



Thèse présentée pour obtenir le grade de  
Docteur de l'Université de Strasbourg

Discipline : Géographie

par **Damien ERTLEN**

## **Archivage pédologique et dynamiques environnementales**

Mise au point d'une méthode de reconnaissance des paléovégétations,  
fondée sur l'analyse spectroscopique dans le proche infrarouge (SPIR) des  
matières organiques de sols et paléosols.

Soutenue publiquement le 18 novembre 2009

### Membres du Jury

- Directeur de thèse :** **M. Dominique SCHWARTZ, Professeur**  
Université de Strasbourg
- Rapporteur externe :** **M. Jean-Paul BRAVARD, Professeur**  
Université de Lyon II
- Rapporteur externe :** **M. Etienne DAMBRINE, Directeur de recherche**  
INRA, Centre de Nancy
- Rapporteur interne :** **M. Joël HUMBERT, Professeur**  
Université de Strasbourg
- Examineur :** **M. Hervé RICHARD, Directeur de recherche**  
CNRS, Université de Franche-Comté, Besançon
- Examineur :** **M. Philippe SCHAEFFER, Directeur de recherche**  
CNRS, Université de Strasbourg
- Invité :** **M. Didier BRUNET, Ingénieur de recherche**  
IRD, Montpellier



Faculté  
de Géographie  
et d'Aménagement  
Strasbourg



Image  
Ville  
Environnement

ERL 7230

# REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier les membres du Jury, Jean-Paul Bravard, Etienne Dambrine, Joël Humbert, Hervé Richard, Philippe Schaeffer et Didier Brunet pour le temps qu'ils ont bien voulu consacrer à l'examen de ce manuscrit.

Ce travail de thèse a vu le jour grâce à Dominique Schwartz. Je lui suis très reconnaissant de m'avoir confié ce sujet passionnant et audacieux que beaucoup jugeaient trop risqué. Les avancées les plus significatives de ce projet sont le fruit de discussions vigoureuses et d'une certaine complicité qui, je l'espère, ne s'arrêteront pas après ce travail de thèse. Enfin, je n'oublierai pas sa précieuse expérience de terrain qu'il a partagé en tant qu'enseignant puis en tant que directeur de thèse.

Je tiens à remercier les membres des différents organismes et laboratoires de recherches qui ont soutenu et participé à ce projet. Leur bonne volonté a largement compensé le manque de moyens matériels.

Didier Brunet et l'ensemble du personnel du laboratoire Eco & Sols (UMR 210 INRA-IRD-SupAgro) m'ont régulièrement accueilli sur leur site depuis 2005 et ont mis à ma disposition un spectromètre proche infrarouge. Didier m'a permis d'appréhender de la meilleure des façons un outil qui m'était totalement inconnu au départ et m'a toujours aidé dans mes démarches de publications.

Les membres du laboratoire Image Ville Environnement (ERL 7230) et plus généralement l'ensemble du personnel de l'UFR de Géographie m'ont accueilli durant quatre années sans *a priori* sur ma thématique de recherche pourtant éloignée de leurs préoccupations. Leur soutien a été particulièrement apprécié au moment de conclure.

Martine Trautmann de l'UMS 830 (EOST) a effectué l'ensemble des analyses pédologiques. Elle m'a conseillé, accompagné sur le terrain et soutenu tout au long de ma thèse. C'est un vrai bonheur de travailler avec elle.

Pierre Adam, Philippe Schaeffer et Jean-Michel Trendel du Laboratoire de Biogéochimie moléculaire (UMR 7177 CNRS-UdS, Institut de chimie) ont su se rendre très accessibles et m'ont apporté leur expertise et leurs moyens dans un domaine pointu qui devrait nous permettre à l'avenir de renforcer notre approche de la matière organique des sols.

Nathalie Schneider, Anne Gebhardt, Eric Böes et l'ensemble des agents INRAP de Strasbourg m'ont donné la chance de m'initier à l'archéologie et à la géoarchéologie préventive.

Le programme SPIMOS-ECC2CO de l'INSU a soutenu financièrement les deux dernières années de ce projet, ce qui nous a notamment permis d'accéder à des mesures  $^{14}\text{C}$  de la matière organique sans lesquelles aucune modélisation n'aurait été possible.

Je tiens également à remercier tous les enseignants, chercheurs, collègues ou amis qui m'ont apporté leur soutien par un conseil, un coup de main sur le terrain ou des relectures : Michel Hoff, Richard Webster, Bruno Ambroise, Ludek Sefrna, Bernard Barthès, Joseph Youta Happi, Richard Bœuf, Lauric Cécillon, Béatrice Bader, Stéphanie Goepf, Carine Heitz, Romain Armand, Aurélie Varelle, Arnaud Piombini, Claudia Marschal.

Enfin, je remercie mes parents et Michelle pour leur soutien et leurs encouragements précieux.

## RESUME

Notre objectif est de développer un nouvel outil d'étude des dynamiques spatiales et temporelles des paléovégétations. Le point de départ de cette démarche est le constat que l'analyse des archives naturelles, sédimentologiques ou pédologiques, comporte des limites ne permettant pas toujours d'aborder à l'échelle locale les dynamiques séculaires ou millénaires des unités paysagères. Notre travail consiste à mettre au point une méthode d'étude des archives pédologiques fondée sur les principes de la spectroscopie proche infrarouge (SPIR). La SPIR mesure l'absorbance d'un matériau sur la bande spectrale 1100-2500 nm. Le spectre obtenu discrimine de nombreux constituants de ce matériau. Il donne entre autres une « empreinte digitale » des matières organiques. De ce fait, il est utilisé depuis longtemps dans de nombreux secteurs industriels. En pédologie, il a surtout été utilisé pour quantifier les constituants du sol. Or, la nature des matières organiques des sols est liée aux types de végétaux et végétations présents et passés. Nous testons donc une approche qualitative, qui consiste à associer le spectre d'un échantillon de sol à un type de végétation.

La démarche de mise au point s'articule en trois étapes. La première consiste à mesurer le spectre de matières organiques dont l'origine est connue. Nous analysons des échantillons de surface de sols dont l'histoire de la végétation est connue sur une période de 150 ans au moins. Une vaste gamme de formations végétales et de types de sols sont représentés dans le référentiel spectral. La discrimination entre les sols sous prairies et sous forêts est très nette. Des distinctions plus fines entre différentes formations forestières sont également observées. Dans la seconde étape, nous vérifions le potentiel de la méthode sur des matières organiques anciennes conservées dans les horizons profonds. Sur les profils étudiés, la connaissance des paléovégétations à l'échelle du millénaire est fournie par des méthodes paléoécologiques classiques. Nous distinguons les schémas d'évolution avec une grande stabilité de la végétation, des schémas présentant un ou plusieurs changements de végétation. La confrontation des spectres d'horizons profonds avec le référentiel de surface permet de retracer des scénarios qui sont calés chronologiquement grâce à l'apport de la modélisation du turnover des matières organiques. Dans la troisième étape, nous examinons des paléosols. Leur signature spectrale nous indique la nature du couvert végétal avant l'enfouissement du paléosol. Pour le moment, ces derniers résultats sont à nuancer compte tenu du peu de données paléoécologiques complémentaires.

Les résultats révèlent un potentiel important de la SPIR dans l'étude des paléovégétations aux échelles locales. Des schémas d'évolutions proposés pour plusieurs des sites étudiés confortent des résultats existants ou apportent de nouveaux éléments pour l'étude des paléovégétations en relation avec l'occupation humaine en Alsace au cours de l'Holocène. Cependant, les investigations méthodologiques devront se poursuivre vers un élargissement du référentiel de surface, du point de vue écosystémique et du point de vue géographique. Les référentiels d'horizons profonds et de paléosols devront également être consolidés par d'autres études paléoécologiques. Ce travail ouvre également des perspectives sur d'autres applications comme le traçage des matières terrigènes dans les cours d'eau.

**Mots-clefs** : mise au point méthodologique, paléoenvironnement, dynamique environnementale, archive pédologique, géoarchéologie, spectroscopie dans le proche infrarouge (SPIR), matière organique du sol (MOS), paléosol.

## SUMMARY

Our goal is to develop a new tool to study spatial and temporal dynamics of palaeo-vegetation. The limits of existing methods to reconstruct past environment of Holocene and Pleistocene at local scale are the starting point of our approach. Our work is to develop a method to study soil memory based on the principles of near infrared spectroscopy (NIRS). NIRS measures the absorbance of a material on the spectral range 1100-2500 nm. The spectrum collected discriminates many components of this material. It provides a "fingerprint" of organic matter. That is why, it has been used for a long time in many industrial sectors. In soil science, it has been mostly used to quantify the soil constituents. In our work, we focus on the nature of soil organic matter that is related to the types of present and past vegetation. Therefore, we test a qualitative approach of combining the spectrum of a soil sample to a type of vegetation.

Our approach consists of three stages. The first is to measure the spectrum of organic matter whose origin is known. Thus, we analyze samples of topsoils from sites where the vegetation is known for at least 150 years. A wide range of ecosystems and soil types are represented in a spectral library. The separation between the soils under grassland and under forests is very clear. Finer distinctions between different forest types are also observed. In the second stage, we check the potential of the method on degraded organic matter in complete profiles. The knowledge of palaeovegetation across the millennium is provided by conventional palaeoecological methods. We distinguish the patterns of evolution with high stability of vegetation from the patterns with one or several changes of vegetation. Comparing the spectra of deep horizons with the reference surface horizons enables to reconstruct scenarios that are chronologically calibrated through the contribution of an organic matter turnover model. In the third stage, we examine buried soils. Their spectral signature indicates the nature of the vegetation cover before the burial of the palaeosoil. However, these last results should be considered carefully due to few complementary palaeoecological data.

The results reveal a great potential of the NIRS in studies of paleovegetation at local scales. Scenarios of changes proposed for several studied sites confirm the existing results or bring new elements to the study of palaeovegetation in relation to human impact in Alsace during the Holocene. However, in terms of ecosystem and geographical perspective, methodological investigations should continue towards broadening of the reference surface. References of deep horizons and palaeosols should also be consolidated by further palaeoecological studies. This work also opens up opportunities for other applications such as tracing of terrigenous materials in the water flow.

**Keywords:** methodological development, palaeoenvironments, environmental dynamic, soil memory, geoarchaeology, near infrared spectroscopy (NIRS), soil organic matter (SOM), palaeosoil

# TABLE DES MATIERES

<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>5</b>
<b>RESUME</b> .....	<b>7</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>8</b>
<b>TABLE DES MATIERES</b> .....	<b>9</b>
<b>TABLE DES ILLUSTRATIONS</b> .....	<b>15</b>
Liste des figures et photos.....	15
Liste des tableaux.....	19
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>21</b>
Contexte scientifique .....	21
Contexte méthodologique.....	22
Démarche de mise au point méthodologique.....	23
Architecture du manuscrit.....	23
<b>PARTIE I : ETAT DE L'ART</b> .....	<b>25</b>
<b>CHAPITRE 1 : LES MATIERES ORGANIQUES DU SOL</b> .....	<b>27</b>
1.1 De la matière organique fraîche à l'humus.....	27
1.1.1. Origine des MOS .....	27
1.1.1.1. La litière .....	28
1.1.1.2. La rhizosphère .....	28
1.1.1.2. Origine spatiale des MOS .....	29
1.1.2. Diversité des approches et diversité des MOS.....	29
1.1.3. La répartition des MOS sur le profil.....	31
1.2. Dégradation, transport : quels processus ?.....	33
1.2.1. Les processus de transformation et de stabilisation des MOS .....	33
1.2.1.1. Le rôle de décomposition de la pédofaune.....	33
1.2.1.2. Rôle du pédoclimat .....	35
1.2.1.3. Rôle du pH.....	35
1.2.1.4. Mécanismes de stabilisation .....	35
1.2.2 Mécanismes de transport des MO .....	37
1.2.2.1. Bioturbation.....	37
1.2.2.2. Les acteurs de la bioturbation .....	38
1.2.2.3. Bioturbation par la végétation.....	39
1.2.2.4. Lessivage.....	41
1.2.2.5. Lixiviation.....	41
1.2.3 Actions anthropiques .....	43
1.3. Aspects temporels : l'âge des MOS .....	45
1.3.1 Notions de TMR.....	45
1.3.2. Mesure du TMR .....	46
1.3.3. Modélisation du C dans les sols à l'aide du TMR .....	50
Conclusion .....	51

<b>CHAPITRE 2 : ARCHIVES PEDOLOGIQUES ET HISTOIRE DE LA VEGETATION : L'APPORT DES CONSTITUANTS D'ORIGINE VEGETALE</b>	<b>53</b>
2.1. Questions d'échelles	53
2.1.1. Echelles spatiales	53
2.1.2. Aspects temporels	54
2.2. Les constituants d'origine végétale (inventaire non exhaustif)	55
2.2.1. Les charbons de bois	55
2.2.2. Les Phytolithes	57
2.2.3. Biomarqueurs moléculaires	58
2.2.3.1. Les lignines	58
2.2.3.2. Les lipides	60
2.2.3.3. Quelques autres marqueurs moléculaires	62
2.2.4. Les marqueurs isotopiques	62
2.2.5. Les pollens dans les sols	64
Conclusion partielle	65

<b>CHAPITRE 3 : LA SPECTROSCOPIE DANS LE PROCHE INFRAROUGE ET SES APPLICATIONS EN SCIENCE DU SOL : UN ETAT DE L'ART</b>	<b>67</b>
3.1. Principes de la SPIR	67
3.2. Bref historique	70
3.3. Diversité des applications	70
3.4. Les applications en science du sol	71
3.4.1. Principales approches	71
3.4.2. Approche quantitative en science du sol	73
3.4.3. Approche qualitative en science du sol	75
3.5. Comparaison avec la spectroscopie dans le moyen infrarouge	77
Conclusion partielle	78

## **PARTIE II : VERS UNE NOUVELLE METHODE D'INVESTIGATION PALEOENVIRONNEMENTALE** .....79

<b>CHAPITRE IV : CONCEPTS ET ETAPES DE LA MISE AU POINT METHODOLOGIQUE</b>	<b>81</b>
4.1. Etape 1 : Les signatures spectrales d'horizons de surface	82
4.1.1. Comment identifier l'origine végétale de la matière organique analysée ?	82
4.1.2. Stratégie d'échantillonnage	84
4.1.2.1. Une démarche évolutive	85
4.1.2.2. Choix des placettes	86
4.1.2.3. Echantillonnage à l'échelle de la placette	86
4.1.3. Limites de l'échantillonnage	87
4.1.4. Traitement des données	88
4.2. Etape 2 : Les signatures spectrales d'horizons profonds	90
4.2.1. Origine des matières organiques d'horizons profonds	90
4.2.2. Stratégie d'échantillonnage	92
4.2.2.1. Choix des sites	92
4.2.2.1. Echantillonnage à l'échelle du profil	93
4.2.3. Exploration des données	94
4.3. Etape 3 : Les signatures de paléosols (Fig. 4.6 h et i)	96
4.3.1. La matière organique des paléosols	96
4.3.2. L'âge des paléosols	97
4.3.3. Stratégie d'échantillonnage	98
4.3.4. Traitement des données	98
Conclusion	99

## **PARTIE III : LE SUPPORT MATERIEL : SITES D'ETUDE ET OUTILS D'ANALYSE ..... 101**

<b>CHAPITRE V : L'AIRE D'ETUDE .....</b>	<b>103</b>
5.1. Contexte géographique .....	103
5.2. La répartition de la végétation.....	106
5.2.1. Représentation théorique et représentation réelle.....	106
5.2.2. Principe de cartographie .....	107
5.2.3. La plaine .....	110
5.2.4. Le piedmont.....	111
5.2.5. Le massif vosgien .....	112
5.2.6. Aspects historiques.....	113
5.3 Sols et Paléosols .....	114
5.3.1 Les données cartographiques.....	114
5.3.2 Les principaux sols alsaciens.....	115
5.3.3. Les paléosols observés en Alsace .....	118
5.4 Les sites d'étude.....	119
5.4.1. Les sites de surface (étape 1).....	119
5.4.2. Les profils de sols (étape 2).....	123
5.4.3. Les stratigraphies comprenant des paléosols (étape 3) .....	129
Conclusion .....	132

## **CHAPITRE VI : LES DONNEES COMPARATIVES DE REFERENCE : ARCHIVES GEOHISTORIQUES, PALEOECOLOGIE, BOTANIQUE:..... 133**

6.1. Les données sur la végétation à l'échelle des trois derniers siècles.....	133
6.1.1 Les archives cartographiques .....	134
6.1.1.1. Les plans de finage du XVIIIe siècle .....	134
6.1.1.2. Les cartes de la période allemande (1870-1918) .....	137
6.1.1.3. Les cartes du service géographique des armées puis de l'IGN .....	138
6.1.2 Les registres et plans d'aménagement de l'administration des Eaux et Forêts.....	139
6.1.3 Les archives photographiques .....	140
6.1.4. Les méthodes naturalistes .....	143
6.1.5. Autres données.....	144
6.2. Qualité des données sur les trois derniers siècles .....	145
6.2.1. Proposition d'un indice .....	145
6.2.2 Application de l'indice aux sites du référentiel de surface .....	146
Conclusion partielle .....	147
6.3. Données à moyen et long terme : les archives pédologiques utilisées.....	149
6.3.1 Les données disponibles sur les profils.....	149
6.3.2 Les scénarios existants.....	149
Conclusion .....	155

## **CHAPITRE VII : ACQUISITION ET TRAITEMENT DES SPECTRES PIR ..... 159**

7.1. Pré-traitement physique des échantillons .....	159
7.2. Acquisition des spectres PIR .....	159
7.3. Pré-traitements mathématiques des spectres .....	161
7.3.1. Choix de la résolution .....	161
7.3.2. Standardisation.....	161
7.3.3. Dérivées .....	163
7.4. Traitements statistiques des spectres.....	166
7.4.1. Choix des variables <i>a priori</i> .....	166
7.4.2. Choix et présentation de l'outil statistique .....	166
7.5. Analyses pédologiques et mesures <sup>14</sup> C .....	168

## **PARTIE IV : RESULTATS ET DISCUSSION ..... 171**

<b>CHAPITRE VIII : LA LIBRAIRIE SPECTRALE D'HORIZONS DE SURFACE (étape 1) .....</b>	<b>173</b>
8.1. Caractérisation chimique et physique des horizons de surface .....	173
8.1.1. La quantité de matière organique dans les sols .....	173
8.1.2. Le $pH_{\text{eau}}$ .....	174
8.1.3. Relation des caractéristiques chimiques avec les groupes écosystémiques .....	174
8.1.4. Distribution granulométrique .....	174
8.2. Discrimination sur la population totale .....	177
8.2.1. Discrimination entre sols sous prairies et sols sous forêts.....	177
8.2.1.1. Résultats.....	177
8.2.1.2. Apport du prétraitement mathématique .....	178
8.2.1.3. Validation des résultats de la fonction discriminante .....	181
8.2.2. Discrimination entre les grandes familles de formation végétale .....	181
8.2.2.1. Résultats.....	181
8.2.2.2. Interprétation des quatre fonctions canoniques .....	182
8.2.2.3. Erreurs de classement des grandes familles de formation végétale .....	184
8.2.3. Discrimination entre les 11 classes d'écosystèmes.....	185
8.2.3.1. Résultats.....	185
8.2.3.2. Interprétation des 10 fonctions canoniques .....	188
8.2.3.3. Effet de site.....	188
8.2.3.4. Problème de définition des classes .....	190
8.3. Discrimination sur des sous populations.....	191
8.3.1. Discriminations des milieux prairiaux .....	191
8.3.2. Discriminations des milieux forestiers .....	192
8.3.2.1. Discriminations au sein de la sous-population « forêts » .....	192
8.3.2.2. Discrimination au sein des sous-populations « forêts de feuillus » et « forêts mixtes » .....	193
8.3.2.3. Intérêt de l'approche par sous-population .....	197
8.4. Longueurs d'ondes discriminantes.....	198
8.4.1. Discrimination entre sols sous prairies et sols sous forêts.....	198
8.4.2. Discrimination à l'intérieure des sous-populations forêts de feuillus et forêts mixtes .....	198
8.4.3. Interprétation des longueurs d'onde discriminante .....	199
8.5. Comparaison avec les biomarqueurs.....	201
Conclusion .....	202
<b>CHAPITRE IX : LES SPECTRES DE PROFILS COMPLETS DE SOLS (étape 2).....</b>	<b>205</b>
9.1. Confrontation directe avec le référentiel de surface (approche 1) .....	205
9.1.1. Opposition forêt-prairie : approche globale .....	205
9.1.1.1. Interprétation des scores de la fonction discriminante élémentaire.....	206
9.1.1.2. Les scores en fonction de la profondeur.....	207
9.1.1.3. Comparaison des profils en fonction de leur stabilité écosystémique .....	209
9.1.2. Opposition forêt prairie - approche par profil .....	210
9.1.2.1. Comparaison des répétitions.....	210
9.1.2.2. Profils stables.....	212
9.1.2.3. Profils avec changement de végétation reconnu .....	212
9.1.3. Reconnaissance d'écosystème spécifique-approche par profil .....	214
9.1.3.1. Evolution des forêts anciennes (niveau 2) .....	214
9.1.3.2. Evolution des forêts anciennes (niveau 3).....	216
9.1.3.3. Evolution des sites avec changement de végétation .....	216
9.1.3.4. Evolution des prairies anciennes.....	219
9.1.4. Limite de l'approche par confrontation directe au référentiel de surface.....	222
9.2. Utilisation des données paléoécologiques en amont de la modélisation (approche 2) ..	222
9.2.1. Discrimination entre horizons sous forêts et horizons sous prairies .....	223

9.2.2. Augmentation de la qualité de la discrimination en profondeur : .....	224
quelques hypothèses.....	224
9.2.2.1. Effet du substrat.....	224
9.2.2.2. Diversité écosystémique et nombre d'échantillons .....	225
9.2.2.3. MO stables et MO labiles .....	225
9.2.3. Approche par profil.....	226
9.2.4. Application de la nouvelle fonction à tous les profils.....	226
9.3. Aspects temporels : couplage avec les mesures de TMR.....	228
9.3.1. Modélisation de la matière organique ancienne sur le profil .....	228
9.3.2. Traduction du signal PIR en pourcentage de matière organique d'origine prairial ou forestière .....	230
9.3.3. Confrontation des deux approches .....	230
9.3.4. Apports et limites de la modélisation.....	234
Conclusion .....	235
<b>CHAPITRE X : LES SPECTRES DE PALEOSOLS (étape 3) .....</b>	<b>237</b>
10.1. Approche globale.....	237
10.1.1. Résultats.....	237
10.1.2. Problème de classement.....	238
10.2. Approche par paléosol.....	239
10.2.1. Les sols médiévaux .....	240
10.2.2. Les paléosols holocènes du secteur de Colmar .....	242
10.2.3. Les paléosols holocènes du Kochersberg.....	245
10.2.4. Les paléosols isohumiques .....	247
Conclusion .....	249
<b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>251</b>
1. Synthèse des acquis .....	251
2. Développements méthodologiques appliqués aux archives pédologiques .....	252
2.1. Etape 1 .....	252
2.2. Etape 2 .....	253
2.3. Etape 3 .....	254
3. Autres développements méthodologiques .....	254
4. Applications environnementales et paléoenvironnementales .....	255
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>257</b>
<b>LISTE DES ANNEXES.....</b>	<b>281</b>



# TABLES DES ILLUSTRATIONS

## Liste des figures et photos

Fig. 1.1.a : La répartition des matières organiques dans différents types de sols (repris de Boulaïne, 1976, cours de pédologie générale).....	32
Fig. 1.1.b : Type de variations des teneurs en matière organique dans les sols de la figure 1.1a (d'après Schwartz, cours inédit).....	32
Fig. 1.2. : Relation entre l'âge apparent maximum et le taux d'argile de plusieurs profils d'Alfisol. (Scharpenseel et Becker-Heidmann, 1992) .....	37
Fig. 1.3. : Exemple de bioturbation par un rongeur, sol peu évolué se développant dans une formation pléistocène, Entzheim, 67 (photo : D. Schwartz) .....	39
Fig. 1.4. : Bioturbation à la surface d'un sol suite au passage d'un incendie.....	39
Fig. 1.5.a : Chablis naturel d'un arbre sénéscent en cours de décomposition, Salajka, République tchèque.....	40
Fig. 1.5.b : Microtopographie caractéristique d'un chablis après le dépérissement complet de l'arbre, Salajka, République Tchèque .....	40
Fig. 1.6. : Revêtement de MOS sur les parois d'agrégats, dans un horizon BTca (140 cm) d'un sol brun lessivé (luvisol), Gottesheim, 67 (photo : D. Schwartz).....	42
Fig. 1.7. : Le podzol : un type de sol emblématique des processus de lixivation de matières organiques solubilisées et complexées avec du fer ou de l'aluminium. ....	42
Fig. 1.8. : Surface d'érosion marquée par des sillons de labour à l'araire .....	44
Fig. 1.9. : Horizon de labour .....	44
Fig. 1.10. : Temps Moyen de Résidence en fonction de la profondeur pour une large gamme de sols (références identiques à la fig. 1.12).....	47
Fig. 1.11. : Temps moyen de résidence des MOS en fonction de la profondeur pour cinq grands types de sols.....	48
Fig 1.12. : Mesure <sup>14</sup> C à haute résolution sur un profil de sol brun lessivé, Wohledorf, Allemagne,(Becker-Heidmann et Scharpenseel, 1986).....	49
Fig 1.13. : Mesure <sup>14</sup> C à haute résolution sur un profil de Aeris Tropaquept, Pangil, Philippines.(Becker-Heidmann et Scharpenseel, 1992). ....	49
Fig. 1.14. : Profils du pool stable et du pool jeune dans un sol brun lessivé (Balesdent et Guillet, 1982).....	49
Fig. 2.1. : Schéma synthétique de la méthode pédoanthracologique. ....	56
Fig. 2.2. : Hypothèse de répartition sur le profil des charbons de bois issus d'un seul incendie (Carcaillet et Talon, 1996).....	57
Fig. 2.3. : Distribution des monomères phénoliques de la lignine. ....	59
Fig. 2.4. : Chromatogramme partiel de l'extrait lipidique total sous trois types de végétation (a,b c) (van Bergen <i>et al.</i> , 1997). ....	61
Fig. 2.5. : Variations du rapport $\delta^{15}\text{N}$ en fonction des différents types d'occupation du sol ayant précédé l'enforestement (Koerner <i>et al.</i> , 1997). ....	63
Fig. 3.1. : Les différentes zones du spectre électromagnétique. ....	68
Fig. 3.2. : Exemple de spectre proche infrarouge mesuré en laboratoire. ....	69
Fig. 3.3. : Analyse en composantes principales calculée à partir de la première dérivée du spectre proche infrarouge (1000-2500 nm) (Cécillon <i>et al.</i> , 2009b).....	75
Fig. 4.1. : Mode de prélèvement des échantillons de surface, sols podzolique sous pineraie, Rothbach, 67 .....	87
Fig. 4.2. Niveaux hiérarchiques de regroupement des sites .....	89
Fig. 4.3. : Mull forestier dans la forêt de l'Illwald, Sélestat, 67.....	89
Fig. 4.4. : Horizon A mince et irrégulier, alocrisol sous chênaie-sapinière, sur roche mère granitique, Wasserbourg, 68.....	89

Fig. 4.5. : Limite entre la litière et l'horizon A diffuse et ondulée, alocrisol sous hêtraie pure, sur roche mère volcano-sédimentaire, Bitschwiller-les-Thann, 68. ....	89
Fig. 4.6. : Récapitulatif des étapes de la mise au point méthodologique.....	91
Fig. 4.7. : Variation de quatre caractères majeurs permettant la distinction de 5 horizons (Baize et Jabiol, 1995).....	93
Fig. 4.8. : Mesure <sup>14</sup> C à haute résolution sur un profil de sol brun lessivé, Wohledorf, Allemagne (Becker-Heidmann et Scharpenseel, 1986). ....	94
Fig. 4.9. : Deux approches différentes pour explorer les données spectroscopiques des profils de sols.....	95
Fig. 5.1.a : Les grandes unités physiographiques des Vosges, de l'Alsace et de la Forêt Noire d'après Gall (2005). ....	105
Fig 5.1.b : Coupes transversales à travers le fossé rhénan et ses bordures à la hauteur de Colmar et Haguenau (Gall, 2005, modifié d'après Kircheimer, 1972).....	106
Fig. 5.2. : Carte de l'occupation du sol, simplifiée à l'échelle de Alsace.....	108
Fig. 5.3. : Cartes de l'occupation du sol dans la vallée de la Fecht et dans le massif du Rossberg, 68 (données et légende d'après Union Européenne - SOeS CORINE LandCover 2006). ....	109
Fig. 5.4. : Etagement théorique de la végétation sur les versants vosgiens (Rameau et al., 1993). ....	112
Fig. 5.5. : Les grands types de peuplements forestiers du massif vosgien (Sgard et al., 1976). ....	113
Fig. 5.6. : Extrait de la carte pédologique de la France au 1 000 000e (Dupuis, 1966). ....	116
Fig. 5.7. : Extrait de la carte des sols dominants de France au 1 000 000e (Le Bas, 2007). ....	117
Fig. 5.8. : Carte de localisation des sites d'étude.....	120
Fig. 5.9. : Carte de localisation des sites d'étude, secteurs de la vallée de la Fecht et du massif du Rossberg.....	121
Fig. 5.10. : Répartition théorique des sites en fonction de l'altitude de l'exposition et de la pente. ....	122
Fig. 5.11. : Répartition des altitudes des 56 sites de surface. ....	123
Fig. 5.12. : Niveau hydromorphe mis au jour par le diagnostic de la LGV Est, Duntzenheim, 67. ....	130
Fig. 5.13. Sol hydromorphe scellé sous des limons de débordement de l'Ill en périphérie du cône de la Fecht, Horbourg-Wihr, 68.....	130
Fig. 5.14. : Calcosol (RP) scellé sous un murger médiéval, Osenbach, 68.....	130
Fig. 5.15. : Sol isohumique scellé dans un épais dépôt de loess, Zemechy, République Tchèque. ....	130
Fig. 6.1. : Exemple de plan de finage ordonné par l'intendant d'Alsace en 1762 : commune de Didenheim dessiné par Petin. ....	136
Fig. 6.2. : Extrait de la feuille 3584 Bad Niederbronn levée en 1883 et publiée en 1885 par l'armée allemande. ....	137
Fig. 6.3. : Cartes postales anciennes des Vosges.....	141
Fig. 6.4. : Cartes postales des chaumes vosgiennes.....	142
Fig. 6.5. : Cartes postales du lac des Perches.....	143
Fig. 6.6. : Représentation de la qualité des données historiques et naturalistes en fonction des critères de localisation et de description de la végétation. ....	146
Fig 6.7. : Indice de qualité des données historiques et naturalistes appliqués aux 56 sites du référentiel de surface. ....	148
Fig. 6.8. : Rapport entre l'unité Cinamique (poacées) et l'unité Vanillique (ligneux) des monomères de la lignine d'après les données de Casner (2001) et Martin (2000).....	153
Fig. 6.9. : Rapport entre l'unité Syringique (angiospermes) et l'unité Vanilliques (ligneux) des monomères de la lignine d'après les données de (Casner, 2001 ; Martin, 2000) . ....	153
Fig. 7.1. : Spectres bruts (A), standardisés (B) puis dérivés (seconde) (C) pour quatre échantillons.....	162

Fig. 7.2. : Relation entre l'absorbance moyenne et la taille des particules : (a) extraits de spectres bruts de fibres de taille variée (18,3-38,6), (b) mêmes extraits après soustraction de la moyenne (McClure, 2001).....	163
Fig. 7.3. : Spectres moyens bruts (A) et dérivés (A'', dérivée seconde) pour douze sites sous forêts et sous prairies (Ertlen et al., en révision). .....	164
Fig. 7.4. : Schéma de synthèse des choix effectués concernant le pré-traitement spectral.....	165
Fig. 8.1. : Répartition des sols sous forêts et des sols sous prairies en fonction de leur taux de C-organique mesuré par la méthode Walkley et Black (1934) .....	175
Fig. 8.2. : Répartition des sols sous forêts et des sols sous prairies en fonction de leur pH <sub>eau</sub> . .....	175
Fig. 8.3. : Relation entre le pH et le taux de C-org. pour les sols sous prairies et les sols sous forêts. ....	175
Fig 8.4. : Distribution granulométrique de la fraction minérale pour les 51 placettes de surface. ....	176
Fig.. 8.5. : Fonction canonique de l'analyse discriminante entre les sols sous forêts et les sols sous prairies avant (A) et après (B) l'application des prétraitements mathématiques. ....	178
Fig. 8.6. : Signatures granulométriques de sols, spécifiques et héritées du substrat (a) ou peu différenciées (b).....	180
Fig. 8.7. : Coefficient de la fonction canonique avant prétraitement (AD1).....	180
Fig. 8.8 : Fonctions canoniques de l'analyse discriminante (AD3) entre les cinq grandes classes de formations végétales (après pré-traitement mathématique).. .....	183
Fig 8.9. : Scores des fonctions canoniques 4 et 5 de l'analyse discriminante à 11 classes pour les sols sous hêtraies, sous chênaies et sous sapinières croisés avec les grandes familles de substrats. ....	189
Fig. 8.10. : Fonctions canoniques de l'analyse discriminante (AD5) entre les trois grandes classes de forêts.....	192
Fig. 8.11. : Fonction canonique de l'analyse discriminante entre les sols sous hêtraies et les sols sous chênaies.....	195
Fig. 8.12. : Fonction canonique de l'analyse discriminante entre les sols sous hêtraies-sapinière et les sols sous chênaies-sapinières.....	196
Fig. 8.13. : Coefficients des fonctions canoniques (valeurs absolues) pour chacune des bandes spectrales pour les discriminations forêt / prairie (a), hêtraie / chênaie (b) et hêtraie-sapinière / chênaie-sapinière (c).....	200
Fig. 9.1. : Scores de la fonction canonique discriminante élémentaire pour le référentiel de surface (A) et les profils de sol (B). La fonction est générée à partir du référentiel de surface et appliquée aux profils de sols.....	206
Fig. 9.2. : Scores de la fonction canonique discriminante élémentaire pour les profils de sol en fonction de la profondeur. ....	208
Fig. 9.3. : Scores de la fonction canonique discriminante élémentaire pour les profils stables et les profils avec changement de végétation. ....	209
Fig. 9.4. : Comparaison des scores de la fonction discriminante pour les profils de sols comprenant plusieurs répétitions. ....	211
Fig. 9.5. : Scores de la fonction canonique discriminante pour des profils stables.....	213
Fig. 9.6. : Scores de la fonction canonique discriminante pour des profils avec changement de végétation.....	213
Fig. 9.7. : Fonctions canoniques discriminantes générées à partir des sols sous forêts du référentiel de surface (cf. § chap. 8) et appliquées aux échantillons de profils stables. ....	215
Fig. 9.8. : Evolution sur le profil des probabilités d'appartenance aux groupes « sous feuillus », « sous forêts mixtes » et « sous conifères » pour les sites EFP, VST et SJK.....	215
Fig. 9.9. : Evolution sur les profils VST et SJK des probabilités d'appartenance aux différentes formations forestières. ....	218
Fig. 9.10. : Evolution sur le profil des probabilités d'appartenance aux différentes formations végétales. ....	218
Fig. 9.11. : Evolution sur des profils à dominantes prairiales des probabilités d'appartenance aux différentes formations forestières.....	221

Fig. 9.12 : Evolution sur des profils prairiaux des probabilités d'appartenance aux différentes formations forestières. ....	221
Fig. 9.13 : Scores de la fonction discriminante élémentaire pour les horizons de référence ....	223
Fig. 9.14 : Scores de la fonction discriminante élémentaire pour les horizons de référence en fonction de la profondeur. ....	227
Fig. 9.15 : Scores de la fonction discriminante élémentaire appliquée à la totalité des profils..	227
Fig. 9.16 : Mesure du TMR par <sup>14</sup> C pour 7 des profils analysés par SPIR .....	229
Fig 9.17. : Exemple de courbes de décroissance de la matière organique .....	229
Fig. 9.18. : Confrontation des données SPIR de profils anciennement sous forêts avec le modèle de décroissance de la matière organique initiale .....	231
Fig. 9.19. : Confrontation des données SPIR de profils anciennement sous prairie avec le modèle de décroissance de la matière organique initiale .....	233
Fig. 9.20. : Confrontation des données SPIR de profils forestier stables avec le modèle de décroissance de la matière organique initiale .....	234
Fig. 10.1. : Score de la fonction canonique discriminante élémentaire appliquée au référentiel de surface (A) et aux paléosols (B).....	238
Fig. 10.2. : Croquis de la coupe dans un murger à Dinsheim, 67. Le paléosol STK à Osenbach (68) est scellé dans des conditions similaires sur une terrasse de moindre dimension ....	241
Fig. 10.3. : Sommet de la stratigraphie levée sur le chantier de fouille de l'ENA, Strasbourg, 67 (rapport de fouille inédit, en cours).....	241
Fig 10.4. : Stratigraphie du site du château d'eau à Houssen (68) comprenant les paléosols HOP1 et HOP2 décrits et prélevés dans le cadre d'un diagnostic archéologique.....	242
Fig 10.5. : Paléosol hydromorphe (HOR) contenant des artefacts gallo-romains relevés dans le cadre d'un diagnostic archéologique à Horbourg (68). ....	243
Fig. 10.6. : Position stratigraphique du paléosol ZEN (us3) dans le paléovallon relevé sur le chantier archéologique du Zenith, Eckbolsheim, 67 .....	244
Fig. 10.7. : Score du paléosol ZEN pour les fonctions discriminantes entre sols sous forêts générées à partir du référentiel de surface .....	244
Fig. 10.8. : Score de la fonction canonique discriminante élémentaire pour l'ensemble des paléosols (A), pour les paléosols sur loess (C) et pour les autres paléosols (B). ....	246
Fig 10.9. : Paléosol scellé par une occupation gallo-romaine, relevé dans le cadre du diagnostic archéologique de la ligne à grande vitesse (TGV, Est). ....	247
Fig. 10.10. : Schéma simplifié de la stratigraphie quaternaire de Zemechy, CZ.....	248
Fig. 10.11 : Steppe boisée à mélèzes, Mongolie .....	249

## Liste des tableaux

Tab. 4.1 : Fonctions respectives des données de référence dans la démarche de mise au point méthodologique. ....	84
Tab. 4.2 : TMR ( <sup>14</sup> C) de quelques horizons de surface. ....	84
Tab. 5.1 : Tableau récapitulatif des 56 sites de surface. ....	127
Tab. 5.2 : Tableau récapitulatif des profils de sol étudiés. ....	128
Tab. 5.3 : Tableau récapitulatif des paléosols étudiés. ....	131
Tab. 6.1 : Synthèse de l'ensemble des cartes et plans accessibles dans la base de données HistCarto ( <a href="http://histcarto.u-strasbg.fr">http://histcarto.u-strasbg.fr</a> ). ....	135
Tab. 6.2 : Anthracomasses Spécifiques Générales (ASG en mg.kg <sup>-1</sup> ) des profils, classés par ordre décroissant (Goepf, 2007) ....	151
Tab. 6.3 : Datations <sup>14</sup> C et cal BP de charbons de bois, classées par site et par profondeur pour le massif du Hohneck et du Rossberg (Goepf, 2007). ....	152
Tab. 6.4 : Tableau récapitulatif des analyses effectuées sur les profils de sols. ....	156
Tab. 6.5 : Tableau récapitulatif des analyses effectuées sur les paléosols. ....	157
Tab. 8.1. : Caractérisation statistique des deux populations d'échantillons (forêt-prairie) avant et après traitement mathématique ....	177
Tab. 8.2 : Valeurs propres et % de variance expliquée des 4 fonctions canoniques (AD3).....	182
Tab. 8.3 : Pourcentage d'échantillons prédits par classes d'écosystèmes (niveau 2,). ....	182
Tab. 8.4 : Pourcentage par classe des échantillons correctement classés avec une probabilité supérieure à 0,95 et 0,99. ....	182
Tab. 8.5 : Distance de Mahalanobis entre les cinq grandes classes de formations végétales. Les chiffres en gras correspondent aux couples de classes totalement disjoints. ....	184
Tab. 8.6. : Valeurs propres et % de variance expliquée des 10 fonctions canoniques (AD4)...	186
Tab. 8.7. : Pourcentage d'échantillons prédits par classe d'écosystèmes (niveau 3, 11 classes). ....	187
Tab. 8.8. : Pourcentage par classe des échantillons correctement classés avec une probabilité supérieure à 0,95 et à 0,99. ....	187
Tab. 8.9. : Barycentre des groupes pour chacune des fonctions canoniques discriminantes. ...	188
Tab. 8.10. : Pourcentage d'échantillons prédits par classe d'écosystèmes (niveau 2 forestier, 3 classes) pour les analyses discriminantes effectuées sur l'ensemble de la population et sur la sous-population « forêt ».....	193
Tab. 8.11. : Probabilités et distances de Mahalanobis pour les analyses discriminantes effectuées sur l'ensemble de la population et sur la sous-population « forêt ».....	193
Tab. 8.12. : Pourcentage d'échantillons correctement prédits par classes pour les analyses effectuées sur l'ensemble de la population et sur la sous-population «forêt de feuillus». .	195
Tab. 8.13. : Probabilités et distances de Mahalanobis pour les analyses discriminantes effectuées sur l'ensemble de la population et sur la sous-population «forêts de feuillus». .	195
Tab. 8.14. : Pourcentage d'échantillons correctement prédits classe par classe pour les analyses discriminantes effectuées sur l'ensemble de la population et sur la sous-population « forêt mixte ».....	196
Tab. 8.15. : Probabilités et distances de Mahalanobis pour les analyses discriminantes effectuées sur l'ensemble de la population et sur la sous-population « forêt mixte ».....	196
Tab. 8.16. : Relations entre les bandes spectrales et des composés fonctionnels d'après la littérature. ....	201
Tab. 10.1 : Scores moyens des paléosols médiévaux pour la fonction élémentaire générée à partir du référentiel de surface .....	241
Tab. 10.2. : Scores moyens des paléosols holocènes du secteur de Colmar pour la fonction élémentaire générée à partir du référentiel de surface.....	243
Tab. 10.3. : Scores moyens des paléosols sur loess du Kochersberg pour la fonction élémentaire générée à partir du référentiel de surface.....	245
Tab. 10.4 : Scores moyens des paléosols isohumiques pour la fonction élémentaire générée à partir du référentiel de surface.....	248



# INTRODUCTION

L'objectif de ce travail est de vérifier le potentiel de la spectroscopie proche infrarouge (SPIR) à discriminer et à reconnaître des matières organiques du sol en fonction de leur origine végétale. Le but est de livrer à la communauté des paléoenvironnementalistes un nouvel outil, simple, efficace et rapide d'utilisation. Nous n'avons pas dans ce travail comme objectif la reconstruction des paléoenvironnements. Nous travaillons de préférence sur des situations déjà bien connues afin de tester la nouvelle méthode. Les études thématiques qui découleraient de ce travail feront l'objet de travaux ultérieurs.

## **Contexte scientifique**

La compréhension des paysages et de leur histoire en relation avec les dynamiques anthropiques demeure un vaste champ de recherche interdisciplinaire. En France, les lois sur l'archéologie préventive ont entraîné une explosion des travaux de diagnostic archéologique. Ce mouvement qui a donné une dimension plus spatiale à l'étude des vestiges humains a été accompagné par le développement de la géoarchéologie. Cette discipline récente, qui a pour objet l'étude du contexte paléoenvironnemental des implantations humaines, a émergé d'une convergence d'intérêts entre des archéologues, des quaternaristes, des paléoécologues, des géographes et d'autres spécialistes des sciences de la terre... Parmi ces spécialistes se sont glissés quelques pédologues. Dans un premier temps, chaque discipline mère a mis à la disposition de la géoarchéologie ses outils traditionnels. Par exemple, l'étude de lames minces de sols par les pédologues s'est répandue et est de plus en plus appréciée des archéologues et des géoarchéologues. Mais dans le contexte fortement contraint de l'archéologie préventive, de nouveaux besoins méthodologiques sont apparus.

Ce travail de thèse propose de développer un nouvel outil permettant de mieux appréhender les dynamiques spatiales et temporelles de la composante végétale des paléoenvironnements. Née des besoins de la géoarchéologie, cette méthode prétend s'appliquer à un champ beaucoup plus vaste qui couvre également l'étude des paléovégétations en milieu faiblement anthropisé. Par conséquent, cette thèse de géographie physique se situe à

l'interface entre la pédologie, la géochimie organique, la biogéographie, la géoarchéologie et les sciences de l'Homme.

Parmi les nombreux mécanismes et les nombreux constituants qui entrent en jeu dans la formation des sols, certains peuvent servir de marqueurs paléoenvironnementaux (Fedoroff et Courty, 2002 ; Schwartz, 2004). Depuis trois décennies, des travaux se sont attachés à décrypter ces archives en développant de nouveaux outils ou en adaptant des outils propres à d'autres objets d'étude. Ainsi, la pédoanthracologie (Thinon, 1978), la micromorphologie (Fedoroff *et al.*, 1990 ; Gebhardt, 1993), l'analyse des phytolithes (Bartoli et Guillet, 1977 ; Kelly *et al.*, 1991), des monomères de la lignine (Maman, 1997), des isotopes  $^{13}\text{C}$  (Schwartz *et al.*, 1986),  $^{14}\text{C}$  (Scharpenseel et Becker-Heidmann, 1992),  $^{15}\text{N}$  (Koerner *et al.*, 1997), et des biomarqueurs moléculaires (Nierop *et al.*, 2001 ; Spielvogel *et al.*, 2007 ; Trouvé *et al.*, 1996 ; Vancampenhout *et al.*, 2008) ont fait l'objet d'études passionnantes, ayant le plus souvent pour finalité de reconnaître les dynamiques passées de l'occupation du sol.

Depuis près de dix ans, des études entreprises sur le territoire alsacien ont permis de tester plusieurs de ces méthodes. Sur la partie sommitale des Vosges, l'histoire des espaces pâturés a pu être précisée et certaines idées anciennes sur l'origine « primaire » des prairies ont été rectifiées (Casner, 2001 ; Goepf, 2007 ; Schwartz *et al.*, 2005). Sur le piémont vosgien, des études ont contribué à une meilleure compréhension des espaces de pelouses sèches enclavés dans le vignoble (Schwartz *et al.*, 2003). Enfin, dans le fossé rhénan, l'approche pédologique est également utilisée dans le cadre d'un projet pluridisciplinaire visant à restituer les dynamiques passées du Rhin et de l'III. Ces travaux ont permis de confirmer l'efficacité de plusieurs méthodes mais en ont révélé d'autre part les limites. La validité d'une méthode cantonnée à un type de milieu naturel et le temps nécessaire à la mise en œuvre sont les obstacles les plus fréquents. Ce sont ces motifs qui ont déclenché ce travail de thèse, dont l'objectif est de mettre au point une nouvelle méthode d'étude des archives pédologiques, fondée sur les principes de la spectroscopie proche infrarouge (SPIR).

## Contexte méthodologique

La SPIR est une mesure de l'absorbance d'un matériau dans la bande spectrale 1100-2500 nm. Le spectre dans le proche infrarouge peut être considéré comme « l'empreinte digitale » de la matière organique (Palmborg et Nordgren, 1996). Elle est de ce fait utilisée depuis longtemps dans les domaines de l'agroalimentaire, de la pétrochimie, de l'industrie pharmaceutique ... (Burns et Ciurczack, 2001). Cette image globale de la matière organique totale permet en partie de s'affranchir de la complexité biochimique des matières organiques et de la multiplicité des mécanismes de transformation et de minéralisation qu'elles subissent.

En pédologie, cette méthode a pour l'instant surtout été utilisée pour **quantifier** les stocks organiques du sol (Barthès *et al.*, 2008 ; Cécillon *et al.*, 2009 ; Viscarra Rossel *et al.*, 2006b). Or la nature, la qualité et la quantité de matières organiques sont directement liées aux

types de végétaux et donc aux types d'occupation présents et passés du sol (Kögel-Knabner, 2002 ; van Bergen *et al.*, 1997). Nous testons, par des méthodes mathématiques et statistiques une approche **qualitative**, à savoir la possibilité d'associer un spectre SPIR d'un échantillon de sol à un type de végétation source des matières organiques de ce sol.

## **Démarche de mise au point méthodologique**

La démarche de mise au point méthodologique définie *a priori* (Ertlen *et al.*, sous presse) s'articule en trois grandes étapes. La première étape consiste à mesurer le spectre de matières organiques dont l'origine est connue. Pour ce faire, nous analysons des échantillons de sols provenant des horizons de surface. Sur l'ensemble de ces sites, l'histoire végétale est examinée en détail, à l'aide d'une cohorte d'outils principalement empruntés à la géohistoire. Une vaste gamme de formations végétales et de types de sols sont représentés dans ce qui constitue un référentiel spectral. La distinction entre les formations prairiales et les formations forestières est testée de façon prioritaire. Des distinctions plus fines entre différentes formations forestières sont ensuite examinées.

La seconde étape s'intéresse aux horizons profonds de sols, afin de vérifier le potentiel de la méthode sur des matières organiques fortement transformées. Sur les profils étudiés par SPIR, de bonnes connaissances de l'histoire de la végétation à l'échelle du millénaire sont fournies par différentes méthodes paléoécologiques existantes (pédoanthracologie, étude des phytolithes) ou en voie de développement (chromatographie gazeuse/spectrométrie de masse). Nous distinguons les schémas d'évolution linéaires, avec une stabilité de la végétation à l'échelle des deux derniers millénaires, des schémas instables présentant un ou plusieurs changements de végétation. Les scénarios sont ensuite calés chronologiquement grâce à l'apport de la modélisation du turnover des matières organiques des sols

Dans une troisième étape, nous confrontons des horizons superficiels de paléosols à notre référentiel de surface. La plupart des paléosols sont datés de l'Holocène. Nous testons la capacité de la SPIR à reconnaître l'origine végétale de la matière organique des paléosols avant leur enfouissement.

## **Architecture du manuscrit**

La première partie présente les aspects théoriques et les acquis méthodologiques sur lesquels nous avons fondé notre démarche. Le fonctionnement et la répartition des matières organiques du sol dans le profil répondent à des mécanismes complexes que nous présentons dans le chapitre 1. Les méthodes d'étude des archives pédologiques existantes, et plus particulièrement des archives d'origine végétale, nous servent de référence et nous permettent dans certains cas de raisonner par analogie. C'est pourquoi nous leur consacrons le second chapitre. Enfin, la spectroscopie proche infrarouge, qui est l'outil que nous testons dans ce

travail, a connu un essor important depuis une vingtaine d'années dans l'étude des matières organiques et depuis une dizaine d'années en pédologie. Nous présentons les principales avancées et les principales applications. La rareté des approches qualitatives en science du sol explique, en partie, l'effort important de mise au point méthodologique que nous avons dû déployer.

La seconde partie est composée d'un chapitre unique (chapitre 4). Ce choix qui brise l'équilibre de notre plan est délibéré et a pour but de mettre en avant le rôle charnière de ce chapitre. Nous y détaillons et justifions notre démarche de mise au point et tous les choix qui l'accompagnent. Ce découpage permet de distinguer sans ambiguïté la démarche de mise au point méthodologique originale des méthodes et outils existants qui constituent le support matériel de notre démarche.

C'est dans la troisième partie que nous présentons les sites d'étude (chapitre 5) puis les données historiques et paléoécologiques de référence (chapitre 6) et enfin les outils de traitement de l'échantillon de sol et du spectre (chapitre 7).

La quatrième partie est consacrée aux résultats. Elle s'organise suivant notre démarche de mise au point et est découpée en trois chapitres consacrés à chacune des trois étapes (chapitres 8, 9 et 10). Enfin, nous livrons nos conclusions sur le potentiel de la spectroscopie proche infrarouge dans l'étude des paléoenvironnements et nous dressons le tableau des nombreuses perspectives thématiques et méthodologiques.

# **PARTIE I**

## **ETAT DE L'ART**



## LES MATIERES ORGANIQUES DU SOL

La matière organique est un constituant fonctionnel des sols, essentielle par les rôles variés qu'elle joue. Les quantités de matière organique et leur répartition au sein du profil varient en fonction des types de pédogenèses et des types de sols. Deux familles de processus permettent d'expliquer ces variations. D'une part, des processus de transformation contrôlés principalement par des facteurs biologiques et climatiques et d'autre part des processus de transport contrôlés par des variables physico-chimiques et biologiques. A ces processus naturels se surimposent des facteurs anthropiques qui peuvent entraîner des modifications importantes du profil organique du sol. Parmi l'ensemble des variables agissant sur le caractère organique du sol, il faut distinguer les variables externes ou environnementales, qui agissent au niveau du *géosystème* (Bertrand et Bertrand, 1995 ; Bertrand, 1986) ou du *système éco-géographique* (Tricart et Killian, 1979) et les variables internes qui agissent au niveau du *système sol* (Yaalon, 1971), considéré ici comme un compartiment du *géosystème*.

Dans ce chapitre, nous présenterons les matières organiques du sol (MOS) sous l'angle de leur origine et de leur diversité, puis nous examinerons les processus qui contrôlent la répartition des MOS sur les différents profils ce qui nous permettra ensuite d'éclairer la dimension temporelle des MO dans les sols. Ce sont en effet ces aspects qui interfèrent le plus avec les interprétations des données SPIR que nous proposerons.

### 1.1 De la matière organique fraîche à l'humus

#### 1.1.1. Origine des MOS

Les MO proviennent, dans leur très grande majorité, de la décomposition des végétaux ou de la production de substances organiques exsudées par les racines (Bonneau et Souchier, 1979 ; Gobat *et al.*, 2003 ; Simoes Lobo *et al.*, 1974). Ainsi, les entrées dans le système sol sont de deux types : par l'intermédiaire de la litière ou par l'intermédiaire du réseau racinaire (Toutain, 1984). En fait, la végétation et la masse microbienne constituent la source des MOS (Kögel-Knabner 2002).

#### **1.1.1.1. La litière**

La litière est composée de fragments morts de la partie supérieure des végétaux : feuilles, tiges, aiguilles, branches, fleurs, fruits. En milieu forestier, la litière est largement dominée par les feuilles ou les aiguilles, qui représentent près de 60 % de la source, contre 35 % pour les fragments de bois (Cannell, 1982). Les graminées représentent moins de 5 % des apports de litière en forêt (Kögel-Knabner, 2002). En fonction du mode de gestion et surtout en l'absence de gestion et de prélèvements, le bois mort peut également constituer une part non négligeable des apports de litière. Des apports d'excréments d'animaux peuvent également constituer une part des intrants. Mais les animaux, hormis la faune du sol que nous évoquerons plus loin, étant largement dominés par les herbivores, leurs excréments peuvent être considérés comme des matières végétales dégradées. Ce postulat est d'autant plus vrai que les MOS décomposées par la faune du sol, les champignons et les bactéries ne sont pas suffisamment transformées pour perdre totalement les propriétés chimiques propres aux végétaux dont elles sont originaires. Ainsi, seuls les cadavres de la faune et leurs répercussions sur la chaîne alimentaire constituent un apport non végétal, potentiellement allochtone, de MO au sol. Or les cadavres représentent au maximum quelques t/ha/an alors que la végétation fournit en moyenne 200 t/ha/an.

La composition chimique des végétaux varie considérablement selon que la source est constituée par des aiguilles de Gymnospermes, des feuilles d'Angiospermes ou des feuilles de Poacées (graminées). La composition chimique des feuilles varie également entre espèces de feuillus ou de résineux (Kögel-Knabner, 2002). Une partie de ces propriétés spécifiques sont conservées dans les sols.

#### **1.1.1.2. La rhizosphère**

Bien que moins visibles que les retombées de litière, les apports par les racines peuvent constituer une part importante des entrées de matières organiques dans le sol, soit par sécrétion de substances variées soit par décomposition des racines mortes (Kögel-Knabner, 2002). Leurs interactions avec la biomasse microbienne en font un acteur important de la vie du sol. Leur ancrage dans le système sol nécessite de prendre des précautions lorsque l'on considère les entrées de matière organique dans le système. Tandis que les entrées de litières peuvent être conceptualisées en deux dimensions - le plan constitué par la surface du sol - les entrées racinaires doivent s'appréhender dans un volume : la rhizosphère. Alors que la rhizosphère est souvent comprise dans son ensemble comme le volume colonisé par les racines de tout l'écosystème, il conviendra dans le cadre de notre étude d'être attentif à une colonisation différentielle en fonction des espèces. Le profil racinaire d'un tapis de graminées ne sera pas le même que celui de la chênaie qui surplombe ce tapis. Après intégration au système sol, les apports sont soumis à des mécanismes similaires de bioturbation et de transports quelle que soit leur origine : racine ou litière. En revanche, l'intensité de ces mécanismes peut varier en fonction de la profondeur et de l'horizon concerné. Ainsi, la matière organique d'une racine

profonde sera certainement intégrée différemment au sol et aura une dynamique différente par rapport à une racine des horizons superficiels ou une feuille tombée à la surface du sol.

La composition chimique des racines et ses variations interspécifiques sont nettement moins connues que la partie supérieure des végétaux, parce que beaucoup plus compliquée à étudier que les litières.

#### **1.1.1.2. Origine spatiale des MOS**

Les MOS sont le résultat de la décomposition des végétaux observés directement à l'aplomb du sol et ceci à l'échelle métrique ou décimétrique. Concernant les transferts végétation-litière, ce postulat est le plus souvent vérifié par des observations de terrain qui confirment la bonne adéquation entre la végétation et la composition de la litière fraîche. La litière des sites fortement exposés aux vents est cependant susceptible d'être remaniée. D'autre part, les sites parcourus par du bétail ou par la faune sauvage sont potentiellement enrichis par des MO allochtones consommées dans un autre écosystème. Pour les transferts latéraux au sein du profil pédologique, ils ne sont envisageables au-delà de l'échelle métrique que sur des sites à forte pente. De plus, ils concernent principalement les MOS solubles rapidement exportées hors du profil.

L'extraordinaire diversité biochimique des végétaux frais a pour conséquence une très grande diversité des MO observées sur le profil pédologique.

#### **1.1.2. Diversité des approches et diversité des MOS**

Les MOS comprennent des milliers de composants différents. La typologie de ces composants et leur classification dépend de l'approche adoptée et de l'échelle d'étude. La diversité n'est pas la même suivant l'angle sous lequel les MOS sont observées.

La classification la plus simple est celle des écologistes, particulièrement adaptée au milieu forestier. Elle est basée sur des observations à l'échelle macroscopique. Elle distingue des types d'humus (Mull, Mor, Moder, Anmoor ...) à partir de critères morphologiques (Jabiol *et al.*, 1994 ; Jabiol *et al.*, 1995). Le principal critère est le degré de transformation des débris végétaux et leur organisation dans la partie superficielle du sol. Dans cette optique, on distingue la litière fraîche (feuilles, fruits entiers, etc.), la matière organique fragmentée mais reconnaissable à l'œil nu appelée aussi matière organique figurée et la matière organique décomposée reconnaissable uniquement par la teinte noire qu'elle donne au sol. Cette typologie découle de critères fonctionnels tels que l'intensité de l'activité biologique.

L'extraction chimique par différents solvants est une approche ancienne. Elle permet de définir plusieurs catégories de matières organiques (carbone soluble, acides fulviques et humiques, humines) (Andreux, 1979). Par définition, l'humine est la fraction non extractible. Ce

concept ne recouvre donc pas un ensemble fonctionnel de matières organiques mais un comportement vis-à-vis des solvants utilisés. Cette fraction comprend aussi bien des corps microbiens que des complexes organo-métalliques très stables. Cette approche, qui à longterm prévalu dans l'étude des matières organiques, est progressivement abandonnée. Il est souvent reproché aux méthodes d'extraction de dénaturer les extraits au point qu'ils ne sont plus fidèles aux matières organiques et à leur comportement *in situ*. De plus, les fractions isolées sont rarement corrélées avec des critères fonctionnels du sol (Feller, 1994)

La troisième approche consiste à séparer le sol total en différentes fractions granulométrique (Feller, 1994). Le principe consiste à agiter le sol jusqu'à obtention d'agrégats élémentaires stables. Cette opération peut être accompagnée par divers traitements de désagrégation aux ultrasons. Dans les agrégats de la taille des sables se logent les matières organiques figurées peu décomposées. Dans la fraction des limons grossiers se trouvent les MO les plus stables tandis que dans la fraction des argiles et des limons fins, se trouvent indifféremment des MOS jeunes ou âgées. Ainsi, cette gamme de méthodes permet dans une certaine mesure de séparer, d'une part les matières organiques particulaires et d'autre part les matières organiques adsorbées sur des complexes organo-minéraux ou occluses dans des agrégats (Kögel-Knabner, 2000).

Les matières organiques peuvent également être identifiées à l'échelle macromoléculaire par différentes méthodes (électrophorèse, spectrométrie de masse, chromatographie, <sup>13</sup>C NMR, spectroscopie IR...). Ces approches permettent d'isoler des composants très spécifiques, mais compte tenu de l'immense diversité des constituants du sol à l'échelle moléculaire, ces études sont toujours partielles et n'abordent pas les MOS dans leur globalité. Ces méthodes permettent tout de même d'identifier des familles de constituants chimiques. Ce sont des constituants classiques des végétaux bien connus des biologistes qui sont partiellement conservés dans les sols ou des produits de l'activité microbienne et fongique. Kögel-Knabner (2002) propose une revue complète de ces constituants. Pour les molécules issues des parois cellulaires des végétaux, il s'agit de polysaccharides (cellulosiques ou non cellulosiques), de lignines, de polyphénols (dont les tanins), de polyesters (cutine et subérine) et de lipides (Kögel-Knabner, 2002). Il faut noter ensuite la présence de protéines, d'amidon, de chlorophylles et d'autres pigments variés d'origine intracellulaire. Outre leur rôle de décomposeur vis-à-vis des molécules d'origine végétale, les champignons et les bactéries sont également composés de molécules spécifiques dont certains acides aminés. Globalement la composition macromoléculaire des bactéries et des champignons est encore très mal connue. La masse microbienne ne représente qu'un faible pourcentage de la matière organique totale. En revanche, la part de matière organique affectée par l'activité microbienne peut excéder 50 %.

Enfin, la dernière approche consiste à doser les éléments de la matière organique à l'échelle atomique. C, N, H, O sont les principaux constituants de la matière organique. Le carbone constitue entre 55 et 60 % de la masse des matières organiques du sol. Cette approche

analytique simple fournit de nombreuses informations synthétiques sur la fertilité du sol, le type de pédogénèse, la dynamique des MOS etc.

Quelle que soit l'approche utilisée, la majorité des études se concentrent sur les 20 premiers centimètres du sol parce qu'ils sont le support de l'agriculture et qu'ils constituent le principal stock de carbone. Dans cette étude, nous nous intéresserons à la totalité du *solum* y compris aux horizons les plus pauvres en matière organique. Pour ce faire, il faut examiner attentivement la répartition de la matière organique dans le profil.

### **1.1.3. La répartition des MOS sur le profil**

La répartition de la matière organique dans le profil pédologique est un critère important de différenciation pour un grand nombre de types de sol. C'est un témoin important du type de pédogénèse et de la dynamique du sol. Cette observation donne également un premier aperçu du potentiel de stockage des matières organiques et des informations associées. Nous nous contenterons dans ce paragraphe d'évoquer les principaux schémas de répartition du point de vue quantitatif, puis nous reviendrons plus loin sur les processus physico-chimiques et biologiques qui sont à l'origine de cette répartition.

Premièrement, les sols jeunes (minéraux bruts ou peu évolués) sont imprégnés en MO sur une faible épaisseur. Les sols minéraux bruts (Fig. 1.1, profil n° 1) sont recouverts d'une mince pellicule de matière organique tandis que les sols peu évolués peuvent présenter un horizon A riche en matière organique atteignant quelques centimètres (2). Dans le cas du ranker (3) l'horizon humifère d'une vingtaine de centimètres est au contact direct des altérites qui elles aussi peuvent être de faible épaisseur. Il faut noter que les rythmes de la pédogénèse ne sont pas les mêmes que les rythmes du cycle de renouvellement des MOS. Par exemple, dans un sol brun de 10 000 ans coexistent de la matière organique relativement ancienne (plusieurs milliers d'années) qui se renouvelle lentement et de la matière organique jeune (quelques centaines d'années) qui se renouvelle vite. Dans un sol ferrallitique de plusieurs millions d'années, l'essentiel des MOS des horizons de surface est âgé en moyenne de quelques dizaines d'années.

Lorsque la minéralisation, et par conséquent le renouvellement de la matière organique, sont lents et que le sol continue son évolution, il en résulte des profils isohumiques (5). Les raisons de ce faible renouvellement peuvent être un climat froid et sec de steppe dans le cas du chernozem ou des conditions de saturation en eau prolongée dans le cas des sols hydromorphes. Le cas extrême et particulier de saturation permanente génère des tourbes qui sont des profils d'accumulation sans renouvellement. Ces cas particuliers, à l'interface entre pédologie et sédimentologie, ne seront pas abordés dans cette étude.

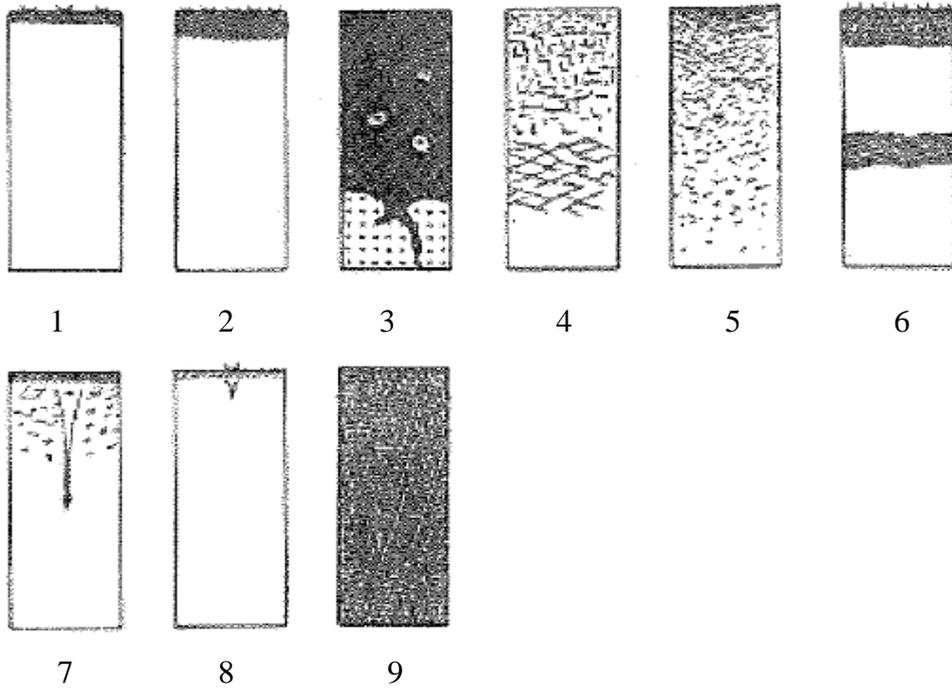


Fig. 1.1a : La répartition des matières organiques dans différents types de sols (repris de Boulaïne, 1976, cours de pédologie générale)

1 : sol minéral brut ; 2 : sol peu évolué ; 3 : sol humique (ranker) ; 4 : vertisol ; 5 : sol isohumique ; 6 : podzol ; 7 : sol brun ; 8 : sol ferralitique ; 9 : tourbe

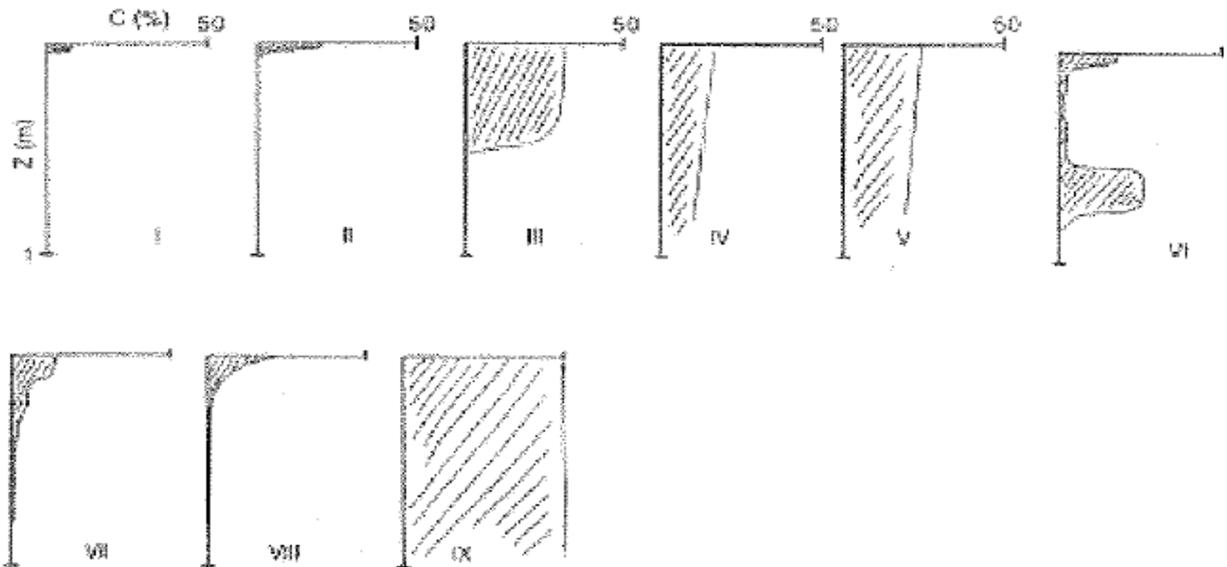


Fig. 1.1b : Type de variations des teneurs en matière organique dans les sols de la figure 1.1a (d'après Schwartz, cours inédit)

Lorsqu'un processus de transport de la matière organique domine la pédogénèse, il en découle un type de répartition spécifique. Les sols bruns (7) fortement affectés par l'activité biologique présentent une décroissance progressive des teneurs en matière organique avec la profondeur avec des effets de seuil notamment à la base de l'horizon A en fonction des différents habitats de la pédofaune. Dans les sols bruns lessivés (non présentés) la matière organique pénètre plus en profondeur par entraînement mécanique de la matière organique. En profondeur, elle se distingue des sols isohumiques par une présence dominante sur la surface des polyèdres quand l'imprégnation des seconds se fait dans la masse. Quant aux podzols (6), ils sont affectés par la lixivation des matières organiques en surface sous forme de complexes organo-minéraux, puis par l'insolubilisation en profondeur des MO transportées. Ils présentent ainsi une répartition bimodale.

## 1.2. Dégradation, transport : quels processus ?

La répartition des matières organiques dans le profil est donc régie par deux types de dynamiques. Tout d'abord, des dynamiques biochimiques qui **transforment** les MOS et les minéralisent par une succession de processus (§1.2.1). Deuxièmement des dynamiques mécaniques et physico-chimiques qui **transportent** les MOS sur le profil (§1.2.2.). Par ailleurs, ces dynamiques peuvent être fortement modifiées par l'intervention de l'Homme (§1.2.3).

### 1.2.1. Les processus de transformation et de stabilisation des MOS

La matière organique fraîche de la litière ou de la rhizosphère est décomposée puis minéralisée dans des proportions et à des vitesses variables en fonction d'un grand nombre de facteurs. Dans le processus de décomposition, la pédofaune joue un rôle fondamental. Les produits de la décomposition sont ensuite pris en charge par la masse microbienne et fongique qui réorganise les molécules organiques ou les minéralisent. La texture, la structure, l'acidité du sol sont des facteurs de contrôle de ces processus. Le pédoclimat et les pratiques agricoles influencent également ces processus. Certaines propriétés des MOS ou certains processus entraînent également une stabilisation des MOS à plus ou moins long terme.

#### 1.2.1.1. Le rôle de décomposition de la pédofaune

Gobat *et al.* (2003) distinguent en plus des bactéries et des champignons, 10 catégories systématiques au sein de la pédofaune : protozoaires, nématodes, lombricidés, enchytréides, gastéropodes, isopodes, myriapodes, arachnides, insectes et vertébrés. Chacun de ces groupes comporte plusieurs dizaines, voire plusieurs milliers, d'espèces vivant dans le sol de façon permanente ou temporaire. S'agissant des MOS, il faut distinguer leur rôle de décomposeurs qui participe à la biodégradation et leur rôle de transporteurs qui participe à la bioturbation sur le profil et que nous évoquerons plus loin. La décomposition se produit principalement dans la litière. Elle concerne parfois l'horizon A et plus rarement les horizons profonds.

Le rôle des décomposeurs est fondamental dans la dégradation de la litière fraîche. De leur abondance et de leur diversité dépend la vitesse de décomposition des litières. Chaque groupe a des fonctions spécifiques complémentaires. Certains, comme les isopodes ou les myriapodes, ont une fonction mécanique qui consiste à fragmenter les végétaux fraîchement tombés au sol. Ils agissent principalement dans l'horizon OL, soit la frange supérieure de la litière. Les fragments plus petits figurés ou non qui composent les horizons OF et OH sont ensuite pris en charge par des décomposeurs chimiques tels les acariens ou les protozoaires qui digèrent et segmentent les molécules les moins résistantes comme la cellulose. Certains produisent des enzymes ou favorisent par leurs sécrétions l'activité des bactéries. La plupart des décomposeurs sont de piètres transporteurs à l'échelle du profil. En revanche, ils participent efficacement au mélange et à l'homogénéisation de la litière.

Toutain (1984) distingue quatre catégories de champignons vis-à-vis de la transformation des MOS. Les pourritures blanches sont capables de dégrader la cellulose et la lignine tout en produisant des quantités importantes de phénols. Les pourritures brunes et les pourritures molles s'attaquent surtout à la cellulose. Enfin des Ascomycètes et des Basidiomycètes vivent en symbiose avec les appareils racinaires sous forme de mycorhizes. Ainsi, tout comme la pédofaune, ils sont des acteurs indispensables et complémentaires de la dégradation des litières fraîches et sénescents. Les champignons, en colonisant rapidement le sol et en diffusant des grandes quantités d'enzymes, produisent un grand nombre de petites molécules disponibles également pour d'autres décomposeurs. De plus, par la multiplicité des symbioses spécifiques d'une espèce végétale, de nombreux champignons sont caractéristiques d'un type d'écosystème.

De même que les champignons, les bactéries doivent leur efficacité à la production d'enzymes *intra* et *extra* cellulaires capables de sectionner les molécules les plus grosses non directement assimilables par les autres organismes. La masse microbienne en tant que telle ne représente pas une fraction très importante de la matière organique. En revanche, son rôle sur leur transformation est déterminant. Des ratios entre différents types de sucres constituent des indices fiables pour distinguer les polysaccharides d'origine microbienne de ceux d'origine végétale (Spielvogel *et al.*, 2007).

De manière générale, les champignons et les bactéries et l'ensemble des micro-organismes ont un impact très important sur les MOS. Leur action n'est pas ou peu observable à l'œil nu sur le profil de sol. Dans ce travail, nous n'avons pas effectué d'analyses susceptibles de fournir des informations sur ces variables. Premièrement, nous estimons qu'une part importante de ces organismes est inféodée au type de végétation sous forme de parasite, de symbiose ou d'autres relations écologiques. Par conséquent, leur biomasse propre et la biomasse qu'ils transforment sont aussi, en partie au moins, spécifiques de la végétation et du sol qu'ils colonisent. Deuxièmement, bien que certains de ces microorganismes soient ubiquistes nous émettons l'hypothèse que leur action n'est pas suffisante pour effacer les spécificités chimiques des MO d'origine végétale.

### **1.2.1.2. Rôle du pédoclimat**

Le pédoclimat influence énormément la vie dans le sol et par conséquent les vitesses et processus de décomposition. Chacune des espèces de la pédofaune a des exigences précises vis-à-vis du régime thermique du sol. Les périodes prolongées de gel qui affectent prioritairement la zone superficielle, qui est aussi la zone où se concentre la vie du sol, ralentissent considérablement la minéralisation. De même, les températures inférieures à 20° ralentissent l'activité microbienne, en particulier en dessous de 10°. Le régime thermique du sol est contrôlé par la densité, la texture et la porosité du sol et dépend fortement du climat local et stationnel. L'exposition, l'altitude, la présence d'une végétation dense sont autant de facteurs environnementaux qui influencent le régime thermique. Le régime hydrique influence également la nature des processus biochimiques. En effet, les processus de transformation sont très différents selon que l'activité microbienne est en milieu saturé anaérobie ou en milieu non saturé aérobie. De longues périodes de saturation dans les sols entraînent un fort ralentissement de la minéralisation et une accumulation de matière organique peu transformée.

### **1.2.1.3. Rôle du pH**

Le pH du sol joue un rôle important dans la dégradation de la matière organique. En témoignent les différents types d'humus contrôlés par le pH. Ainsi, les sols les plus carbonatés avec des pH souvent supérieurs à 8 sont le plus souvent caractérisés par un mull carbonaté. Ce type d'humus se caractérise par une forte activité biologique accompagnée par une minéralisation primaire importante (Gobat *et al.*, 2003). Les sols moins carbonatés (mull saturé) au pH entre 6 et 7,5, présentent une excellente décomposition des litières caractérisée par une forte activité biologique et l'absence de blocage chimique. Dans les sols acides (mor insaturé) l'activité biologique est ralentie et la transformation de la matière organique est incomplète. D'autre part, van Bergen *et al.* (1998) ont observé, en analysant des extraits lipidiques de MOS, que la conservation de certaines fractions organiques était liée au pH. Il semblerait que les sols à pH faible conservent mieux certaines biomolécules issues de la végétation en ralentissant l'activité des microorganismes. Dans les sols très acides, la mésofaune et en particulier les vers de terre sont beaucoup plus rares.

### **1.2.1.4. Mécanismes de stabilisation**

Depuis que le sol est considéré comme un stock de carbone important dans les modèles planétaires de cycles des gaz à effet de serre, de nombreux travaux tentent de décrypter les mécanismes de séquestration et de stabilisation des MO. Trois raisons sont proposées pour expliquer la formation de MOS inertes ayant un temps moyen de résidence (TMR) long dans les sols (Eusterhues *et al.*, 2003) :

- Une récalcitrance à la dégradation liée à la structure chimique.
- L'inclusion de matière organique dans des agrégats ou des micropores,

- L'interaction des molécules organiques avec la fraction minérale.

Certaines molécules sont difficilement décomposables par les champignons et les bactéries en raison de leur taille trop importante ou de structures particulièrement résistantes. La récalcitrance chimique a longtemps été considérée comme le principal mécanisme de conservation du pool inerte. Depuis quelques années, de nombreuses études ont montré le rôle prépondérant d'autres mécanismes capables de protéger des molécules potentiellement décomposables (Schöning et Kögel-Knabner, 2006). Concernant la nature des molécules organiques conservées, il semblerait que les lignines, habituellement reconnues comme chimiquement récalcitrantes (Andreux, 1979), sont mal conservées, tandis que des polysaccharides, plus sensibles à la biodégradation, sont bien conservés en raison d'associations solides avec des minéraux (Kiem et Kögel-Knabner, 2003 ; Spielvogel *et al.*, 2007). En fait, la récalcitrance de la lignine est avérée à des échelles de temps courtes mais pas aux échelles de temps pluriséculaires (Vancampenhout *et al.*, 2008a).

Les agrégats constituent une protection par occlusion face aux attaques microbiennes (John *et al.*, 2005). En enfermant les MOS dans des micro-sites, ils créent des micro-écosystèmes, dont une partie est protégée des organismes décomposeurs. Cette protection est fortement dépendante de la taille des agrégats (von Lützwow *et al.*, 2007). Plus les agrégats sont petits, plus l'âge des MOS piégées est élevé (Yamashita *et al.*, 2006).

Les complexes organo-minéraux sont considérés par Chenu et Plante (2006) comme des micro-agrégats et donc la protection qu'ils offrent est considérée comme un cas particulier de la protection par les agrégats. Le mécanisme de protection n'est pas l'occlusion mais l'adsorption sur des particules fines le plus souvent des argiles ou des oxydes métalliques. Plusieurs études utilisant la dissolution par l'acide hydrofluoridrique (HF) de la fraction minérale (Eusterhues *et al.*, 2003 ; 2007) montrent sur des sols des zones tempérées que l'association avec la fraction minérale semble être le processus prédominant de conservation de MOS et ceci même dans des sols avec une faible teneur en argile. Becker-Heidmann et Scharpenseel (1989) et Scharpenseel et Becker-Heidmann (1992) ont montré une forte corrélation entre l'âge maximum atteint par le temps moyen de résidence (TMR) dans un sol et le taux d'argile de ce même sol (Fig. 1.2). De plus, il semblerait que la surface d'échange très importante offerte par les sols argileux soit la principale raison de cette conservation. Les MOS piégées dans les feuillets d'argiles ne contribueraient que peu au pool inerte. En fait, les MOS piégées dans les espaces interfoliaires sont très mal connues, car très difficiles à extraire. Dans des sols ferrallitiques soumis à des conditions de température et d'humidité très favorables à la biodégradation une quantité importante de matières peu dégradées est conservée dans les horizons profonds grâce à l'association avec des oxydes de fer ou de la kaolinite (Dick *et al.*, 2005). Cependant des résultats contradictoires montrent que dans les horizons profonds riches en MOS inertes les complexes organo-minéraux sont relativement plus jeunes que les MOS protégées par d'autres mécanismes (Eusterhues *et al.*, 2007).

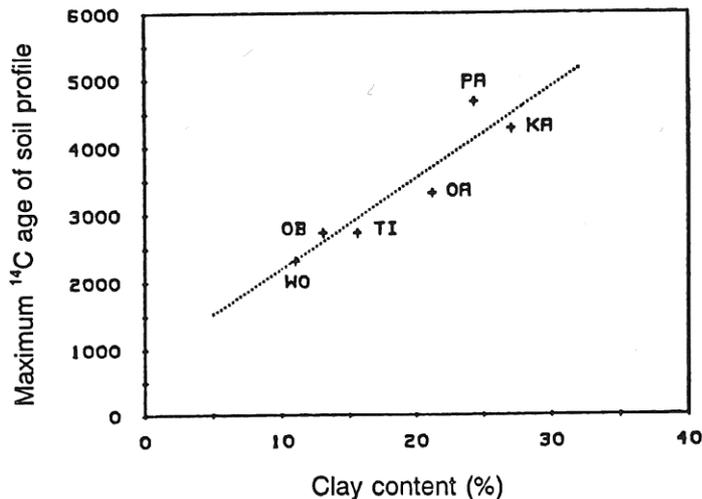


Fig. 1.2 : Relation entre l'âge apparent maximum et le taux d'argile de plusieurs profils d'Alfisols. (Scharpenseel et Becker-Heidmann, 1992)

## 1.2.2 Mécanismes de transport des MO

### 1.2.2.1. Bioturbation

La bioturbation est aussi appelé biomalaxage par Langhor (2001) ce qui traduit peut être mieux l'intensité du processus. La bioturbation est principalement activée par la faune du sol et dans une moindre mesure par la végétation. Ce processus est donc indirectement fonction des conditions écologiques favorables ou non à l'installation de cette faune. Tout comme pour les mécanismes de transformation, le pédoclimat et le pH sont des facteurs déterminants de répartition de la faune de bioturbateurs. Les vers de terre anéciques disparaissent dans les sols acides et aux altitudes/latitudes élevées. Bien que d'autres insectes ou arachnides prennent le relais, ils ne sont jamais aussi efficaces que les vers de terre, tant par la quantité déplacée (jusqu'à 200t/ha/an) que par la profondeur concernée (> 1 m). Le brassage intensif par la pédofaune a pour conséquence une homogénéisation de certains horizons.

Cette homogénéisation est imparfaite en raison des spécificités des différents bioturbateurs. En effet, il n'est pas à exclure que certains bioturbateurs, non omnivores ou non géophages, aient un comportement sélectif vis à vis des éléments déplacés. En fonction des habitats privilégiés de chacun, ceci contribuerait à une forme d'horizonation. De même, les différents habitats de la pédofaune, fonction de la profondeur, peuvent engendrer des spécificités propres à un horizon. Il en va de même pour les végétaux et la répartition de leur enracinement. Ainsi, bien que les quantités déplacées dans un laps de temps donné soient parfois spectaculaires, la bioturbation n'efface pas complètement la chronologie des apports de MOS fraîches.

### 1.2.2.2. Les acteurs de la bioturbation

Parmi les transporteurs, ceux qui se déplacent verticalement contribuent le plus efficacement à la bioturbation. La plupart des espèces participent à la décomposition et au transport de MOS, mais nous avons privilégié ceux dont le rôle de transporteur est déterminant.

De nombreux vertébrés vivent ou séjournent dans le sol. Tous ont pour caractéristique de remanier le sol. Les mammifères tels que les taupes, les blaireaux ou les campagnols creusent des galeries et des terriers avec des conséquences radicales sur le remaniement des horizons. Les conséquences de leurs comportements sont facilement repérables sur le profil pédologique (Fig. 1.3). Cependant, lorsque leur répartition spatiale est lâche et aléatoire, les effets sur la bioturbation sont limités. (Carcaillet, 2001b). Cette remarque est à nuancer pour les milieux steppiques souvent densément peuplés par des écureuils de prairie appelés spermophiles (Chaline et Thevenin, 1972). Les sols typiques des steppes observés parfois en Alsace à l'état de paléosols piégés dans les épaisses stratigraphies loessiques (Wernert, 1957), se caractérisent par une multitude de galeries appelées aussi *crotovinas*. Ces rongeurs participent à l'homogénéisation de l'épais niveau humifère caractéristique des chernozems (WRB, 2006).

Les insectes, principalement les termites et les fourmis contribuent également à un fort remaniement du sol. Leur action est particulièrement importante lorsqu'ils utilisent des matériaux terrigènes pour édifier des habitats aériens ou enterrés. Leur action est spectaculaire en milieu tropical (Bouillon, 1964) et non négligeable en milieu tempéré. Certains insectes ingèrent et digèrent une partie de la litière et restituent des MO transformées au sol. Ils peuvent également entraîner des particules de sol par leur va-et-vient dans les galeries qu'ils creusent.

Les vers de terre sont les champions de la bioturbation. Les anéciques sont les plus efficaces puisqu'ils effectuent continuellement des mouvements de va-et-vient entre la surface et les horizons profonds (Bouché, 1972). Non seulement ils déplacent, entraînent et favorisent l'entraînement de particules de sol dans les galeries qu'ils creusent, mais ils ingèrent également du sol pour le restituer le plus souvent à la surface sous forme de turricules (Fig. 1.4). Ainsi, les effets sont triples : déplacement de MOS vers la profondeur, remontée de la fraction minérale vers les horizons holorganiques et structuration du sol. Or, les agrégats construits par les vers de terre sont souvent des micro-sites importants pour la préservation des MOS. L'abondance de vers anéciques est un critère important de la bioturbation. Ils sont absents dans les sols acides ou lorsque le pédoclimat est trop froid et la bioturbation n'est que partiellement compensée par d'autres transporteurs.



Fig. 1.3 : Exemple de bioturbation par un rongeur, sol peu évolué se développant dans une formation pléistocène, Entzheim, 67 (photo : D. Schwartz)



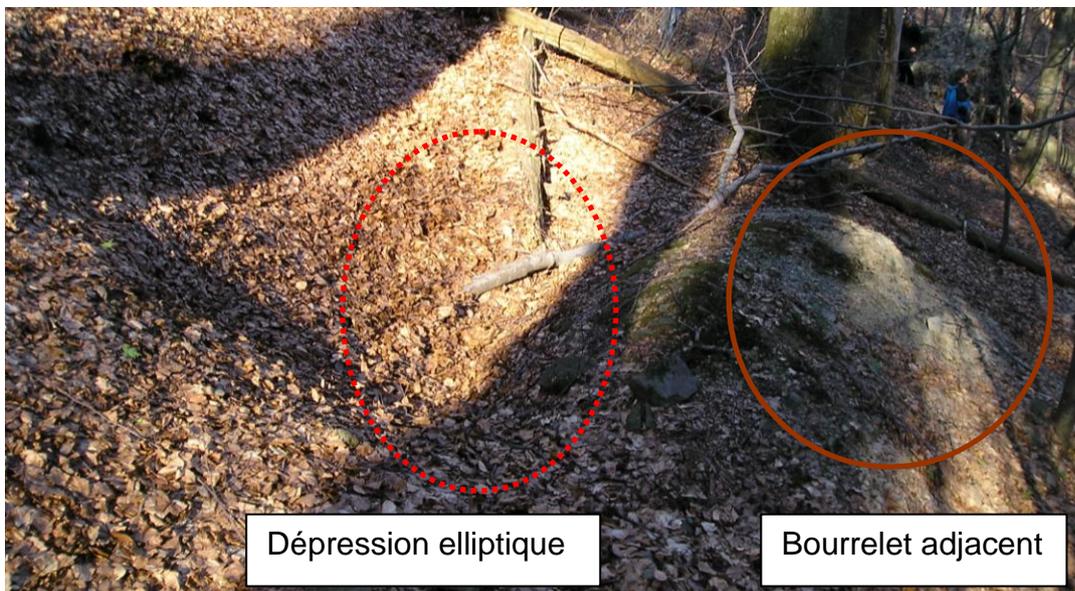
Fig. 1.4 : Bioturbation à la surface d'un sol suite au passage d'un incendie. De la terre des horizons profonds est remontée par dessus la surface du sol. Le phénomène est mis en évidence par le contraste de couleurs, Haguenau, 67 voir également (Balek, 2002)

### 1.2.2.3. Bioturbation par la végétation

De façon ponctuelle et exclusivement en milieu forestier, la végétation joue un rôle mécanique important par l'action des *chablis*. En tombant sous la contrainte du vent ou de la neige, suite à un dépérissement ou par arrachage anthropique (Langhor, 1993 ; Schwartz *et al.*, 2009) l'arbre, lorsqu'il ne casse pas, entraîne une grande partie de son réseau racinaire et du sol dans lequel il est ancré (Fig. 1.5a). Une importante « galette » de sol pouvant atteindre plusieurs décimètres d'épaisseur et quelques mètres de diamètre subit une rotation de  $90^\circ$  ( $\pm 45^\circ$ ). Lorsque l'arbre dépérit définitivement, la part de sol soulevée retombe au sol. Il en résulte une dépression en forme d'ellipse bordée par un bourrelet (Fig. 1.5b). Ce mécanisme entraîne un remaniement important du sol en ramenant du matériel des horizons profonds à la surface et en enfouissant des horizons superficiels (Brown, 1976 ; Stephens, 1956). Ceci contribue à l'enfouissement d'une partie de l'horizon A, riche en MO, et favorise le stockage dans les horizons profonds.



*Fig. 1.5a : Chablis naturel d'un arbre sénéscent en cours de décomposition, Salajka, République tchèque*



*Fig. 1.5b : Microtopographie caractéristique d'un chablis après le dépérissement complet de l'arbre, Salajka, République Tchèque*

Ce phénomène, lorsqu'il est isolé dans le temps et dans l'espace, peut être considéré comme un épiphénomène de la pédogenèse. En revanche, lorsqu'un secteur entier de forêt est concerné, soit par une tempête, soit par une phase de défrichement par arrachage, (Cloître, 2005 ; Schwartz *et al.*, 2009) ce mécanisme est fondamental. Il l'est d'autant plus lorsque les tempêtes ou les phases de défrichement se succèdent. De même, dans certains secteurs laissés en réserve intégrale, les chutes d'arbres matures constituent un mécanisme tout à fait habituel de fonctionnement de la forêt non-gérée (Office National des Forêts, 1997 ; Žárník *et al.*, 2006). Leur densité et leurs dimensions, importantes lorsqu'il s'agit d'arbres matures, permettent d'estimer que la totalité de la surface du sol est concernée après quelques générations de ligneux soit quelques siècles. Brown et Martel (1981) et Vassenev et Targulian (2008) montrent que les chablis peuvent constituer un processus majeur de la pédogenèse.

#### **1.2.2.4. Lessivage**

A la bioturbation s'ajoutent des processus de migration de particules de sols appelés lessivage. La texture, la structure et la pluviométrie sont des facteurs importants dans le contrôle de ces processus. Cet entraînement sous forme particulaire provoque un tri puisqu'il mobilise uniquement les particules les plus fines ou les moins bien agrégées. Dans la pratique, le lessivage concerne pour l'essentiel, les argiles et les MO qui leur sont liées. Or, nous l'avons vu plus haut, les MOS sont de natures différentes en fonction de la classe granulométrique à laquelle elles appartiennent. En conséquence, une quantité importante de MOS récentes se retrouvent déplacée dans les horizons BT profonds.

Le lessivage des MOS vers les horizons profonds est contrôlé en partie par la texture et la structure. Ce lessivage peut modifier fortement la répartition des MOS sur le profil. Il contribue à l'horizonation du profil. La structure influence la circulation et le mode de dépôt des MOS mobilisées par le lessivage. Ainsi, dans les sols bruns lessivés (Luvisol, WRB, 2006), les MO lessivées se déposent quasi exclusivement sur les parois des prismes typiques des horizons BT (Fig. 1.6).

#### **1.2.2.5. Lixiviation**

Une partie des matières organiques est soluble dans l'eau. Ainsi, dans les sols bien drainés certains constituants sont exportés vers le bas du profil ou en-dehors du profil. Ce processus de lixiviation a pour conséquence un tri des MOS entre les plus solubles et celles totalement insolubles. Les sols lixiviés se comportent en quelque sorte comme un système chromatographique (Rumpel *et al.*, 2004). Une partie des matières organiques dissoutes est ensuite insolubilisée en profondeur. Ce mécanisme est emblématique des podzols (Fig. 1.7) pour lesquels une horizonation directement issue de la lixiviation des MOS est observable. Dans le cas des podzols, ce sont des complexes organo-métalliques qui sont entraînés puis insolubilisés. Ceci a des conséquences importantes sur la répartition des MOS en fonction de leur âge.



5cm  
 Fig. 1.6 : Revêtement de MOS sur les parois d'agrégats, dans un horizon BTca (140 cm) d'un sol brun lessivé (luvisol), Gottesheim, 67 (photo : D. Schwartz)



Fig. 1.7 : Le podzol : un type de sol emblématique des processus de lixivation de matières organiques solubilisées et complexées avec du fer ou de l'aluminium. L'horizon Bh est enrichi en MO.

### 1.2.3 Actions anthropiques

Nous n'évoquerons pas ici les actions les plus radicales qui consistent à décaper le sol pour passer à une occupation du sol consacrée aux activités secondaires, tertiaires ou à l'habitat. Ces actions destructrices de sol entraînent également la destruction des archives contenues dans le sol (*cf.* chapitre 2). La prévention systématique, en vigueur pour les « archives » archéologiques, permet toutefois moyennant d'étroites collaborations de sauver un certain nombre de ces archives naturelles dans le cadre d'études géoarchéologiques. Dans cette partie, nous nous pencherons plus spécifiquement sur les interventions humaines qui modifient la fraction organique et ses dynamiques.

Avant le Néolithique, les impacts sur les MOS sont indirects et se limitent à des prélèvements de végétation (cueillette et ramassage de bois) de faible ampleur. Le seul impact non négligeable connu est l'utilisation, maîtrisée ou non, du feu qui entraîne des changements importants de végétation sur de grandes surfaces. Les interventions humaines commencent à prendre de l'ampleur au Néolithique (7500 BP en Europe centrale) avec l'arrivée des pratiques agricoles (Demoule, 2007), précédées de vastes défrichements.

La première conséquence de la mise en culture est le remplacement ou la modification d'une végétation naturelle par des espèces domestiquées avec toutes les répercussions possibles évoquées précédemment dans le paragraphe consacré à la végétation. La seconde conséquence qui suit souvent de près la première est l'activation de processus d'érosion suite à l'installation d'une végétation moins protectrice. Ces processus d'érosion sont amplifiés lorsque débute le travail du sol à l'aide d'outils rudimentaires (Fig.1.8). L'érosion a pour conséquence l'exportation des horizons les plus riches en MO. De façon schématique, les versants cultivés sont appauvris, tandis que certains sols de bas de pente ou de fond de vallée peuvent être épaissis et enrichis en MO allochtones. Cependant, la majorité du matériel mobilisé par l'érosion agricole est prise en charge par les cours d'eau et concentrée dans le réseau hydrographique. La fraction organique plus légère est d'autant plus facilement exportée (Roose, 1977).

Le travail du sol entraîne également le remaniement des horizons supérieurs, de façon très superficielle dans un premier temps, puis de façon plus conséquente avec l'apparition de la charrue. En Alsace, la charrue serait apparue vers le Xe siècle de notre ère (Ferdier *et al.*, 2006). Enfin, les modifications deviennent radicales avec la mécanisation du XXe siècle (Langhor, 2001). Ce travail produit une homogénéisation du taux de matière organique sur l'épaisseur labourée. Ainsi, dans un sol travaillé sur une vingtaine de centimètres les premiers centimètres sont appauvris en MO tandis que les centimètres inférieurs de l'horizon de labour sont enrichis. Cette homogénéisation a des conséquences importantes sur la dynamique des MOS. Par ailleurs, la formation, suite au travail du sol à la charrue, d'une semelle à la base de l'horizon de labour peut également modifier les mécanismes de transfert verticaux (Fig. 1.9.) La mécanisation entraîne également des processus de tassement et la multiplication des outils de

travail du sol tend à détruire la structure du sol (John *et al.*, 2005). Or, les agrégats jouent un rôle protecteur pour la matière organique et les microorganismes (Baldock et Skjemstad, 2000).



*Fig. 1.8 : Surface d'érosion marquée par des sillons de labour à l'araire (protohistoriques ?) scellés sous 140 cm de colluvions loessiques, Gottesheim, 67*



*Fig. 1.9 : Horizon de labour (structure lamellaire) séparé des horizons non remaniés (structure prismatique) par une semelle de labour, Neuwiller-les-Savernes, 67 (photo : D. Schwartz)*

A toutes ces conséquences mécaniques s'ajoutent les modifications du cycle biogéochimique sol-plante. En effet, en récoltant, l'agriculteur exporte une grande partie des matières organiques fraîches privant ainsi d'autant le sol d'apports de litière. Ainsi le sol s'appauvrit fortement en MO et en éléments minéraux. C'est le motif principal de l'agriculture itinérante qui se déplace après quelques années d'exploitation lorsque la fertilité est devenue médiocre. Avec l'arrivée des fertilisants, ces pertes sont partiellement compensées lorsque les

apports sont organiques. En plus des apports classiques, de type fumier, certaines études mettent en évidence des pratiques médiévales qui consistent à apporter de la litière forestière pour amender les parcelles cultivées voisines. Cette pratique peut fortement brouiller les pistes dans notre lecture des archives pédologiques. Les fertilisants minéraux en revanche, bien que compensant les carences du point de vue de la plante, ne rétablissent pas le cycle des MO. Enfin, l'utilisation récente de pesticides, d'insecticides et de fongicides modifient le cycle des MO ; les pesticides réduisent la diversité des apports de litière tandis que les insecticides et les fongicides privent la pédogenèse de certains mécanismes fondamentaux de la biodégradation que nous détaillerons plus loin.

L'intervention de l'Homme, et plus spécialement de l'agriculteur, est ancienne, mais s'est radicalement intensifiée au cours du XXe siècle. Dans la mesure du possible, nous tenterons dans cette étude, d'une part, de prendre en compte au maximum ces paramètres dans notre réflexion et d'autre part, d'éviter les sites les plus impactés par l'agro-industrie du XXe siècle parce que ces pratiques récentes détruisent le plus souvent la « mémoire » du sol. Pour le moins, elles en rendent la lecture malaisée.

### **1.3. Aspects temporels : l'âge des MOS**

#### **1.3.1 Notions de TMR**

Compte tenu de la bioturbation et des autres mécanismes de transports verticaux dans les sols, les MOS ne présentent aucune stratification verticale. Certains éléments peu décomposés jeunes sont entraînés vers la profondeur, tandis que des éléments organiques anciens sont remontés à la surface. De plus, chaque année de la MO jeune entre dans le sol, tandis que d'autres, plus âgées en disparaissent par minéralisation. Par conséquent, les MOS à profondeur égale sont hétérochrones (Schwartz, 1997). Il est donc difficile de mesurer l'âge des matières organiques.

L'outil privilégié par les pédologues, depuis la fin des années 60, pour dater les MOS est de mesurer la quantité de  $^{14}\text{C}$  (Libby, 1962) d'un échantillon de sol (Scharpenseel et Pietig, 1970, 1971). Le carbone étant le composant largement majoritaire de la matière organique, cette mesure donne une bonne approximation de l'âge moyen de la matière organique. Au départ, cette méthode est utilisée pour donner un « âge » au sol ou plus précisément dater le début de la pédogenèse (Scharpenseel et Pietig, 1969). En fait, cette question de l'âge du sol qui doit permettre de calculer la vitesse de développement d'un sol reste largement en suspens et n'a pas été résolue par l'apport des datations radiocarbone (Geyh *et al.*, 1971). En revanche, la méthode demeure un outil précieux pour mieux comprendre la dynamique des MOS à l'échelle du profil dès lors que l'on introduit la notion de temps moyen de résidence (TMR) (Balesdent *et al.*, 1998 ; Bernoux *et al.*, 1998 ; Guillet, 1979). En effet, la datation radiocarbone obtenue est une moyenne non arithmétique entre des fractions d'âge élevé et des fractions plus

jeunes. Ainsi, à une profondeur donnée, la mesure représente l'espérance de vie des matières organiques entre le moment où elles entrent dans le sol par décomposition de MO fraîche et le moment où elles en sortent par minéralisation. Cette moyenne n'est pas arithmétique parce que la courbe qui permet d'obtenir un âge à partir du  $\delta^{14}\text{C}$  est une exponentielle décroissante. Ainsi, l'âge apparent d'un mélange à part égale de matières organiques fraîches et de matières organiques âgées d'un million d'années sera de 5730 ans. Des corrélations élevées ( $r^2 > 0,9$ ) sont observées entre le TMR et le taux de carbone sur des sols bruns (Rumpel *et al.*, 2002), ou entre le  $\delta^{14}\text{C}$  et  $1/\text{C}$  sur des sols ferrallitiques (Schwartz *et al.*, 1992). Pour ces sols, plus la quantité de carbone est importante plus le TMR est faible.

Alors que les premières études se sont d'abord concentrées sur des échantillons bruts de sol, des datations radiocarbone ont ensuite été effectuées sur des fractions granulométriques, densimétriques ou chimiques spécifiques (Balesdent *et al.*, 1998 ; Jocteur Monrozier et Duchaufour, 1986 ; Scharpenseel *et al.*, 1968 ; von Lützow *et al.*, 2007). Les progrès méthodologiques, telle l'apparition des mesures par AMS (Accelerator Mass Spectrometry), ou l'amélioration des méthodes de calibration et de prise en compte des effets des explosions atomiques ont facilité ces démarches et augmenté la précision des mesures. Plus récemment, des datations radiocarbones effectuées sur des constituants spécifiques et mieux identifiables tels que les micro-charbons de bois ont permis de compléter l'approche des dynamiques à l'échelle du profil (Boulet *et al.*, 1995 ; Carcaillet, 2001a, b ; Schwartz, 1997).

### 1.3.2. Mesure du TMR

Le TMR (Fig. 1.10) peut atteindre plusieurs milliers d'années en profondeur et est en général peu élevé en surface (Balesdent et Guillet, 1982 ; Becker-Heidmann et Scharpenseel, 1986, 1992 ; Bernoux *et al.*, 1998 ; Guillet, 1979, 1990 ; Rumpel *et al.*, 2002 ; Trumbore, 1993 ; Trumbore *et al.*, 1995). Les travaux en case lysimétrique de Quideau *et al.* (2000) confirment également ce modèle de la dynamique de la MO dans les sols. Les âges varient en fonction du type de sol et du pédoclimat. Seuls les sols arctiques et subarctiques présentent des horizons de surface à renouvellement très lent avec des TMR supérieurs à 100 ans, tandis que les sols sous forêt boréale ont un âge apparent inférieur à 100 ans sur les 5 premiers centimètres (Bird *et al.*, 2002).

Les gradients varient en fonction du type de sol (Fig. 1.11). Ils sont de 2000 ans/m pour des cambisols et atteignent 7000 ans/m dans des chernozems. Cependant peu d'études ont mesuré des TMR avec une forte résolution verticale. Or, Becker-Heidmann et Scharpenseel (1986 ; 1989) montrent bien que le gradient observé à faible résolution masque un grand nombre de variations à l'échelle centimétrique y compris des gradients ponctuellement positifs (Fig. 1.12 et 1.13). Ces variations centimétriques sont généralement expliquées par des discontinuités texturales ou structurales sur le profil qui influence fortement les processus de migrations et joue un rôle de filtre vis à vis de fractions d'âges différents.

Il faut également, dans certains cas, tenir compte des variations latérales sur le profil. Par exemple des galeries de rongeurs comblées par du matériel provenant d'un autre horizon (Fig. 1.3) ou des limites d'horizons très irrégulières formant des « langues » sont des indices à ne pas négliger lors de l'observation du *solum*. Ainsi, Chabbi *et al.* (2009) obtiennent dans un sol brun acide (Distric Cambisol, WRB, 2006) des TMR de 945 ans et 4696 ans pour des échantillons prélevés à des profondeurs égales respectivement dans une « langue » et dans la matrice, indiquant des dynamiques différentes à quelques centimètres de distance.

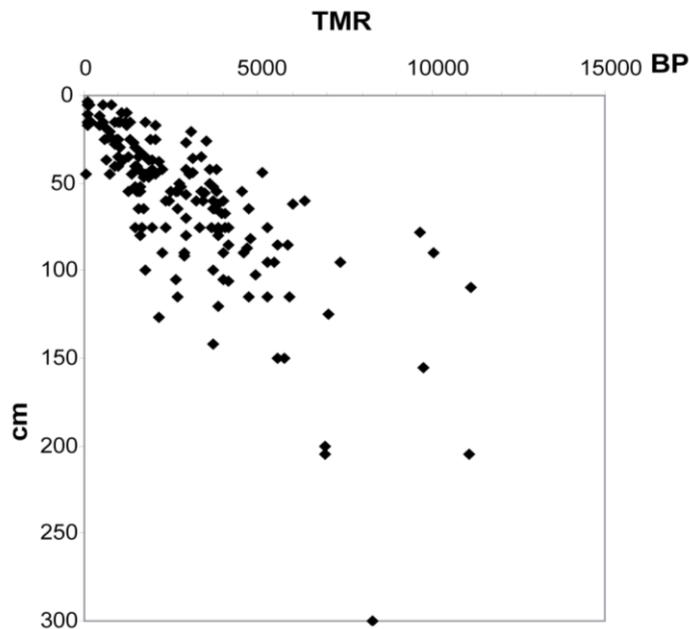


Fig. 1.10 : Temps Moyen de Résidence en fonction de la profondeur pour une large gamme de sols (références identiques à la fig. 1.11)

Ces gradients de TMR croissant avec la profondeur s'expliquent par les mécanismes de transformations et de transports. Les matières organiques très résistantes séjournent longtemps dans le sol. Ainsi elles ont tout le temps d'être prises en charge par les processus de transport. Par conséquent, leur répartition varie selon le mécanisme de transport dominant dans un type de sol donné. Pour les sols dans lesquels la bioturbation est importante, les matières organiques anciennes atteignent une répartition homogène sur le profil. Pour les sols soumis au lessivage, la MO la plus ancienne se trouve dans la matrice des horizons profonds tandis que dans les zones de dépôts, sur les parois des fissures, le TMR est rajeuni par les MOS particulières lessivées depuis la surface. Ces mécanismes entraînent parfois des profils de TMR très irréguliers (Fig. 1.11). Dans les podzols, la lixivation provoque l'accumulation de matière organique soluble au niveau des discontinuités texturales provoquant parfois un rajeunissement brutal de certains horizons profonds

Les MOS facilement dégradables séjournent seulement quelques années ou quelques décennies dans le sol. Ainsi, une partie d'entre elles disparaît au fur et à mesure qu'elles sont entraînées vers la profondeur. Par conséquent, la proportion des matières organiques jeunes décroît avec la profondeur ce qui entraîne corrélativement une augmentation du TMR. De ces considérations découlent le modèle bi-compartmental de répartition proposé par Balesdent et Guillet (1982) (Fig. 1.14). Ce modèle s'applique bien aux sols bioturbés, mais il ne prend pas vraiment en considération les processus de transport par lessivage et lixivation

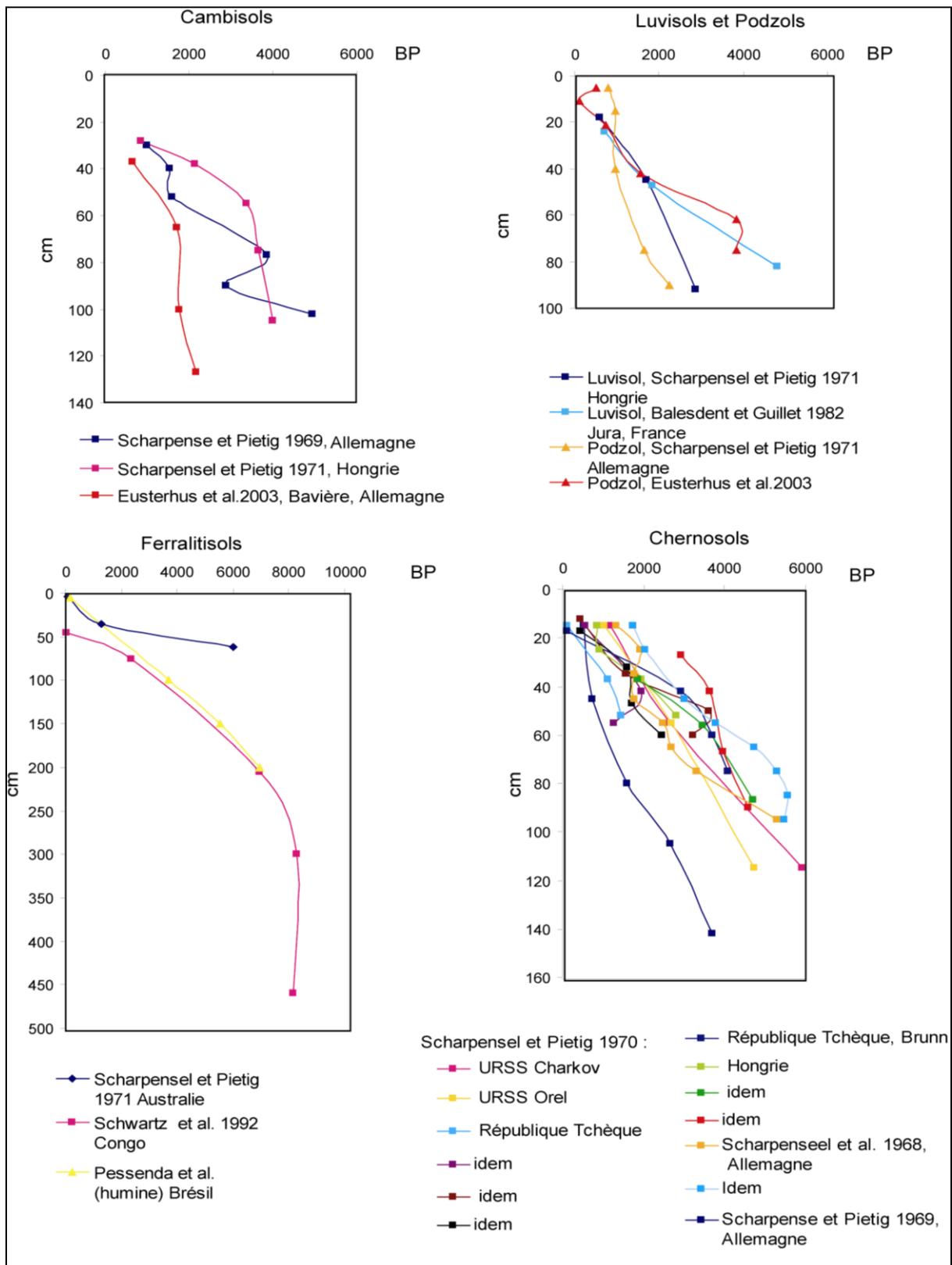


Fig. 1.11 : Temps moyen de résidence des MOS en fonction de la profondeur pour cinq grands types de sols.

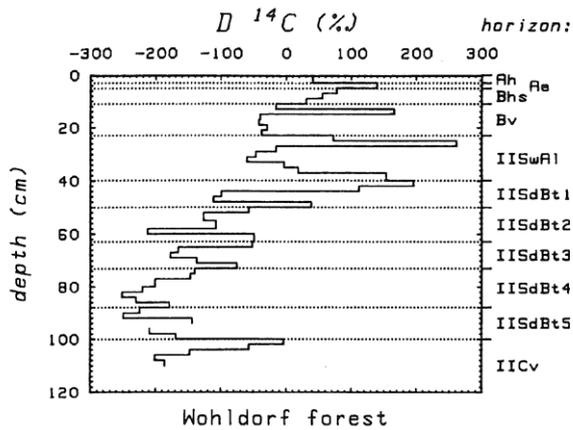


Fig. 1.12 : Mesure  $^{14}\text{C}$  à haute résolution sur un profil de sol brun lessivé, Wohldorf, Allemagne, (Becker-Heidmann et Scharpenseel, 1986)

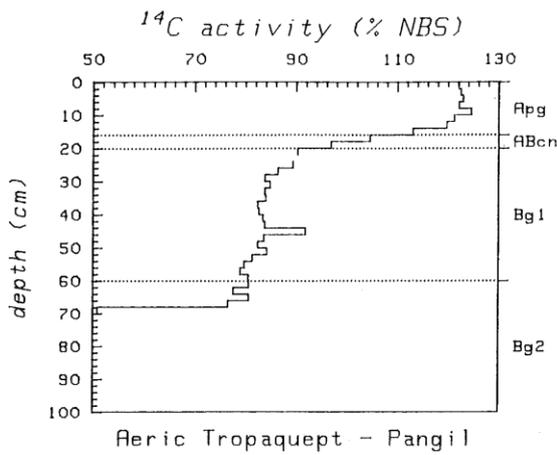


Fig. 1.13 : Mesure  $^{14}\text{C}$  à haute résolution sur un profil de Aeric Tropaquept, Pangil, Philippines, (Becker-Heidmann et Scharpenseel, 1992).

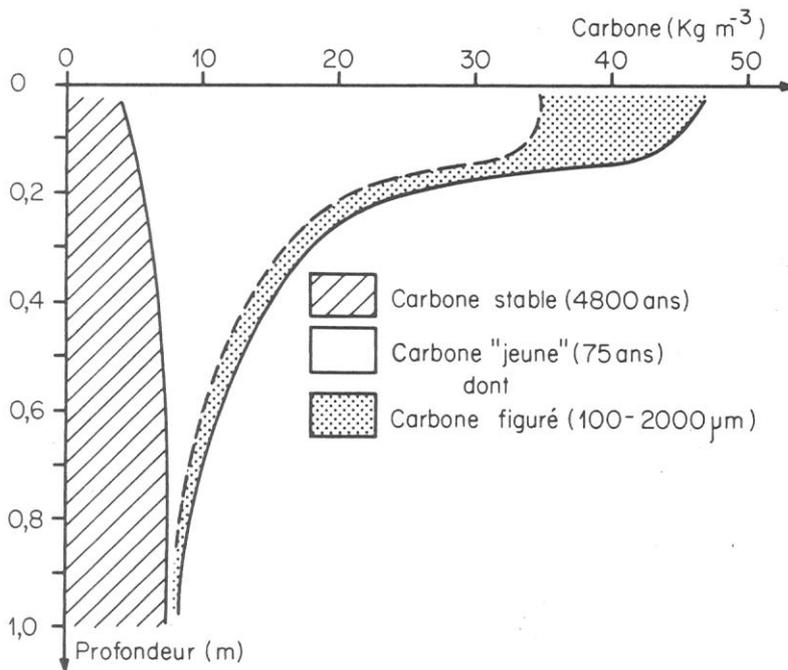


Fig. 1.14 : Profils du pool stable et du pool jeune dans un sol brun lessivé (Balesdent et Guillet, 1982)

### 1.3.3. Modélisation du C dans les sols à l'aide du TMR

La modélisation de la dynamique de la matière organique du sol, menée dans un premier temps, pour mieux comprendre le fonctionnement du sol (Jenkinson et Rayner, 1977), a connu un fort développement lorsque le carbone du sol s'est révélé être un compartiment important pour la modélisation des gaz à effet de serre. De nombreux modèles, généralistes ou spécifiques de milieux bien définis, ont été proposés pour prédire l'évolution des stocks de carbone dans le sol (Smith *et al.*, 1997). La plupart d'entre eux se concentre sur la frange supérieure du sol la plus riche en carbone. D'autres modélisent des profils atteignant un mètre (Jenkinson et Coleman, 2008b ; Jenkinson *et al.*, 2008a). La plupart des modèles proposent un découpage en plusieurs compartiments (Becker-Heidmann et Scharpenseel, 1992). Presque tous comprennent un pool stable ou inerte. Les différentes versions du modèle RothC (Jenkinson et Coleman, 2008b ; Jenkinson *et al.*, 1992 ; Jenkinson et Rayner, 1977) et le modèle CENTURY (Parton *et al.*, 1989) utilisent les mesures de TMR pour prédire l'évolution des stocks de carbone dans le sol. Les données d'entrée du modèle sont souvent issues de sites ayant fait l'objet de suivi sur le long terme. Cependant, les périodes de suivi excèdent rarement le siècle (Smith *et al.*, 1997) et ce que les modélisateurs du carbone nomment long terme correspond à du très court terme pour les études paléoenvironnementales.

Dans le cadre de cette étude où nous cherchons à pister les dynamiques des MOS sur le long terme, nous privilégions une représentation simple à deux compartiments (Fig. 1.14) :

- Un compartiment stable composé de MOS inertes très récalcitrantes ou très bien protégées et dont la répartition est homogène sur le profil ;
- Un compartiment labile, décomposable par un ensemble d'organismes vivants et de processus chimiques, dont la répartition sur le profil résulte de l'équilibre entre vitesse de diffusion vers la profondeur et vitesse de minéralisation.

Pour les modèles CENTURY et RothC, le compartiment labile est subdivisé en 4 compartiments ayant des TMR variant respectivement de 0,25 à 5 ans et de 0,2 à 71 ans (Scharpenseel et Becker-Heidmann, 1992). Ces distinctions fines ne sont pas pertinentes pour les échelles de temps auxquelles nous travaillons. Le seul modèle simple permettant de faire des calculs est le modèle de décroissance exponentiel des âges de Jenkinson (1966). Il permet d'expliquer de façon simple les gradients de TMR. Balesdent (1982) a montré que le remplacement des MOS correspondait plutôt à une fonction puissance, mais celle-ci n'autorise pas de calculs simples. Le modèle de Jenkinson s'exprime ainsi :

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-t/T}$$

Avec :  $Q_t$  la quantité de MOS restant d'une quantité initiale  
 $Q_0$  la quantité initiale au temps  $t$   
 $T$  le TMR mesuré

Ainsi, pour un temps  $t = T$ , il reste dans le sol 37 % de la matière organique initiale. Pour  $t = 2T$ , il en reste 14 %, et pour  $t = 3T$ , 5 %.

## **Conclusion**

Les matières organiques renferment un grand nombre d'informations sur leurs origines et leur âge. Cette information peut être utilisée dans le but de reconstruire la végétation du passé à condition de tenir compte de leur complexité. Cette complexité s'exprime aussi bien à l'échelle moléculaire qu'à l'échelle du profil pédologique. Pour mieux comprendre la répartition des matières organiques dans le profil comme une fonction du temps il est nécessaire d'examiner un certain nombre de travaux qui se sont déjà attachés à l'étude des archives dans les sols.



### ARCHIVES PEDOLOGIQUES ET HISTOIRE DE LA VEGETATION : L'APPORT DES CONSTITUANTS D'ORIGINE VEGETALE

La reconstitution des paléoenvironnements, de l'histoire des paysages, et des dynamiques écosystémiques à long terme s'appuient sur une large gamme de *proxy*. La plupart sont des archives sédimentaires. Ces dernières n'étant pas toujours présentes, ou pas toujours adaptées aux échelles stationnelles. Les archives pédologiques constituent un type de *proxy*, alternatif et complémentaire avec des spécificités en termes de datation. Dans ce chapitre, nous évoquerons les constituants et les propriétés du sol qui peuvent servir de marqueurs de l'environnement passé. Nous limiterons notre synthèse aux archives pédologiques d'origine végétale et nous n'aborderons pas les autres marqueurs paléoécologiques piégés dans les tourbes ou les sédiments.

Ces méthodes sont importantes pour deux raisons dans notre démarche de mise au point méthodologique. Tout d'abord, plusieurs d'entre elles ont été utilisées dans le cadre de ce travail de thèse et nécessitent d'être explicitées. Ce sont soit des données produites dans un passé récent par l'équipe de recherche sur les archives pédologiques de la faculté de Strasbourg, soit des données produites dans le cadre de cette thèse. Elles servent de référence à la mise au point de la nouvelle méthode basée sur la SPIR. Dans ce chapitre, nous les évoquerons en insistant sur leur solidité mais aussi leurs limites.

#### 2.1. Questions d'échelles

##### 2.1.1. Echelles spatiales

La plupart des archives pédologiques d'origine végétale offre une information stationnelle avec une résolution de l'ordre du mètre. C'est le point fort des archives pédologiques par rapport aux autres archives paléoécologiques et paléoenvironnementales. Ceci ouvre des champs d'application que n'offrent pas les autres familles d'archives tels que le suivi de la dynamique d'un écotone, l'étude de l'environnement direct d'un site archéologique, l'étude de végétations aux structures spatiales complexes : mosaïques forêt-savane, ripisylves, systèmes agraires

complexes. La résolution spatiale varie légèrement selon les marqueurs. Pour les marqueurs d'origine racinaire, elle est inférieure au mètre. Pour les marqueurs d'origine foliaire, elle est plutôt de l'ordre du décimètre, tandis que pour certains marqueurs minéraux qui migrent sur les versants sous forme soluble, elle est de l'ordre de l'hectomètre. Les pollens dans les sols constituent une exception puisque la résolution selon les taxons est de faible (hectométrique) à médiocre (régionale).

Second atout des archives pédologiques, elles offrent une couverture quasiment continue de l'espace en milieu tempéré. Ainsi, dans le cadre de l'étude d'un site précis, il est inutile de mener des investigations pour déceler le site le plus proche ayant servi de réservoir et il est inutile de pratiquer des interpolations ou des extrapolations pour relier l'information au site. L'information est directement disponible à l'endroit voulu.

### 2.1.2. Aspects temporels

En ce qui concerne les aspects temporels, Schwartz (2004) distingue trois types d'archives pédologiques : les archives événementielles, les archives transitoires et les archives cumulatives.

Les archives événementielles enregistrent des phénomènes ponctuels, des « accidents » par rapport au fonctionnement habituel du sol. Ces accidents apportent au sol des constituants « exogènes », qui s'y conservent plus ou moins longtemps, en fonction de leurs caractères propres mais aussi des caractéristiques du milieu qui les reçoit, le sol. Parmi les événements enregistrés notons par exemple les incendies, les éruptions volcaniques ou les accidents nucléaires. Ces phénomènes se traduisent notamment par la présence dans le *solum* respectivement de charbons de bois (*cf. infra*), de tephres (Juvigné, 1977a, b) et de  $^{137}\text{Cs}$ . La plupart de ces marqueurs sont pérennes et peuvent être observés ou analysés longtemps après l'évènement. Dans le cas des charbons de bois, l'évènement est facilement datable par  $^{14}\text{C}$ . Les tephres et le  $^{137}\text{Cs}$  dans les sols ne sont pas d'origine locale mais ils permettent de spatialiser l'extension d'un phénomène avec une très bonne résolution.

Les archives cumulatives sont des constituants qui entrent en continu dans le système sol et sont difficilement dégradés de telle sorte que leur quantité dans le sol augmente avec le temps, jusqu'à l'arrêt du fonctionnement du système (fossilisation) ou l'établissement d'un long équilibre qui les fait basculer dans la troisième catégorie. Schwartz (2004) donne l'exemple des matières organiques fossilisées dans des horizons BP de podzols tropicaux. Dans les sols de vignoble, le cuivre est également un constituant très récalcitrant qui a tendance à l'accumulation.

Les archives transitoires sont les plus courantes. C'est à ce type d'archives qu'appartiennent la plupart des MOS. Elles sont typiques des sols formant des systèmes ouverts, caractérisés par des flux d'entrée et de sortie de matière et d'énergie. Le constituant considéré comme « archive » potentielle a une espérance de vie donnée dans le sol (mesurée

par le temps moyen de résidence). La durée moyenne de l'archivage est liée à la valeur du TMR. Certaines MOS transitent très vite (une saison) tandis que d'autres se conservent plusieurs milliers d'années et constituent de bonnes archives de l'Holocène. Il existe évidemment tous les intermédiaires entre les plus rapides et les plus lentes. Nous avons donc affaire à une échelle temporelle étendue allant du millénaire au mois. Cependant, les matières organiques les plus anciennes sont aussi les plus rares et ne sont pas toujours exploitables, soit parce qu'elles sont trop dégradées et dénaturées, soit parce qu'elles sont difficilement extractibles d'un échantillon dans lequel elles représentent une quantité infime des MOS.

Le fait que ces archives soient renouvelées en permanence pose d'évidents problèmes de datation. Nous l'avons vu dans le chapitre précédent, les dynamiques sont complexes et multiples surtout à l'échelle des constituants. En revanche, elles offrent un enregistrement continu et permettent de suivre des dynamiques à moyen et long terme. Alors qu'une archive événementielle, comme les charbons, permet uniquement de repérer un épisode brutal, les archives transitoires permettent de suivre l'évolution des différentes tendances entre plusieurs événements.

## **2.2. Les constituants d'origine végétale (inventaire non exhaustif)**

### **2.2.1. Les charbons de bois**

L'antracologie est la spécialité qui consiste à étudier l'anatomie des charbons de bois pour en déterminer l'appartenance taxonomique à une espèce, un genre ou une famille botanique. Cette identification peut être complétée par des datations par  $^{14}\text{C}$ , rendue possible pour de petits charbons par la technique de mesure AMS (Accelerator Mass Spectrometry). Cette approche appliquée aux micro-charbons de bois du sol a débuté sous l'impulsion de Thion (1978). Les travaux de Talon *et al.* (1998) et Thion (1992) ont ensuite généralisé cette approche (Fig. 2.1). Depuis quelques années cet outil s'est fortement développé (Carcaillet, 2001a ; Goepp, 2007 ; Pessenda *et al.*, 2001 ; Schwartz *et al.*, 2005).

Les charbons de bois sont des archives événementielles qui témoignent d'épisodes de feu. A la précision spatiale propre aux archives pédologiques s'ajoute une précision redoutable en terme paléoécologique puisqu'il est possible de reconnaître les charbons jusqu'au niveau de l'espèce. En revanche, les conditions de fragmentation dans les différents types de sol sont encore mal connues. Une fragmentation telle que les charbons ne sont plus identifiables est du point de vue méthodologique identique à une dégradation même si les micro-fragments demeurent toujours dans le sol. De plus, le travail considérable que représentent l'extraction et l'identification des charbons pour un seul profil ne permet que rarement de donner une image complète de l'écosystème incendié. La non stratification des micro-charbons liée à la bioturbation (Carcaillet, 2001a ; Schwartz, 1997) oblige également à multiplier les datations coûteuses pour identifier et isoler plusieurs phases de feux dans un même profil.

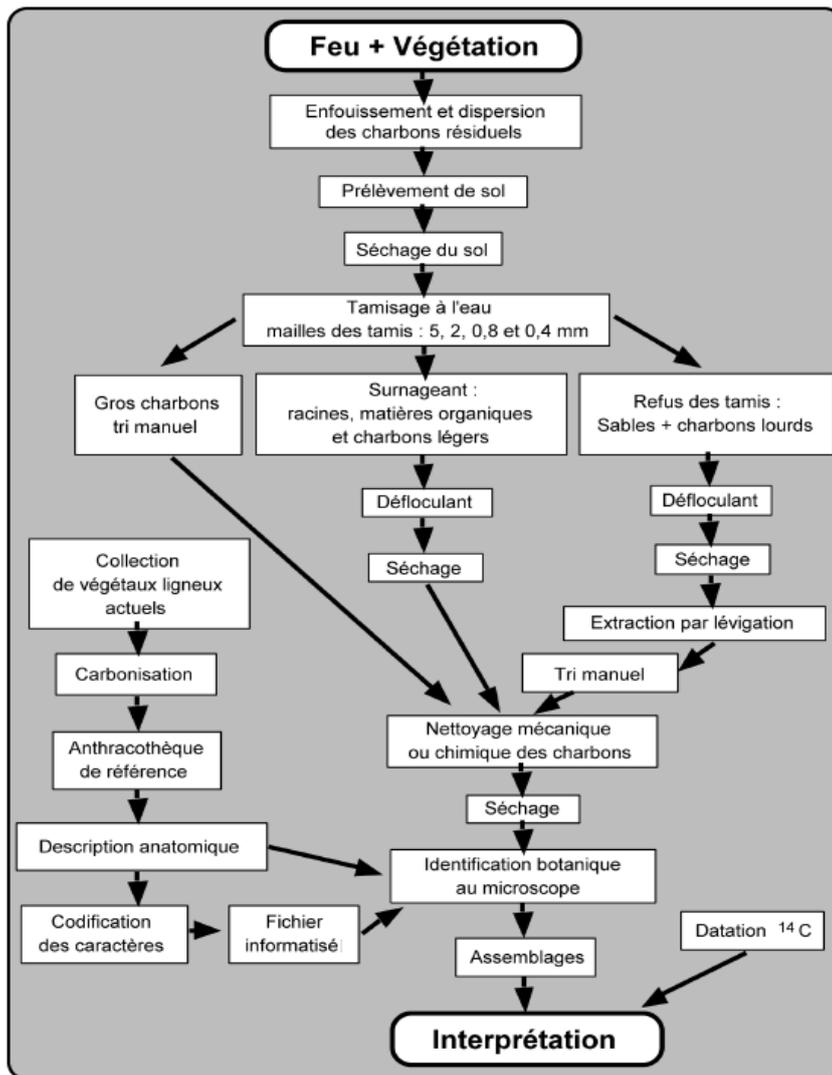


Fig. 2.1 : Schéma synthétique de la méthode pédoanthracologique modifié d'après Thinon, 1992 (Talon et al., 1998).

Les déterminations et les datations peuvent être complétées, lorsque la méthode d'extraction est systématique, par des calculs d'antracomasses qui incluent également les plus petits charbons non identifiables (Carcaillet, 2001a). Goepf (2007) obtient des antracomasses comprises entre quelques mg/kg et 300 mg/kg. Les antracomasses diminuent globalement avec la profondeur mais présentent des pics très émoussés à certaines profondeurs. Carcaillet et Talon (1996) proposent un modèle de diffusion verticale des charbons sur le profil pédologique (Fig. 2.2). Une zone d'abondance se déplace de la surface où les charbons se déposent au moment de l'incendie vers la profondeur où ils sont entraînés par la bioturbation. Ce modèle construit à partir de constituants relativement faciles à pister peut être utilisé par analogie pour d'autres constituants et notamment des constituants organiques plus difficiles à identifier. Il faudra cependant être attentif aux mécanismes de transports qui peuvent différer d'un constituant à l'autre et au mode d'incorporation continu ou événementiel.

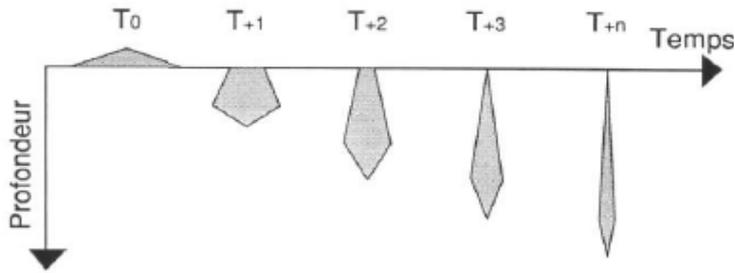


Fig. 2.2 : Hypothèse de répartition sur le profil des charbons de bois issus d'un seul incendie (Carcaillet et Talon, 1996).

$T_0$  correspond à l'accumulation des fragments de charbon de bois après l'incendie. On considère que la masse totale de charbons est invariable en fonction du temps.

### 2.2.2. Les Phytolithes

L'analyse phytolithique est fondée sur l'existence dans les sols de particules siliceuses microscopiques, appelées phytolithes, de la taille des limons (Piperno, 1988). Les phytolithes sont des particules amorphes d'opale A hydratées qui se forment dans les cellules des feuilles ou les espaces intercellulaires des tissus végétaux (Piperno, 1988). Bien que les méthodes d'études ressemblent sous certains aspects à l'étude des pollens (comptage, diagramme..), il faut bien insister sur le fait que les phytolithes ont toutes les caractéristiques des archives pédologiques et en particulier la capacité à fournir une information locale (Bartoli et Guillet, 1977). En effet, les phytolithes sont libérées par les feuilles dans la litière ou dans une moindre mesure par les racines. Donc, ces marqueurs ne sont pas ou peu pris en charge par le vent comme c'est le cas pour les pollens et leur résolution spatiale est comprise entre le mètre et le décimètre.

Les phytolithes sont particulièrement abondantes dans les graminées. Grâce à leur morphologie variée, il est possible de se référer à une typologie précise distinguant différentes sous-familles de Poacées. Les dicotylédones qui produisent nettement moins de phytolithes se distinguent par la production, entre autres, de morphotypes sphériques d'aspect rugueux. Le rapport entre ce morphotype et les phytolithes totaux peut être utilisé pour témoigner d'une végétation plutôt herbacée ou plutôt arborée. L'approche est complémentaire de la pédoanthracologie puisqu'elle n'enregistre pas uniquement les changements brutaux que sont les feux mais elle peut également enregistrer d'autres changements de végétation d'origine climatique ou anthropique (Piperno et Becker, 1996).

La diffusion des phytolithes dans le sol est mal connue. Dans les podzols, Bartoli et Guillet (1977) estiment que le transport des phytolithes est contrôlé par la porosité et suit le chemin de l'eau. Par ailleurs, Alexandre *et al.* (1997) et Goepp (2007) suggèrent, au moins pour les horizons superficiels de sols bruns, que la répartition et les dynamiques de transports des phytolithes sont similaires aux dynamiques des MOS et dominées par la bioturbation. Ils proposent, par conséquent, d'utiliser un modèle bi-compartimental (pool stable et labile) pour expliquer la répartition des phytolithes et raisonner sur leur âge. Goepp (2007) constate

également, à la base de certains profils, des accumulations de phytolithes non corrélées à la matière organique. Elle émet l'hypothèse qu'après entraînement dans les horizons profonds, la dissolution est ralentie et les phytolithes se comportent presque comme des archives cumulatives. En contrepartie, ces phytolithes probablement plus anciennes sont dégradées et le plus souvent impossibles à identifier. En effet, les phytolithes sont malheureusement soumises à des processus de dissolution (Alexandre *et al.*, 1999) et leur conservation est inégale en fonction des milieux. Cette conservation différentielle est même utilisée par Kelly *et al.* (1991) comme marqueur climatique dans les paléosols. La conservation est également inégale en fonction des morphotypes : ceux de conifères se conservent nettement mieux que ceux de graminées et de feuillus (Bartoli et Guillet, 1977). Les phytolithes sont donc des archives transitoires.

### **2.2.3. Biomarqueurs moléculaires**

Parmi les biomarqueurs moléculaires, nous évoquons surtout les lignines et les lipides qui sont des marqueurs que nous avons utilisés comme référence sur certains des profils étudiés. Les lignines représentent une part importante des MOS mais sont facilement dégradées sur le long terme. Présentes uniquement dans les végétaux supérieurs terrestres, ce sont des marqueurs qui permettent de caractériser l'origine de la matière organique (Maman, 1997). Par conséquent, ce sont aussi des outils couramment utilisés pour l'étude des sédiments lacustres ou marins (Gardner et Menzel, 1974 ; Hedges *et al.*, 1982 ; Hedges et Mann, 1979b). Les marqueurs lipidiques représentent une fraction très ténue des MOS mais sont très récalcitrants à la dégradation. Ils se retrouvent dans les pétroles et font de ce fait l'objet de nombreuses études (Hebting *et al.*, 2006). En pédologie, ces approches à l'échelle moléculaire sont moins fréquentes, surtout lorsqu'il s'agit de décrypter des dynamiques passées à moyen et long terme.

#### **2.2.3.1. Les lignines**

La lignine est une substance incrustant les parois épaisses des cellules allongées des tissus de soutien (sclérenchyme) ou recouvrant les tissus conducteurs (xylème) des végétaux supérieurs. Elle est à l'origine de la rigidité du bois. La lignine est formée par la polymérisation de composés phénoliques de type phénylpropane qui présentent une diversité dans leur structure moléculaire. Il en résulte des différences de composition entre les monomères des lignines de Gymnospermes et d'Angiospermes di- et Monocotylédones. Ces différences s'expriment dans la distribution relative des unités de base, vanilliques (V), syringique (S), cinnamiques (C) et p-hydroxybenzoïque (H) (Maman, 1997). S caractérise les Angiospermes, C les Poacées, et V est ubiquiste mais abondant dans les conifères. Ainsi, les rapports C/V et S/V permettent de discriminer les lignines des herbacés, des feuillus et des conifères (Fig. 2.3). Toujours dans sa thèse, Maman (1997) identifie différents épisodes d'érosion de sols et de dépôts de MOS dans les alluvions d'un petit appareil fluvial du Massif Central grâce au rapport S/V et C/V. Guggenberger *et al.* (1994 ; 1995) ont également mesuré les quantités de lignine totale dans différentes fractions (argile, limon, sable) sous différentes occupations du sol.

Ils notent des différences importantes en particulier dans la fraction sableuse. Il n'est pas étonnant que cette fraction qui comprend généralement les MOS les plus jeunes enregistre le mieux des dynamiques à court ou moyen terme. D'autres études se penchent sur la dynamique de la lignine à court terme dans les litières et les horizons superficiels (Coûteaux *et al.*, 1998 ; Kelley *et al.*, 2002 ; Leifeld et Kögel-Knabner, 2005 ; Nierop *et al.*, 2001 ; Spielvogel *et al.*, 2007) ce qui contraste avec des affirmations anciennes, comme quoi les lignines se dégradent peu. Certaines mettent en évidence leur mauvaise conservation et le faible pouvoir de séquestration des sols vis-à-vis de cette catégorie de constituants (Kiem et Kögel-Knabner, 2003 ; Rumpel *et al.*, 2004 ; Spielvogel *et al.*, 2007). Suite aux travaux de Maman sur l'extraction des lignines par électrophorèse capillaire (Maman, 1997 ; Maman *et al.*, 1996), peu d'études paléoenvironnementales ont utilisé cet outil.

Les scénarios à l'échelle pluriséculaire, mis en évidence par des études historiques (Adam, 2002 ; Garnier, 2004 ; Wuscher, 2000), naturalistes (Cloître, 2005 ; Schwartz *et al.*, 2009) et pédoanthracologiques (Goepf, 2007 ; Schwartz *et al.*, 2005), sont pour la plupart confirmés par les rapports S/V et C/V (Martin 2000 ; Casner, 2001). Les horizons profonds, ou plutôt intermédiaires, enregistrent correctement la végétation passée qu'elle soit stable ou changeante à moyen terme. En revanche, le passé forestier ancien de la chaume du Falimont, attesté par la pédoanthracologie, n'est pas confirmé. Ceci est sans doute imputable à un temps moyen de résidence trop faible des lignines dans le sol. Cette faible conservation est également limitante pour l'analyse des horizons profonds dont le rapport lignine/carbone organique est plus faible que dans les horizons superficiels (Kiem et Kögel-Knabner, 2003). Par ailleurs, un profil sous prairie est identifié comme profil « sous forêt » par la méthode en raison de l'abondance des ligneux bas typiques des chaumes vosgiennes : myrtilles (*Vaccinium myrtillus* L.) et callunes (*Calluna vulgaris* L.).

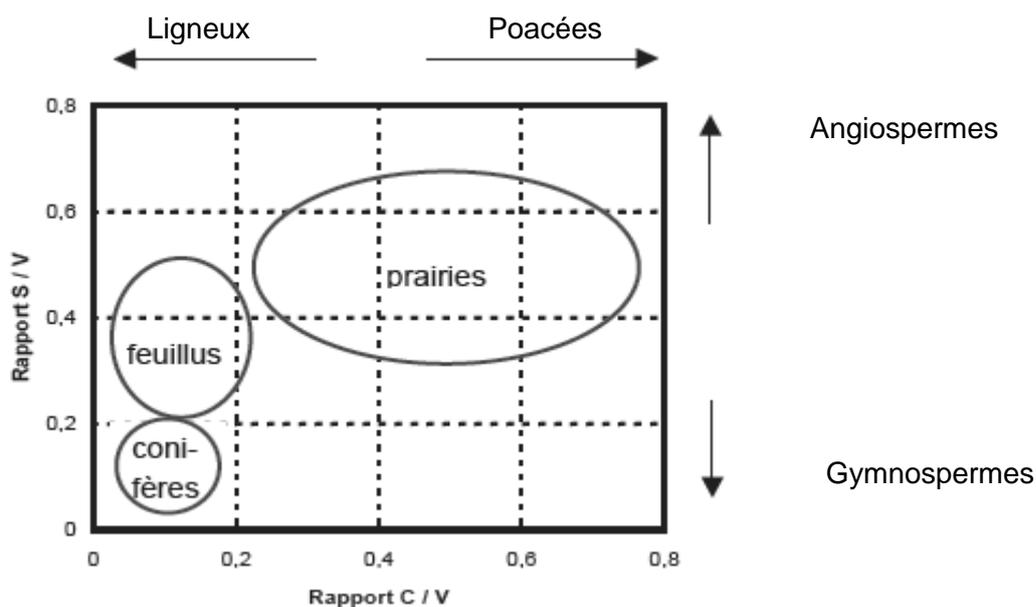


Fig. 2.3 : Distribution des monomères phénoliques de la lignine : rapport S/V en fonction du rapport C/V, d'après Hedges et Mann (1979a).

Ainsi, bien que relativement efficace, cette méthode semble devoir subir des adaptations pour chaque milieu et pour chaque type de sol. De plus, les lignines sont des archives qui transitent assez rapidement. Leur conservation difficile et leur oxydation sur le long terme cantonnent cette méthode à des études à moyen terme à l'échelle de quelques siècles.

### 2.2.3.2. Les lipides

La démarche consiste à identifier un certain nombre de composés (composés aliphatiques, triterpènes polycycliques, stéroïdes, etc.), caractéristiques d'un type de végétation. Ces composés sélectionnés pour leur récalcitrance chimique représentent une fraction très minoritaire de la matière organique du sol.

Les premiers travaux très prometteurs de van Bergen *et al.* (1997) et Bull *et al.* (2000) ont permis de retrouver l'empreinte des occupations du sol sur le site expérimental de Rothamsted (Fig. 2.4). Van Bergen *et al.* (1997) notent que les lipides typiques de l'activité microbienne et typiques de la faune sont faiblement représentés. Ce sont les marqueurs de la végétation qui dominent le spectre des extraits lipidiques totaux analysés. De plus, la comparaison entre des végétaux frais et les sols sous-jacents font état d'une bonne filiation. Cependant la gamme de lipides présents est loin d'être identique. De nombreux biomarqueurs de la végétation disparaissent dans les sols à une profondeur pourtant faible (23 cm). D'autre part, les proportions des biomarqueurs respectifs ne sont pas conservées, probablement en raison de l'absence de prise en compte des intrants racinaires ou d'une dégradation de certaines fractions. L'étude limitée à trois sites et surtout à une seule et même profondeur ne permet malheureusement pas de comprendre la dynamique de ces constituants dans les sols.

A notre connaissance, en dehors de ces travaux, l'analyse des biomarqueurs lipidiques n'a quasiment jamais été utilisée en paléopédologie. De nouveaux développements ont été proposés en marge de cette thèse dans le cadre du projet SPIMOS en collaboration entre une équipe du Laboratoire de Biogéochimie Moléculaire (UMR 7177 du CNRS) et une équipe du laboratoire de géographie de Strasbourg (ERL 7230). Il s'agit d'identifier des molécules organiques spécifiques de certaines essences végétales, susceptibles de se conserver dans les sols. Les lipides des cires cuticulaires (Rieley *et al.*, 1991), les terpénoïdes (Otto *et al.*, 2005), les stéroïdes, les dérivés phénoliques (Ries-Kaut *et al.*, 1988) et les tannins ont été ciblés comme de bons marqueurs potentiels. Certains de ces composés sont très spécifiques. A titre d'exemple, les diterpénoïdes de la série de l'abiétane et du pimarane caractérisent les MOS issues de conifères (Hautevelle *et al.*, 2006 ; Otto et Simoneit, 2001 ; Otto et Wide, 2001). Les triterpénoïdes de la série de l'oléanane, de l'ursane et du lupane proviennent essentiellement des angiospermes (Mahato *et al.*, 1992 ; Pant et Rastogi, 1979). Les méthyléthers pentacycliques des mêmes familles de triterpénoïdes sont des marqueurs spécifiques des Graminées (Jacob *et al.*, 2005 ; Ohmoto *et al.*, 1970). La contribution aux MOS des fougères se reflète par la présence de fernènes (Anderson *et al.*, 1979 ; Arai *et al.*, 1991 ; Niranjan Reddy *et al.*, 2001 ; Tsuzuki *et al.*, 2001), tout comme certains triterpénoïdes de la famille des hopanes

(Arai *et al.*, 1991). Pour l'instant, ces marqueurs ont été testés sur des matières organiques récentes à l'aide de la chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse. Les différentes fractions (hydrocarbures saturés, aromatiques, monocétone, monoalcools) sont obtenues par chromatographie sur gel de silice des extraits organiques totaux.

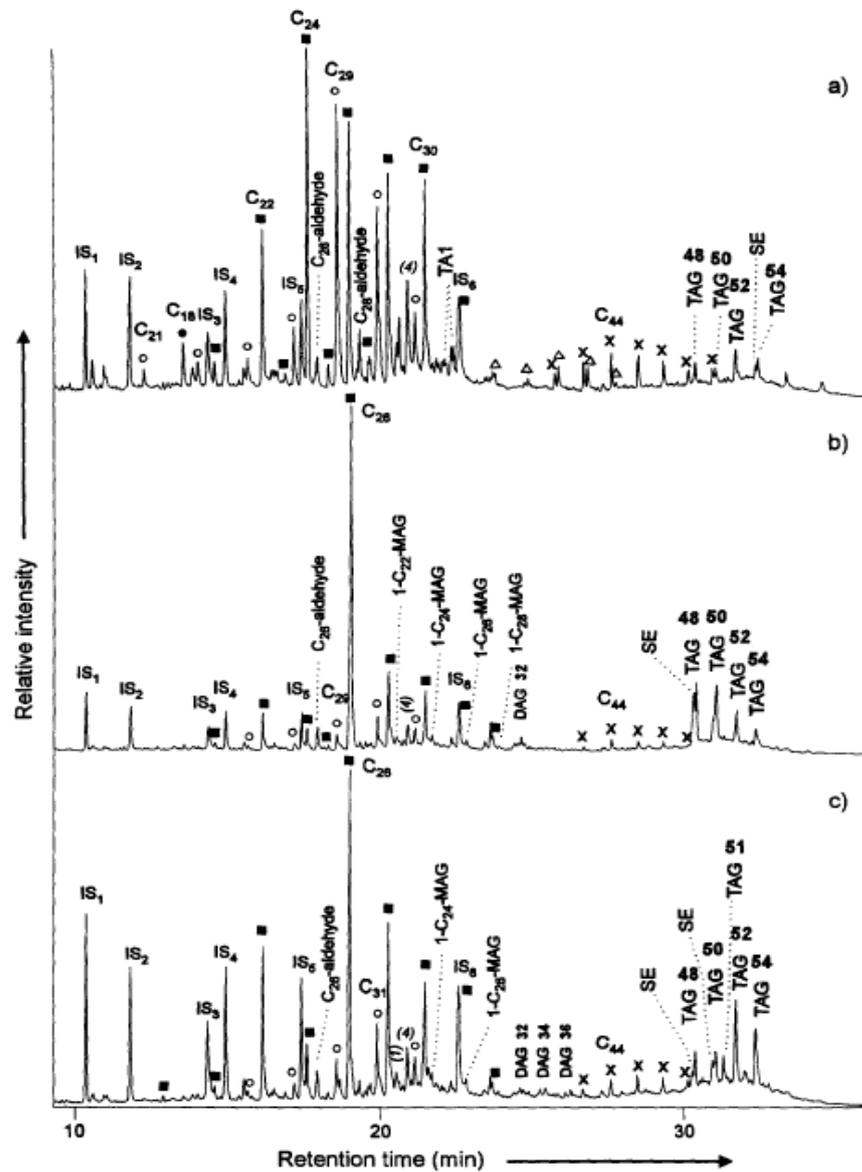


Fig. 2. Partial gas chromatograms of the total lipid extracts from: (a) wooded area soil b; (b) grazed area soil a; and (c) stubbed area soil b. Key: IS<sub>x</sub> = internal standards; ● = fatty acids (FATMS); ○ = *n*-alkanes; ■ = *n*-alkanols; × = wax esters; MAG = monoacylglycerols; DAG = diacylglycerols; TAG = triacylglycerols; TA1 = C<sub>30</sub> triterpenyl acids; △ = compounds with mass fragment ions 177, 192; C<sub>xx</sub> refers to total carbon numbers; numbers in bold indicate total acyl carbons; numbers in parentheses and italics refer to sterols and triterpenols listed in Tables 2 and 3. For additional information and source of the material see text and Table 1.

Fig. 2.4 : Chromatogramme partiel de l'extrait lipidique total sous trois types de végétation (a, b, c) (van Bergen *et al.*, 1997).

### 2.2.3.3. Quelques autres marqueurs moléculaires

D'autres marqueurs moléculaires sont utilisés en pédologie, notamment dans la classe des sucres. Au Congo, Trouvé *et al.* (1996) observent des changements dans la composition des monosaccharides entre des savanes et des plantations d'eucalyptus ayant remplacé des savanes. Le rapport [arabinose + galactose + fructose]/[rhamnose + xylose] est l'indicateur le plus significatif pour suivre ce changement. Ces mêmes monosaccharides sont utilisés par Nierop *et al.* (2001) pour caractériser des successions de végétations pionnières sur des dunes aux Pays-Bas. Malheureusement, ces marqueurs sont fortement biodégradables et conviennent uniquement à l'étude de dynamiques à court terme. Cependant, certains de ces marqueurs mêmes labiles sont susceptibles de se fixer ou plutôt d'être adsorbés sur des argiles ou des oxydes de fer. Sous forme de complexe organo-minéral, ils peuvent se conserver et être séquestrés dans les horizons profonds (Kiem et Kögel-Knabner, 2003).

A des échelles de temps très longues, Vancampenhout *et al.* (2008b) examinent des paléosols pléistocènes. Le degré de dégradation des lipides et des dérivés de la lignine semble limiter leur utilisation comme biomarqueurs de la végétation. En revanche, des biomarqueurs de l'activité microbienne permettent aux auteurs de tirer un certain nombre de conclusions sur les conditions environnementales de la paléopédogénèse.

### 2.2.4. Les marqueurs isotopiques

Le  $^{13}\text{C}$  est produit dans des proportions différentes par les plantes chlorophylliennes en fonction du cycle de photosynthèse. Il en résulte un  $\delta^{13}\text{C}$  différent entre les plantes à cycle en C4 (Poacées et Cyperacées des milieux tropicaux ouverts) et les plantes en C3 (les autres plantes, dont les Poacées des milieux tempérés). Ces marqueurs isotopiques sont donc pertinents en zone tropicale pour suivre les évolutions du contact forêt-savane (de Freitas *et al.*, 2001 ; Delègue *et al.*, 2001 ; Desjardins *et al.*, 1994, 1996 ; Mariotti et Peterschmitt, 1994 ; Pessenda *et al.*, 1996 ; Schwartz *et al.*, 1986, 1992b ; Talbot et Johannessen, 1992). Dans la zone tempérée, l'introduction récente du maïs, une espèce originaire de la zone tropicale sud américaine, a permis d'utiliser le  $^{13}\text{C}$  comme un témoin de la dynamique des MOS (Balesdent *et al.*, 1998). Pour les études paléoenvironnementales en zone tempérée, cette méthode est inopérante puisque l'ensemble des végétaux ont un cycle C3. Le millet cultivé en Europe à partir du Moyen Age constitue une exception avec un cycle C4. Dans le lac du Bourget, les mesures du  $\delta^{13}\text{C}$  sur des sédiments organiques témoignent de la présence dans le bassin versant de plantes en C4 au Moyen Age (Jacob *et al.* 2008). La présence de milacine, un biomarqueur spécifique du millet, confirme l'origine végétale des sédiments.

Le  $\delta^{15}\text{N}$  est plus élevé pour les sols cultivés que pour les sols sous forêts (Riga *et al.*, 1971). Koerner (1999) et Koerner *et al.* (1997) ont utilisé ce marqueur pour différencier des sols sous forêt ayant connu des occupations du sol diverses au XIXe siècle. Les sols sous forêts anciennes ont un  $\delta^{15}\text{N}$  plus faible que les prairies, les champs et les jardins enforestés à la fin

du XIXe siècle (Fig. 2.5). Toutefois ce marqueur n'est pas véritablement un marqueur de la végétation. En effet, l'enrichissement en  $^{15}\text{N}$  est lié à la minéralisation accrue suite au défrichement et au labour, à l'apport de fertilisant d'origine animale ou à l'activation de processus tel le lessivage des nitrates (Koerner *et al.*, 1999b). Il permet de comprendre quel est l'impact anthropique ancien et hérité sur le sol. Malheureusement, d'après les essais de Goepf (2007), cet héritage ne se conserve pas plus que quelques siècles dans les sols en raison du cycle court de l'Azote dans le sol

Parallèlement, Koerner (1999a) et Bürger (2007) utilisent d'autres marqueurs chimiques de l'occupation agricole passée. Les rapports C/N, le pH et le P du sol enregistrent également des variations de l'occupation du sol. Le phosphore est un bon marqueur de la présence de bétail. Une abondance de ce constituant est souvent observée dans des zones de concentration du bétail tels que les enclos. Par ailleurs, ils permettent d'expliquer des différences de fertilité entre différentes parcelles actuelles de forêt. Mais le problème de ce type de marqueurs hormis le phosphore demeure une conservation toujours médiocre dès que l'on passe à une échelle pluriséculaire.

En écho à ce type de marqueur, une étude pointue de la végétation actuelle et de ses exigences édaphiques, permet également de retrouver des traits caractéristiques de pratiques agricoles anciennes (Dupouey *et al.*, 2007 ; Koerner *et al.*, 1997). Des études micromorphologiques des horizons supérieurs permettent quant à elles de repérer des traits caractéristiques du labour (Gebhardt, 2007).

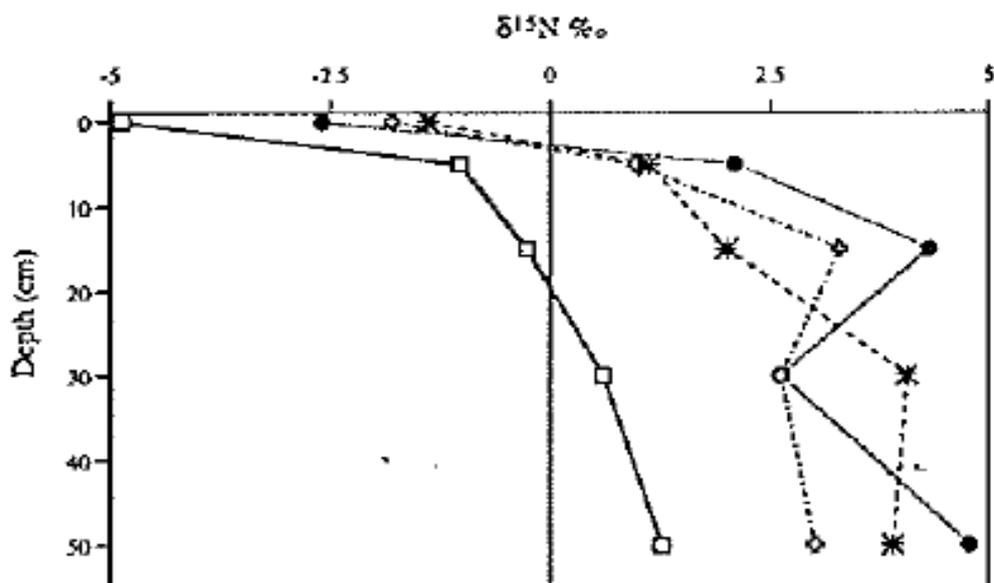


Fig. 2.5 : Variations du rapport  $\delta^{15}\text{N}$  en fonction des différents types d'occupation du sol ayant précédés l'enforestation (Koerner *et al.*, 1997).

(●) jardin, (○) céréales (x) pâturages (□) forêt

### 2.2.5. Les pollens dans les sols.

Les pollens sont des archives pédologiques particulières parce qu'ils n'offrent pas une signature de la végétation à l'échelle de la station (décamétrique). Les pollens sont transportés par le vent à des échelles régionales ou locales (hectométrique) avant de se déposer à la surface du sol. Dès les années soixante et soixante-dix, plusieurs études des pollens dans les sols ont été conduites (Munaut, 1967). Dans les Vosges, plusieurs profils ont été étudiés par Guillet (1972) et De Valk (1981). Guillet s'est concentré sur l'étude des podzols (WRB, 2006), tandis que De Valk s'est cantonné au massif du Kastelberg recouvert de sols bruns acides (cambisol, WRB, 2006) et de rankers cryptopodzoliques (umbrisol, WRB, 2006). Dès le début, Munaut a attiré l'attention sur la grande prudence à apporter dans l'interprétation de diagrammes polliniques dans les sols. Deux problèmes majeurs sont à soulever :

- Les sols soumis à une forte activité de la pédofaune et par conséquent à une forte bioturbation sont impossibles à aborder du point de vue stratigraphique. La non prise en compte de ces processus peut mener à de nombreuses erreurs d'interprétation. Grâce à l'observation des pollens par micromorphologie, Davidson *et al.* (1999), ont mis en évidence qu'une part importante des pollens incorporés au sol sont localisés dans les excréments. Ceci démontre un remaniement vertical aléatoire des pollens par la faune. L'étude de cinq types de sols différents par Davidson *et al.* confirme que seul les tourbes, cas particulier de sol, et dans une moindre mesure les podzols qui sont faiblement affectés par la bioturbation sont susceptibles de livrer des diagrammes polliniques stratifiés.
- Le second problème concerne la conservation des pollens dans les sols. Une part non négligeable des pollens, riches en azote, sont rapidement décomposés par la masse microbienne (Webster *et al.*, 2008). L'alternance de phases d'humidité et de sécheresse ainsi qu'un milieu bien aéré sont défavorables à la conservation des pollens. De plus, la résistance à la biodégradation n'est pas la même en fonction des taxons.

Par conséquent, à l'inverse des pollens dans les sédiments, les pollens dans les sols sont des archives transitoires non stratifiées comme la grande majorité des constituants dans les sols. L'apport de la palynologie dans les sols est ainsi médiocre comparée à la robustesse de l'outil dans les formations sédimentaires ou assimilées telles que les tourbes. Dans ce chapitre, nous n'évoquerons pas d'avantage les nombreuses données palynologiques d'origines sédimentaires parce que l'échelle d'étude, au mieux hectométrique (Jackson et Kearsley, 1998 ; Tipping *et al.*, 2009) est incompatible avec notre échelle d'étude stationnelle (décamétrique). Nous insistons sur ce contraste entre les échelles d'étude, même s'il est relativement faible, parce que seul le passage à une résolution inférieure au décimètre permet véritablement de suivre l'évolution des écotones et de leurs dynamiques.

## Conclusion

La gamme d'outils pour décrypter le passé de la végétation dans les sols est déjà large. La qualité de la plupart de ces méthodes n'est pas remise en cause. Cependant, plusieurs limites d'ordre méthodologique ou pratique sont à relever.

Premièrement, les méthodes ont toutes des limites chronologiques contraignantes. La plupart des marqueurs deviennent délicats à observer ou à analyser au-delà de quelques siècles. De ce point de vue, les charbons de bois semblent les plus aptes à conserver une histoire plurimillénaire. Certains constituants organiques ont également un temps de résidence plurimillénaire dans les sols. Cependant, il reste encore beaucoup à faire pour mieux les mettre en évidence et les interpréter en termes de paléoenvironnement. Deuxièmement, bon nombre des méthodes présentées ne sont pas ou difficilement transférables d'un milieu à l'autre. L'identification des charbons, des phytolithes ou des biomarqueurs nécessitent la construction de nouveaux référentiels adaptés aux nouveaux milieux explorés tandis que les méthodes isotopiques tel que le  $^{13}\text{C}$  sont tout simplement inopérantes en milieu tempéré. De même, certains marqueurs sont absents de certains sols pour des raisons écologiques ou pour des raisons de conservation.

Du point de vue pratique, la quasi totalité des méthodes présentées est extrêmement chronophage. La pédoanthracologie, la palynologie, l'étude des biomarqueurs et l'analyse des phytolithes sont parmi les plus coûteuses en temps. De plus, elles demandent un niveau élevé de qualification qui se traduit par la rareté des spécialistes et leurs faibles disponibilités. Il en résulte des données trop souvent ponctuelles.

Les limites évoquées ci-dessus dessinent le contexte favorable au développement d'une nouvelle méthode, plus rapide et plus efficace. C'est dans ce contexte qu'est née l'idée de l'utilisation de la SPIR, un outil rendu très accessible par de nombreux développements industriels, pour décrypter les matières organiques du sol en tant qu'archives pédologiques. Avec la spectroscopie proche infrarouge, nous espérons développer un outil complémentaire plus universel et plus facile à manipuler. Nous n'échapperons pas aux contraintes de conservation ni aux contraintes de changement de milieux, mais nous espérons grâce aux matières organiques anciennes repousser certaines limites chronologiques et grâce à la rapidité et la simplicité de l'outil spectroscopique construire des référentiels à la fois solides et flexibles.

Dans notre démarche de mise au point, nous serons amenés à confronter nos résultats à plusieurs des méthodes décrites ci-dessus. Parmi les nombreuses données dont nous disposons déjà dans le massif vosgien, les plus fiables seront utilisées comme références pour calibrer ou pour valider les données spectroscopiques.



# LA SPECTROSCOPIE DANS LE PROCHE INFRAROUGE ET SES APPLICATIONS EN SCIENCE DU SOL: UN ETAT DE L'ART

Ce chapitre a pour objectif de présenter l'étendue des applications et des études déjà menées en spectroscopie proche infrarouge (SPIR) et d'en dégager les points susceptibles d'éclairer notre travail. Après quelques rappels sur les principes chimiques et physiques de la réflexion diffuse dans le proche infrarouge, nous proposons un bref historique de cette technique, puis une revue bibliographique. Cette revue balaye d'abord rapidement le champ des applications industrielles toutes disciplines confondues et les études menées dans le domaine de l'environnement. Puis une analyse critique, spécifique aux publications en science du sol, complète et fait écho à une synthèse consacrée à la SPIR en tant qu'outil de gestion des sols récemment publiée par Cécillon *et al.* (2009a). Nous distinguons les très nombreuses applications quantitatives et les applications qualitatives, plus éparses mais auxquelles nous consacrons une revue la plus exhaustive possible. Pour finir, nous examinons quelques travaux comparatifs pour dégager les avantages et les inconvénients du proche infrarouge au regard des autres méthodes spectroscopiques.

### 3.1. Principes de la SPIR

La SPIR est fondée sur la mesure de l'intensité de la réflectance (ou plus rarement de la transmittance) de la lumière proche infrarouge par un échantillon. Cette réflectance (R), mesurée sur chaque bande de longueur d'onde d'une largeur de 0,5 nm pour les appareils les plus performants, est convertie en absorbance (A) par la formule :

$$A = \log [1/R]$$

La lumière proche infrarouge (Fig. 3.1) s'étend sur une gamme allant de 780 nm (limite avec le visible) à 2500 nm (limite avec le moyen infrarouge) (Sheppard *et al.*, 1985). On peut distinguer le très proche infrarouge (780-1100 nm) du proche infrarouge (1100-2500 nm)

(Schimann *et al.*, 2007 ; Viscarra Rossel *et al.*, 2006a). C'est ce dernier que nous utiliserons par la suite. Les limites précises entre les différentes gammes d'infrarouge (très proche, proche, moyen) n'ont pas d'explications physiques mais sont définies par convention (Sheppard *et al.*, 1985) et correspondent le plus souvent aux limites techniques des spectromètres. Les spectres infrarouge résultent des vibrations des liaisons moléculaires O-H, N-H, et C=O (Ciurczack, 2001). L'absorbance dans le proche infrarouge est faible parce qu'elle résulte non pas des vibrations fondamentales, qui se produisent dans l'infrarouge moyen, mais des harmoniques et des combinaisons de vibrations fondamentales, sorte de résonance de plus faible intensité.

Il existe une relation étroite entre le spectre proche infrarouge et la composition biochimique d'un échantillon (Gillon et David, 2001). En excluant certaines liaisons O-H, caractéristiques de l'eau, le spectre du proche infrarouge (Fig. 3.2) peut être considéré comme une « empreinte digitale » de la matière organique (Coûteaux *et al.*, 2003 ; Hindle, 2001 ; Palmborg et Nordgren, 1996). Cette empreinte digitale est particulièrement fidèle pour les matériaux purement organiques ou à très forte teneur en matière organique. Mais elle est également sensible à des constituants dont la teneur dépasse à peine 1 % du matériau analysé (Wetzel, 1983). D'autre part, les matériaux siliceux tel que le quartz sont totalement transparents dans le proche infrarouge (Coûteaux *et al.*, 2003) et n'ont aucune influence sur le spectre.

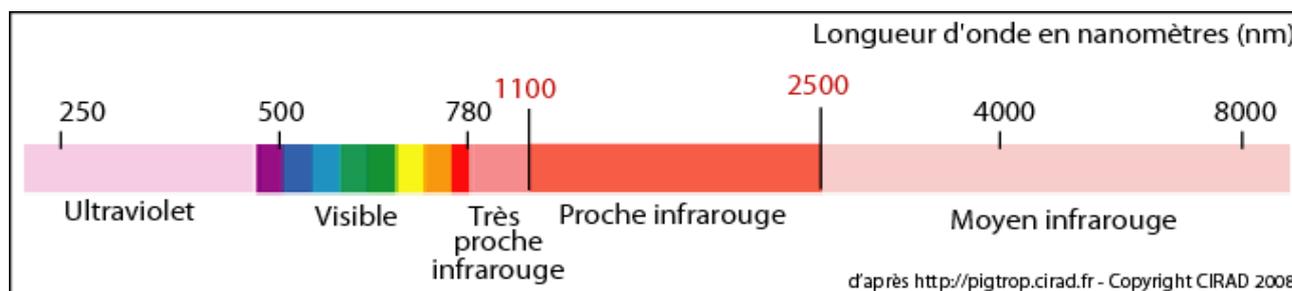


Fig. 3.1 : Les différentes zones du spectre électromagnétique.

Des interprétations qualitatives sont possibles directement par l'observation visuelle de certains segments du spectre (Stoner et Baumgardner, 1981). C'est le cas par exemple pour la reconnaissance de certains minéraux (Clark *et al.*, 1990). L'abondance de certains composés peut également être estimée visuellement dans le cas de mélanges simples. En revanche, pour les matériaux complexes tels les sols, l'estimation directe est impossible (Cécillon *et al.* 2009a). L'analyse du spectre est généralement effectuée à l'aide de méthodes statistiques multivariées regroupées sous le nom de méthodes chimiométriques (Geladi, 2003). Ce sont d'une part des méthodes discriminantes pour les études qualitatives qui s'attachent à reconnaître des différences entre deux spectres et d'autre part des méthodes de régression pour les études quantitatives qui s'appuient toujours sur une méthode de référence (Cécillon *et al.*, 2009a).

Dans le proche infrarouge, il n'est pas possible d'associer directement un composé organique ou un type de liaison moléculaire à une longueur d'onde selon la méthode

traditionnellement utilisée en infrarouge. Les harmoniques et les combinaisons de vibrations se superposent dans le proche infrarouge pour former un spectre complexe. Seul l'eau dispose de trois pics bien identifiés, centrés sur 1400, 1900 et 2200 nm (Russell, 2003) ; cependant d'autres liaisons moléculaires interagissent sur ces trois bandes (Ben-Dor *et al.*, 1997 ; Fourty *et al.*, 1996 ; Shenk *et al.*, 2001). Les méthodes de la chimiométrie qui s'appuient sur des outils statistiques permettent de reconnaître un composant ou de prédire sa teneur en utilisant tout ou partie du spectre sans passer par l'analyse de la structure chimique du composant. Il est possible de reconnaître un composant tout en ignorant sa nature à condition de disposer d'un lot d'échantillons de référence analysés par une méthode de référence. Certaines études ont tout de même pu établir des correspondances entre des liaisons moléculaires ou des groupes fonctionnels et des bandes spectrales (Ali *et al.*, 2001 ; Ben-Dor *et al.*, 1997 ; Dalal et Henry, 1986 ; Fourty *et al.*, 1996 ; Roggo *et al.*, 2004 ; Shenk *et al.*, 2001). Bien que ces résultats n'aient pas valeur de référence, nous en proposons une table de synthèse en annexe 2A.

Les propriétés physiques du matériau telles que la taille et la forme des particules, les vides entre les particules et l'agencement des particules influencent la mesure (Barnes *et al.*, 1989 ; Bowers et Hanks, 1965 ; Russell, 2003). Il existe des traitements mathématiques du spectre (standardisation, dérivés) qui sont connus pour éliminer ou réduire les effets des paramètres physiques (Barnes *et al.*, 1989).

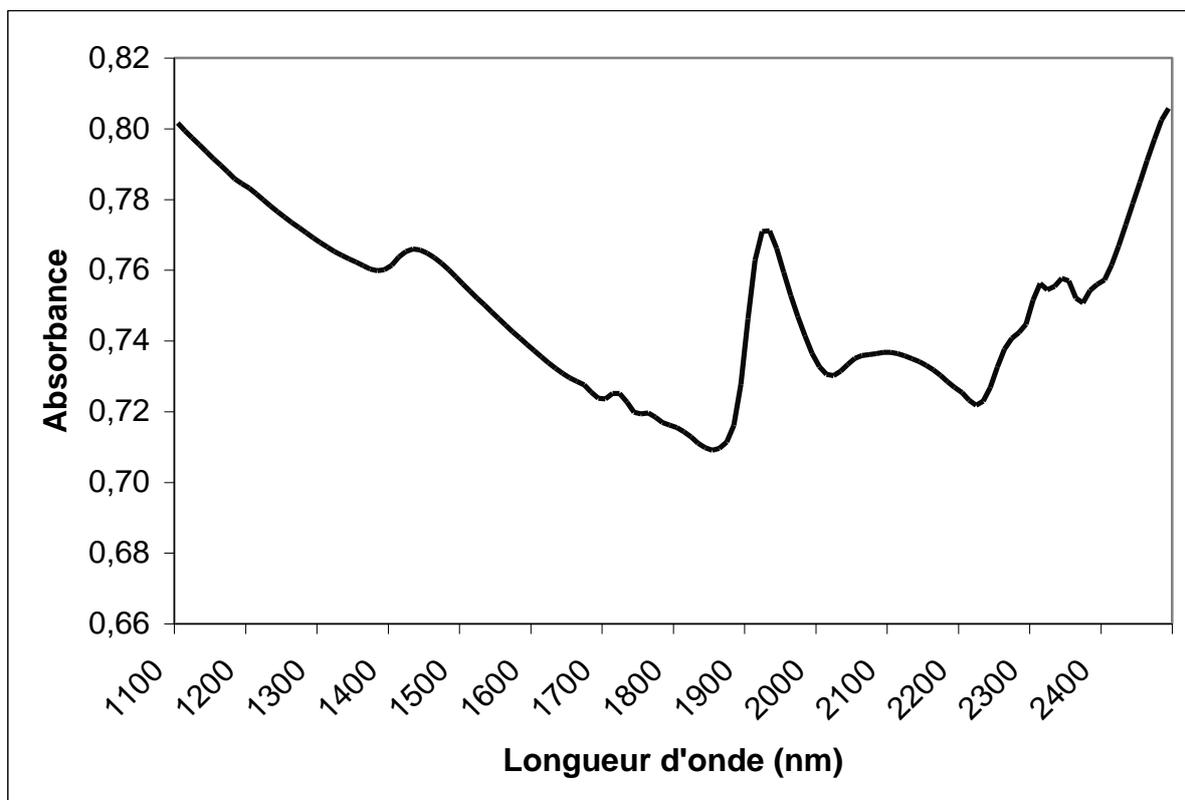


Fig. 3.2 : Exemple de spectre proche infrarouge mesuré en laboratoire sur un échantillon de sol (infra).

## 3.2 Bref historique

La découverte du rayonnement infrarouge est attribuée à William Herschel qui publia ses travaux en 1800. Cet astronome est le premier à constater à l'aide d'un prisme la production de chaleur au-delà de la couleur rouge (Ciurczack, 2001 ; Hindle, 2001). Ampère démontre ensuite (1835) que les propriétés du rayonnement infrarouge sont semblables à celle du visible. Dès 1860, Kirchoff reconnaît le spectre de nombreux éléments. A la fin du XIXe siècle, de nombreux travaux (Wien, Rayleigh-Jeans...) permettent de formuler les lois du spectre électromagnétique ponctuées en 1901 par la publication de la loi spectrale du rayonnement d'un corps noir de Max Planck (Hindle, 2001).

A partir de 1905, W.W. Coblentz publie les spectres de plusieurs centaines de composés chimiques et note que chaque composé possède un spectre unique. Il parvient à distinguer deux composés de structures différentes mais formés des mêmes atomes. Il note également des longueurs d'onde sensibles à certains groupes fonctionnels tel –OH (Ciurczack, 2001).

Une fois les verrous de la physique surmontés, la SPIR va connaître peu de développement dans les deux premiers tiers du XXe siècle. Il faut attendre les années soixante-dix et la convergence des progrès technologiques (spectromètre), statistiques (analyse multivariée) et informatiques appuyés par une forte demande industrielle pour voir se développer les applications de la SPIR. Les premières applications stimulées par les travaux de Ben-Gera et Norris (1968) consistent à mesurer la quantité des composants majeurs présents dans des produits agricoles tels que le blé. Ces applications sont rapidement suivies de l'apparition aux Etats-Unis puis en Europe des premiers spectromètres multi-bandes (Wetzel, 1983). Au début des années quatre-vingt, la spectroscopie proche infrarouge est encore décrite par Wetzel (1983) comme une technologie « dormante » et sous-exploitée. Elle est peu considérée par les spécialistes de la chimie analytique et dénigrée par les nombreux spectroscopistes attachés à l'infrarouge classique (correspondant à l'infrarouge moyen) jugé plus fiable et plus rationnel parce que non inféodé aux méthodes statistiques. Dans les années quatre-vingt et quatre-vingt-dix, la SPIR doit en grande partie son fort développement à l'intérêt croissant de l'industrie pour cette méthode rapide et économique. Ce n'est qu'à la fin des années quatre-vingt-dix et dans les années deux mille que de nombreux chercheurs s'initient à cette technologie en-dehors du giron industriel. Les premières études dans le domaine de l'environnement et de l'écologie sont encourageantes (Foley *et al.*, 1998 ; Joffre *et al.*, 2001) et se propagent rapidement à la science du sol.

## 3.3. Diversité des applications

La SPIR a connu ses premières applications industrielles aux Etats-Unis il y a déjà quarante ans avec l'analyse de la teneur en eau des semences (Ben Gera et Norris, 1968) rapidement suivie par l'analyse de la qualité des fourrages, du soja et du blé. La technologie

s'est rapidement étendue à toute l'industrie agroalimentaire et est le plus souvent utilisée comme outil de contrôle de la qualité aussi bien par les industriels que par les instances de contrôle. Un capteur est placé en bout de chaîne de production pour vérifier la conformité du produit. L'application la plus simple consiste à déterminer une signature spectrale type d'un produit et à écarter les lots dont la signature est non conforme au standard. Les développements de la SPIR ont concerné pratiquement tous les secteurs industriels utilisant ou produisant de la matière organique. Parmi les domaines d'application, on trouve l'analyse de produits pharmaceutiques, pétroliers, textiles, polymères ... (Ghosh et Rodgers, 2001 ; Roggo *et al.*, 2007 ; Zhao *et al.*, 2006).

Plus récemment, des études se sont tournées vers des produits moins standardisés tel que le fromage, le vin ou l'huile d'olive (Cozzolino *et al.*, 2008 ; Galtier *et al.*, 2007 ; González-Martín *et al.*, 2007 ; Urbano-Cuadrado *et al.*, 2004). Galtier *et al.* (2007) ont réussi à identifier dans le spectre l'origine géographique de différentes huiles d'olive laissant entrevoir un fort potentiel de contrôle des AOC par la SPIR. D'autre part, Bellon-Maurel *et al.* (2003) ont mis au point un gant muni d'un capteur proche infrarouge pour détecter la teneur en sucre des fruits.

Dans le domaine de l'environnement, des études ont été menées en sédimentologie lacustre (Rosén, 2005), fluviatile (Kooistra *et al.*, 2003) et dans des tourbières (McTiernan *et al.*, 1998), en biologie sur des feuilles (Fourty *et al.*, 1996 ; Hiukka, 1998), sur la teneur en carbone, azote et phosphore des plantes (Gillon *et al.*, 1999), sur la maturité des composts (Albrecht *et al.*, 2008 ; Thuriès *et al.*, 2007) et la vitesse de décomposition des litières (Coûteaux *et al.*, 1998 ; Gillon et Joffre, 1992 ; Joffre *et al.*, 1992 ; McTiernan *et al.*, 2003 ; Richardson *et al.*, 2004). Dans le domaine de la télédétection, l'apparition d'images hyperspectrales à très haute résolution, y compris dans le proche infrarouge, a permis aux spécialistes de l'analyse spatiale et de la cartographie de bénéficier des progrès de la SPIR (Grossman *et al.*, 1996).

### **3.4. Les applications en science du sol**

Les calculs de bilan de carbone à l'échelle de la planète, d'une part, et la nécessité de mieux connaître les sols pour les protéger d'autre part, requièrent de plus en plus de données sur la matière organique des sols. Ces besoins croissants sont les principaux leviers du développement de la SPIR en science du sol depuis une dizaine d'années.

#### **3.4.1 Principales approches**

La SPIR présente l'énorme avantage de prédire la teneur de plusieurs éléments (C, N, P, C organique, Ca, etc.) à partir d'une même mesure. Cécillon *et al.* (2009a) proposent une revue presque exhaustive des applications de la SPIR en science du sol, faisant référence à 76 articles dont 60 dans les années 2000. Ils distinguent trois types de mesures : les mesures en laboratoire (49 articles), les mesures de terrain (8) et les mesures par télédétection (19).

Plusieurs auteurs ont confronté les différentes approches (Gomez *et al.*, 2008 ; Lagacherie *et al.*, 2008 ; Stevens *et al.*, 2008). Les techniques de télédétection sont limitées à la partie très superficielle de sols nus et les mesures de terrain sont contraintes par l'hétérogénéité des conditions d'humidité et par les variations des propriétés physiques du sol. La mesure en laboratoire est largement la plus répandue et la seule que nous utilisons dans nos travaux.

Une des questions restée longtemps en suspens est le choix des bandes spectrales les plus efficaces. Al-Abbas *et al.* (1972) mettent en évidence que certaines longueurs d'onde sont spécialement réactives à la matière organique tandis que Ben-Dor et Banin (1995) montrent que la matière organique est active sur l'ensemble du spectre infrarouge. Dalal et Henry (1986) utilisent des longueurs d'onde bien précises (1744, 1870, et 2052 nm) pour calibrer la prédiction du carbone sur une population homogène d'échantillons de sols. Mais Henderson *et al.* (1992) trouvent une bonne corrélation avec la teneur en C sur d'autres longueurs d'onde dans le proche infrarouge pour une autre population homogène d'échantillons (1065, 1085-1105, 1125-1165, 1955-1965, 2215, 2265, 2285-2295, 2315, 2335-2365, 2385-2415, 2435 et 2495 nm). D'autre part, Dalal et Henry (1986) sélectionnent des longueurs d'ondes très précises pour calibrer un modèle de prédiction de la teneur en eau (1926, 1954 et 2150 nm) tandis que Henderson *et al.* (1992) retiennent des bandes plus larges. Howard (2001) prenant comme exemple une étude qualitative sur des variétés de blé recommande plutôt de travailler sur quelques bandes. Ceci permet de réduire l'effet du bruit du spectromètre et de limiter la masse de calcul. Mais les conditions nécessaires à cette approche, et notamment la répartition normale de la population d'échantillons sur chaque bande spectrale, sont rarement satisfaites avec des matériaux aussi hétérogènes que les sols. Ainsi, la masse de données traitées n'étant plus un facteur limitant, la tendance récente et quasiment exclusive est à l'utilisation de l'ensemble du spectre.

Ces différentes sélections de bandes de longueur d'onde laissent entrevoir, d'une part la grande complexité du spectre, liée à la complexité chimique de la matière organique d'un sol (*cf.* chapitre 2) et d'autre part des différences dans les résolutions spectrales utilisées. Dalal et Henry (1986) utilisent la résolution maximale des spectromètres (2 nm), tandis que Henderson *et al.* (1992) et Velasquez *et al.* (2005) se contentent respectivement d'une résolution de 5 et 10 nm. La résolution fournie par l'appareil et annoncée par le constructeur ne correspond pas toujours à la résolution réelle du spectromètre. De plus, en réduisant la résolution à 10 nm on s'aperçoit qu'aucun des pics ne disparaît et que les résultats obtenus sont souvent identiques.

Des sols de tous les grands types de milieux bioclimatiques ont fait l'objet d'études par la SPIR (Lobell et Asner, 2002) : les milieux arctiques et subarctiques (Rinnan et Rinnan, 2007 ; Stolter *et al.*, 2006), les milieux tempérés (Ertlen *et al.*, 2008a), les milieux méditerranéens (Cécillon *et al.*, 2008 ; Guerrero *et al.*, 2007), les milieux arides (Ben-Dor et Banin, 1995) et les milieux tropicaux (Barthès *et al.*, 2008 ; Moron et Cozzolino, 2002 ; Mutuo *et al.*, 2006 ; Shepherd *et al.*, 2003). La plupart des travaux se concentrent sur les horizons de surface de sols cultivés (Brown *et al.*, 2005 ; Confalonieri *et al.*, 2001 ; Stevens *et al.*, 2008). Quelques

travaux portent sur les sols forestiers (Chodak *et al.*, 2002 ; Coûteaux *et al.*, 2003 ; Ludwig *et al.*, 2002 ; Palmberg et Nordgren, 1996) et leurs litières (Gillon et Joffre, 1992 ; Joffre *et al.*, 1992 ; McTiernan *et al.*, 2003). Les horizons profonds sont, en revanche, très peu étudiés à l'exception de Brown *et al.* (2005) et Dunn (2002).

### 3.4.2 Approche quantitative en science du sol

L'approche la plus répandue est la mesure quantitative des éléments organiques des sols. L'objectif de ces recherches est, le plus souvent, de remplacer une méthode chimique coûteuse et fastidieuse par une prédiction rapide via une mesure de réflectance dans le proche infrarouge (Barthès *et al.*, 2006 ; Brunet *et al.*, 2008 ; Hartmann et Appel, 2006 ; McBratney *et al.*, 2006 ; Reeves III *et al.*, 2002 ; Vågen *et al.*, 2005). Cette prédiction ne peut pas se faire sans un certain nombre de mesures chimiques de référence nécessaires à l'établissement d'une équation de calibration d'une part et d'une étape de validation d'autre part (Martens et Dardenne, 1998). Par conséquent elle est particulièrement utile pour estimer des concentrations sur une vaste population d'échantillons.

Les premiers travaux sur les sols (Bowers et Hanks, 1965) ont mis en évidence la forte influence sur le spectre infrarouge de la teneur en eau, la teneur en matière organique et la taille des particules. Al-Abbas *et al.* (1972) ont ensuite mis en évidence certaines longueurs d'onde permettant de prédire efficacement le taux de matière organique dans les sols. (Dalal et Henry, 1986) ont montré qu'il était possible de mesurer simultanément le taux d'humidité, le carbone organique et l'azote. Ils ont tout de même souligné les faiblesses de la méthode lorsque les teneurs en carbone et en azote sont très faibles ( $C < 0,3 \%$ , et  $N < 0,03 \%$ ) et lorsque la gamme des couleurs dans le visible est trop large. Cependant, Cousteaux *et al.* (2003) notent que parmi la fraction non organique d'un sol, le quartz représente souvent une large proportion ; or celui-ci est transparent dans le proche infrarouge. Ce sont principalement les minéraux argileux qui interfèrent avec le signal de la matière organique. Par conséquent, la qualité de la prédiction dépend de la quantité de matière organique et des propriétés de la fraction minérale. D'autre part, Reeves III *et al.* (1999) obtiennent de bons résultats sur la prédiction du carbone et de l'azote pour des sols à faibles teneurs en matière organique.

Les nombreuses études récentes montrent qu'il est possible de prédire une large gamme de caractéristiques des sols. Concernant les mesures chimiques, Malley *et al.* (1999) obtiennent des résultats positifs pour P, S, Ca, Mg, Na, K, Fe et Mn ainsi que pour le pH. Chang *et al.* (2001) présentent des résultats satisfaisants pour la prédiction du taux de carbone total et de l'azote total. De plus, Ludwig *et al.* (2002) obtiennent de bons résultats pour le rapport C/N. Dunn *et al.* (2002) et Genot *et al.* (2007) montrent qu'il est possible de prédire la capacité d'échange cationique (CEC), la teneur en Ca et Mg échangeables et le rapport Ca/Mg. Les prédictions du carbone par télédétection sont encore insuffisantes mais devraient encore bénéficier de progrès techniques dans les années à venir (Gomez *et al.*, 2008 ; Stevens *et al.*, 2008). Notons que parmi les propriétés de la matière organique testée, seule la prédiction de P

échoue totalement. Quant à la mesure quantitative des minéraux, théoriquement difficile, elle a été réussie uniquement sur des mélanges artificiels avec une fraction organique parfaitement homogène (Viscarra Rossel *et al.*, 2006b).

Parmi les facteurs physiques, la teneur en eau est facilement prédite (Ben-Gera et Norris, 1968 ; Chang *et al.*, 2001 ; Mouazen *et al.*, 2006) ainsi que les grandes fractions granulométriques : sable, limon, argile, (Chang *et al.*, 2001 ; Lagacherie *et al.*, 2008). Plusieurs paramètres biologiques comme la masse microbienne ou la respiration du sol sont également prédits avec succès (Cécillon *et al.*, 2008). Chang *et al.* (2001) distinguent d'une part les propriétés « primaires » dont la prédiction a une explication physique (taille des particules par exemple) et d'autre part des propriétés « secondaires » comme la CEC qui est prédite avec succès parce qu'elle est fortement corrélée à plusieurs propriétés « primaires » (argile, eau, carbone total). Le nombre déjà non négligeable de propriétés « primaires » prédictibles par la SPIR est ainsi augmenté d'autant de propriétés dépendantes de ces dernières. Cécillon *et al.* (2009) proposent une table de synthèse (Annexe 2B) des propriétés physiques, chimiques et biologiques qui ont déjà fait l'objet d'études par la SPIR.

Tandis que Malley *et al.* (1999) recommandent une large variété de sols pour la calibration, Dunn *et al.* (2002) et Chang *et al.* (2001) se limitent à des populations d'échantillons provenant d'un secteur homogène du point de vue pédologique. Chodak *et al.* (2002) confirment de leur côté de bons résultats de prédiction sur des sols sous différents couverts forestiers. Le fait de mêler horizons profonds et horizons de surface ne semble pas altérer la prédiction (Dunn *et al.*, 2002). Le défi est maintenant de développer une banque de données spectrales permettant de décrire un grand nombre de sols, ce à quoi se sont déjà attachés Chang *et al.* (2001) et Shepherd et Walsh (2002) à des échelles régionales et plus récemment à l'échelle planétaire (Viscarra Rossel, 2008). De manière générale, la qualité de la prédiction d'éléments chimiques diminue lorsque l'hétérogénéité de la population augmente (Brunet *et al.*, 2007). Mais cette hétérogénéité peut être compensée par plus de mesures de référence ou par des méthodes de calibration plus pointues dites « locales » qui consistent à calculer une nouvelle équation pour chaque prédiction en privilégiant dans le calcul les échantillons de références ayant un spectre proche de l'échantillon prédit (Genot *et al.*, 2007).

Les approches quantitatives sont nombreuses et proposent des résultats convaincants. Mais jusqu'à présent, la plupart des études est consacrée à des développements méthodologiques. La SPIR constitue encore un objet de recherche et non pas un outil d'analyse opérationnel. Les gestionnaires et les chercheurs ne se sont pas encore appropriés la SPIR sans doute par manque de standardisation et de synthèse. Les efforts de Fernández Pierna et Dardenne (2008), Viscarra Rossel (2008) et Cécillon *et al.* (2009a) devraient à l'avenir faciliter le développement de cette technologie.

### 3.4.3. Approche qualitative en science du sol

En dehors de l'utilisation de la SPIR comme outil de prédiction quantitatif, quelques rares approches ont tenté d'extraire des informations qualitatives sur les sols à partir de données spectrales. Par qualitatif, nous entendons la reconnaissance par l'analyse statistique du spectre proche infrarouge d'une caractéristique du sol. Il s'agit par exemple de déterminer pour chaque échantillon d'une population la présence ou non d'une catégorie de polluants. Nous excluons les approches dites qualitatives qui s'attachent à mesurer la quantité d'un ou plusieurs éléments associés à une qualité agronomique ou écologique du sol (Joffre *et al.*, 2001 ; Shepherd et Walsh, 2002).

L'approche qualitative la plus classique consiste à effectuer une analyse en composante principale avec comme variable explicative l'ensemble des bandes spectrales (Velasquez *et al.*, 2005). Les facteurs ayant une variance expliquée élevée peuvent ensuite être observés graphiquement (Fig. 3.3) par groupe de deux (Albrecht *et al.*, 2008 ; Cécillon *et al.*, 2009b) ou trois (Ertlen *et al.*, 2008a) pour vérifier si oui ou non l'information spectrale permet de distinguer des classes en fonction des propriétés étudiées. Pour compléter cette approche préliminaire, d'autres outils d'analyse multivariée telles l'analyse discriminante (Velasquez *et al.*, 2005) ou la classification hiérarchique ascendante (Cohen *et al.*, 2006) permettent de mesurer la distance entre les classes ou de prédire l'appartenance d'un échantillon à une classe. Bien d'autres méthodes de chimiométrie, comme les réseaux neuronaux (Fu *et al.*, 2007) ou les machines à vecteurs de support (Zhao *et al.*, 2006), présentent un potentiel non négligeable pour les approches qualitatives mais n'ont pas encore été testées en science du sol.

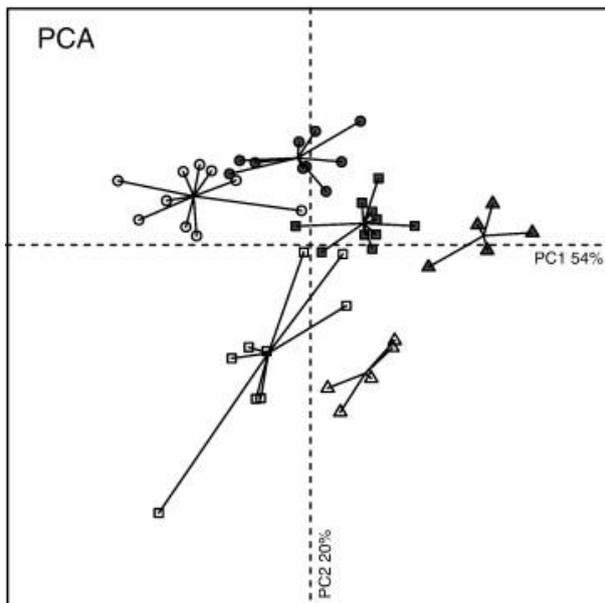


Fig. 3.3: Analyse en composantes principales calculée à partir de la première dérivée du spectre proche infrarouge (1000-2500 nm) (Cécillon *et al.*, 2009b). La couleur noire correspond aux horizons supérieurs de sol et la couleur blanche aux turicules d'origine animale (vers de terre). Les symboles correspondent à la date du dernier incendie (cercle : 3 ans ; carré : 16 ans ; triangle : 50 ans) La matière organique transformée par les vers de terre est différente de la matière organique totale.

A l'inverse des études quantitatives qui couvrent l'ensemble des zones bioclimatiques (*cf. infra*), les quelques études quelques qualitatives se concentrent pour l'instant dans les zones intertropicales et méditerranéennes. La première approche qualitative en science du sol est proposée par Velasquez *et al.* (2005). Ils tentent de montrer, sur des sols cultivés de Colombie, que la SPIR permet de discriminer des types de sol en fonction de leur système d'exploitation. Bien que le type de sol (inceptisol) soit homogène sur l'aire d'étude, les résultats sont à nuancer : compte tenu du nombre limité d'échantillons (240) et surtout du faible nombre de sites étudiés ; huit, soit un site par système de culture. Un tel échantillonnage ne permet pas réellement de dégager quels sont les facteurs discriminants et si le système d'exploitation est déterminant dans cette discrimination. De plus, l'observation graphique de l'analyse discriminante révèle que seuls la plantation de café et le sol érodé se distinguent réellement des autres sites. Le sol érodé se distingue sans doute des autres sites par sa très faible teneur en matière organique tandis que la plantation de café se distingue peut être par des apports de matière organique de nature différente. La discrimination est sans doute rendue difficile par le traitement simultané d'échantillons prélevés à trois profondeurs différentes (0-10 ; 10-20 ; 20-30). L'interprétation des échantillons profonds est problématique en l'absence de données sur l'historique des systèmes de cultures étudiés.

Les travaux suivants, consacrés à la séparation des agrégats biologiques du sol en fonction de leur origine, sont plus convaincants. Bien que le nombre d'échantillons demeure limité, 134 (Hedde *et al.*, 2005) et 60 (Velasquez *et al.*, 2007), la séparation entre les types d'agrégats (6 et 5 types respectivement) semble performante. Cette fois, l'échantillonnage de Velasquez *et al.* (2007) est plus performant et permet également de reconnaître l'influence du type de sol, de la végétation qui le recouvre et plus généralement du site. Par conséquent, ces auteurs recommandent pour une bonne utilisation de la SPIR dans l'étude des agrégats biologiques de travailler à grande échelle sur des sites homogènes, ceci n'étant pas restrictif pour le suivi *in situ* de l'évolution des agrégats biologiques du sol et plus généralement de la dynamique de la biodiversité. Cohen *et al.* (2006) constatent également dans une étude consacrée à la qualité des sols dans quatre bassins versant un fort effet de site ainsi qu'une influence de la position de l'échantillon sur le versant (bas de pente, mi-pente et sommet).

Au Kenya, Awiti *et al.* (2008) ont étudié par SPIR 582 échantillons sur une chronoséquence végétale comprenant trois stades : forêt, forêt défrichée récemment puis cultivée, forêt défrichée il y a 70 ans puis cultivée. Les spectres des différentes séquences sont bien distincts. Ils proposent de prédire par la SPIR un indice de qualité des sols décliné en trois classes : bon, moyen, mauvais. Le succès de cette prédiction tout comme la distinction des chronoséquences semblent cependant fortement inféodés à la quantité de matière organique. En effet, ce facteur important de la qualité des sols varie souvent avec la durée de mise en culture et les processus d'érosion qui l'accompagnent. Cependant, il n'est pas exclu que l'origine de la matière organique, forestière puis agricole, soit également à l'origine de différences spectrales qui seraient alors liées à des caractéristiques chimiques différentes.

Dans un même souci de gestion et de suivi de la qualité des sols, Schimann *et al.*, (2007) ont analysé 105 échantillons dans le cadre d'un programme de restauration d'une ancienne mine en Guyane française. Deux chronoséquences, une sur sols sableux et une sur sols argileux, comprenant chacune deux phases de restauration (5 et 8 ans) et trois sites témoins sont étudiées. La discrimination entre les séquences est convaincante et s'améliore significativement lorsque les populations de sols sableux et sols argileux sont étudiées séparément. L'effet du substrat est donc important mais ne masque pas l'effet de l'occupation du sol et de son évolution.

Cécillon *et al.* (2009b) s'intéressent quant à eux à une chronoséquence d'épisode de feu en milieu méditerranéen dans le massif des Maures. Ils distinguent par une analyse en composante principale (Fig. 3.3) trois classes de sols parmi 25 sites en fonction de la date du dernier incendie (3, 16 et 50 ans). Cette étude portant sur des échantillons de surface, il est probable que la majeure partie de la matière organique a été détruite ou fortement modifiée lors des épisodes de feu. Ainsi, on peut supposer que les échantillons se différencient en fonction de la quantité de matière organique « fraîche » non carbonisée accumulée postérieurement à l'incendie. L'hypothèse d'une différenciation en fonction des apports de matière organique correspondant aux différents stades de reconquête végétale (végétaux inférieurs, arbustes puis arbres) est également envisageable.

Les différentes études qualitatives consacrées à des essais méthodologiques de la SPIR en science du sol ont des objectifs variés et ne s'intéressent jamais directement à l'origine végétale de la matière organique. Lorsque l'effet de la végétation est relevé, c'est en tant que facteur perturbant l'information initialement recherchée (Velasquez *et al.*, 2007). Néanmoins, l'examen attentif des sites étudiés et de l'architecture des échantillonnages pratiqués permet déjà de discerner les effets du couvert végétal sur l'information spectrale. Ces observations devront être vérifiées par une étude approfondie s'appuyant sur un échantillonnage spécifique prenant mieux en compte l'occupation du sol et son évolution.

### **3.5. Comparaison avec la spectroscopie dans le moyen infrarouge**

La spectroscopie dans l'infrarouge moyen (MIR), communément appelée par le passé, spectroscopie infrarouge a été largement utilisée dans la seconde moitié du XXe siècle. L'absorbance est plus forte que dans le proche infrarouge et les pics qui résultent des vibrations fondamentales sont facilement identifiables. A chaque pic est associée une substance précise. La matière organique, mais aussi les minéraux tels le quartz ou les minéraux argileux, ont des pics caractéristiques dans l'infrarouge moyen. L'utilisation classique de cette méthode ne nécessite pas l'apport de la chimométrie. La présence ou la quantité d'une substance est directement mesurée en fonction de l'intensité d'un ou plusieurs pics. L'absorbance étant élevée, la mesure ne peut pas être effectuée sur un échantillon brut. L'échantillon est en général broyé et dilué dans une solution de bromure de potassium (KBr). Ceci augmente

considérablement la phase de prétraitement par rapport à la SPIR qui ne nécessite qu'un séchage et un tamisage à deux millimètres ou à 100 µm. Avec le développement de nouveaux spectromètres PIR et la levée des verrous informatiques en chimimétrie dans les années 1980 et 1990, la SPIR s'est progressivement imposée comme un outil aux performances quasi équivalentes avec des coûts moindres et une durée d'analyse fortement réduite.

Plus récemment, l'apparition de nouveaux spectromètres dans le MIR ont permis de placer cette technique dans des gammes de coûts et de temps d'analyses équivalentes au proche infrarouge. Les traitements au KBr ne sont plus nécessaires. Plusieurs études comparatives ont utilisé le PIR et le moyen MIR pour quantifier des propriétés chimiques et physiques du sol (McBratney *et al.*, 2006 ; McCarty *et al.*, 2002 ; Reeves III *et al.*, 2002). Une synthèse proposée par Viscarra Rossel *et al.* (2006a) montre que les performances du proche et du moyen infrarouge sont variables en fonction des propriétés prédites avec un léger avantage au moyen infrarouge. Aucun travail récent n'a utilisé la spectroscopie dans le moyen infrarouge dans le cadre d'une étude qualitative appliquée au sol.

Un des avantages majeurs de la SPIR réside dans la faible absorbance du minéral, qui permet de travailler sur des échantillons bruts. Au contraire l'absorbance forte de la fraction minérale, y compris du quartz sur certaines bandes du MIR risque de poser plus de problèmes pour les études qualitatives que pour les études quantitatives. En effet, les variations de la nature des minéraux et de leur quantité dans les échantillons risquent de masquer l'empreinte digitale de la matière organique du sol. Si on devait caricaturer l'approche quantitative, on pourrait considérer que la prédiction du carbone dans le moyen infrarouge peut être approchée indirectement par la prédiction de la quantité de minéral dans l'échantillon sur le même principe que la perte au feu. Ceci étant, le potentiel du MIR pour les études qualitatives de sol reste un vaste champ d'investigation.

## **Conclusion**

La SPIR est une technologie rapide peu coûteuse, non destructive et par conséquent aisément reproductible. De plus elle peut être mise en œuvre sur de petits échantillons (5 g) à l'état solide, liquide ou gazeux sans préparation importante. Bien que largement exploité depuis une dizaine d'année, le potentiel de la SPIR en science du sol offre encore un vaste champ d'expérimentation. Plusieurs fois décrit comme l'empreinte digitale de la matière organique, le spectre PIR n'a pas encore livré tous ses secrets. Les applications qualitatives en science du sol à des fins de reconstitutions paléoécologiques sont un domaine encore totalement inexploré en-dehors des quelques travaux préliminaires à cette thèse (Ertlen, 2005).

## **PARTIE II**

# **VERS UNE NOUVELLE METHODE D'INVESTIGATION PALEOENVIRONNEMENTALE**



### CONCEPTS ET ETAPES DE LA MISE AU POINT METHODOLOGIQUE

Comme nous l'avons vu dans la première partie, cette démarche de mise au point méthodologique s'inscrit dans un champ de recherche peu exploré qui a nécessité aussi bien à l'amont que tout au long de ce travail des prises de décisions qui ne s'appuyaient que rarement sur des acquis tangibles. Pour l'utilisation de l'outil SPIR proprement dit, nous avons largement utilisé les compétences développées depuis quelques années par la communauté scientifique des pédologues et plus particulièrement par l'équipe IRD de l'UMR Eco&Sol spécialisée dans l'étude du carbone organique des sols tropicaux. En revanche, en ce qui concerne l'approche qualitative appliquée à l'origine végétale des MOS en milieu tempéré, il a fallu construire de toutes pièces une démarche expérimentale. C'est ainsi que dès 2006, en présence de maigres résultats préliminaires (Ertlen, 2005), et en nous appuyant sur des acquis en milieu tropical (Schwartz, 1991), nous avons formalisé une démarche en trois grandes étapes (Ertlen *et al.*, 2006) synthétisées sur la figure 4.6. A cette époque, il était particulièrement délicat de se projeter vers les étapes finales puisque les fondements des étapes 2 et 3 reposaient sur le succès de la première étape. Nous avons choisi de consacrer une partie spécifique à la présentation de la démarche, afin de bien la distinguer de l'utilisation des outils géographiques, géohistoriques, pédologiques et spectroscopiques qui viennent la servir et qui seront détaillés dans une troisième partie consacrée aux sites d'études et aux méthodes.

Dans cette seconde partie, nous présentons chacune des trois étapes afin d'expliquer dans les moindres détails tous les choix qui ont été faits. Certains de ces choix trouvent leur justification dans des résultats préliminaires obtenus au cours des quatre années de travail. Ces résultats préliminaires sont détaillés dans la quatrième partie de la thèse. Les trois étapes sont toutes indispensables à la mise au point et à la validation de l'utilisation de la SPIR en tant qu'outil de reconstruction des paléovégétations à partir de l'analyse des MOS.

La première question posée dans cette démarche de mise au point méthodologique est :

« Les spectres proche infrarouge d'échantillons de sols mesurés en laboratoire permettent-ils de distinguer les MO en fonction du type de végétation dont elles sont issues ? »

Pour répondre à cette question, il est nécessaire de disposer de MO provenant exclusivement d'un seul type d'écosystème, à l'exclusion donc de MO héritée d'un écosystème passé différent. Compte tenu de la dynamique complexe des MO dans la litière et dans le sol, des précautions particulières sont nécessaires. Par conséquent, dans la première étape tout comme dans la seconde nous travaillerons uniquement sur des sols de référence pour lesquels la couverture végétale passée est connue. Il faut distinguer deux catégories de données nécessaires à notre démarche :

- Les données sur la végétation qui répondront aux questions : Quelles végétations ? A quelle époque ? Quelle stabilité écosystémique ? Quelle évolution ?
- Les données sur la matière organique du sol qui répondront à la question : Quel est l'âge moyen de la MO analysée ?

En combinant les deux catégories de données, nous pouvons dire : « Cette matière organique a tel âge moyen et sur ce laps de temps le sol a été enrichi en matière organique par tel type de végétation ». Ceci nous permet d'établir un lien entre le spectre proche infrarouge de la matière organique et son origine végétale.

## **4.1. Etape 1 : Les signatures spectrales d'horizons de surface** (Figure 4.6 a et b)

### **4.1.1. Comment identifier l'origine végétale de la matière organique analysée ?**

Tout d'abord, nous retiendrons les deux postulats exprimés dans le chapitre I, à savoir :

- Les MOS proviennent directement ou indirectement quasi exclusivement de la végétation ;
- Les MO de la litière proviennent quasi exclusivement de la végétation observée à l'aplomb du sol dans un rayon de l'ordre du décimètre.

Ce second postulat va définir *a minima* l'échelle spatiale d'étude d'une placette. Du point de vue des phytosociologues, cette échelle correspond au faciès ou à la synusie (Gobat *et al.*, 2003) voire à la phytocénose si l'on se place à une échelle légèrement plus petite. Notre objectif n'étant pas la reconstruction d'une paléophytosociologie, mais plutôt la reconstruction des paléovégétations, nous emprunterons plutôt aux botanistes le concept de formation végétale. Cette orientation n'émane pas d'un mépris pour la phytosociologie mais de contraintes fortes liées à l'archivage des MO. En effet, la phytosociologie s'appuie très souvent sur des espèces et des associations d'espèces caractéristiques du milieu mais représentant une part très

minoritaire de la biomasse. En revanche, la formation végétale est définie par les végétaux fortement majoritaires. Ainsi la formation végétale est en adéquation avec le stock de MO fourni au sol, tandis que la phytocénose ne l'est pas toujours. Ceci étant, nous ne nous limiterons pas au simple examen des grandes formations végétales telles que la prairie d'altitude, la forêt de conifères, la forêt caducifoliée, mais nous utiliserons cette nomenclature comme architecture de base de notre référentiel.

Une fois la question de l'origine des MOS traitée, il faut tenir compte de leur stockage et de leur évolution. Nous avons vu dans le chapitre 1 que la question de l'âge des matières organiques est complexe et doit être appréhendée en se fondant sur le concept de temps moyen de résidence. Selon le modèle de Jenkinson (chapitre 1 §1.3.3), après une durée égale à trois TMR, 97 % de la matière organique est renouvelée. Ainsi en cas de stabilité d'un écosystème à l'aplomb du sol pendant une durée supérieure ou égale à 3 TMR, plus de 97 % de la matière organique provient de cet écosystème. Nous avons utilisé ce seuil de confiance. Par conséquent, pour les placettes du référentiel de surface, nous avons fait en sorte d'obtenir les garanties historiques nécessaires quant à la stabilité des écosystèmes sur une durée supérieure à trois TMR. La littérature (chapitre 1) et les données complémentaires que nous avons acquises (Tab. 4.2) indiquent que dans les horizons de surface, le TMR est inférieur à 50 ans sauf dans des cas particuliers (gleysol). Cette valeur est dépassée pour des sols particuliers à faible dégradation de la matière organique. Nous avons pris cette valeur de TMR comme seuil de référence. Par conséquent, la période de stabilité écosystémique de référence est de 150 ans. Les mesures de TMR tirées de la littérature concernent le plus souvent les 10 ou 20 premiers centimètres. Afin de renforcer nos garanties, nous avons toujours prélevé les quatre premiers centimètres du sol. En effet, dans cette partie superficielle du sol, le TMR est toujours inférieur à 50 ans. Nous pouvons donc estimer que la proportion de matière organique provenant de l'écosystème observé est supérieure à 97 %. Il faut nuancer ces propos en notant que la stabilité écosystémique observée concerne souvent les traits principaux et ne prend pas en compte l'évolution du sous-bois ou l'évolution d'essences ligneuses minoritaires.

Pour cette période de 150 ans, nous avons rassemblé et recoupé toutes les informations disponibles et fiables sur la végétation (Tab. 4.1). Les données sont essentiellement empruntées aux historiens, aux géohistoriens et aux naturalistes. Nous discuterons dans le chapitre 6 des apports respectifs des différents documents utilisés : plans de finage de 1762, cartes allemandes de la fin du XIXe siècle, cartes du Service Géographique des Armées de l'entre-deux guerres, cartes de l'Institut Géographique National, photos aériennes des années 1950, archives de l'ONF depuis 1840, cartes postales depuis 1890, textes anciens. Nous présenterons enfin quelques méthodes naturalistes simples dont le champ d'application se concentre sur les milieux forestiers.

Toujours dans le but de renforcer les garanties sur l'origine écosystémique des MOS, nous avons entrepris pour quelques placettes du référentiel de surface l'analyse de

biomarqueurs moléculaires spécifiques des écosystèmes étudiés, en collaboration avec le Laboratoire de Biogéochimie moléculaire de l'Université de Strasbourg (UMR 7177 CNRS)

Ainsi, en couplant les critères d'origine et de stockage, nous aurons après vérification de la stabilité écosystémique des garanties fortes sur la matière organique que nous analyserons par SPIR dans le cadre de cette première étape.

Etape de la démarche	Type de stockage	Végétation	Age de la matière organique
Etape 1 : données sur le court terme (0-300 ans)	Sols fonctionnels	Cartes anciennes Photos aériennes Cartes postales Registres de l'ONF Textes anciens Observations naturalistes	TMR des MOS d'horizons de surface
Etape 2 : données sur le long terme (0-10 000 ans)	Sols fonctionnels	Pédoanthracologie Phytolithes Biomarqueurs	TMR des MOS d'horizons profonds
Etape 3 données anciennes	Paléosols	Pédoanthracologie Biomarqueurs Pédologie Géomorphologie	Age des MOS des horizons fossiles <sup>14</sup> C sur des charbons de bois datation par du matériel archéologique

Tab. 4.1 : Fonctions respectives des données de référence dans la démarche de mise au point méthodologique.

Code	Prof. en cm	Type de sol	TMR
ROS1	10-15	cambisol	56 ± 32
MRN	0-4	gleysol	60 ± 30
FAP	5-10	umbrisol	moderne
THB	0-5	cambisol	moderne
EFP01	0-5	cambisol	moderne

Tab. 4.2 : TMR (<sup>14</sup>C) de quelques horizons de surface.

#### 4.1.2. Stratégie d'échantillonnage

Un choix diversifié des écosystèmes permettra de vérifier le degré de finesse que l'on peut attendre de la méthode. Pour caricaturer : peut-on discriminer de simples différences élémentaires entre écosystèmes (différences prairie-forêt), ou bien peut on faire des distinctions très fines, allant par exemple, jusqu'à séparer les hêtraies pures des hêtraies-sapinières, les chênaies des chênaies-charmaies, les pelouses sèches des prairies de fauche ... La réponse à cette question nécessite de passer par une phase de calibration sur des horizons de surface

d'écosystèmes variés, correspondant à une gamme des écosystèmes présents à l'échelle régionale aussi complète que possible. Cette gamme constituera la base de données de référence. Ignorant totalement le potentiel discriminant de la SPIR au début de cette étude, cette stratégie a été élaborée au fur et à mesure des avancées et des résultats obtenus.

#### **4.1.2.1. Une démarche évolutive**

Le référentiel, composé de 56 placettes, est relativement bien équilibré et représentatif des grands écosystèmes alsaciens. Mais l'architecture de ce référentiel n'a pas été conçue *a priori*. Les mesures préliminaires (Ertlen, 2005) effectuées sur des profils prélevés dans le cadre d'une autre étude (Goepf, 2007) présentaient un échantillonnage bien insuffisant pour tirer de véritables conclusions (1 échantillon de surface par site, sur 12 sites). Les premiers prélèvements de surface dans la continuité des travaux de Schwartz *et al.* (2005) se sont concentrés sur la distinction entre sols sous forêts et sols sous prairies dans le massif du Rossberg. Quatre placettes, une sous prairie et trois sous forêts, représentées chacune par au moins trente échantillons, nous ont permis de révéler les premiers indices d'une discrimination entre forêts et prairies (Ertlen *et al.*, 2008a).

Dans un second temps, nous avons voulu confirmer cette discrimination élémentaire au niveau écosystémique en multipliant les contextes pédologiques et géologiques. De quatre placettes (quatre formations végétales) regroupées sur quelques dizaines d'hectares, le panel a été élargi à douze placettes disséminées dans l'ensemble du massif vosgien. Ainsi, aux alocrisols (cambisols, WRB) du Rossberg développés sur roches volcano-sédimentaires, nous avons ajouté les rankers cryptopodzoliques (umbrisol, WRB) développés sous les prairies les plus élevées des Vosges granitiques (> 1300 m), d'autres alocrisols développés sur granite sous forêts et sous prairies, et un podzol développé sur grès. L'examen de ces douze placettes a définitivement confirmé le potentiel de la SPIR à discriminer les sites sous forêts des sites sous prairies (Ertlen *et al.*, en révision).

Dans un troisième temps, nous avons voulu vérifier le potentiel de la SPIR à discriminer des écosystèmes moins contrastés, toujours à l'échelle du massif vosgien. Pour ce faire, nous avons élargi notre gamme de prairies à des placettes de pelouses sèches des collines sous-vosgiennes et échantillonné un grand nombre de placettes sous forêts : de la chênaie alluviale du fossé rhénan à la hêtraie sommitale vosgienne en passant par la sapinière, la hêtraie-sapinière, la chênaie-sapinière, la pineraie et d'autres peuplements moins fréquents en Alsace. Pour les peuplements les plus ubiquistes, nous avons choisi plusieurs sites en veillant à la diversité des types de sols et de substrats. Une attention particulière a été portée à la diversité des situations topographiques (pente, orientation, altitude). Cet ensemble d'une quarantaine de placettes a permis de tester le pouvoir discriminant de la SPIR entre les forêts caducifoliées, les forêts mixtes et les forêts de conifères. Le potentiel discriminant entre les grandes familles de peuplements les plus répandus en Alsace (chênaie, hêtraie, sapinière) a également pu être testé. En parallèle, plusieurs placettes avec sols carbonatés sur substrat calcaire (absents de la

deuxième phase) ont été intégrées dans le référentiel sans remettre en cause les résultats précédents (Ertlen *et al.*, 2008b).

Nous avons également testé quelques écosystèmes continentaux très similaires sur le territoire de la République Tchèque. Ce changement d'échelle a permis de vérifier la capacité de transfert de notre référentiel à des sites proches du point de vue écosystémique, mais géographiquement éloignés.

Enfin, la mise en œuvre des étapes 2 et 3 et plus particulièrement un échantillonnage de paléosols en Alsace et en République Tchèque ont révélé certains manques dans le référentiel de surface. Pour combler ces lacunes, des placettes de forêts développées sur loess ont été échantillonnées spécifiquement.

Bien qu'étoffé, le référentiel présenté dans cette thèse n'a pas vocation à être exhaustif. Il reste ouvert et devra être complété en fonction des besoins liés aux applications souhaitées. Les sols mis en culture constituent le principal hiatus pour le territoire alsacien. La difficulté de réunir des références sur le long terme est la principale raison de cette lacune. Seules quelques mesures spectroscopiques, à titre d'essai, ont été effectuées dans le vignoble. L'histoire de ces agrosystèmes emblématiques constitue sans doute l'objet d'études à venir avec le concours de la SPIR, d'autant que le sol est encore trop souvent la composante oubliée du terroir par les viticulteurs, qui préfèrent s'appuyer sur la notion plus accessible de substrat. Par ailleurs, certains écosystèmes marginaux ne sont pas représentés ou insuffisamment représentés (megaphorbaie et milieux palustres par exemple).

#### **4.1.2.2. Choix des placettes**

Le choix des placettes a évidemment été guidé en premier lieu par les conditions que nous avons fixées à chacune des étapes décrites ci-dessus : type d'écosystème, type de sol, substrat, topographie, géographie. Mais à ces contraintes d'ordre méthodologique s'ajoute un certain nombre de contraintes techniques. Comme nous l'avons expliqué ci-dessus, ce référentiel de surface s'appuie sur les références fournies par une cohorte de documents historiques couvrant au minimum les 150 dernières années, dont nous livrerons une analyse détaillée dans le chapitre 6. La couverture géographique, la conservation et l'accessibilité de ces données étant très hétérogènes, elles ont fortement influencé le choix des placettes. En revanche, les contraintes liées à la protection des milieux naturels ne constituent pas un obstacle à ce stade de l'étude puisque la quantité de matériel prélevé à la surface du sol (< 10 g) est négligeable et que les perturbations des sites sont quasiment nulles.

#### **4.1.2.3. Echantillonnage à l'échelle de la placette**

La stratégie d'échantillonnage à l'échelle de la placette a elle aussi légèrement évolué en fonction des résultats intermédiaires obtenus. Elle consiste, dans un premier temps, en

l'échantillonnage systématique sur une aire rectangulaire d'une surface de 10 m sur 20 m. Trente échantillons sont prélevés tous les 2 mètres sur trois lignes espacées de 4 mètres. Ce maillage fin et le nombre important d'échantillons par placette ont pour objectif de prendre en compte les variations à l'intérieur d'un même écosystème. Cet échantillonnage est d'autant plus important que les analyses sont ensuite effectuées sur une faible quantité de sol. Le nombre d'échantillons améliore la représentativité. L'examen des 12 premières placettes a mis en évidence la faible variabilité spectrale à l'intérieur des placettes. En conséquence, les placettes suivantes ont été échantillonnées à raison de 15 échantillons toujours répartis sur 3 lignes espacées de 4 m. Les échantillons sont prélevés à l'aide d'un cylindre enfoncé à la verticale dans le sol après nettoyage de la litière (Fig. 4.1). Sur chaque placette un relevé botanique est effectué (annexe 1, la précision des relevés est variable selon le type de formation végétale). Sur certaines placettes de forêts, les espèces ligneuses sont cartographiées et le diamètre des individus est relevé afin de vérifier l'existence de variations intra-placette liées à la répartition des essences (non présenté). Les observations pédologiques sont faites sur des fosses, des coupes naturelles ou à l'aide d'une tarière. Pour certains sites sélectionnés uniquement pour l'étape 1, les observations se sont limitées à la litière et à l'horizon A.



*Fig. 4.1 : Mode de prélèvement des échantillons de surface, sols podzolique sous pineraie, Rothbach, 67 (photo : M. Trautmann)*

#### **4.1.3. Limites de l'échantillonnage**

Bien que des observations minutieuses aient été menées sur chaque site avant l'échantillonnage, il ne faut pas totalement exclure sur certains sites des perturbations d'ordre agronomique, sylvicole, plus généralement d'ordre anthropique. Des perturbations de petites tailles à l'échelle métrique telles que le passage d'un ancien chemin ou le creusement d'une fosse sont facilement compensées par la nature même de l'échantillonnage. En revanche, des interventions anciennes plus étendues telles que l'amendement organique ou chimique, le chaulage ou la fauche peuvent modifier fortement l'apport de MO au sol tant quantitativement que qualitativement. Ces pratiques, si elles s'inscrivent dans la durée, sont souvent détectables sur le terrain et/ou par des enquêtes (Algayer, 2008). En revanche, lorsqu'elles sont ponctuelles dans le temps ou anciennes, elles sont difficiles à détecter.

Le labour, même occasionnel, d'une prairie est quant à lui facile à détecter en effectuant les observations appropriées sur les premiers décimètres du profil pédologique. Il a pour conséquence le mélange rapide des MO de l'horizon cultural et tend à homogénéiser sur cette épaisseur leurs TMR (Becker-Heidmann et Scharpenseel, 1989, 1992). Le raisonnement qui nous a conduit à fixer une période de 150 ans de végétation stable pour obtenir un signal pur sur les 5 premiers centimètres est dans ce cas remis en cause. En ajoutant à cela la quasi impossibilité de trouver des terres agricoles d'une telle stabilité (à l'exception de Rothamsted en Angleterre : van Bergen *et al.*, 1997) ceci explique que nous ayons dans un premier temps exclu les terres cultivées du référentiel. De plus, le principe de l'actualisme, qui consiste à comparer des MOS issues de végétations actuelles avec des MOS issues de végétations anciennes, est remis en cause quand on considère l'évolution du panel de cultures et des pratiques agricoles depuis un siècle.

Quel que soit l'écosystème, le prélèvement systématique des quatre premiers centimètres pose le problème de la prise en compte des horizons et de leurs limites. La litière, composée de débris végétaux plus ou moins fragmentés et décomposés, est théoriquement exclue du prélèvement. Le tri est aisé dans le cas de mull forestiers où la litière fraîche est facilement écartée à la main et laisse place au sommet de l'horizon A (Fig. 4.3). En revanche, pour les moders et les mors forestiers ainsi que pour les rhizomulls des sols sous prairies (Gobat *et al.*, 2003), la limite entre la litière et l'horizon A est souvent délicate à déterminer à l'œil nu et est très irrégulière (Fig. 4.4). Même dans le cas où la limite est déterminée avec précision, il est difficile d'éviter toute pollution de l'échantillon par la litière. Nous verrons dans la partie III les aspects techniques qui permettent de limiter et de relativiser cette pollution.

D'autre part, pour certains sols forestiers, l'épaisseur de l'horizon A est inférieure à quatre centimètres (Fig. 4.5). La limite inférieure est souvent nette mais irrégulière. Dans ce cas, le prélèvement inclut également une partie de l'horizon S ou E sous-jacent. Ce problème est compensé par le fait que dans de tels échantillons composites, la grande majorité de la MO provient de l'horizon A. Dans d'autres cas, l'horizon A est suffisamment épais mais peut être subdivisé visuellement en deux horizons A11 et A12 qui se démarquent par une quantité différente de MO.

#### **4.1.4 Traitement des données**

Les outils statistiques que nous détaillons dans le chapitre 7 nécessitent le regroupement des échantillons par classe en fonction de l'origine des MOS. La définition des classes et la répartition des sites dans ces classes se fait suivant une organisation hiérarchique à trois niveaux (Fig. 4.2). Chaque niveau correspond à un degré de finesse, du plus général (niveau 1) au plus précis (niveau 3).

D'abord, nous traitons l'ensemble de la population afin de vérifier le potentiel discriminant entre sols sous forêts et sols sous prairies (niveau 1). Puis, sur cette même population, nous

testons le pouvoir discriminant entre cinq grandes classes de formations végétales (niveau 2), puis entre 11 classes d'écosystèmes plus spécifiques. Ces classes sont définies en fonction des végétaux dominants du point de vue des apports de MO au sol.

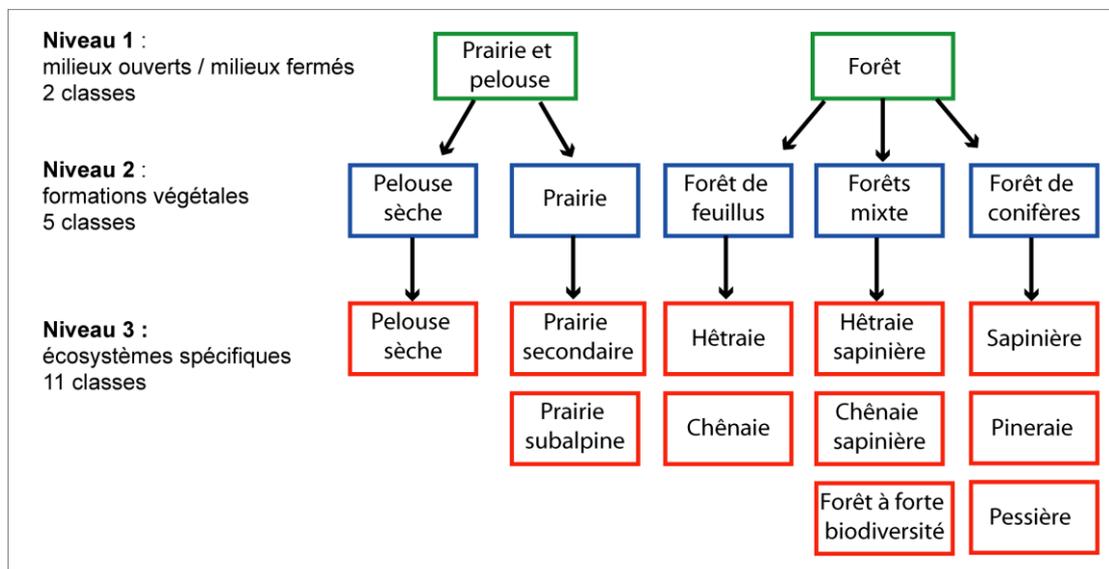


Fig. 4.2 Niveaux hiérarchiques de regroupement des sites



Fig. 4.3 : Mull forestier dans la forêt de l'Ilwald, Sélestat, 67 (photo C. Marschal).



Fig. 4.4 : Horizon A mince et irrégulier, alocrisol sous chênaie-sapinière, sur roche mère granitique, Wasserbourg, 68.



Fig. 4.5 : Limite entre la litière et l'horizon A diffus et ondulé, alocrisol sous hêtraie pure, sur roche mère volcano-sédimentaire, Bitschwiller-les-Thann, 68 (photo D. Schwartz).

Enfin, pour affiner les discriminations, nous utilisons une seconde approche qui consiste à travailler sur des sous-populations. Par exemple, nous isolons les sites sous forêts pour tester le potentiel discriminant entre les sites sous feuillus, les sites sous forêts mixtes et les sites sous conifères. De même, nous utilisons les sous-populations telles que les feuillus pour tester par exemple le potentiel discriminant entre les sites sous hêtraies et les sites sous chênaies.

Malgré quelques limites, la matière organique des horizons de surface présente les meilleures garanties concernant son origine végétale. En contrepartie, elle est jeune et n'a subi que partiellement les processus de dégradation. Par conséquent, elle n'est pas forcément représentative des matières organiques anciennes qui nous livreront une information sur les paléovégétations. C'est pourquoi, dans une seconde étape, nous analysons des matières organiques plus anciennes.

## **4.2. Etape 2 : Les signatures spectrales d'horizons profonds**

**(Figure 4.6 c, d, e, f et g)**

### **4.2.1. Origine des matières organiques d'horizons profonds.**

Dans les horizons profonds, le TMR peut atteindre plusieurs siècles voire plusieurs millénaires (*cf.* chapitre 1, fig. 1.10 et 1.11). Les matières organiques sont en moyenne beaucoup plus âgées et elles ont subi des processus de transformation plus importants. Elles ont pour origine les paléovégétations. A ces échelles de temps, les méthodes historiques fiables que nous utilisons pour garantir l'origine de la matière organique sur les deux derniers siècles sont inopérantes. Ce sont les méthodes paléoécologiques qui prennent le relais (Tab. 4.1.). Ces méthodes ont souvent une résolution temporelle moindre mais permettent de remonter dans le temps à l'échelle de l'Holocène et au-delà. Deux obstacles majeurs sont à surmonter dans cette étape.

D'une part, les données paléoécologiques à notre disposition fournissent rarement des données précises et continues. Nous l'avons vu dans le chapitre 2, chaque méthode a ses spécificités et ses limites. L'information disponible n'est pas toujours en adéquation avec l'information recherchée. De plus, les calages temporels ne sont pas toujours possibles. Le plus souvent, nous disposons de scénarios avec différentes phases successives identifiées, sans que la date du changement soit très précise. Ces difficultés nous ont amené à tester deux approches (Fig. 4.9). Une première approche consiste à considérer tous les échantillons profonds comme inconnus et à les classer en les confrontant uniquement au référentiel de surface. La deuxième approche consiste à prendre en compte les données paléoécologiques. Les profils les mieux connus et les plus stables sont identifiés et utilisés comme références pour prédire l'origine végétale des profils dont l'histoire est plus complexe ou inconnue.

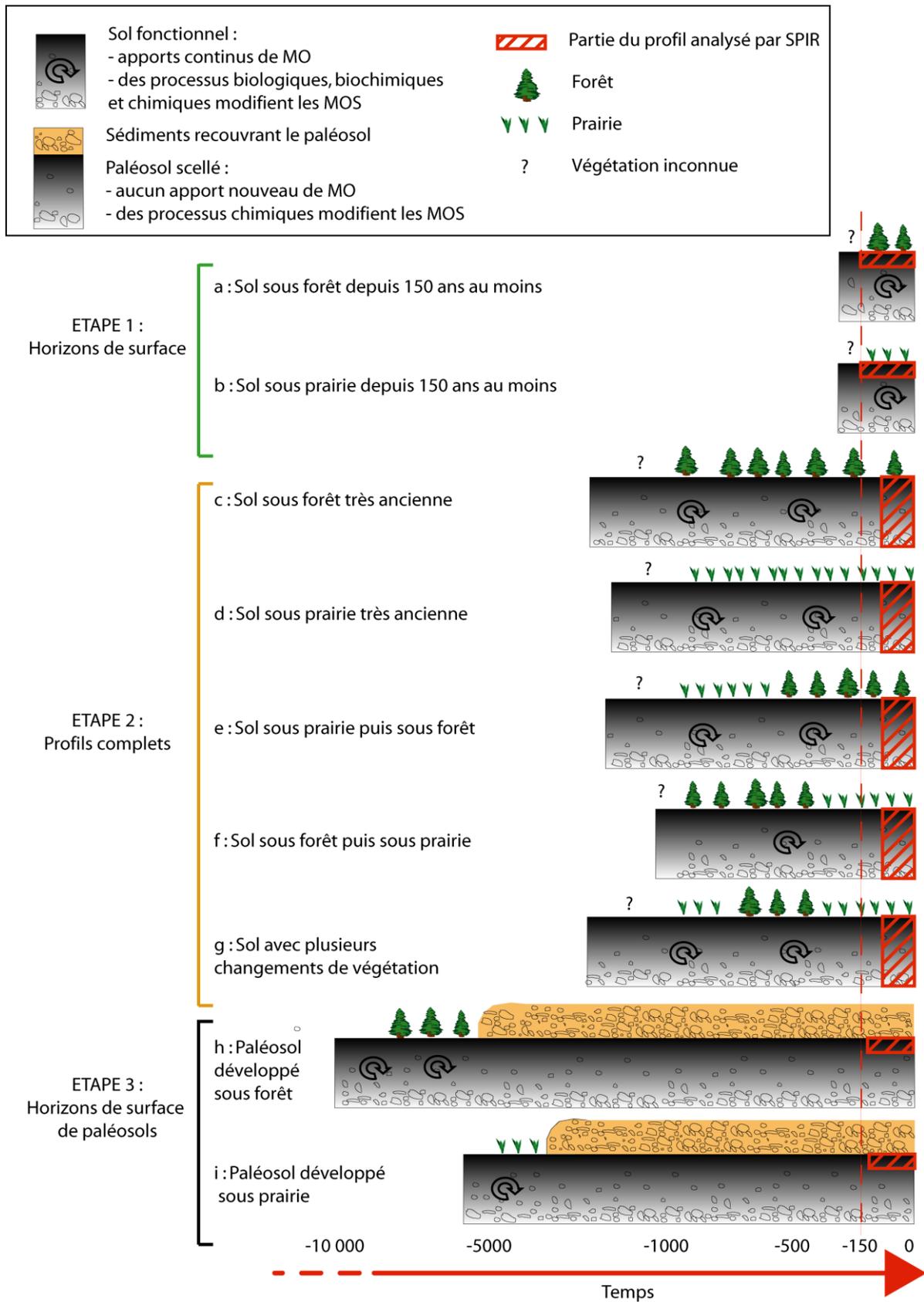


Fig. 4.6 : Récapitulatif des étapes de la mise au point méthodologique

La rareté des situations écosystémiques stables à l'échelle du millénaire constitue le second obstacle. En effet, la plupart des données disponibles concerne des sites qui présentent des changements de végétations. Par conséquent, puisque les matières organiques à profondeur égale sont d'âges différents, elles sont aussi d'origines différentes. Nous avons donc affaire le plus souvent à des échantillons composites. Dans un premier temps, nous examinerons quelques situations exceptionnelles pour lesquelles une stabilité à l'échelle du millénaire est avérée (Fig. 4.6 c et d). Pour ces profils, nous pourrions raisonner de la même manière que pour le référentiel de surface. Dans un second temps, nous examinerons les sites ayant des scénarios plus complexes mis en évidence par les méthodes paléoécologiques (Fig. 4.6 d, e et f). Nous privilégierons les scénarios n'excédant pas deux changements majeurs de végétation. Dans ce cas, il est encore possible à l'aide des mesures de TMR d'estimer les proportions relatives des matières organiques en fonction de leur origine. Ainsi nous pourrions vérifier si, grâce au spectre PIR, nous sommes capables d'une part de reconnaître l'origine végétale des MOS dégradées de profondeur et d'autre part de reconnaître cette origine lorsqu'elle est composite. Afin de conforter notre approche, une analyse des biomarqueurs moléculaires est effectuée sur les quelques profils les plus stables, dans le but de vérifier l'absence d'autres marqueurs que ceux de la végétation stable observée.

Malgré ces obstacles, nous tenterons pour les scénarios les plus simples de coupler les changements de végétations identifiés par SPIR avec les mesures de TMR. D'une part, nous traduisons le signal PIR en proportion de matière organique d'origine forestière ou prairiale et, d'autre part, nous modélisons l'évolution des matières organiques anciennes sur le profil. En confrontant les deux courbes, nous pourrions fournir une approximation de la date des changements de végétations. Cette date est ensuite confrontée aux indications fournies par les données paléoécologiques. Le détail de la modélisation est présenté dans le chapitre 9.

## **4.2.2. Stratégie d'échantillonnage**

### **4.2.2.1. Choix des sites**

Le coût et la mise en œuvre des méthodes paléoécologiques nous ont poussé à utiliser un certain nombre de sites déjà étudiés par ailleurs (chapitre 6). À la différence du référentiel de surface, ce référentiel d'horizons profonds s'est donc bâti de manière opportuniste en tenant compte de fortes contraintes externes. Parmi les sites déjà bien connus, les massifs du Rossberg (ROS 01-04) et du Hohneck (FALI CSCH, PHOH...) étudiés par Goepp (2007), ainsi que le site de Mussig (MHG, MRN) constituent des points forts. Le site de l'Elmerforst a été retenu parce qu'il présente la particularité appartenir à l'Œuvre Notre-Dame depuis le XII<sup>e</sup> siècle et que sa stabilité forestière est attestée par des documents très anciens. De la même manière, les sites tchèques de Salajka et V Studenem (SJK et VST) présentent de bonnes garanties pluriséculaires. Le site de Gottesheim (GOT) fait partie d'une étude en cours, tandis que les sites du Champ du feu ont été choisis pour

augmenter la représentativité spatiale et écosystémique de l'étude. En contrepartie, ils sont moins bien documentés sur le long terme.

#### 4.2.2.1. Echantillonnage à l'échelle du profil

Les échantillons profonds sont prélevés dans des fosses pédologiques. Les profils du massif du Rossberg et du Hohneck ont été prélevés avant le début de ce travail pour les besoins de la pédoanthracologie par tranche de 5 cm tous les 10 cm. Un échantillon a été prélevé dans chacune des tranches. Les autres fosses ont une dimension de 1 m sur 70 cm environ et une profondeur égale à l'épaisseur totale du sol (1 m en moyenne). Dans chacune des fosses, deux ou trois prélèvements parallèles ont été effectués à l'aide d'un cylindre avec une résolution verticale de 5 cm. Nous avons fait le choix de prélèvements systématiques et non pas de prélèvements basés sur les limites d'horizons. En fait, pour la plupart des sols, à l'exception de l'horizon A, la matière organique n'est pas un critère de différenciation des horizons (Fig. 4.7). Par conséquent, la nature de la matière organique n'est pas propre à un horizon. En revanche, le TMR et par conséquent la nature de la matière organique peuvent présenter des variations importantes à l'échelle centimétrique (Fig. 4.8). Ces variations ne sont pas visibles à l'œil nu, c'est pourquoi nous privilégions un prélèvement systématique à haute résolution. Dans la réserve de Salajka, les mesures de protection nous ont obligé à prélever le sol à l'aide d'une tarière. Six carottes ont été échantillonnées avec une résolution de 10 cm.

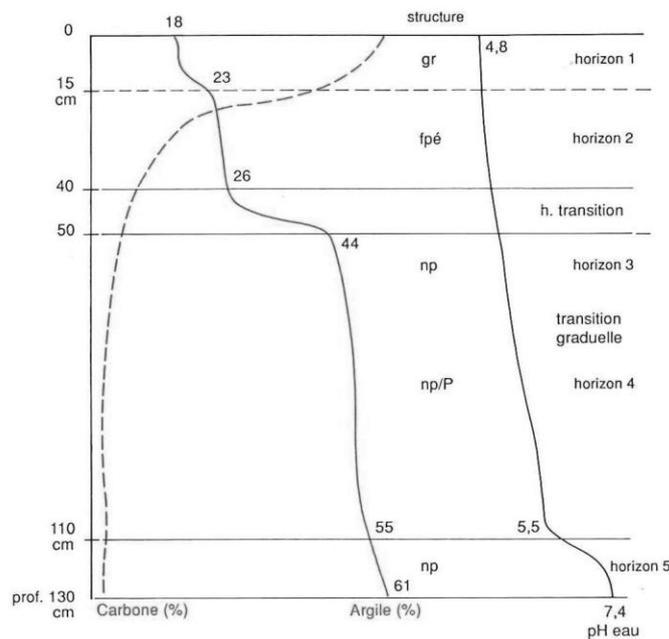


Fig. 4.7 : Variation de quatre caractères majeurs permettant la distinction de 5 horizons (Baize et Jabiol, 1995).

*La teneur en carbone et la structure permettent de définir les horizons 1 et 2. La texture et la structure caractérisent les horizons 3 et 4. La structure et le pH distinguent l'horizon 5. [...]*

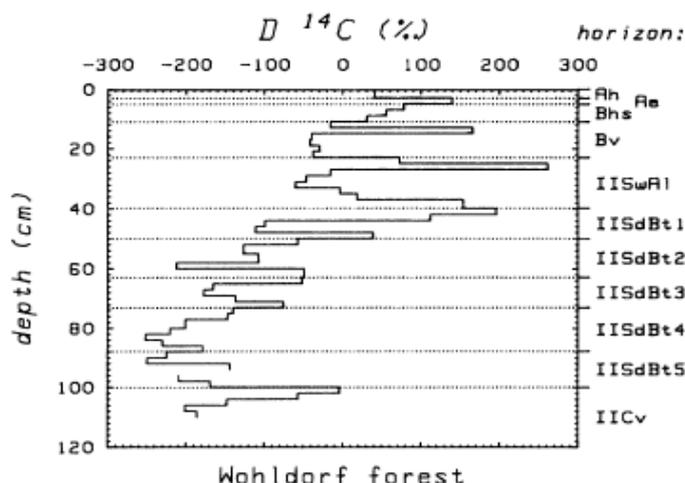


Fig. 4.8 : Mesure  $^{14}\text{C}$  à haute résolution sur un profil de sol brun lessivé, Wohldorf, Allemagne (Becker-Heidmann et Scharpenseel, 1986).

Ce sont des échantillons de sols totaux qui sont analysés et non pas des fractions granulométriques ou chimiques.

#### 4.2.3. Exploration des données

Deux approches sont testées (Fig. 4.9). La première consiste à considérer que tous les échantillons de profondeur sont inconnus. Les échantillons de profondeur sont uniquement confrontés au référentiel de surface. Ils ne servent pas à la construction du modèle. Cette approche présente l'avantage de pouvoir s'affranchir des données paléoécologiques de référence et de leurs approximations. Ces dernières ne sont utilisées que pour confirmer ou infirmer les résultats. De plus, nous pouvons nous appuyer sur un référentiel vaste qui permet une exploration à tous les niveaux hiérarchiques (cf. fig. 4.2). En revanche, il existe des différences systématiques entre les références de surface et les échantillons de profondeur étudiés. Les quantités de MO sont toujours supérieures en surface et les transformations biochimiques sont moindres.

La deuxième approche consiste à attribuer une origine végétale à chaque échantillon de profondeur chaque fois que les données paléoécologiques le permettent. Par ailleurs, la précision des données paléoécologiques ne permet pas une exploration au-delà du premier niveau hiérarchique. L'avantage de cette approche est que nous comparons des horizons profonds entre eux avec des degrés de transformation de la matière organique similaires. Les échantillons de référence sont sélectionnés en fonction de la fiabilité des données paléoécologiques. Lorsqu'une stabilité écosystémique sur le long terme est avérée, les profils entiers sont utilisés. Lorsque des changements de végétation sont identifiés, la partie supérieure du profil est utilisée. La limite est fixée en couplant le TMR et l'âge du dernier changement. Même si une végétation ancienne remplacée par une autre est bien identifiée, les échantillons profonds ne sont pas utilisés en raison de la trop grande incertitude introduite par le brassage des MOS. Ces critères sévères réduisent les données à quelques profils. Par conséquent, le lot d'échantillons de référence est bien plus petit que pour la première approche.

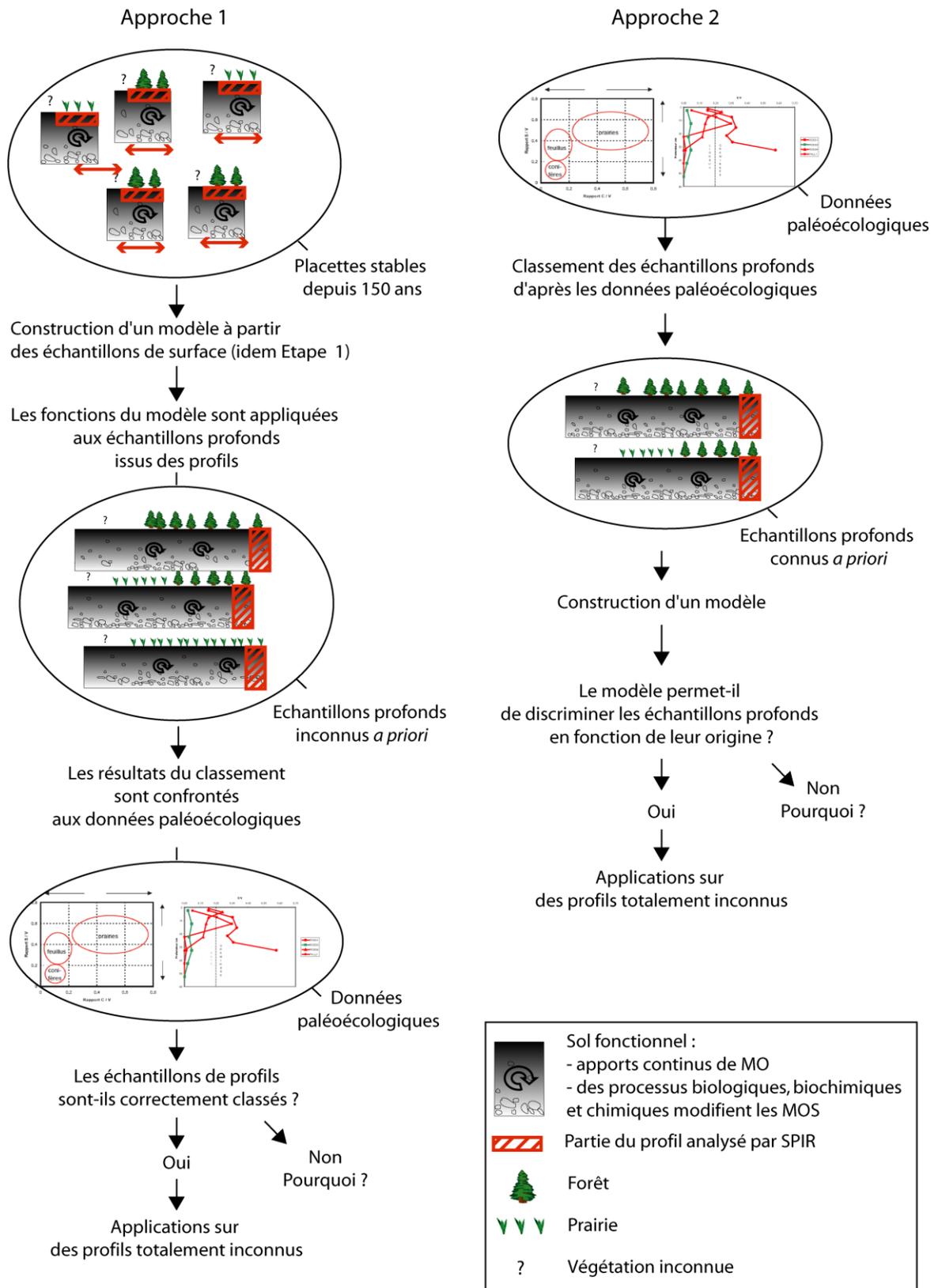


Fig. 4.9 : Deux approches différentes pour explorer les données spectroscopiques des profils de sols.

Les profils de sols fonctionnels (étape 2), au même titre que les horizons superficiels (étape 1), ont l'avantage d'offrir une très large couverture spatiale. En revanche, la dynamique des MOS à l'intérieur du profil rend la lecture du passé difficile lorsque les scénarios d'évolution de la végétation se complexifient. Par ailleurs, les conditions de stockage de la matière organique constituent une limite pour remonter dans le temps. Pour aborder des périodes plus anciennes tels que le Pléistocène, le Tardiglaciaire ou le début de l'Holocène, les paléosols constituent une bonne alternative.

### **4.3. Etape 3 : Les signatures de paléosols (Fig. 4.6 h et i)**

Les paléosols sont des sols anciens formés dans des conditions écologiques propres à l'époque de leur développement (Lozet et Mathieu, 2002). Dans ce travail, nous utilisons ce terme uniquement pour des paléosols enterrés sous un dépôt épais qui empêche ou ralentit toute évolution pédologique ultérieure (« *burried soil* » en anglais). Nous excluons les sols reliques (« *relict soil* ») qui conservent des traits anciens tout en subissant la pédogénèse actuelle (Ruellan, 1971). Les paléosols, lorsqu'ils sont convenablement scellés, fossilisent mieux la matière organique que les sols fonctionnels. De plus, les aspects temporels sont plus faciles à décrypter lorsque les sols sont conservés dans des stratigraphies bien calées chronologiquement.

#### **4.3.1. La matière organique des paléosols**

Les paléosols correctement enfouis peuvent être considérés comme n'appartenant plus à la biosphère. Tous les facteurs liés au vivant sont ainsi neutralisés. Seuls certains mécanismes chimiques liés en partie à la circulation d'eau dans le sédiment sont encore actifs. Dans les horizons enfouis, la matière organique garde l'essentiel des caractéristiques qui étaient les siennes au moment de l'enfouissement ; ainsi, le cas des horizons A enfouis se rapproche fortement de celui des humus actuels (Schwartz, 1991). Donc, le paléosol peut être considéré comme un « arrêt sur image » au moment de l'enfouissement. Cependant, depuis le paléosol parfaitement scellé jusqu'au sol fonctionnel, toutes les situations intermédiaires sont envisageables (Polach et Costin, 1971). La pollution des paléosols par des substances labiles jeunes, lessivées à travers les sédiments est fréquente (Hammond *et al.*, 1991 ; Wang *et al.*, 1996).

D'autre part, tous les paléosols ne contiennent pas de la matière organique. La qualité et la quantité de la matière organique conservée dans les paléosols dépendent de plusieurs facteurs : état initial du sol, intensité de l'érosion avant l'enfouissement, conditions d'enfouissement et qualité du recouvrement.

Le type de sol ou état initial avant enfouissement est un paramètre important. Un type de sol à l'état fonctionnel, tels qu'un chernozem ou un sol hydromorphe qui contient des quantités importantes de matière organique sur une épaisseur pouvant dépasser 70 cm, a plus de chance de conserver des quantités de matières organiques détectables sur le long terme. Dans le cadre de notre démarche, où nous nous contenterons d'analyser les horizons de surface des paléosols, des sols moins développés mais avec des horizons A riches en MO conviennent également (par exemple : rendzine, sol brun, etc.)

Les conditions de scellement déterminent également la qualité du paléosol du point de vue paléoenvironnemental. Si une phase d'érosion précède l'enfouissement, une partie de l'information recherchée est perdue. Par ailleurs, l'enfouissement définitif peut également être précédé d'une phase de transition durant laquelle une faible couche de sédiments recouvre le sol sans l'isoler totalement. Cette couche de sédiments peut elle-même subir des processus de pédogénèse. Ces transitions progressives rendent plus difficiles la lecture des limites du paléosol.

La qualité du matériau de recouvrement va fortement conditionner la durée et la qualité de conservation du paléosol. Les dépôts éoliens épais et compacts laissent percoler de faibles quantités d'eau et quasiment pas de matériau sous forme particulaire. De la même manière, les dépôts alluviaux fins constituent une bonne protection. A l'inverse, les matériaux alluviaux grossiers ou les constructions archéologiques en pierre sèches (murgers) sont très filtrants et facilitent le transit de matériaux particuliers. De ce fait, des pollutions par des matières organiques plus récentes se produisent. Le problème est contourné, en évitant la zone de transition la plus sensible à ce type de pollution. Dans les cas les plus délicats, le paléosol est également exposé à une activité biologique résiduelle incluant un brassage. Dans ce cas, la lecture du TMR (*cf.* paragraphe suivant) est rendue beaucoup plus compliquée.

#### **4.3.2. L'âge des paléosols**

L'âge radiocarbone mesuré des paléosols est égal au TMR au moment de l'enfouissement, plus le temps écoulé depuis l'enfouissement (Gerasimov, 1971 ; Guillet, 1979). En mesurant l'âge  $^{14}\text{C}$  des horizons superficiels, dont le TMR au moment de l'enfouissement est subcontemporain, il est possible d'approcher l'âge de l'enfouissement à 50 ans près. Dans certains cas particuliers, il faut également tenir compte du tassement associé à l'enfouissement qui peut augmenter fortement le gradient (TMR/profondeur) du paléosol (Hetier *et al.*, 1983). D'autre part, si le matériau de recouvrement n'est pas totalement imperméable aux transferts de matières organiques, le paléosol peut être pollué par des matières organiques récentes, ce qui entraîne un rajeunissement de l'âge mesuré. Cette méthode est applicable pour tous les paléosols contenant de la matière organique, donc pour tous les paléosols qui nous intéressent dans cette étude.

Notons tout de même que des méthodes stratigraphiques permettent de dater les paléosols avec une bonne précision. Les charbons de bois ou les bois fossiles, lorsqu'ils sont disposés en strates sur la coupe, peuvent également être datés par  $^{14}\text{C}$ . Dans ce cas, il date la mise en place du matériau et non l'enfouissement du paléosol. Les bois fossiles peuvent également être datés par dendrochronologie, ce qui constitue à ce jour l'outil le plus précis en termes de résolution temporelle. Par ailleurs, lorsque les paléosols sont scellés sous des niveaux archéologiques ou recouvrent ces niveaux, les datations relatives apportées par cette discipline fournissent de bonnes garanties. En revanche, les datations relatives du Quaternaire sont parfois aléatoires. Ainsi, avant d'être datés par le matériel archéologique, les quatre niveaux de paléosols inclus dans la stratigraphie d'Achenheim ont été corrélés à tort avec les quatre grandes périodes glaciaires identifiées en Bavière (Wernert, 1957).

#### **4.3.3. Stratégie d'échantillonnage**

Le choix des paléosols échantillonnés et de leur localisation est presque toujours inféodé au caractère fortuit des découvertes. La grande majorité des découvertes a été rendue possible par une collaboration étroite avec l'INRAP dans le cadre des diagnostics archéologiques et des fouilles préventives.

Le plus souvent, nous avons prélevé uniquement la partie superficielle (horizon A) des paléosols. Effectué sur des coupes ou dans des fosses de tailles très variables, l'échantillonnage a été adapté à chaque situation. L'objectif n'étant pas de créer un vaste référentiel comme pour l'étape 1, nous nous sommes contentés en moyenne de 5 échantillons par horizon de surface de paléosols, afin de bien représenter les variations latérales et l'éventuelle hétérogénéité du matériau.

#### **4.3.4 Traitement des données**

Pour les paléosols, les données de référence sont trop parcellaires. Nous les considérons donc tous comme inconnus et nous les confrontons uniquement au référentiel de surface. Nous n'avons pas tenté à l'aide de notre échantillonnage de prendre en compte l'histoire des paléosols tout au long de leur fonctionnement. En analysant uniquement la partie superficielle de paléosols, nous tentons simplement de connaître la nature du couvert végétal au moment de l'enfouissement. Les conditions de fonctionnement avant l'enfouissement sont les mêmes que celles évoquées pour un sol fonctionnel actuel (étape 1). Ainsi, en théorie, la matière organique analysée a pour origine un seul type d'écosystème si celui-ci a perduré au moins 150 ans avant l'enfouissement.

Le point faible de cette étape est le manque de données sur les paléovégétations ayant colonisé les paléosols. Les apports de la biogéochimie par l'étude, en cours, de biomarqueurs moléculaires seront sans doute déterminants pour valider définitivement cette étape.

## Conclusion

La matière organique du sol est un matériau complexe tant à l'échelle régionale qu'à l'échelle du profil. Le vaste panel de sites à l'échelle régionale permettra d'aborder la complexité des MOS à l'échelle du géosystème, en considérant un grand nombre de contextes pédologiques et écosystémiques (chapitre 5) dont nous vérifierons la stabilité (chapitre 6). D'autre part, la SPIR et le concept d'empreinte digitale nous permettront d'aborder de façon simple la complexité des MOS à l'échelle de l'échantillon (chapitre 7). La multiplication des échantillons sur le profil et sur les sites nous permettra de prendre en compte toute la variabilité locale. Enfin, chacune des trois étapes nous permettra de tester le pouvoir discriminant de la SPIR pour des MOS d'âges et de degrés d'évolution différents. La quatrième étape que nous aborderons sous forme de perspective consiste à étudier des profils de sols ou des paléosols dont l'histoire est totalement inconnue *a priori*. En s'assurant au préalable que les conditions de développement de ces sols ne sont pas trop différentes des conditions testées, nous espérons produire de nouvelles données paléoenvironnementales.



## **PARTIE III**

### **LE SUPPORT MATERIEL :**

#### **SITES D'ETUDE ET OUTILS D'ANALYSE**



## CHAPITRE 5

### L'AIRE D'ETUDE

La grande majorité des sites étudiés dans le cadre de cette mise au point méthodologique se trouve sur le territoire alsacien. Quelques sites ont également été étudiés en République Tchèque. Ce cadre, relativement restreint pour une méthode qui a vocation à être opérante sur un territoire beaucoup plus vaste, est largement compensé par la très grande diversité géographique de l'aire d'étude. En effet, sur un court transect Est-Ouest, courant du Rhin à la crête principale des Vosges, il est possible d'observer une grande diversité géologique, géomorphologique, pédologique, climatique et biogéographique. Nous insisterons ici plus particulièrement sur les contrastes biogéographiques et pédologiques puis nous renverrons le lecteur à l'Atlas des sites (Annexe 1) qui fournit des informations géographiques complètes pour chacun des sites étudiés.

#### 5.1. Contexte géographique

Le territoire alsacien est organisé suivant un axe Nord-Sud parallèle au Rhin qui le borde à l'Est et à la crête principale des Vosges qui le borde à l'Ouest. Il faut distinguer trois compartiments principaux, tant du point de vue physique que du point de vue de l'occupation du sol. A l'est, comblant partiellement un large graben, la vaste plaine alluviale du Rhin et de l'Ill est dominée par la culture céréalière et entrecoupée de quelques zones humides. Au centre, séparée de la plaine par la faille rhénane, une zone de piedmont recouverte par le vignoble occupe un vaste champ de failles en touches de piano. A l'Ouest, séparé par la faille vosgienne, se trouve le massif hercynien dominé par les granites du socle au Sud et les grès qui bordent le bassin parisien au Nord. Ce territoire est principalement consacré à la sylviculture à l'exception des parties sommitales qui servent d'estive au bétail. L'occupation humaine est globalement dense et se concentre dans les agglomérations de la plaine, sur le piedmont viticole et dans les vallées vosgiennes. A cette organisation longitudinale, il faut ajouter les secteurs de collines recouverts par d'épaisses couches de limons éoliens : le Sundgau au sud, le Kochersberg à l'ouest de Strasbourg et l'Outre Forêt au nord de Haguenau (Fig. 5.1.a).

Cette organisation longitudinale et l'obstacle que constitue le massif Vosgien aux flux d'Ouest favorise de forts contrastes climatiques. La pluviométrie atteint 2000 mm/an au sommet

du Hohneck, tandis qu'elle est seulement de 550 mm/an à Colmar à 30 km à l'Est (REKLIP, 1995). Ce contraste a des répercussions importantes sur le régime hydrique des sols. Concernant les températures, le contraste est également important entre les plus hauts sommets qui dépassent 1300 m et la plaine située à peine au-dessus de 200 m. A ce contraste spatial s'ajoute un fort contraste annuel typique des climats à tendance continentale avec des périodes prolongées de gel en hiver et de fortes chaleurs en été.

Du point de vue géologique, la diversité est également très importante y compris à l'intérieur des trois compartiments précités (Fig. 5.1a et b). La plaine se partage entre les alluvions carbonatées d'origine alpine et les alluvions acides d'origine vosgienne. Elle est bordée en certains endroits par des dépôts de lœss (Vogt, 1992). Le compartiment central est un véritable musée géologique, puisque, par le jeu des nombreuses failles, il offre à l'affleurement toute une gamme de roches sédimentaires allant du Permien au Pliocène (von Eller, 1984). Quant au massif vosgien, il est dominé, au Nord, par le grès du Bundsandstein (Gall *et al.*, 2006). Au Sud, où les mouvements de surrection ont été plus importants, la couverture sédimentaire est décapée et ce sont les granites qui dominent. Certains massifs, tel que le Rossberg ou le Nideck (Juteau et Rocci, 1965) sont d'origine volcanique, tandis que d'autres sont formés par des gneiss ou des grauwackes (von Eller, 1984).

Du point de vue des formations superficielles allochtones, la situation est très contrastée. La plaine ello-rhénane est dominée par une grande diversité de formations alluviales dont une partie de la dynamique a été interrompue par les grands aménagements du XIX<sup>e</sup> siècle. Les rivières vosgiennes et l'Ille présentent tout de même des dynamiques alluviales récentes et variées (Schmitt, 2001). En bordure de la plaine, les épaisses stratigraphies lœssiques et les paléosols qu'elles renferment constituent également un terrain géomorphologique riche en informations paléoenvironnementales (Wernert, 1957). Dans le massif vosgien, en revanche, les archives sédimentaires sont plus rares, à l'exception des tourbières. En dehors des quelques vestiges glaciaires (Andreoli *et al.*, 2006 ; Flageollet, 2003) et de quelques grands cônes d'épandage au sortir des vallées principales (Vogt, 1992), les formations remarquables sont rares et surtout très peu étudiées. La couverture pédologique repose soit directement sur le substratum, soit sur des formations de pentes relativement discrètes. Les formations les plus intéressantes sont les tourbières situées le plus souvent dans les cirques en lieu et place des anciens glaciers (Sittler et Ochsenbein, 1986 ; Woilard, 1978).

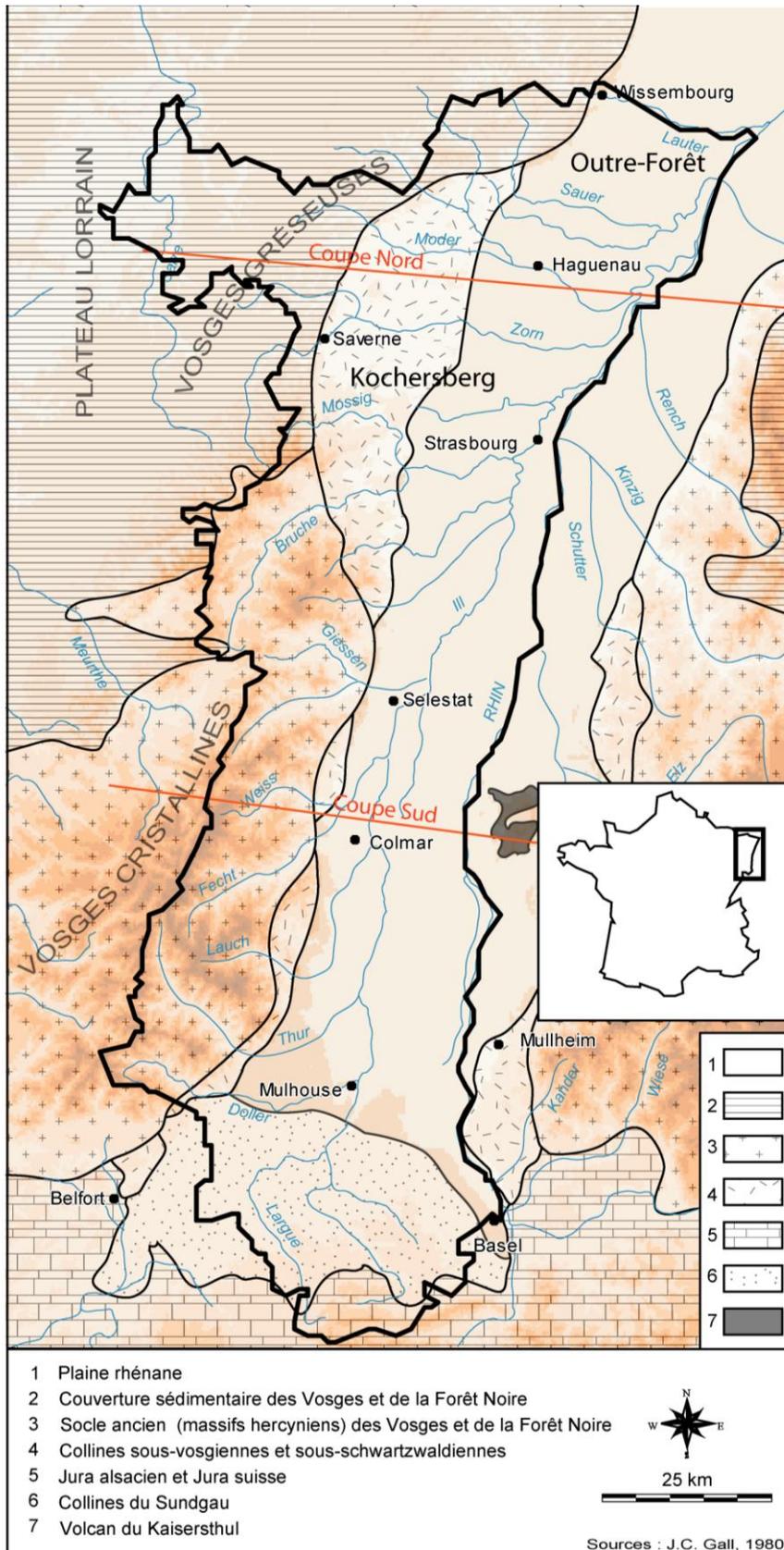


Fig. 5.1.a : Les grandes unités physiographiques des Vosges, de l'Alsace et de la Forêt Noire d'après Gall (2005).  
 Les coupes Sud et Nord renvoient à la figure 5.1b.

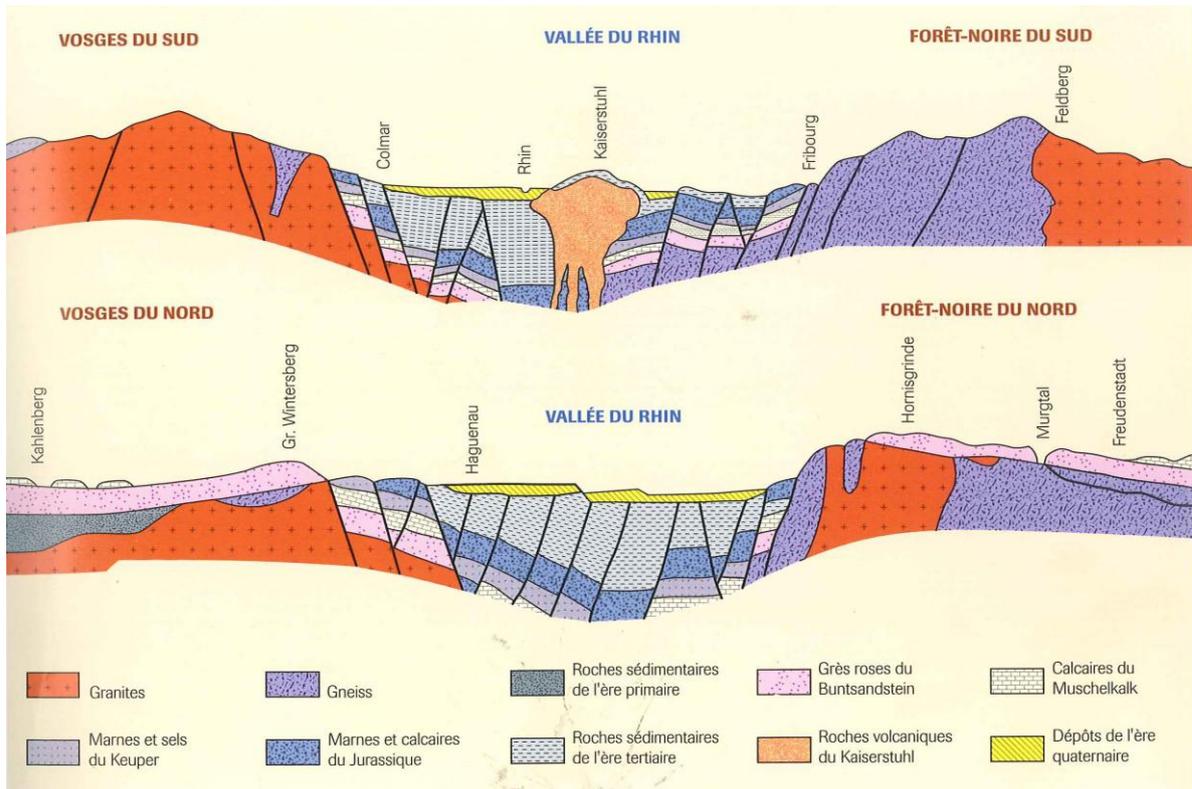


Fig. 5.1.b : Coupes transversales à travers le fossé rhénan et ses bordures à la hauteur de Colmar et Haguenau (Gall, 2005, modifié d'après Kircheimer, 1972). Coupes reportées sur la figure 5.1a.

## 5.2. La répartition de la végétation

La diversité des formations végétales est très importante à l'instar de tous les paramètres physiques et humains dont elle dépend. Il ne faut pas la confondre avec la biodiversité interne des écosystèmes. Elle suit la même organisation méridienne que le relief et le climat. Avant de traiter la difficile question de leur évolution, nous proposons de dresser un état des lieux par le biais de la cartographie.

### 5.2.1. Représentation théorique et représentation réelle

La répartition de la végétation répond à un certain nombre de contraintes naturelles. A l'échelle planétaire ou continentale, les cartes de végétation qui présentent une organisation latitudinale rendent bien compte de la contrainte climatique. A l'échelle du versant, des successions de végétation altitudinale sont également contrôlées par des gradients de températures. De même, dans la plaine alluviale d'un cours d'eau, des successions latérales sont observées en fonction de la nature des alluvions et de l'âge de leur dernier remaniement. Les formations pionnières occupent les bancs alluviaux les plus instables du lit majeur, tandis que la chênaie occupe les terrasses les mieux stabilisées. Ces répartitions théoriques sont cependant fortement mises à mal par les diverses actions anthropiques.

Le défrichement est l'action la plus remarquable. Mais la sylviculture entraîne également de nombreuses modifications à l'intérieur de la forêt. Bien souvent, l'étagement de la végétation persiste, mais il ne correspond pas toujours à un étagement naturel. Pour les Vosges, nous présenterons tout de même quelques données de répartitions théoriques existantes. Pour le piedmont et la plaine, l'impact respectif de la viticulture et de la céréaliculture est tel qu'il est vain de vouloir déchiffrer les traces d'une répartition naturelle des formations végétales à partir d'observations actuelles.

Ainsi, nous proposons de cartographier et d'examiner les données CORINE LandCover (2006) qui sont obtenues à partir de l'interprétation de photos aériennes. Ces données biophysiques (Commissariat général au développement durable, 2009) sont moins précises du point de vue écosystémique que les données théoriques, mais elles livrent une représentation plus fidèle de la couverture végétale réelle. La base de données comprend cinq grandes classes. La première classe comprend les territoires artificialisés. La classe 2 couvre les territoires agricoles avec une précision inégale. La classe 3 concerne les forêts et les milieux ouverts semi-naturels. Les marais et les tourbières sont regroupés dans la classe 4. Nous les avons écartés parce qu'ils sont marginaux à notre échelle d'étude. Enfin, la classe 5 comprend les surfaces d'eau libre. Les cours d'eau sont très mal représentés par les données CORINE en raison de la faible résolution spatiale mal adaptée aux objets linéaires. Chacune des 5 classes est ensuite subdivisée, formant deux niveaux hiérarchiques supplémentaires comprenant respectivement 15 et 44 classes. (Annexe 3)

### **5.2.2. Principe de cartographie**

Nous proposons différentes échelles de représentation : l'échelle de l'Alsace qui donne une vue d'ensemble de l'aire d'étude, l'échelle de la vallée pour le secteur de la Fecht et l'échelle du massif pour le secteur du Rossberg. Sur ces deux secteurs se concentrent un grand nombre de sites d'étude (*cf.* fig. 5.8). Le transect de la Fecht est bien représentatif de l'organisation méridienne de la végétation dans les Vosges et le fossé Rhénan. Le massif du Rossberg, qui sépare la vallée de la Doller au Sud-Ouest de la vallée de la Thur au Nord-Est présente un transect plus court représentatif des variations de végétation à l'échelle du versant.

Pour la carte à l'échelle de l'Alsace, nous avons choisi de représenter principalement l'opposition entre forêts et prairies (Fig. 5.2). La distinction entre forêts de feuillus, de conifères et forêts mixtes offerte par la base est utilisée pour les échelles plus grandes qui offrent une meilleure lisibilité. Les prairies « agricoles » comprises dans la classe 2 sont regroupées avec les prairies semi-naturelles comprises dans la classe 3. Puisqu'il n'est pas possible de distinguer les prairies de fauche des prairies pâturées par photo-interprétation, la nomenclature CORINE propose d'utiliser un critère d'altitude. Pour ne pas prendre en compte ce critère aléatoire, nous avons regroupé les deux classes. Pour les activités agricoles, nous avons fait le choix de ne pas séparer les différentes classes. Les activités soumises à des rotations sont difficiles à cartographier à partir des photos aériennes.

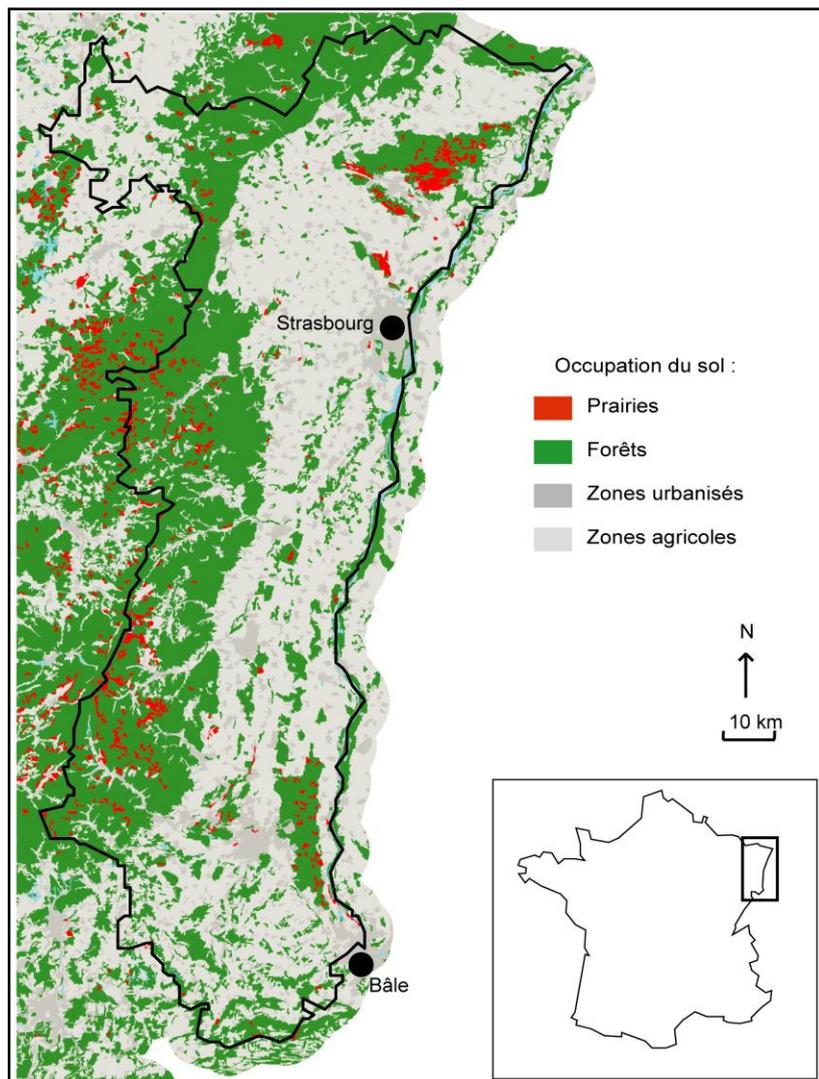
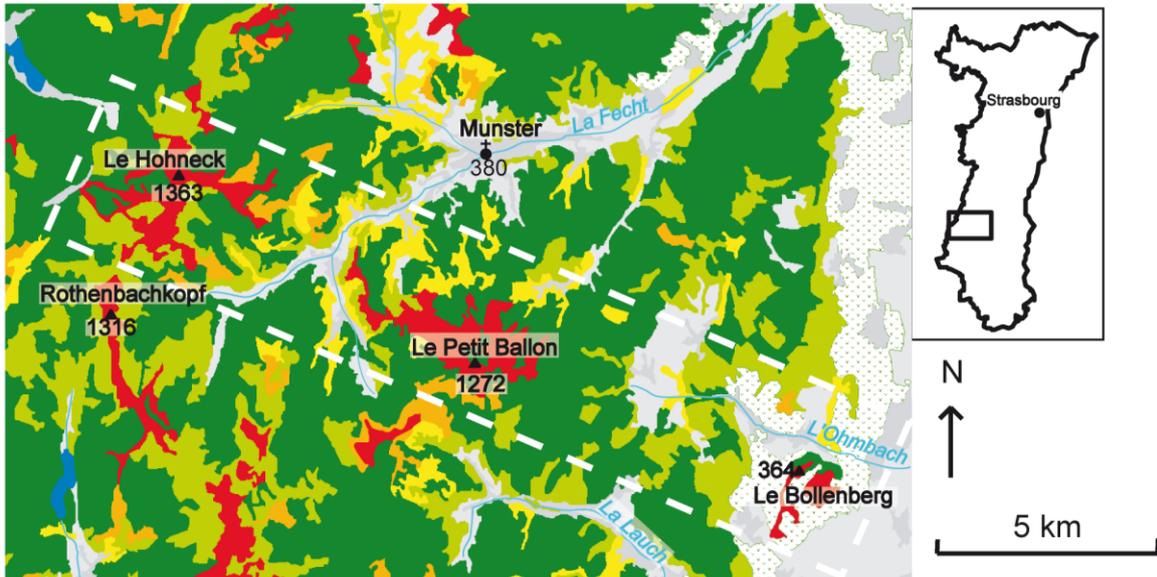
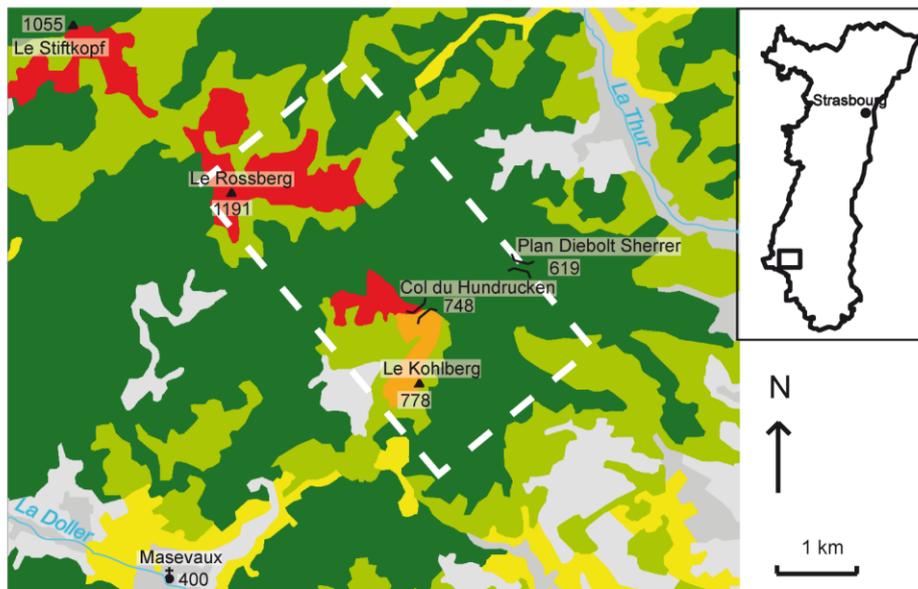


Fig. 5.2 : Carte de l'occupation du sol, simplifiée à l'échelle de Alsace (données Union Européenne - SOeS CORINE LandCover 2006).

Pour les cartes à plus grandes échelles (Fig. 5.3), les choix cartographiques toujours fondés sur les données CORINE LandCover sont différents. Nous avons distingué les « forêts de feuillus » des autres forêts. Les « forêts mixtes » n'ont pas été distinguées des « forêts de conifères » parce que nous estimons que les forêts composées à 100% de conifères sont soit des plantations, soit une interprétation erronée des photos aériennes (à l'exception des pineraies des Vosges du Nord qui n'apparaissent pas sur ces deux cartes). De plus, entre la hêtraie quasiment pure et la sapinière pure, il existe toutes les variantes et aucun seuil ne nous paraît pertinent. Pour les prairies, nous sommes fidèles à la nomenclature détaillée de la base de données CORINE LandCover, à savoir, d'une part, la sous-classe « prairies », et d'autre part la sous-classe « pelouses et pâturages naturels ». Par ailleurs, nous avons regroupé les sous-classes « landes et broussailles » et « forêt et végétation arbustive en mutation » dans une même classe puisqu'elles représentent chacune des espaces en mutation à des stades d'évolution différents. Les espaces qui portent encore les stigmates de la tempête de 1999 sont parfois inclus dans cette classe. La représentation des espaces artificialisés et agricoles est la même que pour l'échelle régionale à l'exception du vignoble que nous avons distingué. Nous avons ajouté les principaux cours d'eau afin de faciliter la localisation.



Vallée de la Fecht



Massif du Rossberg

Ecosystèmes forestiers :

- Hêtraies-sapinières (+Sapinières, Pessières...)
- Forêts caducifoliées (Hêtraies, Chênaies, Chênaies-Charmaies...)

Ecosystèmes ouverts :

- Pelouses et pâturages naturels
- Prairies
- Espaces ouverts en mutation

Ecosystèmes fortement anthropisés :

- Zones urbanisées
- Zones agricoles
- Vignobles
- Surfaces d'eaux libres
- Transect étudié

Fig. 5.3 : Cartes de l'occupation du sol dans la vallée de la Fecht et dans le massif du Rossberg, 68 (données et légende d'après Union Européenne - SOeS CORINE LandCover 2006).

### 5.2.3. La plaine

La plaine est largement dominée par les agrosystèmes, en tête desquels se place la monoculture du maïs. La très bonne disponibilité en eau et l'irrigation compensent largement la médiocre réserve hydrique de nombreux sols. Cette monoculture, parfois nuancée par la culture du blé et de la betterave ou de façon ponctuelle par des cultures maraîchères, occupe également des sols de bonne qualité développés sur les limons de débordement de l'Ill et du Rhin. Dans quelques secteurs préservés, la forêt alluviale, végétation « naturelle » du fossé rhénan, s'est maintenue malgré l'intensification agricole du XXe siècle sur ces terrains propices à la mécanisation. Les territoires forestiers sont soit de petites parcelles de forêts communales disséminées sur l'ensemble du territoire, soit des forêts aux abords directs du Rhin dans des secteurs peu ou pas protégés par le dispositif d'endiguement. Il faut noter, en plus de cette répartition, trois massifs forestiers importants ayant chacun des spécificités. Au sud, le massif de la Hardt est particulier du point de vue biogéographique en raison de la légère surrection qui éloigne considérablement la nappe rhénane de la surface et prive la végétation d'une réserve en eau qui, ailleurs, compense la très faible pluviométrie. En Alsace centrale, à l'est de la ville de Sélestat, l'Illwald est une vaste forêt alluviale humide sous l'influence de l'Ill et des nombreux bras qu'elle forme dans ce secteur. Au nord, la forêt domaniale de Haguenau se développe sur les alluvions de la Sauer d'origine vosgienne. Elle a été largement enrésinée depuis le XIXe siècle et se démarque ainsi des autres forêts du fossé rhénan. Les forêts de Haguenau et de la Hardt ont été épargnées par les grands défrichements en raison de leur grande sécheresse édaphique liée à des substrats respectivement sableux et graveleux.

La forêt rhénane est généralement dominée par le chêne (*Quercus* L. spp.) et le frêne (*Fraxinus excelsior* L.) accompagnés d'une forte biodiversité des ligneux (jusqu'à 48 espèces recensées par Carbiener, 1970). L'orme faisait partie, au même titre que le frêne, des essences les plus répandues avant qu'un champignon ne décime l'espèce la plus répandue (*Ulmus minor* Mill.) durant le XXe siècle. Les secteurs encore actifs du lit majeur rhénan présentent des successions classiques de forêts à bois tendre associées à la dynamique latérale du cours d'eau avec une forte présence du saule (*Salix alba* L.) et du peuplier noir (*Populus nigra* L.). Les forêts alluviales rhénanes ont fait l'objet de nombreuses études parmi lesquelles celles de Schnitzler (1988 ; 1995), Carbiener et Schnitzler (1990), Deiller (2003) et Boeuf *et al.* (2007). En dehors des forêts alluviales et des agrosystèmes, il existe quelques rares prairies humides dans le secteur de Sélestat. Cependant, leur histoire est mal connue et il est très probable qu'elles aient été mises en culture par le passé. Certaines ont été labourées et/ou amendées. L'histoire de ces prairies tout comme l'histoire des forêts alluviales et de leurs dynamiques fait partie des questions auxquelles nous espérons répondre grâce aux apports de la SPIR.

#### 5.2.4. Le piedmont

Le piedmont est le territoire de la viticulture. Les données CORINE LandCover sous-estiment sa superficie (14 500 ha) par confusion avec la classe « système culturaux et parcellaires complexes » (Fig. 5.3). La viticulture n'est interrompue que très ponctuellement par de petits secteurs de pelouses sèches qui occupent le sommet tabulaire de certaines collines calcaires. A l'amont du vignoble, une partie du champ de fracture est dominée par la forêt, mais du point de vue biogéographique, nous rattacherons ces forêts au cœur du massif vosgien.

La grande variabilité des substrats, des expositions et plus généralement des terroirs, contribuent à la grande diversité des vins d'Alsace et à la spécificité de chacun des grands crus. L'histoire du vignoble, de son installation à son évolution récente, fait également partie des problématiques d'histoire du paysage qui peuvent être abordées par le biais des archives pédologiques. Les faibles apports de litières, le problème des bandes enherbées et les remaniements importants du sol par les viticulteurs font partie des obstacles qui nous ont poussé à ne pas traiter cet agrosystème de façon approfondie dans cette étude.

Au milieu de ce vignoble, échappant à la forte pression foncière, se trouvent quelques espaces de pelouses sèches dominées par le brôme dressé (Jacob, 1984). La pluviométrie très faible (550 mm/an), des sols peu épais (<30 cm) et un substrat calcaire très filtrant rendent les conditions impropres à la culture de la vigne. La plupart de ces espaces est soumise à des mesures de protection en raison des espèces végétales particulières qu'elle renferme. Du point de vue écologique, ces espaces sont singuliers puisqu'ils abritent à la fois des espèces d'origine méditerranéenne et des espèces d'origine boréale. Ces caractéristiques suggèrent que ces espaces sont hérités de défrichements très anciens datant du Néolithique (Jacob, 1984). Cependant, depuis quelques décennies, le développement de mesures de protection sur certaines collines, dont l'interdiction des pratiques pastorales, conduit à la fermeture rapide du milieu par l'invasion de ligneux bas (ex. : *prunus spinosa*, L.) suivi rapidement par le chêne (ex. : collines du Zinkoepfle, 68). Ces mécanismes de colonisation rapide mettent sérieusement en doute l'hypothèse d'une origine ancienne. De plus, ils démontrent que le pastoralisme n'est pas forcément incompatible avec la préservation ou l'apparition de plantes rares provenant d'autres zones bioclimatiques. Evidemment, la plupart des plantes préservées ne résistent pas ou ne résisteront pas à une colonisation avancée par les ligneux. En fait, Schwartz *et al.* (2003) montrent que ces pelouses ont succédé à des défrichements datant du Haut Moyen Age. Les données CORINE LandCover illustrent bien le problème de gestion de ces espaces, puisque à l'entrée de la vallée de l'Ohmbach, les trois collines couvertes de ces pelouses (Bollenberg, Strangenberg et Zinkoepfle) sont enregistrées dans trois classes différentes, allant de la prairie à l'espace en mutation en passant par la pelouse naturelle (Fig.5.3). Bien que les sols peu épais de ces espaces ne soit pas les plus propices à l'enregistrement d'archives, ils ont fait l'objet de notre attention dans le référentiel de surface.

### 5.2.5. Le massif vosgien

A l'exception des sommets consacrés au pâturage, le massif vosgien est dominé par la forêt. L'emblématique hêtraie-sapinière couvre la plus grande partie des versants. A l'amont, au contact des chaumes d'altitude, elle est relayée par une hêtraie pionnière caractérisée par une morphologie de « krumholz » (bois tortueux et troncs multiples en raison d'une croissance en-dehors du milieu forestier). Certains arbres ont alors une allure de bonzaïs naturels. A l'aval, la transition vers la chênaie, la chênaie-hêtraie ou la chênaie-charmaie se fait de manière progressive à des altitudes variables en fonction de l'exposition. Dans les vallées de la Fecht et de la Lauch (Fig. 5.3), la répartition des forêts caducifoliées de basse altitude présente une belle opposition ubac-adret. Sur les versants ombragés, elles sont absentes tandis qu'elles s'étendent sur une bonne partie du versant ensoleillé. Au Nord, dans les Vosges gréseuses, le sapin est très souvent remplacé par le pin. A cet étagement théorique décrit par Rameau (1993) (Fig. 5.4) et spatialisé de façon synthétique par Sgard (1976) (fig. 5.5), il faut apporter quelques nuances.

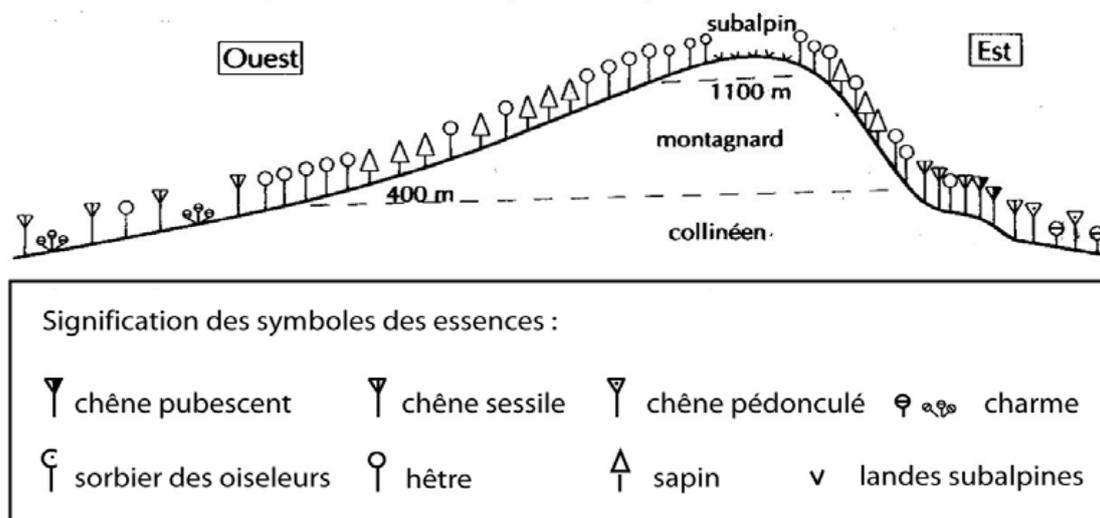


Fig. 5.4 : Etagement théorique de la végétation sur les versants vosgiens (Rameau et al., 1993).

En premier lieu, des faciès de chênaie-sapinière, bien que très peu décrits, sont régulièrement observés dans les zones de transition. Dans la chênaie-sapinière, les sapins sont toujours d'un âge limité et occupent la strate intermédiaire, tandis que le chêne domine la strate supérieure. Deuxièmement, des surfaces importantes sont sous l'influence des actions anthropiques. Ainsi, à proximité du vignoble, la fréquence des essences introduites augmente. Le châtaigner (*Castanea sativa* Mill.) et le robinier ou faux acacia (*Robinia pseudoacacia* L.) réputés imputrescibles ont été introduits respectivement avant le VIII<sup>e</sup> siècle et à partir du XVIII<sup>e</sup> siècle pour la fabrication des pieux qui soutiennent la vigne. D'autre part, les gestionnaires sylvicoles ont introduit l'épicéa (*Picea abies* L.) et le douglas (*Pseudotsuga menziesii* Mirb.) parfois sous forme de plantations qui n'ont pas grand-chose à voir avec le milieu forestier. La présence de l'épicéa dans les Vosges avant son introduction sylvicole est encore débattue.

Au schéma étagé, il faut également ajouter un nombre important de pâturages et de prairies de fauches à des étages intermédiaires entre la plaine et les pelouses subalpines. Une proportion importante de ces espaces étant en voie d'abandon, ils sont souvent associés à des faciès de reconquête forestière caractérisés par le genévrier (*Juniperus communis* L.) ou le genêt à balais (*Cytisus scoparius* (L.) Link) (par exemple secteur du col du Hundsrucken, fig. 5.3). Les dynamiques de reconquête d'espaces pastoraux abandonnés, l'impact des pratiques sylvicoles et le suivi du front pionnier de hêtres à la limite de la lande sub-alpine sont autant de problématiques qui peuvent être abordées à l'aide des archives pédologiques.

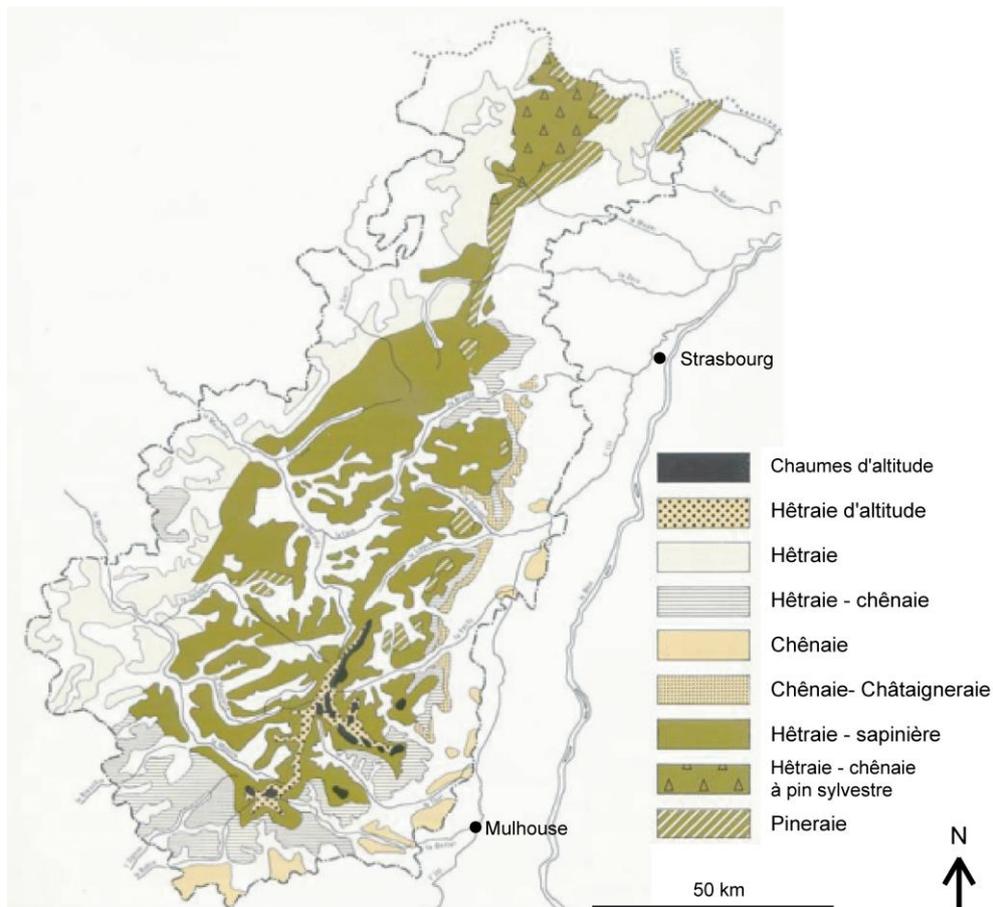


Fig. 5.5 : Les grands types de peuplements forestiers du massif vosgien (Sgard et al., 1976).

### 5.2.6. Aspects historiques

Ce paragraphe n'a pas vocation à dresser un tableau complet de l'histoire de la végétation en Alsace, mais simplement de rappeler les traits principaux qui caractérisent la végétation holocène au regard des influences anthropiques. Une synthèse plus complète inspirée des travaux de Carbiener et de plusieurs palynologues est livrée par Boudot (1983). Malheureusement, cette synthèse est déjà ancienne et ne prend pas en compte certaines données récentes.

A l'Atlantique, les premiers balbutiements de l'agriculture ont un impact limité. Le climat doux permet à la chênaie mixte de dominer quasiment tout le paysage y compris la majeure partie du massif vosgien. L'érable, le frêne, l'orme et le tilleul sont bien représentés dans les diagrammes polliniques. C'est au Subboréal que débute l'installation du hêtre et du sapin dans le massif vosgien, d'abord sous forme de chênaie-hêtraie avant l'extension massive de la hêtraie-sapinière. Dès la protohistoire, les sommets vosgiens sont défrichés et semble-t-il pâturés (Goepp, 2007). Ces défrichements s'intensifient à la période gallo-romaine avec une extension importante des chaumes d'altitude. Plus bas, le châtaigner et le noyer apparaissent. Après la période faste de l'Antiquité, les grandes invasions s'accompagnent d'un déclin démographique et d'une reconquête des milieux forestiers sur les pâturages. Le hêtre, le charme et le bouleau sont très présents. Au VIIe siècle, l'installation d'abbayes puissantes dans toute la région réactive la dynamique de défrichement qui s'intensifie au cours du Moyen Age. Cette dynamique est stoppée de façon très brutale par la guerre de Trente Ans qui décime la population alsacienne (Garnier, 2004). A partir de 1700, la gestion forestière maladroite prend le relais des pratiques agricoles en matière d'impact sur la végétation. Le sapin est d'abord en déclin en raison d'une surexploitation au XVIIIe siècle, puis il est, avec l'épicéa et le pin, largement favorisé au XIXe siècle dans le cadre d'une politique d'enrésinement. A partir du milieu du XIXe siècle, la déprise agraire entraîne l'enforestation des pâturages vosgiens.

## **5.3 Sols et Paléosols**

### **5.3.1 Les données cartographiques**

Pour les sols, il n'existe pas de données équivalentes à la base CORINE LandCover. Sur le territoire alsacien, la seule carte fondée sur des observations pédologiques de terrain est la carte pédologique de la France au millionième (Dupuis, 1966). Cette carte représente avec une résolution acceptable la répartition des grands ensembles pédologiques (Fig. 5.6). Elle souffre cependant d'une typologie ancienne. Dans les Vosges, la ceinture de sols bruns acides entre 1000 et 1300 m répond mieux au concept récent d'alocrisol (Baize et Girard, 2008). Dans la plaine rhénane, le terme de sol de tourbière semble très exagéré pour des espaces aussi vastes. Il s'agit en fait de sols hydromorphes (gleysol, WRB 2006) présentant des profils très organiques.

La carte des sols dominants de France dressée par l'INRA (Fig. 5.7) en 2007 propose également une cartographie à l'échelle de la France. Par contre, la résolution est bien plus médiocre et correspond à la résolution de la carte européenne des sols. Bien que la légende fasse référence à la classification moderne du référentiel pédologique, l'organisation de cette légende et l'association des types de sols dans plusieurs sous-parties montrent bien que ce document est plutôt une carte théorique fortement inspirée par le rôle du substrat dans la pédogénèse. Malgré cette simplification et la faible résolution, l'extrait de la carte couvrant le

territoire alsacien donne une bonne image de la répartition des sols. Une fois de plus, l'organisation méridienne est le trait dominant de la répartition.

A l'échelle régionale, un travail important d'observations et de relevés des sols a été financé par la Région Alsace (Koller et Party, 1994). Le territoire a été découpé en 15 « petites régions naturelles ». Un guide des sols a été consacré à presque chacune des « régions ». Malheureusement, ce travail considérable de description et de classification n'a débouché « que » sur des cartes théoriques au 1/100 000e qui s'appuient sur un nombre limité d'observations. Deuxième « bémol » de taille, au regard de nos préoccupations, les descriptions ne concernent que les secteurs agricoles. Les secteurs de prairies naturelles et de forêts sont totalement laissés de côté. De manière générale, la spatialisation à grande échelle des sols demeure déficitaire en Alsace. L'absence de carte des sols issue de la série au 1/100 000e de l'INRA est un handicap. Néanmoins nous pouvons dégager les grandes tendances de la pédogenèse sur le territoire.

### **5.3.2 Les principaux sols alsaciens**

Le massif des Vosges est dominé par les sols acides : podzols (WRB 2006) et alocrisols (Cambisol hyperdystic, WRB, 2006). Les podzols couvrent la plupart des zones d'affleurement du grès. Sur certains substrats granitiques, des formes de podzolisation moins prononcées sont également observées. Elles sont plus ou moins bien développées en fonction de leur position topographique. Ce sont des podzols humiques classiques ou des ocres podzoliques. Les Hautes Vosges sont principalement recouvertes d'aloocrisols, à l'exception des plus hauts sommets (>1300 m) où se développent des rankers cryptopodzoliques (Umbric podzol ou Umbrisol, WRB, 2006) (Carbiener, 1963 ; Goepf et Schwartz, 2007). Les aloocrisols se caractérisent par une activité biologique importante et par une faible différenciation à l'exception de l'horizon A qui dépasse rarement quelques centimètres d'épaisseur sous forêt (*cf. infra*, annexe1). Les rankers cryptopodzoliques sont caractérisés par une forte imprégnation en matière organique sur une épaisseur pouvant atteindre 50 cm et une activité biologique limitée.

Sur les terrains calcaires du piedmont, les sols les plus évolués sont des sols bruns décarbonatés (Eutric Cambisol, WRB, 2006). Les sols moins évolués ou moins bien drainés sont des sols bruns calcaires (Hypereutric Cambisol, WRB, 2006). Sur les collines dites « sèches » subissant l'effet de fœhn et recevant moins de 600 mm de pluie par an se développent des rendzines (Rendzic Leptosols, WRB, 2006).

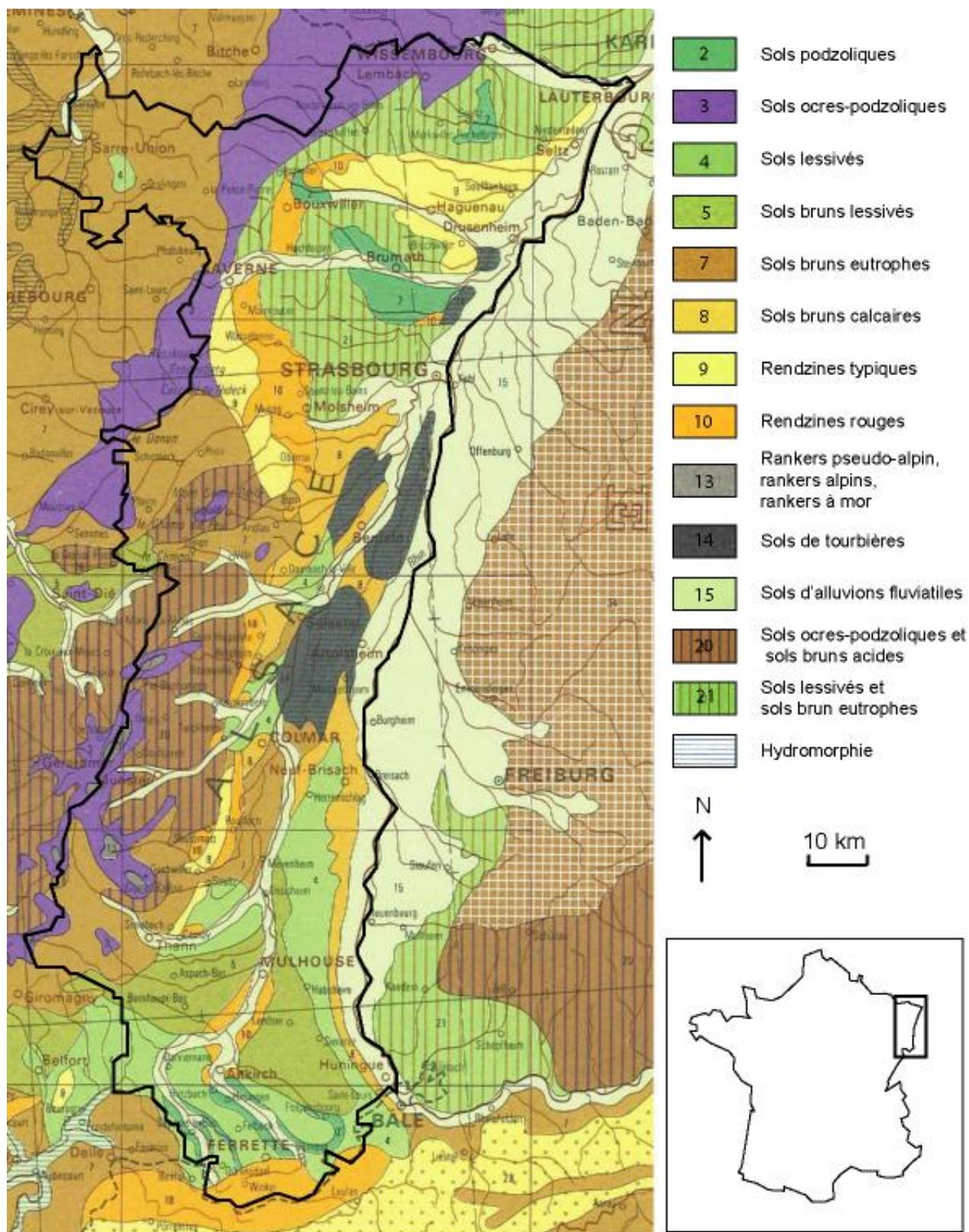


Fig. 5.6 : Extrait de la carte pédologique de la France au 1 000 000e (Dupuis, 1966).

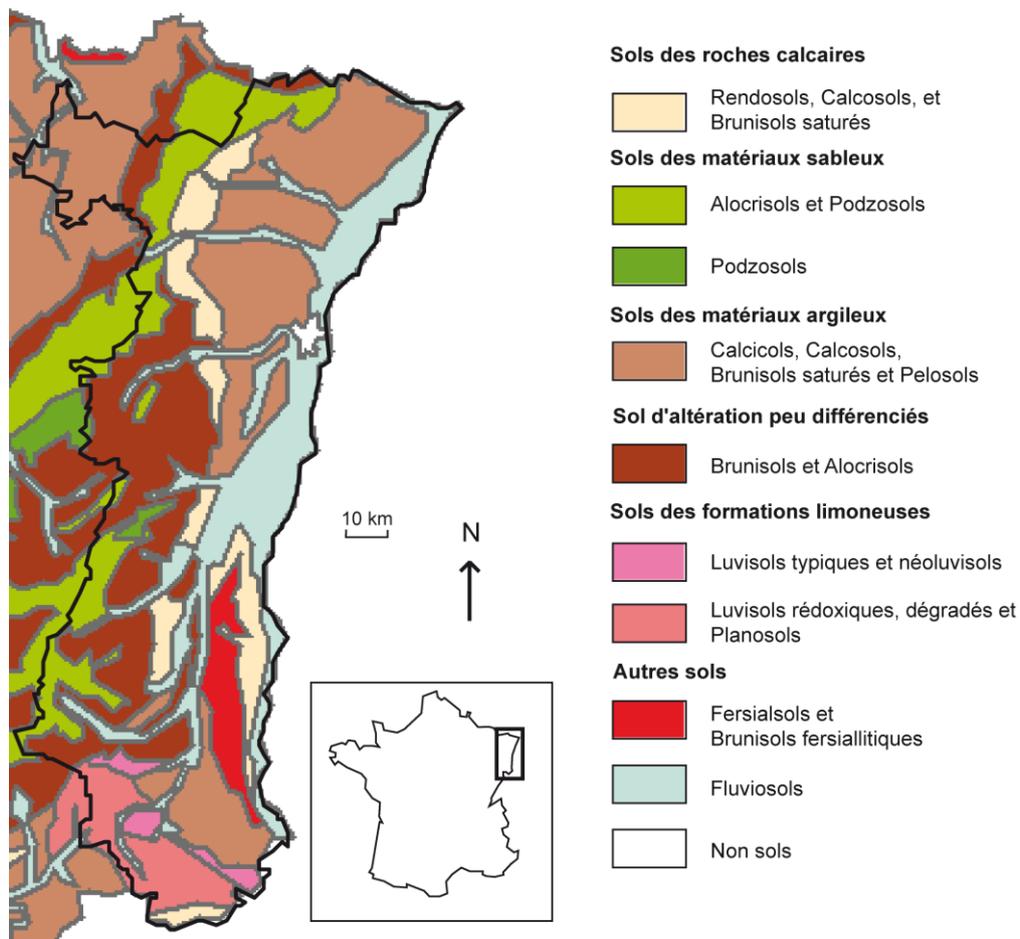


Fig. 5.7 : Extrait de la carte des sols dominants de France au 1 000 000e (Le Bas, 2007).

La plaine est dominée en son centre par les sols hydromorphes (Gleysols). Ils présentent différents stades d'hydromorphie en fonction des fréquences d'inondations et du niveau de la nappe. Au sud, dans le massif forestier de la Hardt surélevé par rapport à la nappe, se trouve la formation la plus singulière d'Alsace. Il s'agit de sols rouges dits « méditerranéens » (Chromic Haplic Luvisols, WRB, 2006). Leur genèse sous climat méditerranéen (Bornand, 1978) est actuellement discutée (Legros, 2007). Dans la bande rhénane, se trouvent des sols calciques peu évolués d'apport alluvial (Fluvisols, WRB, 2006). Enfin, sur les collines loessiques, se développent des sols bruns lessivés (Luvisols, WRB, 2006). Cependant, les processus d'érosion intenses dans ces secteurs ont détruit la plupart de ces sols, à l'exception de ceux en position sommitale. Sur les versants, ils sont remplacés par des sols bruns calcaires moins évolués (Colluvic Cambisol) tandis que dans les fonds de vallons, les colluvions sont affectés par des processus importants d'hydromorphie (Ramdane, 1981).

### 5.3.3. Les paléosols observés en Alsace

Nous limitons notre attention aux paléosols contenant encore de la matière organique (>0,1 %) et ayant subi peu de processus de diagenèse. Ceci exclut, *de facto*, les paléosols antérieurs au Quaternaire. Parmi les paléosols ayant conservé de la matière organique se dégagent les paléosols postglaciaires enfouis sous des colluvions, des alluvions ou des structures archéologiques et les sols isohumiques (chernozems) des périodes froides, enfouis sous d'épaisses couches de loess. Dans ces loess, se sont également développés durant les interglaciaires des sols bruns lessivés et des sols des climats chauds identifiables par leur couleur rouge liée à l'oxydation du fer. Malheureusement, la faible teneur en matière organique de ces sols quand ils sont fonctionnels ne permet pas de conserver suffisamment de matière organique lors de la fossilisation. De plus, la partie supérieure, la plus organique de ces sols est souvent tronquée. Les sols isohumiques ont, eux, l'avantage de contenir une quantité élevée de matière organique sur une épaisseur importante. De plus, ces sols lorsqu'ils se sont développés en condition périglaciaire ont moins été exposés au risque de troncature et ont pu être recouverts rapidement par les derniers grands dépôts éoliens.

L'épaisse stratigraphie d'Achenheim (67), qui comprend cinq niveaux de paléosols est de loin la plus instructive. De plus, elle a livré un matériel archéologique riche qui fixe des repères chronologiques. Elle a fait l'objet d'une attention particulière et continue durant les deux premiers tiers du XXe siècle, menée en parallèle de l'exploitation commerciale de la loessière (Vogt, 1992). Les résultats les plus significatifs ont été publiés par Wernert (1957). Malheureusement, l'intérêt scientifique transdisciplinaire d'un tel gisement n'a pas suffi à préserver ce site d'une transformation et d'un comblement par une décharge. D'autres stratigraphies du même type, mais moins complètes ont également été étudiées comme à Eguisheim (Blanck *et al.*, 1971 ; Vogt, 1992). L'alternance de faciès humides (sols bruns lessivés, milieux marécageux) et de faciès secs (sols isohumiques) traduit la position intermédiaire du fossé rhénan, tantôt sous influence atlantique et tantôt sous influence continentale. Nos investigations le long du futur tracé de la LGV-Est (ligne à grande vitesse), en collaboration avec l'INRAP et le Pôle d'Archéologie Interdépartemental Rhénan ont révélé des sols isohumiques scellés sous de faibles épaisseurs de loess (< 2 m) dans le secteur du Kochersberg. Les fouilles préventives qui succéderont au diagnostic et le suivi des travaux de décaissement de certaines collines permettront peut être de révéler des stratigraphies plus épaisses. En attendant, ces formations ont été prélevées et traitées dans le cadre de ce travail de thèse.

Concernant les paléosols de l'Holocène ou du Tardiglaciaire, très peu d'études existent. La plupart des cartes géologiques de la région attribuent les formations superficielles les plus récentes au Würm, occultant par conséquent les dynamiques postérieures. L'explosion du nombre d'observations géomorphologiques et archéologiques depuis les lois sur l'archéologie préventive montrent une réalité différente. De nombreuses formations cartographiées comme würmiennes s'avèrent postérieures au regard de datations archéologiques et paléoécologiques irréfutables. Ces résultats, encore parcellaires, ne sont pas publiés. Nous présentons dans ce

travail certaines de ces données, lorsqu'elles sont associées à des paléosols potentiellement exploitables dans notre démarche.

Après avoir dressé le profil de notre aire d'étude nous allons maintenant présenter les sites que nous avons jugés représentatifs de cette grande diversité.

## 5.4 Les sites d'étude

Pour chaque placette étudiée, nous avons dressé une fiche signalétique qui comporte une photo, les éléments nécessaires à une localisation sub-métrique, les informations concernant la végétation, le substrat et le sol, ainsi que les principaux résultats des analyses de sol effectuées. Un effort important de localisation a été mené, afin de ne pas fermer la porte à une opération de suivi à moyen terme. Les fiches des placettes pour lesquelles un profil de sol est étudié sont complétées par la description du *solum*. Chaque placette est identifiée par un code de trois lettres. L'ensemble des fiches est regroupé dans l'Atlas des sites en annexe 1. Les fiches sont classées en deux groupes (sols et paléosols) par ordre alphabétique des codes.

### 5.4.1. Les sites de surface (étape 1)

Sur le territoire alsacien, 53 placettes ont fait l'objet de prélèvements sur les quatre centimètres superficiels du sol (Fig. 5.8, 5.9 et tab. 5.1). Ces placettes se répartissent sur l'ensemble du territoire. Néanmoins le massif du Rossberg et la vallée de la Fecht sont deux secteurs où se concentrent respectivement 9 et 18 placettes dessinant deux transects à l'échelle du versant et à l'échelle du fossé rhénan. Trois placettes étudiées en République Tchèque complètent ce corpus. Du point de vue des formations végétales, nous avons 23 prairies au sens large, 32 forêts et une placette de vignoble. Parmi les placettes se trouvent 10 sites de pelouses sèches, 2 prés de fauche de fond de vallée et 11 pâturages parmi lesquels 3 se situent à l'étage sub-alpin au-delà de 1300 m. Pour les forêts, nous avons 7 forêts largement dominées par les conifères, 10 forêts mixtes et 15 forêts caducifoliées. Aucun des sites n'est une plantation. Quatre des forêts de conifères sont des sapinières, deux des pineraies et la dernière est une pessière (non plantée). Les forêts mixtes se répartissent entre des hêtraies-sapinières (5), des chênaies-sapinières (4) et un faciès d'éboulis à très forte biodiversité (RTH). Parmi les forêts caducifoliées, 6 sont des hêtraies pures et 9 sont des chênaies. Parmi les chênaies, certaines sont quasiment pures (EFC, HKC) certaines présentent un faciès de chênaie-charmaie (OCS), tandis que d'autres présentent une forte biodiversité caractéristique des milieux alluviaux (5 forêts alluviales).

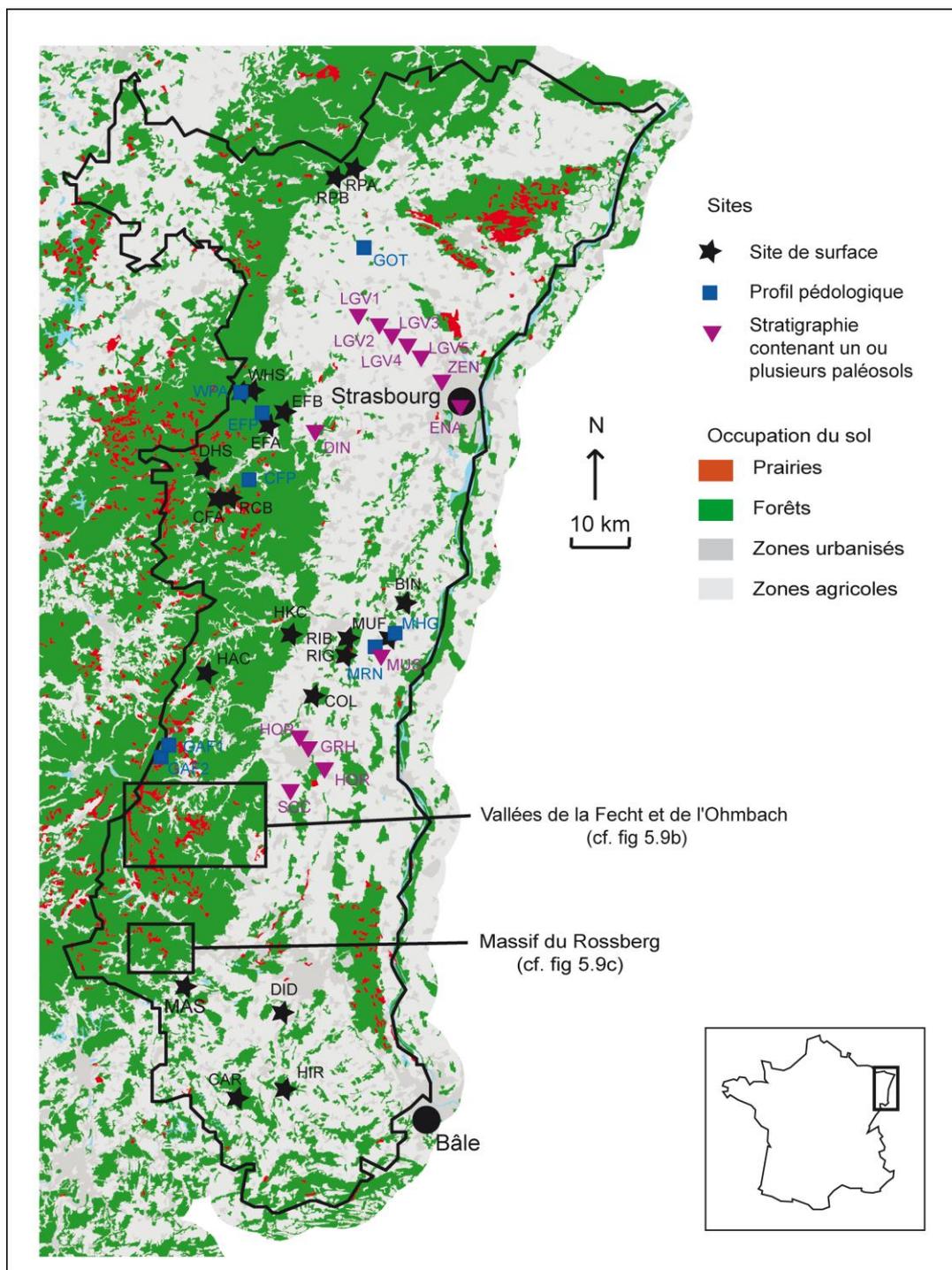
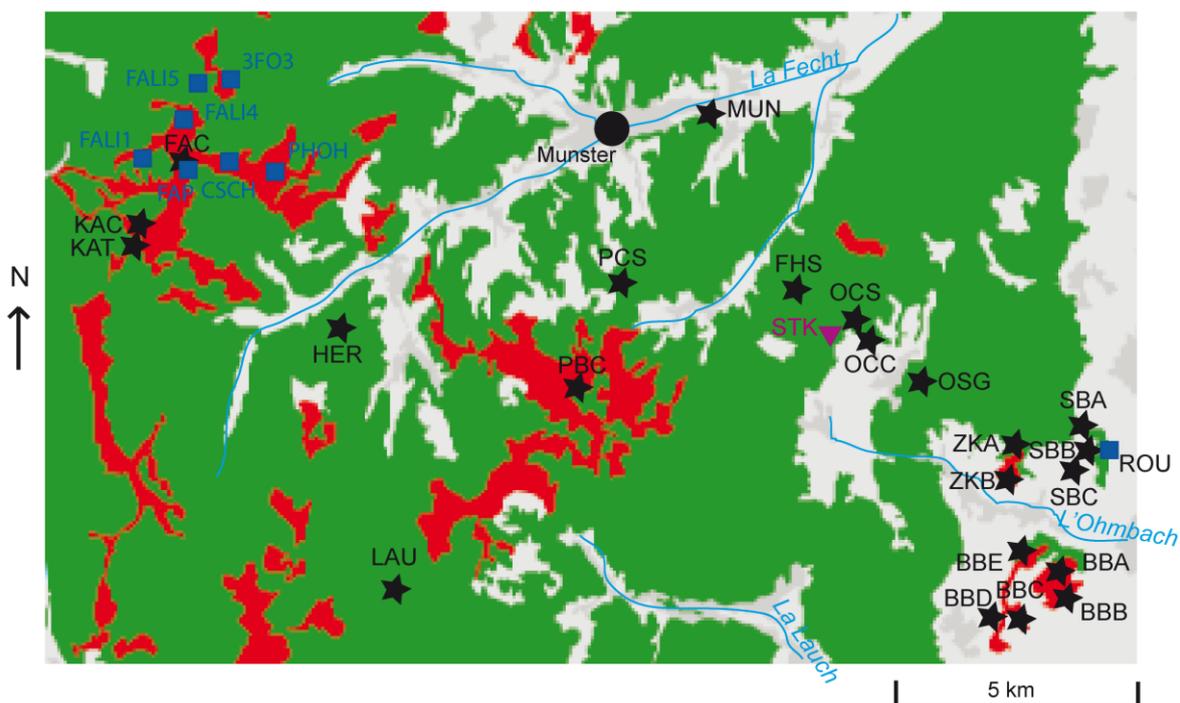


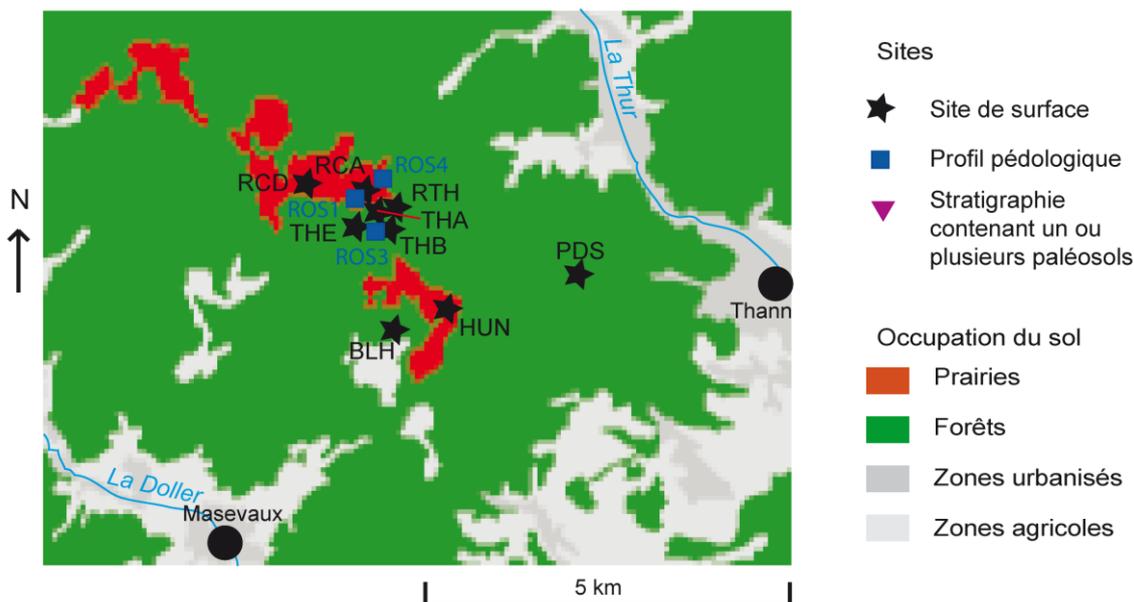
Fig. 5.8: Carte de localisation des sites d'étude (fond de carte d'après CORINE LandCover 2006).

Les codes renvoient aux tableaux 5.1, 5.2 et 5.3

Vallées de la Fecht et le l'Ohmbach



Massif du Rossberg



- Sites
- ★ Site de surface
  - Profil pédologique
  - ▼ Stratigraphie contenant un ou plusieurs paléosols
- Occupation du sol
- Prairies
  - Forêts
  - Zones urbanisés
  - Zones agricoles

Fig. 5.9 : Carte de localisation des sites d'étude, secteurs de la vallée de la Fecht et du massif du Rossberg (fond de carte d'après CORINE LandCover 2006). Les codes renvoient aux tableaux 5.1, 5.2 et 5.3

Afin d'assurer une qualité optimale de l'échantillonnage, nous avons pris en compte un maximum de facteurs et veillé à ce qu'un grand nombre de combinaisons de facteurs soient représentées. Comme le montrent les figures 5.10 et 5.11, les altitudes, les expositions et les valeurs de pente sont toutes bien représentées.

Pour la sapinière, la hêtraie-sapinière, la chênaie-sapinière, et la chênaie, chacun des faciès a été échantillonné au minimum sur quatre substrats différents afin de faire varier au maximum les conditions minéralogiques et granulométriques. Parmi la grande diversité de substrats, il faut distinguer 2 groupes fondamentaux, les substrats carbonatés (23) et les substrats acides (33). De même, nous avons tenté, dans la mesure du possible, de faire varier au maximum les contextes pédologiques. Cependant, les alocrisols sont largement dominants dans l'échantillonnage. Par ailleurs, un certain nombre de formations végétales sont très fortement interdépendantes du type de sol. Ainsi, les forêts alluviales sont toujours sur des sols hydromorphes, mais nous avons veillé à échantillonner un large panel de conditions d'hydromorphie. Pour les pelouses sèches, les conditions pédologiques sont plus uniformes et sur les 10 placettes se développent des rendzines (calcic leptosols, WRB).

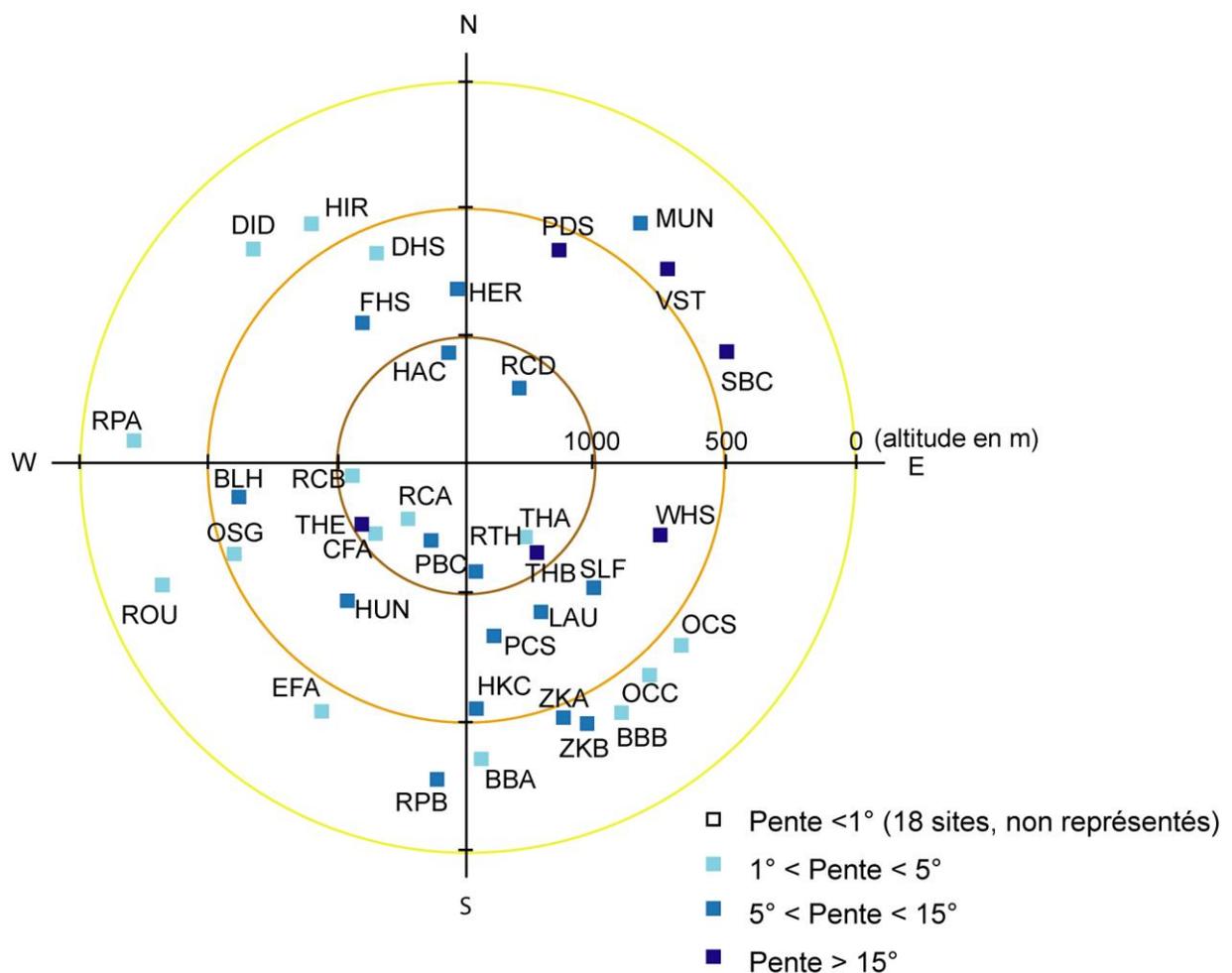


Fig. 5.10 : Répartition théorique des sites en fonction de l'altitude de l'exposition et de la pente.

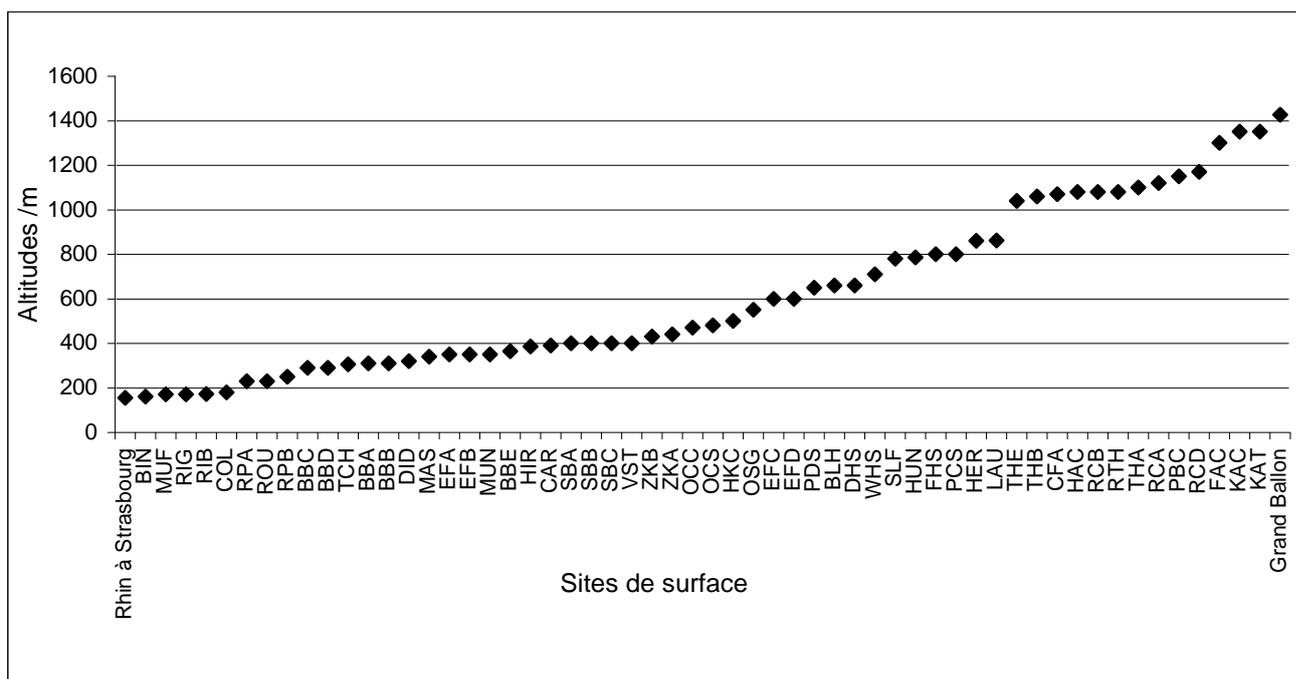


Fig. 5.11 : Répartition des altitudes des 56 sites de surface.

#### 5.4.2. Les profils de sols (étape 2)

Parmi les 20 profils étudiés (Tab 5.2), 13 ont été choisis parce que des données paléoenvironnementales de référence existaient déjà. Il s'agit tout d'abord de trois profils sous prairies et un profil sous forêt dans la partie sommitale du massif du Rossberg. Dans ce secteur, plusieurs phases de défrichement dont certaines récentes ont été mises en évidence. Des alocrisols se développent de façon assez uniforme sur ce massif d'origine volcanique où les affleurements volcano-sédimentaires présentent une organisation géologique complexe. Même si les abords directs des fosses pédologiques n'ont pas toujours été ré-échantillonnés, les neuf sites de surface sont bien représentatifs des différentes formations végétales. Nous disposons donc pour ce massif d'un échantillonnage très cohérent qui devrait constituer un des piliers de la mise au point méthodologique. Ensuite, nous avons repris neuf profils situés sur la crête principale des Vosges dans les massifs du Hohneck et du Gazon du Faing. Ces sites ont également connu plusieurs phases de défrichement. Le site du Falimont, à l'image des plus hautes chaumes (> 1300 m) est cependant resté ouvert depuis plus longtemps. Une attention particulière a été portée à ce site. Notre référentiel de surface couvre l'ensemble des formations végétales du secteur. Le massif du Hohneck constitue donc le second pilier de notre démarche. Les données paléoenvironnementales et les scénarios d'évolution sont détaillés dans le chapitre suivant consacré aux données existantes.

Les contraintes imposées par les données existantes nous cantonnent dans deux massifs et ne répondent pas complètement à notre volonté de travailler à l'échelle régionale. Par conséquent, neuf autres profils ont été prélevés et analysés. Ils se répartissent bien mieux sur le

territoire et vont de la plaine alluviale aux sommets vosgiens en passant par les collines lœssiques, calcaires et gréseuses et intègrent un plus grand nombre de formations végétales (prairie humide, forêt alluviale, chênaie ...). Le choix a tout de même été guidé par l'existence de programmes de recherche menés en parallèle afin de disposer au maximum de données paléoenvironnementales. L'inconvénient est que ces profils sont bien moins renseignés par d'autres méthodes ou sont encore en cours d'étude (*cf. infra* chapitre 6). Pour parfaire cet échantillonnage, nous avons ajouté deux profils prélevés en République Tchèque, pour lesquels des garanties solides sur la stabilité du couvert forestier sont disponibles.



Code de la placette	site	Commune	Altitude /m	Orientation	Formation végétale	Type de sol (WRB)	Substratum
BBA	Bollenberg	Westhalten	310	S	pelouse sèche	calcic leptosol	calcaire
BBB	Bollenberg	Westhalten	310	S-E	pelouse sèche	calcic leptosol	calcaire
BBC	Bollenberg	Orschwihr	290	sommet	pelouse sèche	calcic leptosol	calcaire
BBD	Bollenberg	Orschwihr	290	sommet	pelouse sèche	calcic leptosol	calcaire
BBE	Bollenberg	Westhalten	364	sommet	pelouse sèche	calcic leptosol	calcaire
BIN	Rohrzembs	Bindernheim	161	plaine	forêts alluviale	histosol	tourbe
BLH	Rossberg	Bourbach-le-haut	660	W	chênaie-sapinière	cambisol	volcano-sédimentaire
CAR	Stoeffelhag	Carspach	390	Sommet	hêtraie	cambisol	loess
CFA	Champ du feu	Belmont	1070	S-O	prairie	cambisol	granite
COL	F. comm. de Colmar	Colmar	179	plaine	forêts alluviale	gleysol	alluvions vosgiennes
DHS	Donon	Grandfontaine	660	replat	hêtraie-sapinière	cambisol	spilites
DID	Gallenhölzchen	Didenheim	320	N-W	chênaie	cambisol	loess
EFA	Elmerforst	Balbronn	350	W	chênaie	cambisol	grès
EFB	Elmerforst	Balbronn	350	sommet	hêtraie	cambisol	grès
EFC	Elmerforst	Cosswiller	600	plateau	sapinière	entic podzol	grès
EFD	Elmerforst	Cosswiller	600	plateau	sapinière	entic podzol	grès
FAC	Hohneck	Stosswihr	1300	sommet	prairie	umbrisol	granite
FHS	Rundkopf	Rouffach	800	N-W	hêtraie-sapinière	cambisol	granite porphyroïde à biotite
HAC	Haicot	Sainte-Marie aux Mines	1080	N	prairie	cambisol	granite
HER	Herrenberg	Mittlach	860	N	sapinière	cambisol	grauwackes
HIR	Breitholz	Hirsingue	385	N-W	hêtraie	cambisol	loess
HKC	Haut-Koenigsbourg	Saint-Hippolyte	500	S	chênaie	cambisol	granite
HUN	Rossberg	Bourbach-le haut	785	S-W	prairie	cambisol	latite à biotite
KAC	Hohneck	Metzeral	1350	sommet	prairie	umbrisol	granite
KAT	Hohneck	Metzeral	1350	sommet	prairie	umbrisol	granite
LAU	Klinzrunz	Linthal	861	S-SE	sapinière	cambisol	grauwackes
MAS	Vallée de la Doller	Guewenheim	340	replat	pré de fauche	cambisol	alluvions vosgiennes
MUF	Ried	Mussig	170	plaine	forêt alluviale	gleysol	alluvions calcaires
MUN	Vallée de la fecht	Griesbach-au-val	350	N-E	pré de fauche	cambisol	loess

OCC	Kalkofen	Osenbach	470	S-E	chênaie-charmaie	calcic leptosol	calcaire
OCS	Kalkofen	Osenbach	480	S-E	chênaie-sapinières	calcic leptosol	calcaire
OSG	Hohberg	Westhalten	550	W-SW	chênaie-sapinières	calcic leptosol	calcaire
PBC	Petit Ballon	Sondernach	1150	S-W	prairie	cambisol	granite
PCS	Petit Ballon	Wasserbourg	800	S	chênaie-sapinière	cambisol	granite
PDS	Rossberg	Bittschwiller-les-Thann	650	N-NE	hêtraie	cambisol	latite quartzifère
RCA	Rossberg	Bourbach-le-Haut	1120	S-SW	prairie	cambisol	volcano-sédimentaire
RCB	Champ du feu	Belmont	1080	O	prairie	cambisol	diorites
RCD	Rossberg	Moosch	1170	N-E	prairie	cambisol	labradorite
RIB	Illwald	Sélestat	172	plaine	forêts alluviale	gleysol	alluvions de l'III
RIG	Illwald	Sélestat	170	plaine	forêts alluviale	gleysol	alluvions de l'III
ROU	Vorburg	Rouffach	230	W-SW	vigne	cambisol	loess remaniés
RPA	Vallon du Rothbach	Lichtenberg	230	W	pineraie-pessièr	podzol	grès
RPB	Bruderthal	Rothbach	250	S	pineraie	podzol	grès
RTH	Rossberg	Bourbach-le-Haut	1080	S	forêt mixte	leptosol	trachyte inférieur
SBA	Strangenberg	Westhalten	400	sommet	pelouse sèche	calcic leptosol	calcaire
SBB	Strangenberg	Westhalten	400	sommet	pelouse sèche	calcic leptosol	calcaire
SBC	Strangenberg	Westhalten	400	E-NE	pelouse sèche	calcic leptosol	calcaire
SLF	Salajka	Roznov (CZ)	780	S-E	hêtraie-sapinière	cambisol	flysch
THA	Rossberg	Bourbach-le-Haut	1100	SE	hêtraie	cambisol	trachyte inférieur
THB	Rossberg	Bourbach-le-Haut	1060	SE	hêtraie-sapinière	cambisol	trachyte inférieur
THE	Rossberg	Masevaux	1040	S-W	pessièr	cambisol	trachyte inférieur
VST	Ve Studenem	Dojetrice (CZ)	400	N-E	hêtraie	cambisol	gneiss
WHS	Kohlberg	Wangenbourg-Engenthal	710	E S-E	hêtraie-sapinière	entic podzol	grès
ZKA	Zinnkoepfle	Westhalten	440	S-SE	pelouse sèche	calcic leptosol	calcaire
ZKB	Zinnkoepfle	Westhalten	430	S-SE	pelouse sèche	calcic leptosol	calcaire

Tab. 5.1 : Tableau récapitulatif des 56 sites de surface.

Code du site	Lieu-dit	Commune	Site de surface associé	Prof. du profil /cm	Formation végétale actuelle	Type de sol (WRB)	Substrat
FALI 1	Hohneck	La Bresse		90	hêtraie	cambisol	granite
FAP	Hohneck	Stosswihr	FAC	90	prairie	umbrisol	granite
FALI 4	Hohneck	Stosswihr		85	prairie	cambisol	granite
FALI 5	Hohneck	Stosswihr		65	hêtraie	cambisol	granite
3 FO 3	Hohneck	Stosswihr		85	hêtraie-sapinière	cambisol	granite
C-SCH	Hohneck	Metzeral		80	prairie	cambisol	granite
P-HOH	Hohneck	Metzeral		70	prairie	umbrisol	granite
GAF 1	Gazon du Faing	Le Valtin		63	prairie	cambisol	granite
GAF 2	Gazon du Faing	Le Valtin		53	prairie	cambisol	granite
ROS01	Rosberg	Bourbach-le-haut	RCA	105	prairie	cambisol	volcano-sédimentaire
ROS02	Rosberg	Bourbach-le-haut	RCA	105	prairie	cambisol	volcano-sédimentaire
ROS03	Rosberg	Bourbach-le-haut	THB	90	hêtraie-sapinière	cambisol	trachyte inférieur
ROS04	Rosberg	Bitschwiller-les-Thann		100	prairie	cambisol	Volcano-sédimentaire
CFP	Champ du Feu	Belmont	CFA	75	prairie	cambisol	granite
EFP	Elmerforst	Balbronn	EFA	70	chênaie	cambisol	grès
MHG	Hardt grise	Mussig	MUF	120	chênaie	gleysol	alluvions rhénanes
MRN	Ried noir	Mussig		45	prairie	gleysol	alluvions rhénanes
SJK	Salajka	Roznov	SLF	90	hêtraie-sapinière	cambisol	flysch
GOT	village	Gottesheim		120	Cultures	luvisol	loess
VST	Ve studenem	Dojetrice (CZ)	VST	50	hêtraie	cambisol	

Tab. 5.2 : Tableau récapitulatif des profils de sol étudiés.

Un tableau synthétique est disponible en annexe 1 sur un A3 dépliant.

### 5.4.3. Les stratigraphies comprenant des paléosols (étape 3)

Parmi les stratigraphies auxquelles nous avons eu accès depuis quatre années, nous avons identifié 22 paléosols (Tab. 5.3). La grande majorité d'entre eux (19) a été mise à jour lors d'opérations de fouilles préventives ou de diagnostics archéologiques (Fig. 5.12). La découverte de paléosols en Alsace est donc totalement dépendante des opérations d'archéologie préventive et par conséquent dépendante de l'implantation des aménagements futurs. Ceci explique une répartition complètement indépendante de nos objectifs méthodologiques. Deux zones de concentrations sont visibles sur la figure 5.8. Il s'agit d'abord des travaux de la partie alsacienne de la ligne à grande vitesse reliant Paris à Strasbourg. Ce tronçon recoupe d'Ouest en Est le secteur de collines lœssiques du Kochersberg (67). Il s'agit ensuite de la périphérie de Colmar (68) où un certain nombre de zones d'activités s'implantent progressivement sur le cône alluvial coalescent de la Fecht et de la Weiss (Fig. 5.13). En plus de ces deux secteurs, nous avons prélevé des paléosols sous des murs médiévaux qui s'étendent sur de nombreuses collines calcaires du piedmont (Fig. 5.14). A ces paléosols enfouis, au plus, sous quelques mètres de sédiments ou sous des structures archéologiques, nous avons ajouté trois paléosols isohumiques provenant d'une importante stratigraphie quaternaire mise au jour par l'incision d'un petit cours d'eau au nord de Prague, CZ (Fig. : 5.15).

Malgré cette faible représentativité spatiale, une diversité relativement intéressante de paléosols est observée avec une dominante de sols hydromorphes, (gleysols) et de sols isohumiques (chernozem). Les sols hydromorphes sont préférentiellement conservés parce qu'ils se développent dans des zones d'accumulation de sédiment telles que la plaine d'Alsace ou des fonds de vallons. La probabilité pour qu'ils soient recouverts rapidement par des alluvions ou des colluvions est importante dans ces positions topographique. Les sols isohumiques sont eux des vestiges habituels des environnements périglaciaires puisqu'ils sont efficacement scellés sous des apports éoliens qui peuvent être brutaux.



*Fig. 5.12 : Niveau hydromorphe mis au jour par le diagnostic de la LGV Est, Duntzenheim, 67.*



*Fig. 5.13 Sol hydromorphe scellé sous des limons de débordement de l'Ille en périphérie du cône de la Fecht, Horbourg-Wihr, 68.*



*Fig. 5.14 : Calcisol (RP) scellé sous un murger médiéval, Osenbach, 68.*



*Fig. 5.15 : Sol isohumique scellé dans un épais dépôt de loess, Zemechy, République Tchèque.*

Code du paléosol	Lieu-dit	Commune	Type de sol (hypothèse)	Contexte stratigraphique
S7 SD22	Fouille LGV secteur 7	Ingenheim	cambisol	colluvions loessiques
S7 SD341	"	Duntzenheim	cambisol	colluvions loessiques
S7 SD298	"	"	cambisol	vestiges romains
S8 SD347	Fouille LGV secteur 8	Gougenheim	chernozem	loses
S8 SD294	"	"	chernozem	loess
S8 SD305	"	"	sol brun lessivé	colluvions loessiques
S9 SD255	Fouille LGV secteur 9	Mittelhausen	cambisol	colluvions loessiques
S9 SD268	"	"	gleysol	colluvions loessiques
S10 SD278	Fouille LGV secteur 10	Mittelhausen	cambisol	vestiges romains
HOP1	Diag. château d'eau	Houssen	gleysol	limons de débordement
HOP2	"	Houssen	gleysol	"
GRH	Diag. gravière	Houssen	gleysol	limons de débordement
HOR	Diag. INRAP	Horbourg-Wihr	gleysol	limons de débordement
HOW	Diag. INRAP	Horbourg-Wihr	gleysol	limons de débordement
SCD	Fouille PAIR	Sainte-Croix-en-plaine	gleysol	limons de débordement
ENA	ENA	Strasbourg	gleysol	contexte urbain
STK	Kalkofen	Osenbach	cambisol	murger médiéval
DIN	Schiebenberg	Dinsheim	leptosol	murger médiéval
ZMK1	Rive gauche	Zemechy (CZ)	chernozem	loess
ZMK2	Rive gauche	Zemechy (CZ)	chernozem	loess
ZMC	Rive droite	Zemechy (CZ)	chernozem	loses
ZEN	Fouille Zenith	Eckbolsheim	gleysol	alluvions et colluvions

Tab. 5.3 : Tableau récapitulatif des paléosols étudiés.

Un tableau synthétique est disponible en annexe 1 sur un A3 dépliant.

## Conclusion

En conclusion de ce chapitre, nous pouvons déjà proposer un certain nombre d'observations sur le panel d'échantillons. La qualité de l'échantillonnage est inégale et décroissante au fil des trois étapes de mise au point méthodologique. Cette décroissance est fortement liée à l'augmentation des contraintes techniques et scientifiques. Cependant, ce schéma résulte également d'une stratégie de notre part. En effet, des investissements supplémentaires auraient pu être effectués, en particulier dans le cadre de l'étape deux, puisque des profils pédologiques sont partout accessibles en Alsace. Cependant, nous avons privilégié une organisation pyramidale qui offre une base solide, à savoir un référentiel de surface étoffé avec de très bonnes garanties sur l'origine végétale des MOS. De plus, la multiplication possible des profils étudiés par SPIR n'aurait pas pu s'accompagner de références paléoécologiques pour des raisons évidentes de moyens. Nous allons maintenant examiner et discuter l'ensemble des données pré-existantes sur ces sites qui permettront, lors des différentes étapes, d'identifier l'origine végétale de la matière organique.

# LES DONNEES COMPARATIVES DE REFERENCE : ARCHIVES GEOHISTORIQUES, PALEOECOLOGIE, BOTANIQUE

Nous avons évoqué dans le chapitre 4 l'importance des données de référence dans la démarche de mise au point méthodologique. Nous présenterons tout d'abord une analyse critique des données géohistoriques qui couvrent les trois derniers siècles. Ces données serviront de référence pour l'établissement du référentiel de surface (étape1). Puis, nous examinerons les données paléoécologiques disponibles sur nos sites d'études qui alimenteront notre démarche dans la seconde et la troisième étape.

### **6.1. Les données sur la végétation à l'échelle des trois derniers siècles**

Les sources écrites, cartographiques, photographiques et naturalistes sont nombreuses et de qualité variable. Leur addition et leur confrontation permettent d'obtenir des informations de qualité. Nous identifions trois critères principaux qui différencient ces sources :

- Le premier critère concerne la qualité de la localisation des données dans l'espace en relation avec l'échelle à laquelle les données sont produites. Cela va du texte évoquant un massif forestier de plusieurs centaines d'hectare sur le territoire d'une abbaye à l'observation naturaliste sur un arbre soigneusement géoréférencé et localisé au mètre près.
- Le second critère est écologique. Il détermine le degré de précision de la description de la végétation. Les descriptions les plus vagues distinguent simplement les forêts des milieux ouverts, tandis que les descriptions les plus précises donnent un inventaire de la flore.
- Dans une moindre mesure, la précision et la fiabilité de la date de relevé des données est également un critère de qualité. Sur les trois derniers siècles, ce critère est plutôt homogène et rarement médiocre. De plus, compte tenu de nos besoins, une précision de l'ordre de la décennie est largement suffisante.

### 6.1.1 Les archives cartographiques

Les archives cartographiques sont *a priori* plus intéressantes pour répondre à la question de la localisation, à plus forte raison lorsque l'échelle est grande comme c'est le cas pour les plans terriers de 1760 (environ 5200e). En général, leur date d'édition est précise. Il ne faut cependant pas exclure un décalage entre les relevés de terrain et l'édition. Les principales limites concernent la précision des descriptions biogéographiques. La cartographie se limite le plus souvent aux massifs forestiers. Nous discuterons ci-dessous des nuances propres à chacun des documents utilisés.

#### 6.1.1.1. Les plans de finage du XVIIIe siècle

Les plans d'arpentage, appelés plans terriers par les historiens et plans de finage par les géographes, sont dressés au XVIIIe siècle à la demande de l'Intendance d'Alsace pour répondre à une crise agricole et alimentaire (Fig. 6.1). Cartographiés commune par commune, aux alentours de 1760 (Himly, 1959), ces plans constituent une série exceptionnelle couvrant la quasi totalité du territoire alsacien à l'échelle du 5200e. Deux initiatives parallèles et récentes facilitent l'accessibilité de ces documents.

D'une part, entre 2005 et 2008, un projet de recherche dirigé par Isabelle Laboulay a dressé l'inventaire de 4147 cartes manuscrites élaborées entre le XVIIe et le XIXe siècle et conservées dans quatre dépôts strasbourgeois distincts (Tab. 6.1). Parmi les 1831 documents inventoriés (<http://histcarto.u-strasbg.fr>) aux Archives Départementales du Bas-Rhin, 1009 sont des plans d'arpentage émanant de l'Intendance d'Alsace couvrant la quasi totalité du territoire bas-rhinois (dont environ 50 % de minutes). D'autre part, dans le Haut-Rhin, les Archives Départementales ont numérisé et mis à disposition les 332 plans d'arpentage en leur possession et proposent une interface SIG pour leur consultation. Chaque légende étant digitalisée, la consultation des plans est rendue très facile (<http://www.archives.cg68.fr> et [www.infogeo68.fr](http://www.infogeo68.fr)). Cette deuxième initiative montre, par le géoréférencement et l'assemblage des 332 plans, la grande précision de l'arpentage.

Le finage de chaque commune est subdivisé en cantons, en fonction de la propriété - communale, seigneuriale, privée - et de l'occupation du sol. Terres labourables, prés, pâturages, forêts, vignes sont les grandes catégories que l'on retrouve sur chaque document. A chaque canton est attribué un numéro ou une lettre qui renvoie à une légende organisée en fonction de l'occupation du sol. Dans la légende, sont indiqués, le toponyme du canton, sa superficie et éventuellement d'autres détails. Quelquefois, il est fait mention de la qualité des sols ou des essences dominantes d'un canton forestier.

La localisation de l'information sur ces plans est aisée, en particulier lorsqu'ils sont géoréférencés et superposables à un fond topographique. Bien que l'échelle soit très grande, la résolution spatiale n'est pas exceptionnelle puisque les informations ne sont

données que par cantons. Cependant, pour le XVIIIe siècle, cette résolution est remarquable et ne sera égalée qu'à la fin du XIXe siècle.

La description de la végétation se limite aux grandes classes d'occupation du sol, avec une précision supplémentaire pour les terres agricoles. Ponctuellement, des informations plus pointues sont disponibles. Ainsi, pour le site de référence du Herrenberg (HER), il est fait mention dans la légende du plan de Munster « *Herrenberg, forêt à l'abbaye de Munster peuplé de sapins entremêlés de hêtres bien fournis, vers la partie orientale, mais dégradée sur le sommet, la partie occidentale n'ayant qu'un sol fort ingrat et dépourvu de gros pieds d'arbres, 1063 arpents et 72 perches.* » (Archives Départementales du Haut-Rhin, MUNSTER - C1169/10,11 ,12 et 13).

A l'exception des quelques sites de références échantillonnés en République Tchèque, l'ensemble des sites de référence de notre étude sont couverts par les plans de 1760. Cependant, les zones encore considérées comme marginales à l'échelle du finage et d'un point de vue agronomique sont mal représentées. C'est le cas des forêts seigneuriales et plus généralement de la crête principale du massif vosgien, impropre à la culture et éloignée de toutes habitations. Ainsi, les sites du Falimont (FAC), du Kastelberg (KAC, KAT), et du Champ du Feu (CFA, RCB) ne sont pas représentés ou du moins non distincts des forêts communales qui les séparent des vallées. Cette lacune est partiellement comblée par la carte de Cassini qui représente l'ensemble de la France à l'échelle du 80 000e. La feuille de Luxeuil, qui représente la crête principale des Vosges, a été levée entre 1758 et 1761. Cependant, cette alternative est de médiocre qualité puisque son échelle est petite et la représentation de la végétation aléatoire. Elle permet tout juste de distinguer que les principaux sommets vosgiens ne sont pas boisés. C'est pour cette raison que nous ne reviendrons pas d'avantage sur ce document. Dans le massif du Rossberg, la lacune des plans de finage est compensée par un plan similaire de 1772 détaillant le massif (Goepf, 2007). Dans ce cas, il semblerait que les différents territoriaux opposant l'abbaye de Murbach et l'abbaye de Masevaux soient à l'origine d'une telle cartographie.

Lieux de conservation	Nombre de notices en lignes	Nombre de notices sans images
Archives de la Ville et de la Communauté Urbaine de Strasbourg	1468	198
Archives Départementales du Bas-Rhin	1831	47
Bibliothèque Nationale et Universitaire	494	7
Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre	354	5

Tab. 6.1 : Synthèse de l'ensemble des cartes et plans accessibles dans la base de données HistCarto (<http://histcarto.u-strasbg.fr>).



TERRES	arpents perches		arpents perches
1. Die Aue.....	8 0	24. Der Weyer.....	5 48
2. Oben aus Feld.....	50 14	Total des prés.....	131 34
3. Hinder dem lang Holtz.....	1 70	VIGNES	
4. Oben am Stein Weg.....	23 44	25. Narr Berg und Lang Holtz.....	21 41
5. Die Schemme.....	49 49	26. Tuns Latten, wanen Wiss graben Kauff Egerten, Reghottel Berg und Hörerlen ...	34 74
6. Goldbach Kopff und Goldbach Boden.	25 37	27. Wiesten.....	4 89
7. Lerchen Berg.....	20 48	28. Klein Kalberg.....	1 76
8. Hinder der Eschpe.....	10 48	29. Gross Kalberg mêlés de terres labourables .....	6 39
9. Guten Heüschen nassen Acker und im Loch.....	61 66	30. Illberg mêlés de terres labourables....	10 59
10. Steinen Creützlen, Roten Grund, Klein Feld und Kintzinger Feld.....	84 59	<b>Total des vignes.....</b>	<b>79 78</b>
11. Hubschen Bihl und Birgelen Zelig....	133 86	PÂTURAGES	
12. Hoffacker.....	5 24	31. Kintzinger Alment.....	9 69
13. Stein Acker, und Ill Berg.....	18 99	32. Illberg.....	4 59
14. Nideren Auss Länder.....	4 6	Total des pâturages.....	14 28
15. Ehnen der Bruck.....	3 42	VILLAGE	
Total des terres.....	500 92	33. Emplacement du village, vergers.....	19 97
PRÉS		BOIS COMMUNAUX	
16. Nidere auss Matten.....	6 2	34. Bois communaux	
17. Rössen Winckel.....	9 32	Terrain contesté entre Didenheim et Höchstatt dont le toisé est compris dans le ban de Höchstatt.	
18. In der Lachen.....	10 65	<b>TOTAL GÉNÉRAL DES ARPENTS.....</b>	<b>746 29</b>
19. Ehnen der Bruck.....	9 42		
20. Zwischen den Brucken.....	10 28		
21. Niderlach Widen.....	27 56		
22. Oben auss Matten.....	34 11		
23. Im Biss Winckel.....	18 50		

Fig. 6.1 : Exemple de plan de finage ordonné par l'intendant d'Alsace en 1762 : commune de Didenheim dessiné par Petin.

Ce plan est conservé et numérisé aux archives départementale du Haut-Rhin (cote C1161/14) et sa légende a été retranscrite par les ADHR.

### 6.1.1.2. Les cartes de la période allemande (1870-1918)

De 1870 à 1918, le territoire alsacien fut rattaché à l'Allemagne. Entre 1880 et 1910, l'armée allemande a cartographié l'ensemble du territoire au 25 000e avec une précision proche des cartes topographiques actuelles (Fig. 6.2). Ces cartes en noir et blanc sont accessibles aussi bien à la cartothèque de la faculté de géographie de Strasbourg qu'aux Archives Départementales (68 et 67). La localisation est rendue aisée par la représentation du relief sous forme de courbes de niveau avec une équidistance de 10 ou 20 mètres selon les feuilles. Les toponymes représentés ont très peu évolué depuis cette époque. En revanche, la numérotation des parcelles qui figure sur ces cartes est différente de la numérotation actuelle.

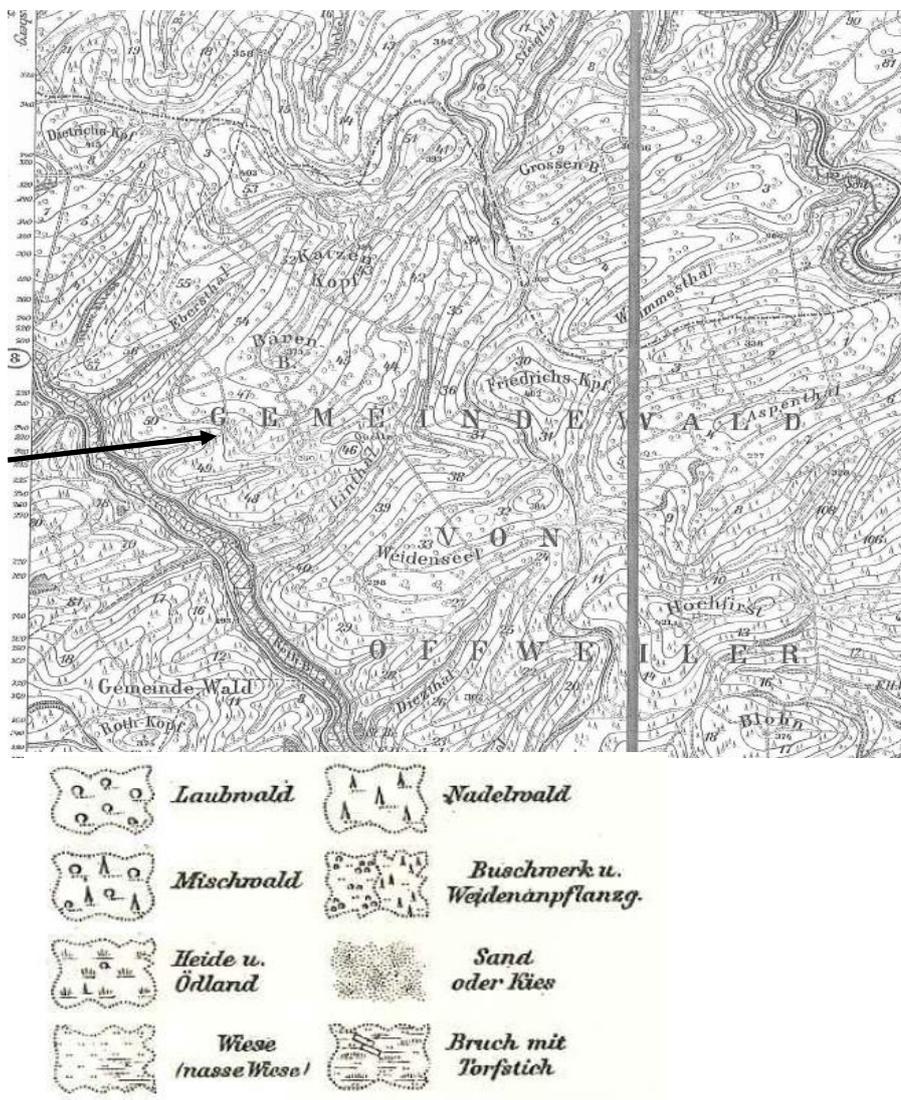


Fig. 6.2 : Extrait de la feuille 3584 Bad Niederbronn levée en 1883 et publiée en 1885 par l'armée allemande.

Mise à jour en 1909. La flèche indique l'emplacement du site RPA sur la commune de Lichtenberg. Laubwald = forêt de feuillus ; Mischwald = forêt mixte ; Nadelwald = forêt de conifères ; Wiese = prés.

Les informations concernant la végétation sont particulièrement instructives. Les massifs forestiers sont représentés avec un figuré triangulaire lorsqu'il s'agit de conifères et un figuré rond lorsqu'il s'agit de feuillus. Un mélange des deux figurés est employé pour les forêts mixtes. Le recoupement avec des documents de l'administration française des Eaux et Forêts (*cf. infra*) confirme la fiabilité de ces sources. Concernant les milieux ouverts, un figuré propre aux prairies (prés et pâturages confondus) permet de les distinguer des espaces cultivés laissés blancs. L'ensemble des sites de référence est cartographié sur cette série très homogène.

Il faut signaler, également aux alentours de 1900, l'existence de quelques plans forestiers édités par l'administration allemande qui présentent une cartographie précise des essences. Nous ne les avons pas utilisés et nous ne les présentons pas d'avantage en raison de la trop faible couverture spatiale qu'ils offrent. En effet, les plans auxquels nous avons pu avoir accès ne concernent que quelques communes de la vallée de la Bruche (67).

### **6.1.1.3. Les cartes du service géographique des armées puis de l'IGN**

Les cartes d'état major sont produites pour le territoire alsacien entre 1918 et 1940 par le Service Géographique des Armées français (SGA). L'Institut Géographique National (IGN), créé en 1940 sous la Troisième République, prend véritablement la relève du SGA en 1947. C'est entre 1939 et 1940, que le SGA est le plus actif en Alsace, avec près de la totalité du territoire couverte à cette période. L'échelle du 20 000<sup>e</sup>, avec des agrandissements au 10 000<sup>e</sup>, offre une bonne résolution spatiale. Après la seconde guerre mondiale, l'IGN privilégie la cartographie au 50 000<sup>e</sup>. La représentation de la végétation se limite à l'indication des zones boisées. L'utilisation de ces cartes sans confrontations à d'autres données sur la végétation est donc d'un intérêt limité. L'avantage de cette série réside dans le rythme régulier des mises à jour et des rééditions calquées sur autant de nouvelles campagnes de photographies aériennes. En moyenne, ce sont quatre mises à jour qui s'échelonnent entre 1939 et 2000. Ce rythme est suffisant pour suivre la progression naturelle des forêts sur les espaces ouverts et repérer les zones défrichées durant la seconde moitié du XXe siècle. Cependant, dans le cadre de la première étape de notre démarche, ces informations sont anecdotiques et très en dessous du niveau de description de la végétation atteint par les observations naturalistes actuelles.

Nous pouvons rattacher à ces sources cartographiques les campagnes de photographies aériennes dont elles découlent. Celles-ci présentent les mêmes avantages et inconvénients que ceux précédemment cités. Cependant, elles permettent de s'affranchir d'éventuelles erreurs de cartographie et, lorsqu'elles sont de bonne qualité, offrent à l'observateur expérimenté la possibilité de distinguer les forêts de feuillus des forêts de conifères. La lecture des cartes demeure cependant plus confortable.

### **6.1.2 Les registres et plans d'aménagement de l'administration des Eaux et Forêts**

L'Office National des Forêts a succédé en 1966 à l'administration des Eaux et Forêts créée en 1291 par Philippe Le Bel. En Alsace, l'Office conserve, de façon inégale, ses registres et plans d'aménagement depuis 1840. Une grande partie des documents anciens est réunie au siège de la direction territoriale d'Alsace, mais elle est difficile d'accès en l'absence d'une politique d'archivage. Bien souvent, des exemplaires de ces documents sont également présents dans les agences locales et dans les maisons forestières pour les plus récents. Les registres des années 1840 qui font suite à la révision profonde du code forestier en 1827 sont quasiment tous disponibles tandis que les registres couvrant la période allemande de 1870 à 1914 sont rarement conservés. La mauvaise accessibilité de ces documents constitue le principal défaut de cette source. Pour cette raison, nous n'avons pas exploité cette ressource de façon systématique pour nos sites de référence.

Le découpage et la numérotation des parcelles de forêts gérées par l'ONF a peu évolué en près de 200 ans. Les données sont fournies pour chaque parcelle. La gestion à l'intérieur d'une parcelle étant relativement homogène il est aisé de localiser les données. Les registres sont parfois accompagnés d'une carte qui localise les parcelles mais ne reprend pas les données sur la végétation.

Ces données se limitent strictement aux forêts domaniales et communales gérées par l'ONF et excluent de fait les forêts privées ainsi que les milieux ouverts. Concernant les espaces gérés, des indications précises sur les essences et l'âge des individus sont fournis dès 1840. Nous soupçonnons cependant l'existence d'un biais relativement important. En effet, l'analyse rapide d'un registre du XIXe siècle laisse apparaître une prédominance des parcelles mono-spécifiques. Il n'est bien sûr pas à exclure que la gestion de l'époque soit responsable d'une répartition aussi rigide des essences. Mais le protocole d'inventaire peut également être suspecté de se préoccuper uniquement des essences dominantes ou des essences ayant une valeur marchande. Des charmes de taille moyenne par exemple seraient ignorés dans une chênaie-charmaie composée de gros fûts de chênes destinés à la construction navale.

Ces données n'en demeurent pas moins précieuses pour le XIXe siècle d'autant qu'elles peuvent, par combinaison avec l'âge des arbres, être extrapolées jusqu'au début du XVIIIe siècle. En effet, certaines parcelles sont peuplées par des chênes de 140 ans et plus en 1840. Ainsi nous avons la garantie que lesdites parcelles ont été dominées par le chêne de 1700 à 1840. Nous pouvons ainsi bénéficier de données de bonne qualité sur le couvert végétal sur une période de 300 ans.

Notons enfin, qu'outre l'âge des arbres, les registres des Eaux et Forêts comportent fréquemment un paragraphe consacré à l'histoire de la forêt étudiée. Malheureusement, au

XIXe siècle, les connaissances, limitées, se résument souvent à la formule laconique « : [cette forêt existe] depuis des temps immémoriaux ».

Nos investigations se sont concentrées sur la vallée de la Bruche dont les archives sont regroupées à l'agence ONF de Schirmeck. Elles concernent les sites du Donon (DHS), et de l'Elmerforst (EFA, EFB, EFP). Les documents sélectionnés sont deux registres de 1930 et 1840 de la forêt de Framont aujourd'hui appelée forêt domaniale du Donon et d'un registre de 1920 pour la forêt de l'Elmerforst. Ces documents permettent d'attester de la continuité d'un peuplement de sapins et de hêtres depuis 250 ans sur la placette DHS, d'un peuplement continu de chênes depuis 200 ans sur la placette EFA et d'un peuplement continu de hêtres depuis 115 ans sur la placette EFB.

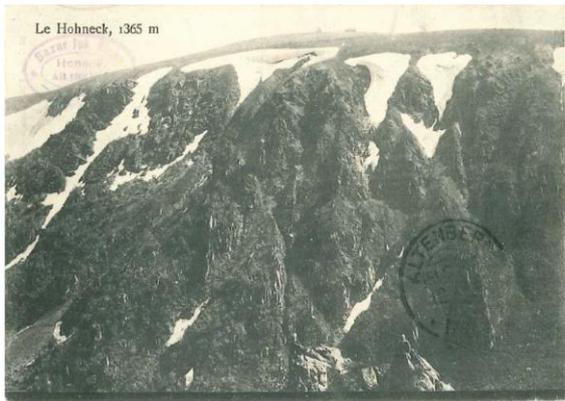
### **6.1.3 Les archives photographiques**

Les paysages photographiés, qu'ils soient sujet principal ou simple arrière plan peuvent fournir des indications précises sur la nature et les contours de la végétation (Fig.6.3).

L'usage de la photographie en tant que carte postale s'est développé avec l'apparition du tourisme dans les années 1890. En-dehors des comptes rendus touristiques, la carte postale a connu un essor important durant la première guerre mondiale en tant que support de communication entre les soldats du front et leurs familles. A ce titre, les cartes postales provenant de part et d'autre de la ligne bleue des Vosges ont été largement diffusées. L'accès à ces cartes postales est très variable et ne répond pas à des règles bien définies. Il est cependant facilité par des publications dans des bulletins et des ouvrages spécialisés. Leur conservation doit beaucoup à des cercles de collectionneurs.

L'espace couvert par ces cartes est en revanche restreint et soumis à une sélection subjective. En effet, le sujet photographié pour une carte postale doit présenter une dimension esthétique et/ou touristique. En-dehors des sujets urbains, nous trouvons principalement les collines du piémont Vosgien surmontées d'un château médiéval (Fig. 6.3C), les plus hauts sommets vosgiens et les lacs nichés dans les anciens cirques glaciaires. En tête du classement des sommets les plus photographiés se trouvent le Grand Ballon (fig. 6.3D), sans doute pour son statut de point culminant du massif, et le Hohneck qui offre à la vue des touristes franchissant le col de la Schlucht un versant Est rocheux aux allures alpines, en particulier lorsqu'il est enneigé (Fig. 6.3A).

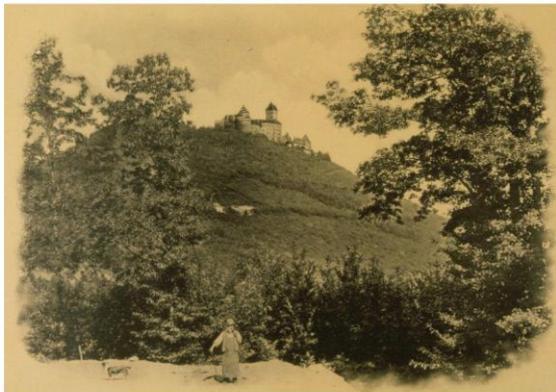
Pour l'étude de la végétation, les cartes postales nous confirment l'étendue des chaumes et les positions de leur lisière avec la hêtraie sommitale au début du XXe siècle (Fig. 6.4). Elles nous confirment également la présence de forêts sur certains versants (Fig. 6.3E) et permettent, lorsque leur qualité est optimale, de distinguer les forêts de feuillus des forêts de conifères (Fig. 6.3F). Mais ces données n'offrent qu'une faible plus-value par rapport aux cartes topographiques.



A



B



C



D



E



F

*Fig. 6.3 : Cartes postales anciennes des Vosges*

(A) : Anonyme, 1909. Le Hohneck, 1365 m, Zahneissen-Wieland. Munster, collection personnelle

(B) : Au petit Hahnenbrunnen (Weber, 1924)

(Numérisé par la Bibliothèque Universitaire de Strasbourg, BNUS, Cote : NIM111844)

(C) : Le Haut-Koenigsbourg, (Anonyme, 1910 (?))

(D) : Grand Ballon (alt. 1424 m.), 68 Hôtel du Grand Ballon (Anonyme, date ?), collection personnelle

(E) : Wangenbourg, vue générale (Wioland, 1905), Numérisé par la BNUS, Cote : NIM 04909

(F) : La vallée de la Lauch. (Chagny, 1932), Numérisé par la BNUS, Cote : NIM.15026



A



B



C



D

**Fig. 6.4 : Cartes postales des chaumes vosgiennes**

(A) : Ferme du Haicot (Weber, 1924)

(Numérisé par la BNUS, Cote : NIM 11814)

(B) : Restaurant et ferme « Waldmatt » A. Weiss – Rossberg, Thanner-Hubel (Alt. 1140 m.), (Maller et Lutringer, 2004)

(C) : Rossberg 1094 m. Melkerei Théophile Guth (Maller et Lutringer, 2004)

(D) : Prise de vue récente dans le massif du Rossberg similaire à la prise de vue (C) (photo D. Schwartz)

En revanche, la première moitié du XXe siècle coïncide avec une reconquête végétale rapide des cirques glaciaires et des chaumes sommitales (Fig. 6.4 et 6.5), sans doute liée à une chute de la pression pastorale. Cette reconquête n'est traduite que partiellement sur les cartes topographiques et l'apport des cartes postales est donc non négligeable. Ainsi, le jeu de cartes représentant le cirque du lac des Perches (Fig.6.5) est particulièrement remarquable. Les arbres sont distincts les uns des autres, les essences sont reconnaissables et l'on peut suivre leur croissance dans le temps. Le seul « bémol » dans cette démarche est la médiocre fiabilité des datations des cartes postales, compte tenu des décalages entre les dates des prises de vue, souvent inaccessibles, et les dates d'édition (souvent fin XIXe) qui font autorité.

Parmi nos placettes de référence, nous observons sur des cartes postales des prairies au Rossberg (RCA, RCD, fig.6.4), au Kastelberg, (KAT, KAC, fig. 6.3B) au Falimont (FAC), au Champ du Feu (CFA, RCB) et au Haicot (HAC, fig. 6.4A) ; nous observons des

forêts à l'aplomb du village de Wangenbourg (WHS, fig. 6.3E) et sous le château du Haut Koenigsbourg (HKC, fig. 6.3C) ainsi qu'une forêt mixte au fond de la vallée de la Lauch (LAU, fig. 6.3F).

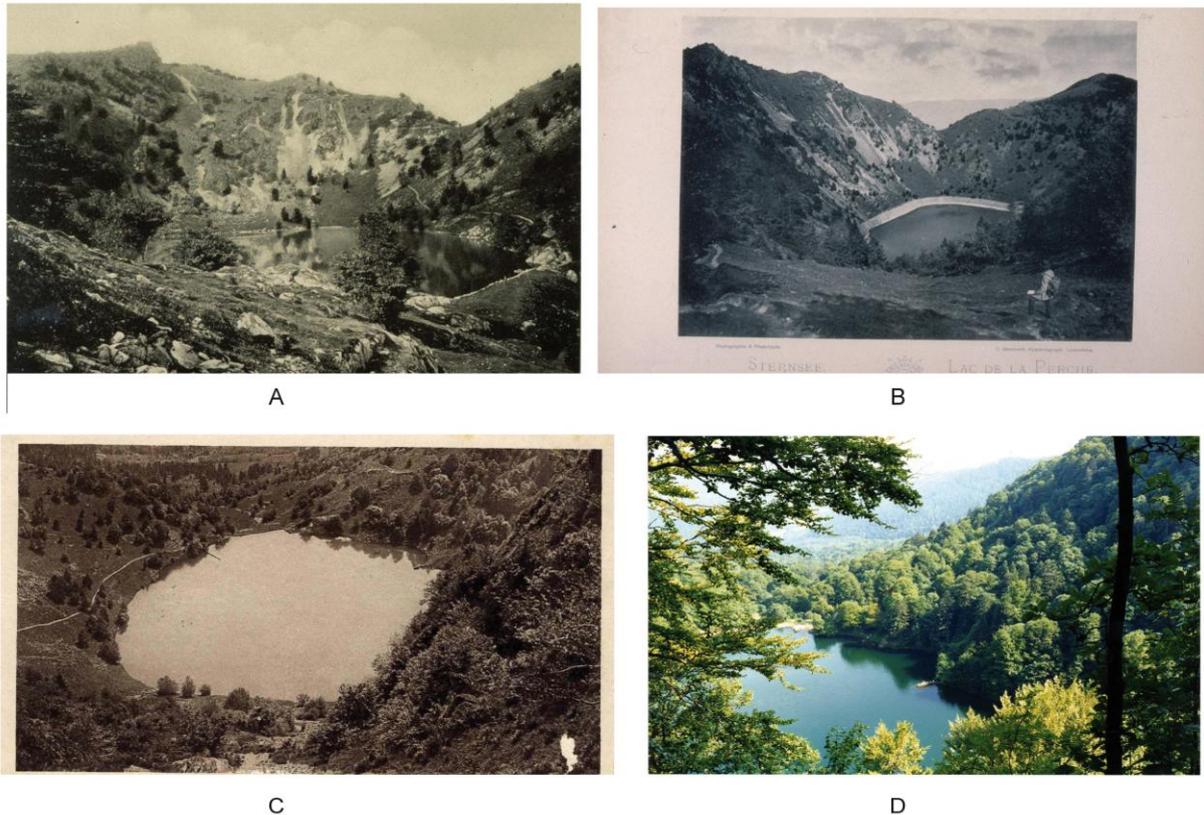


Fig. 6.5 : Cartes postales du lac des Perches  
 (A) : Der Sternsee (Bernhœft, 1894), Numérisé par la BNUS, Cote : NIM101623.  
 (B) : Sternsee (Lac des Perches) (Luib, 1907), Numérisé par la BNUS, Cote : NIM03237  
 (C) : Le lac des Perches (Anonyme), Collection D. Schwartz  
 (D) : Prise de vue actuelle du lac des Perches.

#### 6.1.4. Les méthodes naturalistes

Sur chacun des 57 sites examinés, un relevé botanique quasi exhaustif allant des espèces ligneuses dominantes aux plantes annuelles donne une image très précise à un temps T des apports de matières organiques au sol via la litière. Malheureusement, pour la plupart des espèces relevées, l'information demeure ponctuelle et rien ne permet d'affirmer que telle ou telle espèce était présente l'année précédente et encore moins sur une période de 150 ans.

Pour les sites forestiers, l'âge du peuplement a pu être calculé en comptant les cernes de croissances sur des souches fraîches ou en consultant les plans d'aménagement forestier récents. A défaut, l'âge a été estimé en fonction du diamètre des individus. Cette méthode fournit une information continue pouvant atteindre 150 ans pour les peuplements les plus anciens. Cependant, l'âge maximum n'est atteint souvent que par une essence

parmi celles présentes sur le site. A titre d'exemple, une chênaie-charmaie est le plus souvent composée de chênes bien plus anciens que les charmes. Par conséquent, si les charmes sont âgés de 50 ans seulement, il n'est pas possible, au-delà de ce laps de temps, de garantir leur présence au côté des chênes plus que centenaires. De la même manière, des érables jeunes sont souvent présents dans la hêtraie-sapinière, faciès largement dominant en Alsace et par conséquent dans notre référentiel. Malgré ces contraintes, ces observations demeurent les plus fiables au moins sur la deuxième moitié du XXe siècle.

A ces observations écologiques classiques, s'ajoutent des observations moins évidentes, propres aux milieux forestiers. Lorsqu'un arbre mature ou un arbre soumis à une tempête est arraché et tombe, il forme un chablis. Après quelques années, l'arbre dépérit et disparaît. Il laisse au sol une microtopographie caractérisée par une légère dépression ovale surmontée du côté de la chute d'une levée en arc de cercle (Langhor, 1993 ; Pescator, 1984 ; Schwartz *et al.*, 2009). La taille de ces microtopographies est fonction de l'espèce, de la taille de l'arbre et de son réseau racinaire (Beatty, 1981). Plusieurs auteurs ont étudié la durée de conservation de ces dépressions (Denny et Goodlett, 1956 ; Stephens, 1956 ; Stone, 1975). Les résultats oscillent entre deux et cinq siècles. Dans la forêt de Salajka, (SLF), nous avons pu observer des arbres matures (âgés d'environ 250 ans) qui s'enracinent sur ces microtopographies. Cette configuration offre la garantie qu'une génération d'arbres matures a précédé celle observable actuellement. Ainsi la durée garantie par l'âge des arbres peut être approximativement doublée.

#### **6.1.5. Autres données**

Nous ne traiterons pas ici des textes anciens et de l'iconographie ancienne. Nous n'avons pas effectué de recherches systématiques dans ce domaine qui exige des compétences d'historien, de linguiste et de paléographe. Des historiens (Doll, 1985 ; Garnier, 2004 ; Jehin, 1993 ; Rieger, 1949) et des géographes (Rochel, 2004) se sont déjà attachés à cette tâche fastidieuse dans le but de reconstituer l'histoire de la forêt dans les Vosges. En revanche, nous avons pu nous appuyer de manière opportuniste sur quelques textes anciens déjà étudiés qui font mention de certains des sites de référence. Le plus remarquable fait mention de la forêt de l'Elmerforst, propriété de l'Œuvre Notre Dame dès 1290 et jusqu'à aujourd'hui (Gass, 1988). Concernant l'iconographie ancienne, citons tout de même le splendide plan en relief dessiné en 1578 par Thierry Alix à la demande de Charles III (Parmentier, 2007). Ce dessin des sommets vosgiens vu depuis le versant lorrain illustre très bien l'étagement de la végétation avec des versants couverts de forêts et des sommets couverts de pâturages.

## 6.2. Qualité des données sur les trois derniers siècles

### 6.2.1. Proposition d'un indice

L'examen de tous ces outils très hétérogènes laisse entrevoir la nécessité de les utiliser conjointement. En effet, il n'existe aucun outil qui par ses qualités supplante tous les autres. De plus, la nécessité d'obtenir des données continues sur 300 ans exige une approche synthétique. Il serait tentant de proposer une synthèse applicable à chaque site. Par exemple, « l'ensemble constitué par le plan de finage de 1760, la carte de l'Empire allemand de 1880, la carte IGN des années 50, et un relevé botanique actuel confirment une continuité du peuplement sur 250 ans ». Malheureusement, la plupart des documents sont hétérogènes dans leur couverture géographique, d'autres sont difficiles d'accès et n'ont pas toujours pu être consultés. Enfin, certains critères et notamment les critères naturalistes utilisés sont très insuffisants pour caractériser les sites de prairies. Ainsi, pour presque chaque site, la combinaison d'informations disponibles est différente. Le niveau de fiabilité de nos références va ainsi varier fortement dans le temps et d'un site à l'autre. Afin de maintenir un niveau de comparaison acceptable entre nos sites, nous proposons un indice de qualité de la donnée fondé sur les deux critères que nous avons détaillés plus haut, à savoir la qualité de la localisation et le niveau de description de la végétation.

Pour chaque critère, nous attribuons une note de 0 à 3. Le niveau 0 correspond à l'absence de localisation ou de description. Pour la localisation, le niveau 1 est attribué à une donnée localisée à l'échelle de la commune avec comme ordre de grandeur le kilomètre. Le niveau 2 est attribué à une donnée localisée à l'échelle de la parcelle (hm) et le niveau 3 à l'échelle de la station échantillonnée (m). Pour la description de la végétation, nous attribuons le niveau 1 lorsque seules l'absence ou la présence de forêts sont mentionnées. Le niveau 2 est attribué lorsque la distinction entre feuillus et conifères d'une part et prairies et champs cultivés d'autre part est clairement exprimée. Enfin le niveau 3 est réservé aux données mentionnant les essences arbustives de façon exhaustive, les types de cultures et distinguant les prés de fauches des pâturages. La multiplication des deux critères indépendants fournit un indice de qualité synthétique de 0 à 9, arrondi à l'entier le plus proche. Les deux critères étant indépendants, la multiplication est préférée à l'addition pour des raisons mathématiques. Cette qualité est bien évidemment à relier aux exigences de notre mise au point méthodologique et ne constitue en aucun cas un indice général de la qualité des documents.

La figure 6.6 donne une vue synthétique de cet indice de qualité pour l'ensemble des familles de données précédemment mentionnées. Globalement, les données naturalistes sont de meilleure qualité, mais couvrent un laps de temps beaucoup plus court. Parmi les documents cartographiques, il faut noter que l'indice de qualité est totalement indépendant de l'âge des documents. Les plans de finage de 1760 obtiennent un indice supérieur aux cartes de l'IGN de la seconde moitié du XXe siècle en raison notamment d'une légende plus

détaillée. Sans surprise, les documents cartographiques obtiennent de meilleurs indices de localisation tandis que la description de la végétation est meilleure dans les registres forestiers.

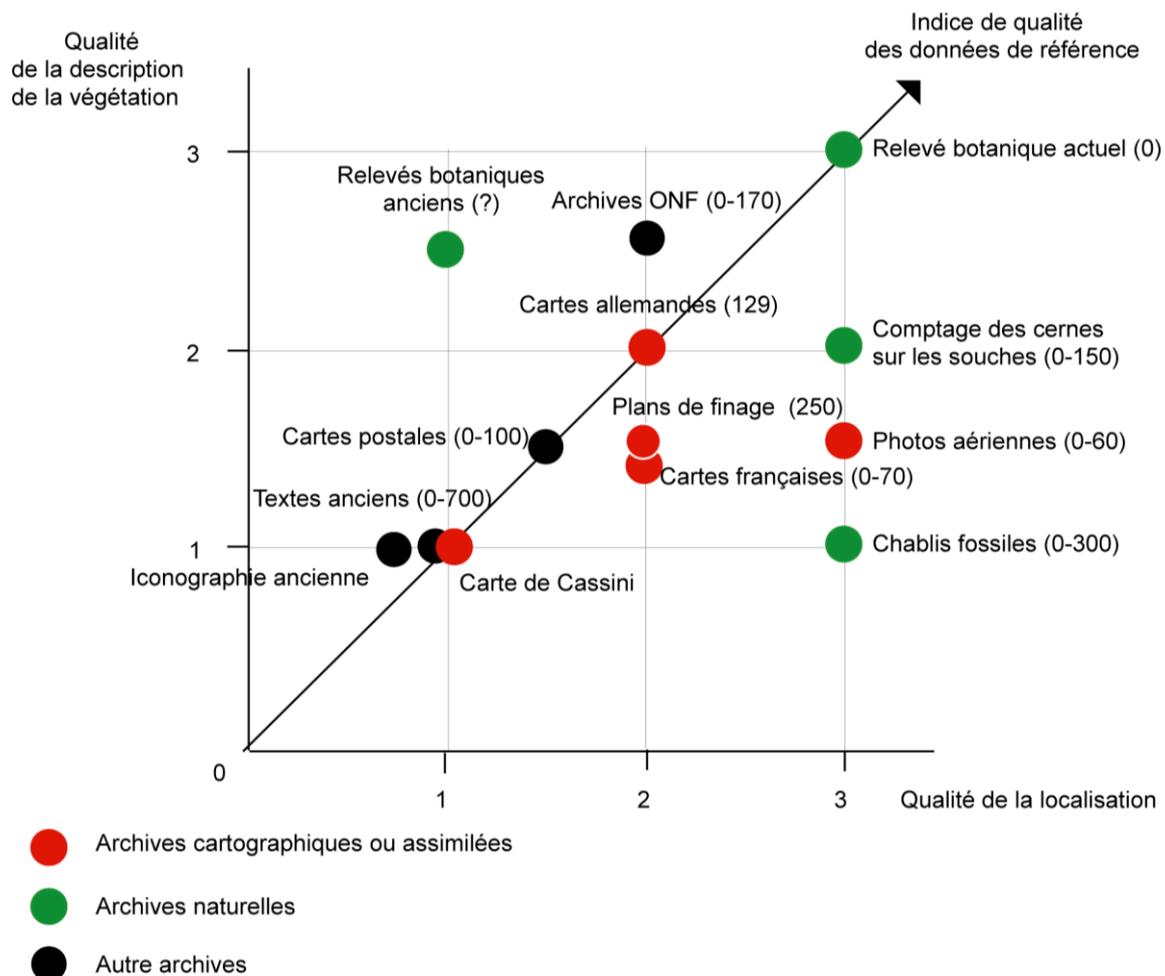


Fig. 6.6 : Représentation de la qualité des données historiques et naturalistes en fonction des critères de localisation et de description de la végétation. Les chiffres entre parenthèses correspondent à l'âge des documents (BP) ou à la période couverte par les documents (BP).

### 6.2.2 Application de l'indice aux sites du référentiel de surface

Cet indice est ensuite utilisé pour rendre compte de la fiabilité de nos données sur chacun des 56 sites étudiés (Fig. 6.7). Lorsqu'au temps T plusieurs données avec des indices différents sont disponibles, nous avons retenu l'indice le plus élevé. La représentation est limitée à quatre valeurs d'indices, 1 3, 4 et 6. En effet, les valeurs 5, 7 et 8 ne sont jamais obtenues pour des raisons mathématiques tandis que la valeur de 2 n'est obtenue que par les photos aériennes qui sont toujours supplantées par une donnée d'indice supérieur. Celle de 9 n'existe, dans notre cas, uniquement l'instant T=0 et ne peut être représentée sur l'échelle temporelle.

Cet outil facilite la lecture de la qualité des références site par site et son évolution au cours du temps. La grande majorité des sites est très bien documentée sur les 100 dernières

années (indice > 4), et bien documentée sur les 150 dernières années (indice souvent > 3). Au-delà de 250 ans, les données sont rares et parcellaires (indice de 1). Les sites de forêts sont dans l'ensemble mieux documentés que les sites de prairies en raisons de données naturalistes plus nombreuses. Certains sites (MAS, MUN, BLH, BIN) ne répondent pas aux critères des 150 ans de stabilité fixés dans notre démarche. D'autres sont insuffisamment documentés sur les 150 dernières années (HAC, RCB, CFA). Grâce à cet outil, le référentiel de spectres d'horizon de surface peut être réduit pour ne conserver que les sites les plus fiables.

### **Conclusion partielle**

La richesse des documents d'archives disponibles sur le territoire alsacien constitue une base solide dans le cadre de la mise au point d'une nouvelle méthode paléoécologique. L'hétérogénéité des sources demeure cependant un obstacle à l'utilisation conjointe de supports échelonnés sur plusieurs siècles. L'utilisation d'un indice de qualité des documents en fonction de leurs capacités à répondre aux questions *où ?* et *quoi ?* permet d'évaluer rapidement la fiabilité des données site par site.

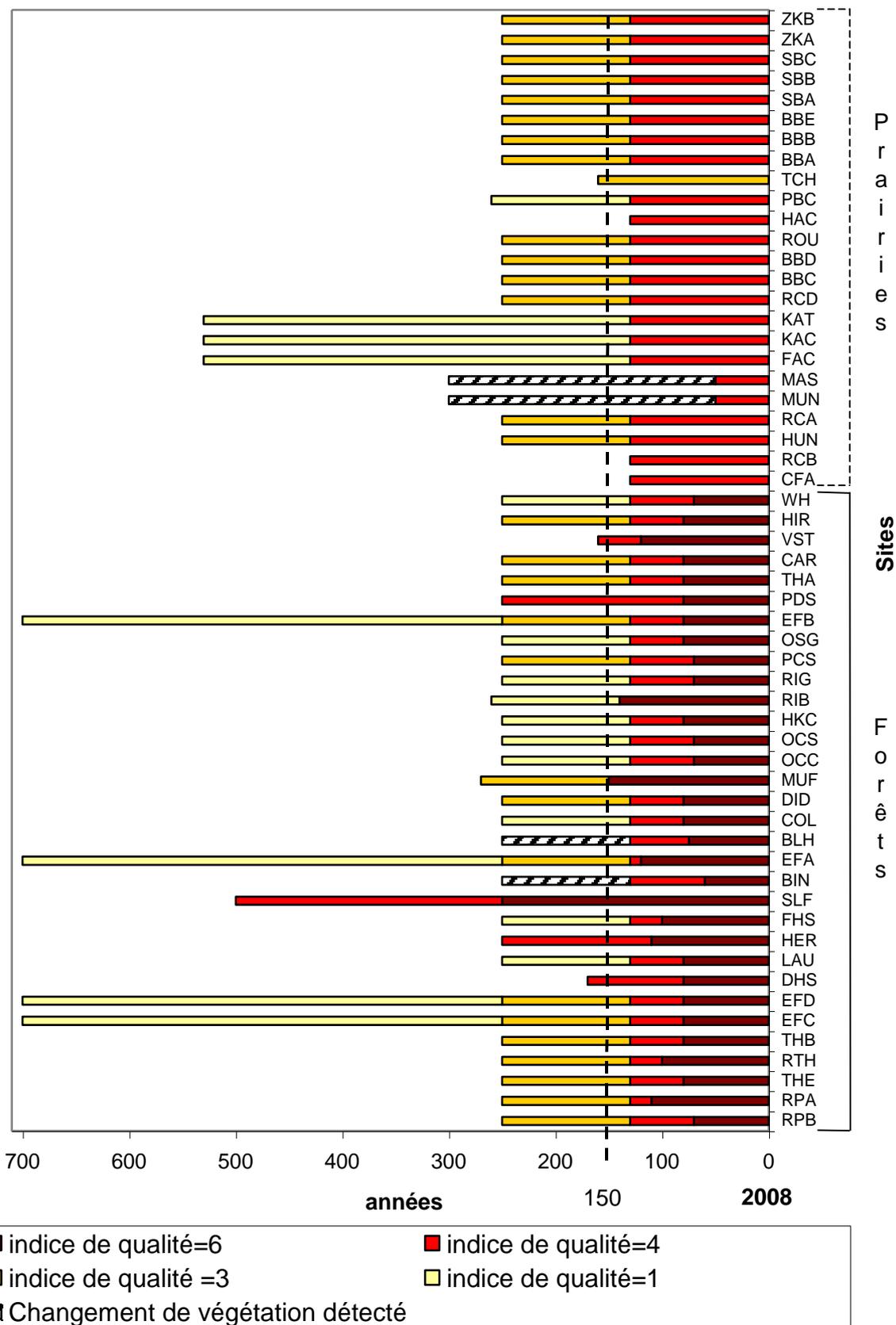


Fig. 6.7 : Indice de qualité des données historiques et naturalistes appliqués aux 56 sites du référentiel de surface.

## 6.3. Données à moyen et long terme : les archives pédologiques utilisées

### 6.3.1 Les données disponibles sur les profils

Nous utilisons uniquement des données provenant de fosses pédologiques identiques ou directement adjacentes aux profils étudiés par SPIR afin de garantir la qualité de la confrontation. Nous disposons de données paléoécologiques pour 17 des 20 profils étudiés (Tab. 6.4 et annexe 1).

- Pour la pédoanthracologie, il s'agit de sept des profils étudiés par Goepp (2007) Goepp *et al.*, (2007) et Schwartz *et al.* (2005) sur les Hautes-Chaumes vosgiennes.
- Pour les phytolithes, quatre profils étudiés par Goepp (2007) dans les massifs du Rossberg et du Falimont sont utilisés comme référence.
- Pour les monomères de la lignine, quatre profils étudiés par Martin (2000) et Casner (2001) sont utilisés comme référence.
- Pour les biomarqueurs, des résultats préliminaires obtenus sur 13 sites de surface constituent un référentiel (Trendel *et al.*, soumis). Les travaux en cours portent sur l'analyse d'échantillons de MOS anciennes issues de profils complets et de paléosols.
- La micromorphologie permet de préciser la mise en place du sol brun lessivé étudié à Gottesheim (GOT). En parallèle, l'archéologie nous renseigne sur la mise en place du matériau.

### 6.3.2 Les scénarios existants

Dans chacune des études citées ci-dessus, des scénarios d'évolution du couvert végétal ont été proposés. Nous les restituons ici en les synthétisant lorsque plusieurs études ont examiné le même profil.

Pour six profils, nous disposons uniquement d'antracomasses (Tab. 6.2) et pas de déterminations ou de datations de charbons de bois. La présence de charbons à elle seule atteste d'un passé forestier affecté par des feux. D'autres fosses étudiées dans ce même secteur indiquent des phases de défrichement médiévales, elles-mêmes précédées d'autres phases de défrichements. Le site FALI 1 présente un faciès de reconquête qui témoigne d'un passé prairial récent confirmé par les archives cartographiques. Les sites FALI 5 et 3 FO 3 présentent des faciès forestiers classiques avec des antracomasses très différentes.

L'antracomasse très faible du profil FALI 5 pourrait indiquer un passé forestier relativement stable (absence de défrichement). Les sites FALI 4, C-SCH et P-HOH sont des chaumes relativement anciennes d'après les documents cartographiques, mais la présence de charbons indique un passé forestier qu'il est difficile de dater pour l'instant.

Le site FAP dénommé FALI 3 par Goepp (2007) a fait l'objet d'une grande attention. Situé à plus de 1300 m et se développant sur un ranker cryptopodzolique (umbrisol, WRB, 2006), cette prairie était considérée avant les travaux de Goepp (2007) comme « primaire ». En effet, Carbiener (1966) considérait que la forêt n'avait jamais colonisé ces espaces depuis le dernier interglaciaire. Pourtant, le profil présente une importante anthracomasse et de nombreux charbons de ligneux datés du Bas Moyen-âge et de la Protohistoire (Tab. 6.2 et 6.3). Cependant, le corpus de charbons dont seulement une partie est datée est dominé par les espèces de bas-ligneux comme les callunes. Ceci indique que le passé de ce site, même s'il n'est pas exclusivement prairial, est tout de même dominé par des formations végétales ouvertes. L'étude des phytolithes (Goepp, 2007) et la comparaison de leur quantité avec les profils du Rossberg tend à confirmer que le passé récent (quelques siècles) de ce site est largement dominé par la prairie. L'analyse des monomères de la lignine sur ce profil a également révélé une histoire prairiale (Casner 2001 ; fig. 6.8). Cependant, les analyses se sont limitées pour des raisons techniques aux cinquante centimètres supérieurs. Paradoxalement, pour les monomères, le seul signal plutôt forestier se trouve dans l'horizon superficiel. S'il est le témoin de la présence de ligneux bas, il pourrait indiquer une colonisation récente de ces derniers ou une conservation différentielle des types de monomères. L'examen des taux de carbone et de lignine indique que la proportion de lignine dans les MOS tend à diminuer avec la profondeur. Ceci confirme que les lignines ne sont pas les composés organiques les plus récalcitrants et que leur TMR est inférieur, à profondeur égale, au TMR des matières organiques totales. En synthétisant, le scénario le plus probable est celui d'un défrichement protohistorique suivi d'une période largement dominée par la prairie avec des feux d'entretien pour éliminer les ligneux bas.

Les deux fosses sous prairie ROS1 et ROS2 sont distantes de quelques mètres, c'est pourquoi nous les traitons conjointement. La pédoanthracologie révèle des phases de feux au Néolithique, à la Protohistoire, à l'Antiquité et au Moyen Age (Tab. 6.3). Par ailleurs, sur la quasi totalité de la chaume du Rossberg, des traces de chablis anthropiques (Cloître, 2005) et de charbonnières (Battmann, 2008) attestent de phases de défrichement récentes dont certaines sont confirmées par les documents historiques. Les monomères de la lignine enregistrent essentiellement un passé forestier avec une influence légère des *Poacées* à faible profondeur (Fig. 6.8). Au-delà de 40 cm, la signature de conifères devient très évidente alors que dans la partie superficielle, elle présente une position intermédiaire témoin d'une forêt mixte (Fig. 6.9).

Pour la fosse sous forêt ROS3, les monomères de la lignine témoignent d'un passé strictement forestier avec présence quasiment exclusive des conifères (Fig. 6.9). Ces résultats sont à nuancer par les taux de monomères très faibles sur ce profil. Dans ce cas, l'utilisation des ratios peut exacerber des erreurs de mesure. L'image laser scanning ne révèle pas la présence de traces de chablis dans ce secteur (Battmann, 2008) ce qui confirme l'hypothèse d'une histoire récente relativement stable.

Le profil sous prairie ROS4 est plus singulier du point de vue de la pédoanthracologie, puisqu'il a livré un charbon de sapin datant du dernier maximum glaciaire et des charbons de pins de la fin du Tardiglaciaire (Tab. 6.3). Compte tenu des temps moyens de résidence de la matière organique dans ce type de sol, il est peu probable que nous puissions détecter ces différentes phases. Plusieurs charbons datant de la protohistoire et de la fin du Moyen Age sont également présents. Tout comme pour ROSS 01 et 02, les monomères de la lignine et les traces de chablis indiquent un passé forestier récent.

Profil	ASG (mg.kg <sup>-1</sup> )	Type de végétation	Type de sol
3 FO 3	450,4	Hêtraie-sapinière	Cambisol
FAP	119,3	prairie	Umbrisol
FAP	95,5	Hêtraie-sapinière	Cambisol
ROSS 2	90,3	prairie	Cambisol
3 FO 2	42,8	prairie	Cambisol
P-HOH	37,7	prairie	Umbrisol
C-SCH	22,9	prairie	Cambisol
ROSS 4	21,2	prairie	Cambisol
FALI 4	17,6	prairie	Cambisol
FALI 5	6,7	Hêtraie	Cambisol

Tab. 6.2 : Anthracomasses Spécifiques Générales (ASG en mg.kg<sup>-1</sup>) des profils, classés par ordre décroissant (Goepf, 2007)

Nom	Réf. labo	Profondeur (cm)	Identification	Age 14C (BP)	Age calibré* (cal BP) 95,4 % de probabilité
FAP - II	Poz-12449	16-21	<i>Fagus sylvatica</i>	<b>750 ± 30 BP</b>	664-728 cal BP
FAP - II	Poz-12450	16-21	Ericaceae	<b>915 ± 30 BP</b>	764-919 cal BP
FAP - II	Poz-12447	16-21	<i>Abies alba</i>	<b>935 ± 25 BP</b>	792-920 cal BP
FAP - IV	Poz-12451	36-41	<i>Vaccinium uliginosum</i>	<b>2445 ± 35 BP</b>	2357-2702 cal BP
FAP - IV	Poz-12452	36-41	<i>Sorbus</i> sp.	<b>3885 ± 35 BP</b>	4231-4419 cal BP
FAP - VI	Poz-12453	56-61	<i>Genista</i> sp.	<b>1000 ± 30 BP</b>	898-967 cal BP
FAP - VI	Poz-12455	56-61	<i>Calluna vulgaris</i>	<b>2725 ± 30 BP</b>	2760-2872 cal BP
FAP - VI	Poz-12454	56-61	<i>Fagus sylvatica</i>	<b>3330 ± 35 BP</b>	3469-3640 cal BP
3 FO 3 - I	Poz-12463	0-5	<i>Abies alba</i>	<b>190 ± 30 BP</b>	138-302 cal BP
3 FO 3 - III	Poz-12467	20-30	<i>Fagus sylvatica</i>	<b>250 ± 30 BP</b>	*-1 -324 cal BP
3 FO 3 - III	Poz-12464	20-30	<i>Acer</i> sp.	<b>765 ± 30 BP</b>	668-731 cal BP
3 FO 3 - III	Poz-12465	20-30	<i>Fraxinus excelsior</i>	<b>3260 ± 35 BP</b>	3399-3567 cal BP
3 FO 3 - VIII	Poz-12469	70-80	<i>Fraxinus excelsior</i>	<b>3300 ± 35 BP</b>	3448-3618 cal BP
3 FO 3 - VIII	Poz-12468	70-80	<i>Abies alba</i>	<b>4370 ± 35 BP</b>	4855-4984 cal BP
ROSS 2-III	UtC 11527	20-25	<i>Abies pectinata</i>	<b>1494 ± 30 BP</b>	1348-1402 cal BP
ROSS 2-III	UtC 11539	20-25	<i>Juniperus communis</i>	<b>2113 ± 35 BP</b>	1993-2155 cal BP
ROSS 2-VI	Poz 6145	50-55	<i>Juniperus communis</i>	<b>2135 ± 30 BP</b>	2033-2159 cal BP
ROSS 2-VI	UtC 11528	50-55	<i>Acer pseudoplatanus</i>	<b>3030 ± 60 BP</b>	3062-3379 cal BP
ROSS 2-VIII	UtC 11529	70-75	<i>Populus</i> sp.	<b>1968 ± 32 BP</b>	1864-1992 cal BP
ROSS 2-VIII	Poz 6144	70-75	<i>Juniperus communis</i>	<b>2210 ± 30 BP</b>	2149-2325 cal BP
ROSS 2-VIII	UtC 11530	70-75	<i>Tilia platyphyllos</i>	<b>6970 ± 60 BP</b>	7684-7881 cal BP
ROSS 2-XI	UtC 11538	100-120	<i>Fagus sylvatica</i>	<b>1301 ± 45 BP</b>	1167-1303 cal BP
ROSS 2-XI	UtC 11531	100-120	<i>Abies pectinata</i>	<b>1930 ± 60 BP</b>	1719-1997 cal BP
ROSS 2-XI	Poz 6143	100-120	<i>Fagus sylvatica</i>	<b>5580 ± 40 BP</b>	6296-6414 cal BP
ROSS 4-III	Poz 6154	20-25	<i>Acer pseudoplatanus</i>	<b>570 ± 30 BP</b>	527-646 cal BP
ROSS 4-III	Poz 6151	20-25	<i>Corylus avellana</i>	<b>3850 ± 35 BP</b>	4216-4408 cal BP
ROSS 4-III	Poz 6153	20-25	<i>Pinus silvestris</i>	<b>10170 ± 170 BP</b>	11245-12397 cal BP
ROSS 4-VI	Poz 6150	50-55	<i>Fraxinus excelsior</i>	<b>2125 ± 35 BP</b>	1996-2158 cal BP
ROSS 4-VI	Poz 6208	50-55	<i>Pinus silvestris</i>	<b>9570 ± 50 BP</b>	10722-11125 cal BP
ROSS 4-VIII	Poz 6147	70-75	<i>Acer pseudoplatanus</i>	<b>1280 ± 30 BP</b>	1171-1288 cal BP
ROSS 4-VIII	Poz 6149	70-75	<i>Fagus sylvatica</i>	<b>2930 ± 35 BP</b>	2967-3171 cal BP
ROSS 4-IX	Poz 6146	90-100	<i>Abies pectinata</i>	<b>18200 ± 100 BP</b>	21181-22052 cal BP

Tab. 6.3 : Datations <sup>14</sup>C et cal BP de charbons de bois, classées par site et par profondeur pour le massif du Hohneck et du Rossberg (Goepp, 2007).

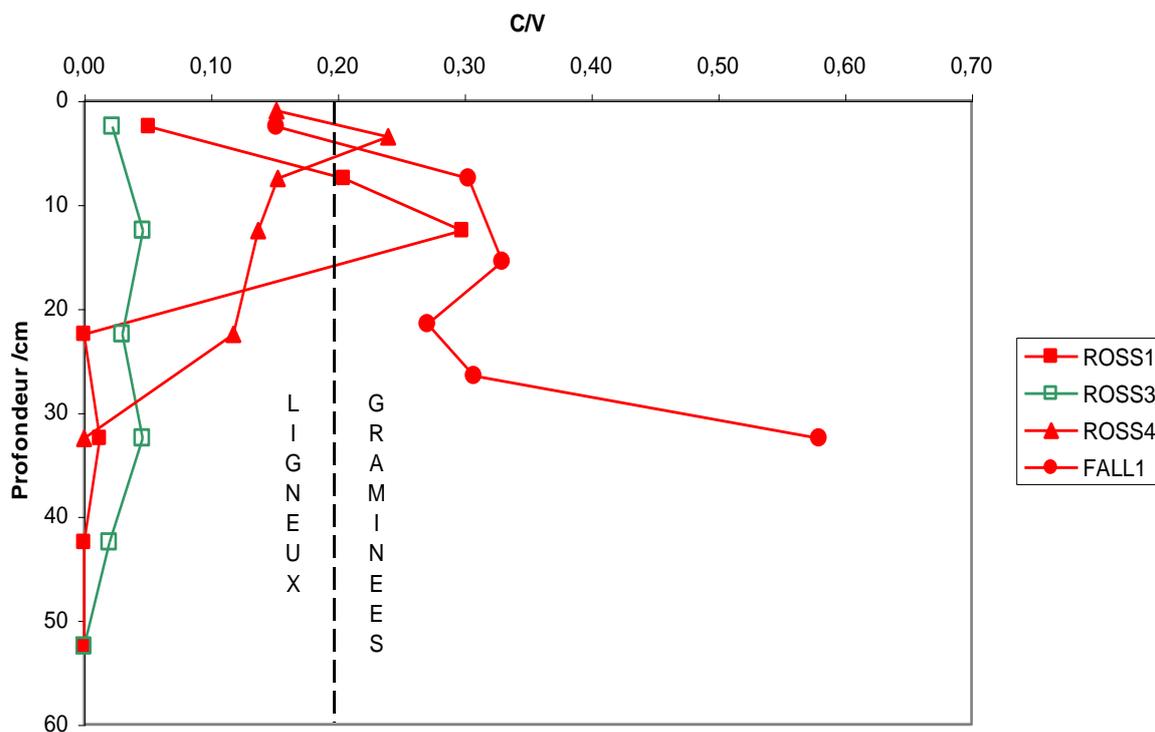


Fig. 6.8 : Rapport entre l'unité Cinamique (poacées) et l'unité Vanillique (ligneux) des monomères de la lignine d'après les données de Casner ( 2001) et Martin ( 2000).

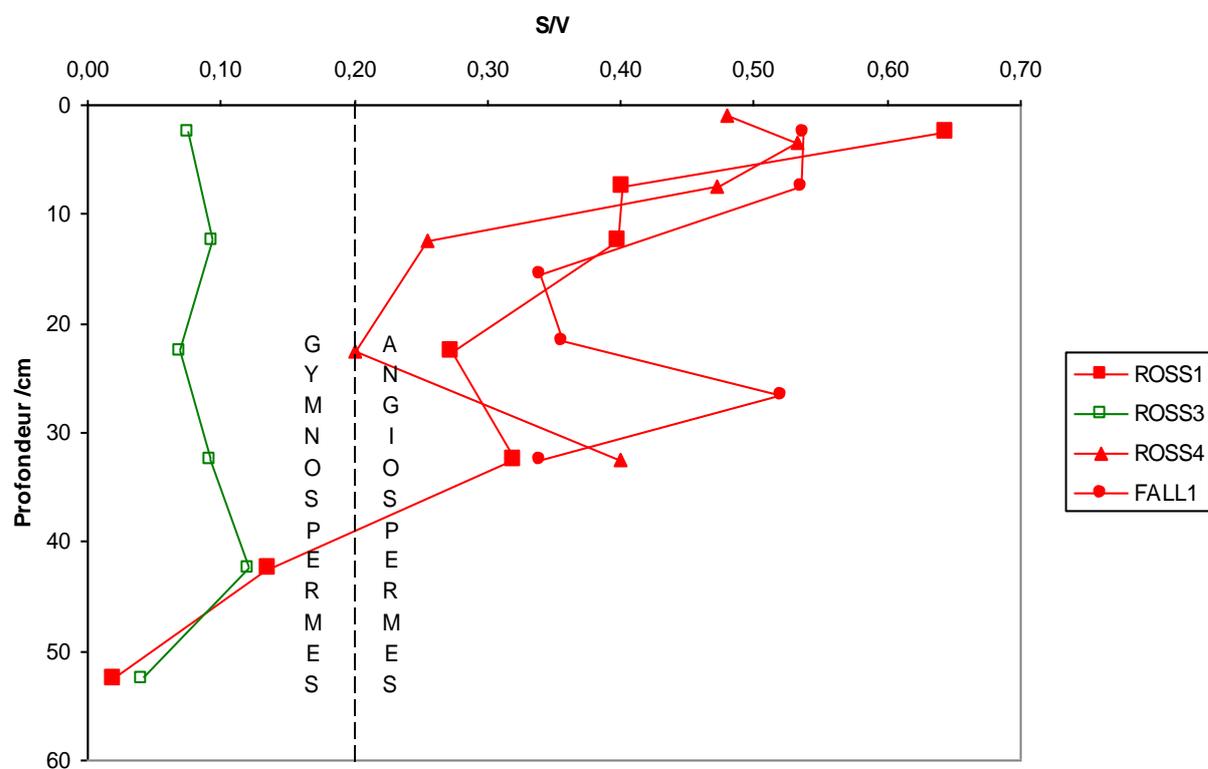


Fig. 6.9 : Rapport entre l'unité Syringique (angiospermes) et l'unité Vanilliques (ligneux) des monomères de la lignine d'après les données de Casner ( 2001) et Martin ( 2000).

Nous avons vu plus haut que des textes anciens attestent que la forêt de l'Elmerforst est la propriété de l'Œuvre Notre Dame depuis 1290. Il est donc très probable qu'elle ait été préservée des défrichements médiévaux et modernes. L'analyse des biomarqueurs sur le profil EFP confirme l'absence de marqueurs prairiaux dans ce profil et la présence de marqueurs forestiers jusqu'à la base du profil.

Les analyses des biomarqueurs doivent encore confirmer l'histoire végétale des profils MHG et MRN. Les scénarios de mise en place des sédiments sur lesquels se développent ces sols seront abordés par des datations OSL multi-grain puis mono-grain (en cours). Cette technique qui mesure le temps écoulé depuis la dernière mise au jour du sédiment permet de dater la mise en place du sédiment et le début de la pédogenèse. L'approche mono-grain permet également d'évaluer les effets de la pédogenèse sur le sédiment. Les données historiques indiquent un passé récent prairial pour MRN et un passé forestier pour MHG.

Dans la forêt de Salajka (SJK), l'observation de paléo-chablis et d'arbres matures a montré avec certitude que le couvert forestier a au minimum 500 ans. Les responsables de cette réserve forestière considèrent également que l'absence de vestiges archéologiques dans un périmètre relativement large est un cas particulier en République Tchèque et constitue la garantie d'un passé forestier très ancien. Nous n'adhérons cependant que modérément à l'hypothèse d'une histoire holocène exclusivement forestière et encore moins à l'hypothèse d'une forêt « primaire ». Les biomarqueurs confirment un passé forestier très ancien.

Sur le site de Gottesheim (GOT), la micromorphologie a permis de préciser le développement du sol et de son évolution par l'observation des revêtements argilo organiques dans les horizons d'accumulation d'un sol brun lessivé. Les revêtements d'argile et de matières organiques dans les horizons BT sont caractéristiques des processus de lessivage. Les données granulométriques et les observations macroscopiques de la structure pédologique indiquaient un développement important synonyme de pédogenèse pluriséculaire. L'observation des lames minces a révélé qu'une partie des revêtements, disposés sur la partie supérieure des pores, s'était formée antérieurement à un remaniement important du sol. En fait, des processus d'érosion fréquents dans ce secteur de loess ont pris en charge des horizons BT à l'amont, sans détruire complètement des macro-agrégats renfermant des revêtements. Ces observations nuancent l'argument d'une pédogenèse prolongée et apportent des précisions sur l'origine de la matière organique en partie allochtone. Cependant, la structure prismatique du sol et l'existence de revêtements post transport témoignent tout de même d'une pédogenèse avancée.

Pour les profils GAF1, GAF2, CFP, WHS et VST seules des données historiques récentes nous garantissent une stabilité du couvert végétal à l'échelle des trois derniers siècles. Pour GAF1 et GAF2, qui sont des sites de prairies situés au-delà de 1300 m

d'altitude sur la crête principale des Vosges, nous pouvons raisonner par analogie avec le site FAP et considérer que les deux derniers millénaires ont largement été dominés par la prairie.

### **6.3.3 Les données sur les paléosols**

Les données sur les paléosols sont nettement moins étoffées (Tab. 6.5). Très peu de données concernent directement l'origine végétale de la matière organique. Puisque nous avons fait le choix de confronter directement les horizons A superficiels des paléosols au référentiel de surface actuel, nous pouvons nous passer de ces données. Nous avons tout de même engagé des analyses des biomarqueurs moléculaires pour bénéficier d'arguments supplémentaires. D'autre part, une attention particulière doit se porter sur les conditions d'enfouissement et de conservation des paléosols. Les descriptions de terrain et en particulier l'observation des zones de transition entre le paléosol et le sédiment qui le recouvre sont des indices importants de conservation. De même, la transition progressive que présentent les horizons organiques avec les horizons profonds permet d'éviter toute confusion avec des sédiments organiques. Les analyses granulométriques et la mesure du carbone organique et du pH confirment les traits de la pédogenèse observés sur le terrain. Enfin, grâce à la micromorphologie, le degré de perturbation du paléosol est évalué.

Les lames minces des paléosols ENA et DIN sont en cours d'analyse. Les lames minces du paléosol ENA (ancien jardin d'une abbaye) dans un contexte fortement anthropisé seront confrontées à un référentiel de lames prélevées en contexte archéologique afin de mieux caractériser la nature des impacts anthropiques. Les lames du paléosol DIN prélevé sous le murger d'un parcellaire médiéval sont examinées afin de confirmer l'absence de traces de bioturbation récentes et, par conséquent, la qualité de conservation du paléosol.

## **Conclusion**

Les données, bien que riches, sont inégales en fonction des sites. Pour le court terme, la quantité de données et l'indice synthétique que nous proposons permettent d'harmoniser le référentiel. Pour le long terme, les données paléoécologiques sont encore plus hétérogènes. Néanmoins, la compilation des résultats aboutit à des scénarios dont certains sont relativement précis. Couplés au temps moyen de résidence des MOS, ces scénarios nous informent sur l'origine végétale d'un échantillon donné. Ainsi, nous pourrions confronter cette origine même ancienne aux résultats de la SPIR.

Profils étudiés				Données disponibles								
Code du profil	Type de sol	Prof. du profil	Couverture végétale	SPIR	Analyses courantes.	Anthraco-masse	Déterminat. et datation	Phytolithes	Lignine	CGSM	TMR 14C	Autres
FALI 1	Cambisol	90	Hêtraie	(7) <sup>1</sup>	(3) <sup>2</sup>	(7) <sup>2</sup>						
FAP	Umbrisol	90	Prairie	(17) <sup>1</sup>	(6) <sup>2</sup>	(7) <sup>2</sup>	(8) <sup>2</sup>	(5) <sup>2</sup>	(7) <sup>5</sup>	(5) <sup>6</sup>	(5) <sup>1</sup>	
FALI 4	Cambisol	85	Prairie	(8) <sup>1</sup>	(6) <sup>2</sup>	(8) <sup>2</sup>						
FALI 5	Cambisol	65	Hêtraie	(9) <sup>1</sup>	(4) <sup>2</sup>	(9) <sup>2</sup>					(3) <sup>1</sup>	
3 FO 3	Cambisol	85	Hêtraie-sapinière	(8) <sup>1</sup>	(4) <sup>2</sup>	(8) <sup>2</sup>	(6) <sup>2</sup>					
C-SCH	Cambisol	80	Prairie	(9) <sup>1</sup>	(2) <sup>2</sup>	(9) <sup>2</sup>						
P-HOH	Umbrisol	70	Prairie	(7) <sup>1</sup>	(5) <sup>2</sup>	(7) <sup>2</sup>						
GAF 1	Cambisol	63	Prairie	(6) <sup>1</sup>	(3) <sup>2</sup>							
GAF 2	Cambisol	53	Prairie	(6) <sup>1</sup>	(3) <sup>2</sup>							
ROS01	Cambisol	105	Prairie	(11) <sup>1</sup>	(11) <sup>2</sup>			(7) <sup>2</sup>	(7) <sup>4</sup>		(3) <sup>?</sup>	
ROS02	Cambisol	105	Prairie	(10) <sup>1</sup>	(11) <sup>2</sup>	(4) <sup>2</sup>	(10) <sup>2</sup>					
ROS03	Cambisol	90	Hêtraie-sapinière	(7) <sup>1</sup>	(7) <sup>2</sup>			(7) <sup>2</sup>	(6) <sup>4</sup>			
ROS04	Cambisol	100	Prairie	(9) <sup>1</sup>	(9) <sup>2</sup>	(4) <sup>2</sup>	(8) <sup>2</sup>	(5) <sup>2</sup>	(6) <sup>5</sup>			
CFP	Cambisol	75	Prairie	(15) <sup>1</sup>	(5) <sup>1</sup>							
EFP	Cambisol	70	Chênaie	(10) <sup>1</sup>	(3) <sup>1</sup>					(3) <sup>6</sup>	(3) <sup>1</sup>	texte ancien <sup>7</sup>
MHG	Gleysol	120	Chênaie	(12) <sup>1</sup>	(4) <sup>1</sup>					(4) <sup>6</sup>	(3) <sup>1</sup>	(2) datation OSL
MRN	Gleysol	45	Prairie	(6) <sup>1</sup>	(3) <sup>1</sup>					(3) <sup>6</sup>	(3) <sup>1</sup>	(2) datation OSL
SJK	Cambisol	90	Hêtraie-sapinière	(8) <sup>1</sup>	(4) <sup>3</sup>					(4) <sup>6</sup>	(3) <sup>1</sup>	Chablis <sup>1</sup>
GOT	Luvisol	120	Cultures	(10) <sup>1</sup>	(7) <sup>1</sup>						(2) <sup>1</sup>	Micromorphologie <sup>8</sup>
VST	Cambisol	50	Hêtraie	(5) <sup>1</sup>	(3) <sup>1</sup>							

<sup>1</sup> Infra ; <sup>2</sup> Goepp 2007 ; <sup>3</sup> Žárník *et al.* 2006 ; <sup>4</sup> Martin 2000 ; <sup>5</sup> Casner 2001 ; <sup>6</sup> Trendel *et al.*, en cours ; <sup>7</sup> Gass 1988 ; <sup>8</sup> Schwartz *et al.* 2009

Tab. 6.4 : Tableau récapitulatif des analyses effectuées sur les profils de sols présentés dans cette thèse.

Profils étudiés			Données disponibles						
Code du profil	Type de sol	Epaisseur du profil	SPIR	Granulo. pH, C orga.	Détermination et datation	CGSM	TMR 14C	datation archéologique	Autres
S7 SD22	Cambisol		(3)*	(3)*				(1) <sup>2</sup>	
S7 SD341	Cambisol		(8)*	(8)*				(1) <sup>2</sup>	
S7 SD298	Cambisol		(2)*	(2)*				(1) <sup>2</sup>	
S8 SD347	Chernozem		(13)*	(13)*					
S8 SD294	Chernozem		(6)*	(6)*		(1) <sup>3</sup>	(2)*		
S8 SD305	Sol brun lessivé		(3)*	(3)*				(1) <sup>2</sup>	
S9 SD255	Cambisol		(3)*	(3)*			à venir	(1) <sup>2</sup>	
S9 SD268	Gleysol		(3)*	(3)*				(1) <sup>2</sup>	
S9 SD346	?		(2)*	(2)*			(1)*		
S9 SD346bis	?		(3)*	(3)*			(1)*		
S10 SD278	Cambisol		(2)*	(2)*				(1) <sup>2</sup>	
HOP1	Gleysol		(5)*	(1)*		(1) <sup>3</sup>	(1)*		
HOP2	Gleysol		(10)*	(2)*			(1)*		
GRH	Gleysol		(10)*	(1)*				(1) <sup>1</sup>	
HOR	Gleysol		(3)*	(1)*				(1) <sup>2</sup>	
HOW	Gleysol		(5)*	(1)*			(1)*	(1) <sup>2</sup>	
SCC	Chernozem		(5)*	(1)*		(1) <sup>3</sup>	(1)*		
SCD	Gleysol		(5)*	(1)*			(1)*	(1) <sup>2</sup>	
ENA	Gleysol		(6)*	(1)*			(1)*		Micromorphologie <sup>2</sup>
STK	Cambisol		(6)*	(2)*		(1) <sup>3</sup>	(2)*		
DIN	Leptosol		(9)*	(2)*	(2)*		(1)*		Micromorphologie <sup>2</sup>
ZMK1	Chernozem		(7)*	(2)*			(1)*		
ZMK2	Chernozem		(8)*	(2)*	(1)*	(1) <sup>3</sup>	(1)*		
ZMC	Chernozem		(9)*	(2)*			(1)*		

Nombre d'analyses effectuées entre parenthèses, \* cf. *Infra*, <sup>1</sup> données ANTHEA, <sup>2</sup> données INRAP, <sup>3</sup> en cours

Tab. 6.5 : Tableau récapitulatif des analyses effectuées sur les paléosols présentés dans cette thèse.



# ACQUISITION ET TRAITEMENT DES SPECTRES PIR

Avec 1699 échantillons mesurés, l'acquisition et le traitement des spectres PIR représentent la plus grosse part des données produites. Nous présentons dans ce chapitre le mode d'acquisition des spectres, qui n'est spécifique ni à cette étude ni aux études de sols de manière générale. Puis, nous justifions nos choix en matière de traitements mathématiques du spectre. Enfin, nous expliquons l'approche statistique développée pour répondre au mieux au besoin de discriminer des échantillons de qualités différentes. Dans une dernière partie, nous présentons les analyses courantes effectuées sur chaque site.

## 7.1. Prétraitement physique des échantillons

Les 1699 échantillons prélevés dans le cadre des trois étapes de mise au point méthodologique sont traités de façon identique au laboratoire. Tous les échantillons sont séchés à l'étuve pendant une semaine à une température de 40°. Cette température modérée de séchage évite toute transformation ou destruction de la matière organique. Le séchage complet des échantillons est important pour limiter au maximum l'influence des liaisons O-H des molécules d'eau sur le spectre (*cf.* chapitre 3). Les échantillons sont ensuite tamisés à 2 mm et la fraction grossière est écartée. Si nécessaire, l'échantillon est délicatement broyé à l'aide d'un mortier afin de détruire les macro agrégats. Les racines et les débris végétaux de forme allongée franchissent facilement le tamis. Les plus grossiers sont écartés à l'aide d'une pince. Chaque échantillon est stocké individuellement dans un sachet en plastique en prévision des mesures spectroscopiques.

## 7.2. Acquisition des spectres PIR

Environ 5 g d'échantillon sont placés dans une cellule circulaire fermée par une vitre en quartz du côté où est effectuée la mesure, et par un cache en carton à l'opposé. La cellule est ensuite introduite dans l'appareil de mesure avec la vitre tournée vers le bas. Ce dispositif permet de remplir la cellule sans effectuer de tassement qui pourrait modifier la mesure ou rayer

la vitre. La réflectance est mesurée tous les 2 nanomètres entre 1100 et 2500 nm avec un spectromètre Foss NIRSystems 5000 (Silver Spring, MD, USA).

L'appareil effectue la moyenne de 32 balayages en moins d'une minute. La zone de balayage légèrement inférieure à la cellule couvre environ 1 cm<sup>2</sup>. Il en résulte un spectre de 700 points. Pour chaque campagne de mesures, les échantillons sont regroupés en séries dont l'ordre de grandeur est la centaine. Chaque série d'échantillons est mesurée deux fois. Ainsi, pour chaque échantillon, deux répétitions sont effectuées dans des cellules différentes à quelques heures d'intervalle. Les deux mesures sont ensuite comparées en mesurant la distance ou l'erreur entre les spectres. Lorsque cette distance est trop importante, deux nouvelles mesures dans deux cellules différentes sont effectuées et ceci jusqu'à ce que la distance entre les deux mesures soit satisfaisante. Cette procédure permet de garantir une bonne qualité des spectres.

Plusieurs raisons peuvent expliquer une différence importante entre les deux répétitions. Tout d'abord, un dérèglement de l'appareil ou une déviation de la mesure liée à la qualité de la lampe. Au début de chaque journée de mesure, l'état de l'appareil est vérifié à l'aide d'une cellule de référence composée de tourteau de soja. Ce type d'avarie n'a jamais été observé. La seconde source de mauvaise répétition est l'hétérogénéité granulométrique de l'échantillon. Si l'échantillon présente par exemple une répartition bimodale avec des sables grossiers d'une part et des limons fins d'autre part, le fait de disposer sur la vitre les uns pour la première répétition et les autres pour la seconde répétition va entraîner une distance importante entre les deux mesures. La répétition du même geste de remplissage par un seul et même opérateur permet de limiter les conséquences de l'hétérogénéité. La présence résiduelle de débris végétaux de taille millimétrique peut également provoquer des distances élevées entre les répétitions. Cet aléa est le plus difficile à éviter ; il a sans doute contribué au plus grand nombre de répétitions. En moyenne, ce sont 10 % des échantillons qui présentent des écarts trop importants entre les deux premières répétitions. Ce chiffre varie entre 5 et 20 % en fonction de l'opérateur et de la nature des échantillons. Les séries d'échantillons des horizons profonds et des paléosols qui ne contiennent pas de débris végétaux nécessitent moins de mesures supplémentaires que des échantillons de surface sous conifères contenant de nombreux petits fragments d'aiguilles.

Une fois que les deux répétitions sont jugées satisfaisantes, la moyenne arithmétique est calculée pour chaque bande afin d'obtenir un spectre unique de 700 points résultant de 64 balayages.

## 7.3. Prétraitements mathématiques des spectres

La démarche d'utilisation des prétraitements est synthétisée sur la figure 7.4.

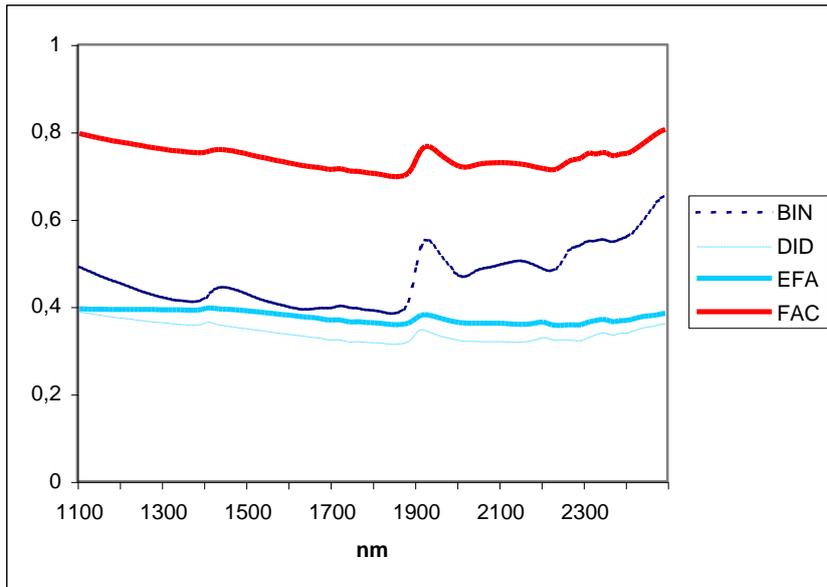
### 7.3.1. Choix de la résolution

Les mesures de réflectance sont converties en absorbance selon la formule  $A = \log(1/R)$  où R est la réflectance. Afin de réduire la masse de données, la résolution spectrale est ensuite réduite à 10 nm en effectuant la moyenne arithmétique de 5 bandes spectrales adjacentes. Cette procédure habituelle (Hedde *et al.*, 2005 ; Richardson *et al.*, 2004 ; Velasquez *et al.*, 2005) n'affecte pas l'information la plus significative (Fourty *et al.*, 1996). La comparaison des deux résolutions montre que l'ensemble des pics est conservé. Des essais de réduction de la résolution à 30 nm montrent, en revanche, que certains pics sont perdus ou écrêtés. A la résolution 10 nm, correspondent des spectres de 140 points. Cette réduction de la résolution a pour objectif d'une part de réduire la masse de données et d'autre part de réduire le nombre de variables afin de lever un certain nombre de contraintes pour la pratique ultérieure d'analyses statistiques (*cf. infra*).

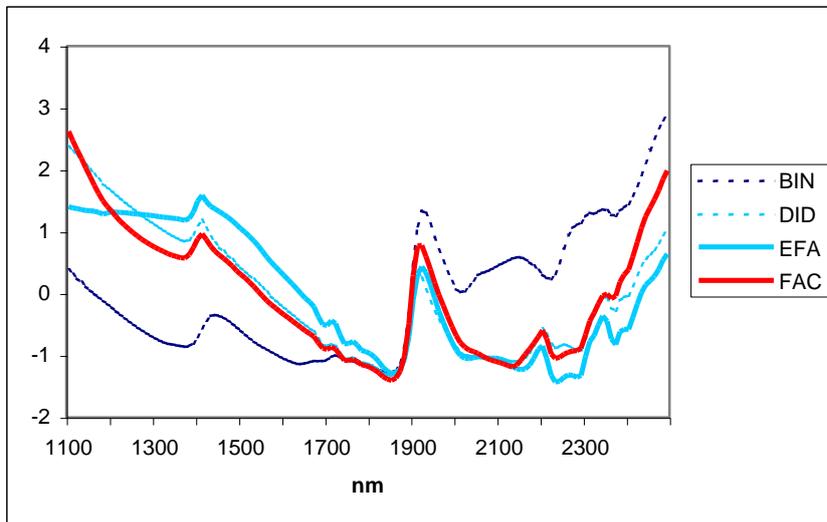
### 7.3.2. Standardisation

La standardisation consiste à centrer le spectre sur zéro en soustrayant de l'absorbance de chacune des bandes l'absorbance moyenne de toutes les bandes, puis à réduire le spectre en divisant les valeurs centrées par l'écart-type des spectres originaux (Shenk *et al.*, 2001). Ce prétraitement est facultatif. Cependant, l'intensité de l'absorbance est fortement corrélée à la quantité de matière organique. Ainsi sur la figure 7.1 (A) les spectres BIN et FAC qui contiennent des quantités importantes de MO ont des absorbances plus élevées. De la même manière, la taille des particules influence l'intensité de l'absorbance (Barnes *et al.*, 1989). En comparant les spectres de fibres de diamètres différents, Schenk *et al.* (2001) montrent l'importance d'un tel traitement pour comparer des spectres de matériaux chimiquement proches mais différents du point de vue de la texture (Fig. 7.2). Plus la texture est grossière plus l'absorbance est élevée. Ainsi, EFA très sableux a une absorbance bien plus élevée que BIN qui est limono-argileux alors que ce dernier contient une quantité supérieure de MO. La standardisation permet de réduire les écarts d'intensité moyenne et de conserver l'ensemble des pics. Ainsi, l'information qualitative est conservée. Pour les sols, ce traitement paraît indispensable tant l'hétérogénéité est grande, malgré un tamisage à deux millimètres. C'est pourquoi, nous n'avons pas persévéré dans les traitements du spectre sans standardisation.

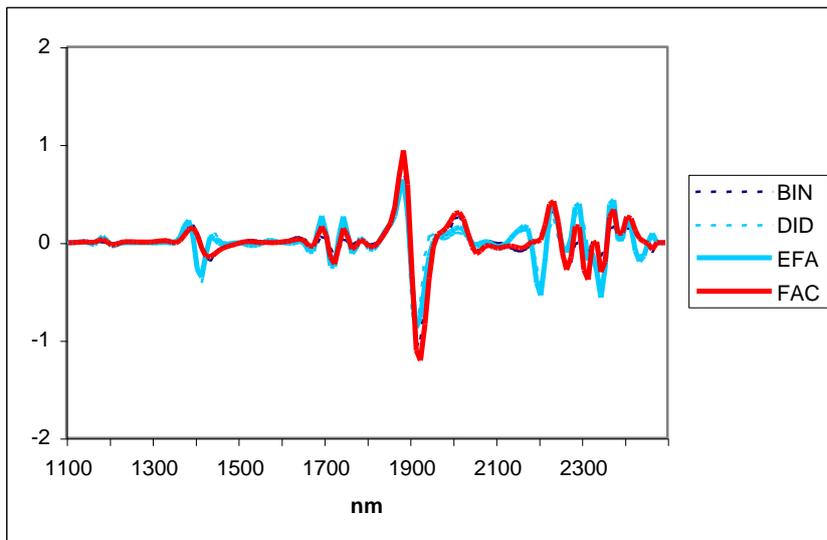
Ce traitement peut s'accompagner d'une autre correction (detrend, D) qui consiste en l'application d'une fonction puissance pour rectifier la tendance curvilinéaire du spectre dans les valeurs proches de l'extrémité haute (2500 nm).



A



B



C

Fig. 7.1: Spectres bruts (A), standardisés (B) puis dérivés (seconde) (C) pour quatre échantillons

BIN=limoneux et riche en MO ; DID=limoneux et pauvre en MO ; EFA=sableux et pauvre en MO ; FAC=sableux et riche en MO.

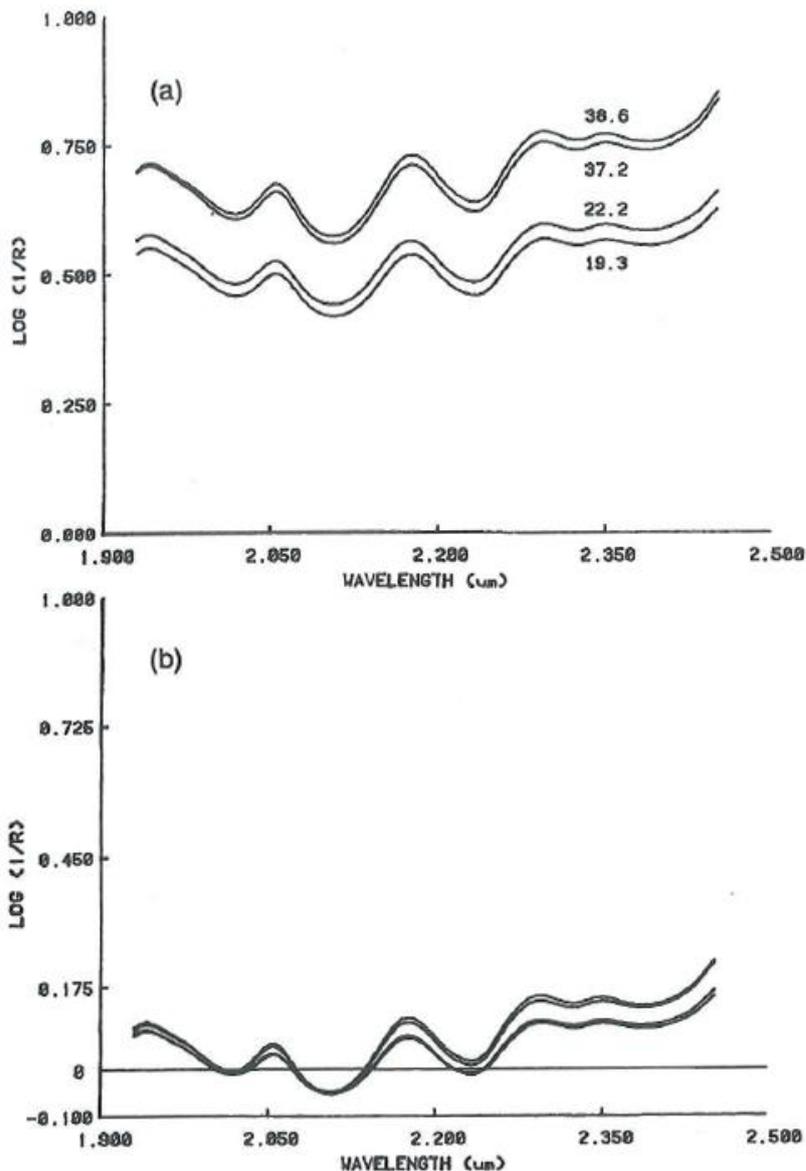


Fig. 7.2 : Relation entre l'absorbance moyenne et la taille des particules : (a) extraits de spectres bruts de fibres de taille variée (18,3-38,6), (b) mêmes extraits après soustraction de la moyenne (McClure, 2001).

### 7.3.3. Dérivées

Comme le montrent de nombreux travaux en SPIR y compris en science du sol de meilleurs résultats sont obtenus en utilisant les dérivées de ces spectres (Coûteaux *et al.*, 2003 ; Roggo *et al.*, 2003 ; Shenk *et al.*, 2001). Ce constat n'est cependant pas exclusif et chaque objet d'étude ou problématique a un traitement mathématique optimal. L'application d'une dérivée a pour principale fonction d'amplifier les variations observées sur le spectre brut (Fig. 7.1 ; 7.3). Ainsi, des variations de l'absorbance à peine visibles sur les données brutes tout comme sur les données standardisées sont mises en valeur grâce à l'application d'une dérivée. Les dérivées sont calculées sur des fenêtres mobiles le long du spectre. Ces fenêtres sont déplacées d'une bande à chaque fois pour obtenir une valeur par bande spectrale.

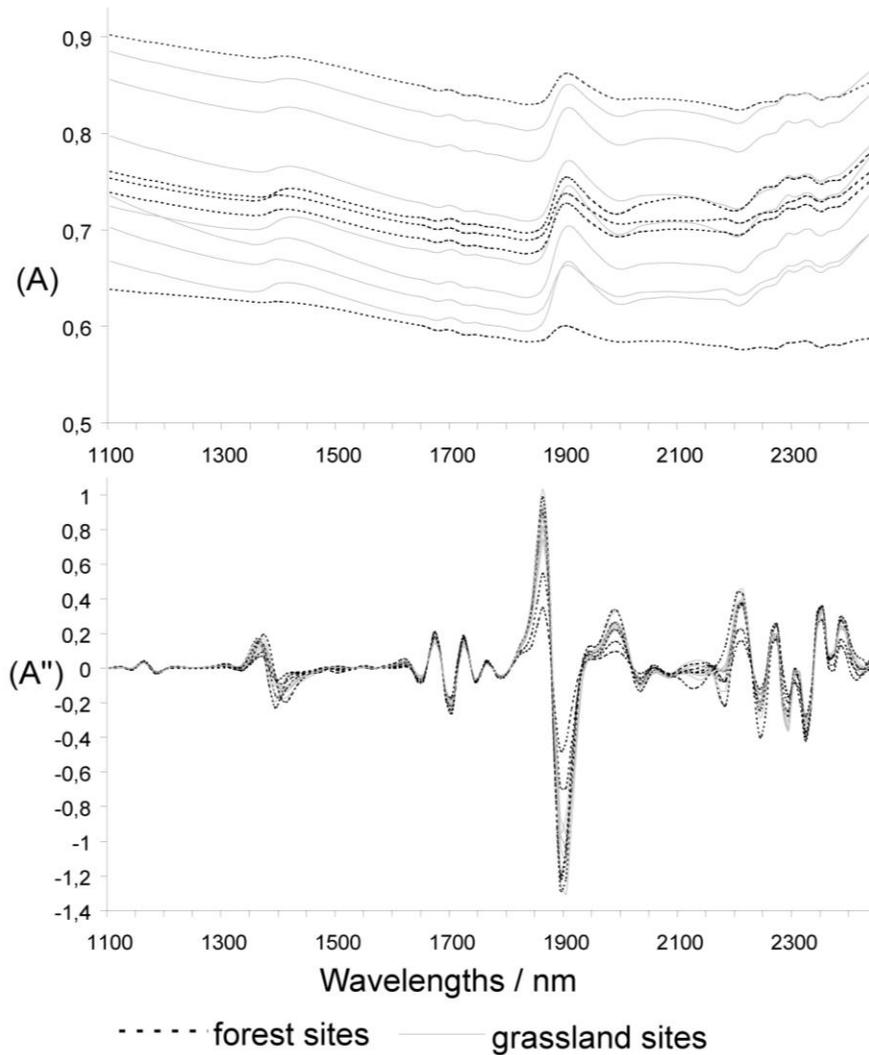


Fig. 7.3: Spectres moyens bruts (A) et dérivés (A'', dérivée seconde) pour douze sites sous forêts et sous prairies (Ertlen et al., en révision).

Première dérivée :

$$A' = \sum_{j=1}^m A_j - \sum_{k=m+1}^{2m} A_k ,$$

$A_j$  et  $A_k$  sont les  $j^{\text{ème}}$  et  $k^{\text{ème}}$  valeurs de A (spectre standardisé) à l'intérieur de la fenêtre.

Seconde dérivée (calculée à l'intérieure d'une fenêtre de  $3m=12$ ) :

$$A'' = \sum_{j=1}^m A_j - 2 \sum_{k=m+1}^{2m} A_k + \sum_{l=2m+1}^{3m} A_l .$$

Ce calcul a pour conséquence de tronquer les deux extrémités du spectre et de le réduire à 135 bandes de 10 nm de large entre 1120 et 2460 nm. Nous avons testé sur une population de 370 échantillons l'effet de la première et de la seconde dérivée sur le pouvoir discriminant des spectres. L'amélioration significative de la discrimination entre la première et la seconde nous a amené à utiliser principalement la seconde dérivée (Fig. 7.3). Dans la littérature les résultats sont très partagés. Pour prédire certains paramètres, la première dérivée est

meilleure tandis que pour d'autres, la seconde dérivée est plus performante (Coûteaux *et al.*, 2003).

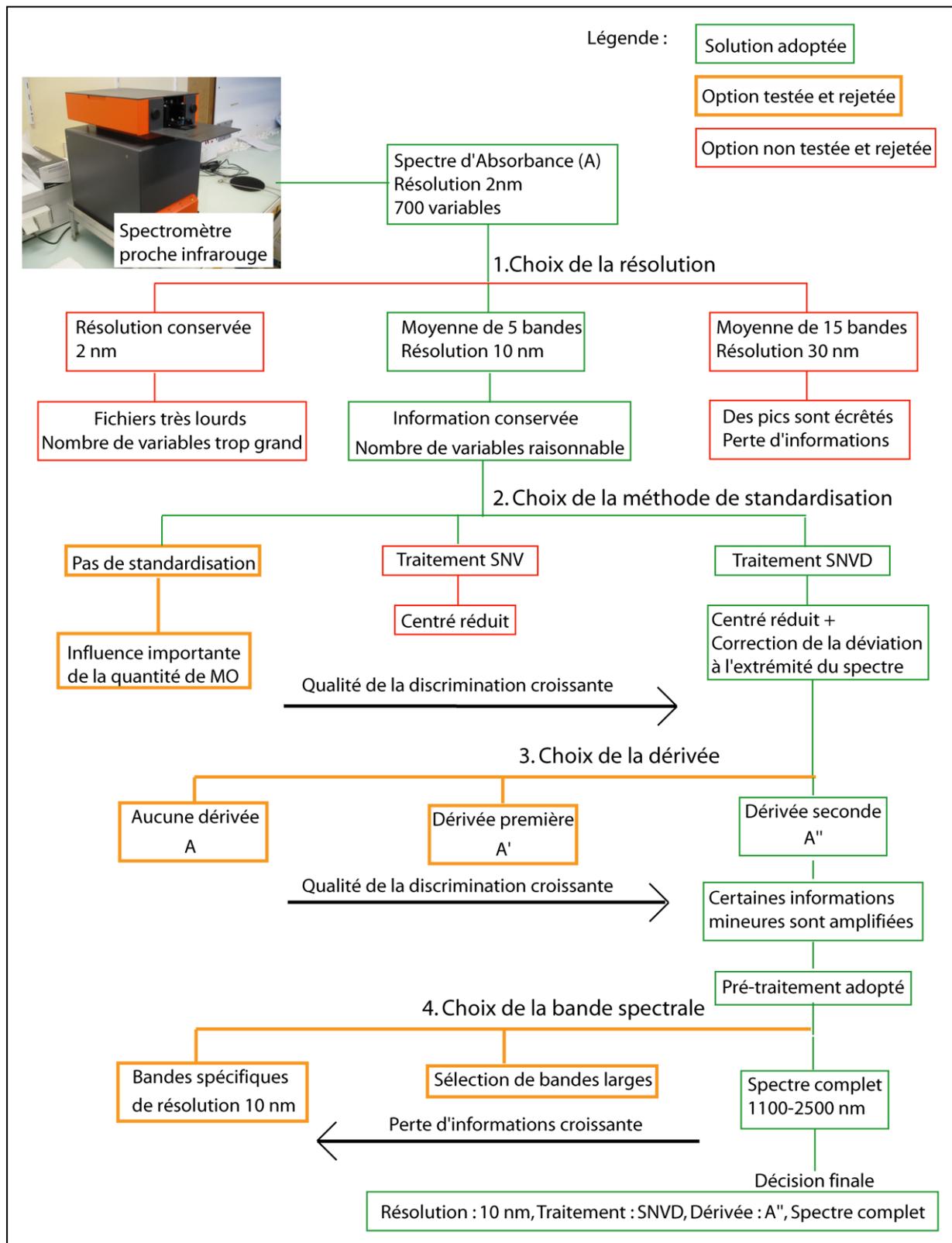


Fig. 7.4 : Schéma de synthèse des choix effectués concernant le prétraitement spectral.

## 7.4. Traitements statistiques des spectres

Après prétraitement, nous obtenons en considérant la totalité de nos échantillons une matrice avec 1699 observations (échantillons) et 135 variables (bandes spectrales). Avant de choisir les outils statistiques et graphiques pour examiner cette matrice, il faut choisir les observations et les variables à utiliser.

### 7.4.1. Choix des variables *a priori*

Le choix des variables en spectroscopie proche infrarouge est crucial. Il n'existe pas de méthode unique. De la bande spectrale élémentaire à la totalité des bandes, toutes les solutions sont possibles. Cependant, la grande complexité du spectre ne permet pas véritablement d'effectuer une sélection experte en fonction des éléments chimiques recherchés comme c'est le cas pour le moyen infrarouge. Avec le développement des moyens informatiques, aucun outil statistique n'est véritablement contraint par le manque de puissance de calcul. La tendance est donc à l'utilisation de l'ensemble des bandes spectrales. C'est cette démarche que nous privilégierons dans un premier temps.

### 7.4.2. Choix et présentation de l'outil statistique

L'analyse en composante principale (ACP) est sans doute l'outil le plus utilisé en statistique multivariée. Cependant, elle consiste en une simple rotation du repère de manière à faire correspondre le premier axe avec le maximum de variance. Cette démarche ne permet pas de mettre l'accent sur l'information spécifique recherchée. Ce type d'outil est utile pour dégager les variables qui présentent un maximum de variance. Mais ces variables ne sont pas nécessairement les variables pour lesquelles la variance inter-groupe est maximale. Or, c'est cette variance inter-groupe qui va nous permettre de séparer nos échantillons en fonction de leur origine. Pour séparer des classes qualitativement différentes, les analyses discriminantes multivariées appelées aussi analyses canoniques sont plus efficaces. Cet algorithme s'appuie sur l'appartenance *a priori* des échantillons à une classe. Elle génère des fonctions dont les coefficients sont attribués à certaines variables dans le but de maximiser les différences entre les classes.

Les données forment une matrice **Z** de **y** lignes (échantillons) et **x** colonnes (bandes spectrales) avec une matrice de variance-covariance **T**. La matrice peut être subdivisée en autant de sous-matrices qu'il y a de groupes. Les sous-matrices ont une matrice de variance-covariance intra-classe **W** et une matrice de variance-covariance inter-classe **B**. Les valeurs propres et les vecteurs de la matrice **W<sup>-1</sup>B** sont obtenus à partir de l'équation ( $W^{-1}$  est la matrice inverse de **W**) :

$$|W^{-1}B - \lambda I| = 0 ,$$

**I** est la matrice identité et  $\lambda$  les valeurs propres.

La solution de l'équation

$$(\mathbf{B} - \lambda\mathbf{W}) \mathbf{c} = 0$$

permet d'obtenir les vecteurs canoniques  $\mathbf{c}$

Les scores canoniques de chaque échantillon sont obtenus par :

$$\mathbf{y} = \mathbf{z}^T \mathbf{c} ,$$

et la moyenne canonique est obtenue par :

$$\bar{\mathbf{y}} = \bar{\mathbf{z}}^T \mathbf{c} .$$

Enfin nous calculons la distance de Mahalanobis  $\mathbf{D}$  entre les classes

$$D^2 = \mathbf{d}^T \mathbf{W}^{-1} \mathbf{d} ,$$

avec  $\mathbf{d}$  le vecteur entre la moyenne de 2 classes.

La principale contrainte est que le nombre d'observations  $\mathbf{n}$  doit toujours être supérieur à la somme du nombre de variables  $\mathbf{p}$  et du nombre de groupes  $\mathbf{g}$  soit  $\mathbf{n} > \mathbf{p} + \mathbf{g}$ . Nous disposons de 135 variables et nous n'utiliserons jamais plus de 11 groupes. Nous sommes donc contraints de travailler avec plus de 146 observations (échantillons). La non réduction préalable de la résolution spectrale nous contraindrait à travailler avec toujours plus de 700 échantillons.

Lorsqu'il y a deux classes (sols sous forêts et sols sous prairies par exemple), il y a une seule fonction canonique. A partir des fonctions canoniques, il est ensuite possible de mesurer la distance entre les groupes et de prédire l'appartenance à un groupe pour un échantillon inconnu. L'échantillon est classé dans le groupe dont il est le plus proche. Lorsque les populations d'échantillons à l'intérieur d'un groupe présentent une répartition modale, une probabilité d'appartenance peut être calculée à partir de la distance entre l'échantillon et le centre du groupe.

Avec cet outil statistique, la sélection préalable de bandes spectrales est superflue, puisque c'est l'algorithme lui-même qui sélectionne les bandes les plus discriminantes. En revanche, des informations importantes peuvent être tirées des fonctions canoniques. En effet, ces fonctions attribuent des coefficients à chacune des variables, ce qui permet de détecter les plus discriminantes. Or, malgré la complexité du spectre, certains auteurs assignent des longueurs d'onde à des composés organiques (cf. chapitre 3 et annexe 2A). Pour cette raison, nous tenterons de faire le lien entre les longueurs d'onde discriminantes et les propriétés chimiques des échantillons.

## 7.5. Analyses pédologiques et mesures $^{14}\text{C}$

Pour chaque site de surface et pour chaque paléosol, nous avons effectué des analyses granulométriques, une mesure de la matière organique par perte au feu, une mesure du C-organique et une mesure du pH sur un échantillon moyen constitué à partir du groupe d'échantillon prélevé pour la SPIR. Pour les profils de sols, nous avons effectué pour chaque horizon, et non pas pour chaque échantillon, la même batterie d'analyses. Nous avons fait mesurer par  $^{14}\text{C}$  le TMR des échantillons de surface et des profils que nous jugions les plus significatifs et pour lesquels nous disposons d'un maximum de données paléoécologiques.

La perte au feu permet d'estimer grossièrement la quantité de matière organique totale dans un échantillon. L'échantillon est placé dans un four à  $375^\circ$  degrés pendant 16 heures. La perte au feu est égale à la différence de masse de l'échantillon avant et après le passage au four. Cette méthode simple est entachée de nombreux biais puisque de l'eau de constitution et certains composés non organiques peuvent également être détruits lors du passage au four. Par conséquent, cette mesure n'a été utilisée que pour déterminer la prise d'essai de la mesure du C-organique. La mesure du C-organique (Walkley et Black, 1934) donne une image plus précise des variations de matière organique dans les sols. Cependant, c'est le carbone organique qui est dosé et non la MO. Le passage de l'un à l'autre se fait par un coefficient constant (1,728, facteur de van Bemmelen). Mais il semblerait que dans les sols forestiers, ce coefficient est sous-estimé. Il est alors nécessaire d'utiliser un coefficient de 2 voire 2,5 (Pansu et Gautheyrou, 2003). Ces mesures sur la matière organique nous permettront de vérifier que nos classes sont indépendantes de la quantité de matière organique et que c'est bien la qualité de cette matière organique (son origine) qui nous permet de discriminer les échantillons.

La mesure de l'azote n'a pas été effectuée pour des questions de moyens analytiques et financiers. Nous sommes bien conscients qu'il serait également important de vérifier que le taux d'azote dans les sols est indépendant des classes de couverts. De plus, il pourrait alimenter notre discussion et améliorer notre compréhension des données spectrales.

Le  $\text{pH}_{\text{eau}}$  est mesuré à l'aide d'un pH-mètre. Dans la gamme de sols analysée, il indique, entre autres, si l'échantillon est carbonaté ou non. Le carbonate de calcium produit également un pic dans le proche infrarouge. Cette mesure permettra de vérifier que nos classes ne sont pas totalement dépendantes de ce paramètre. Nous serons particulièrement attentifs à ce point puisque la végétation est souvent dépendante de la disponibilité en  $\text{Ca}^{2+}$  et donc de la présence de carbonates.

L'absorbance dans le proche infrarouge est également fortement dépendante de la texture du matériau. C'est pourquoi nous avons également contrôlé ce paramètre en effectuant des analyses par granulomètre laser (BeckmanCoulter LS230). Cette technique donne une image très précise de la répartition des particules dans chacune des classes de taille. Les résultats nous permettront d'illustrer la grande diversité des sols étudiés et de nous assurer que ce paramètre n'influence pas trop les résultats.

Trente-sept échantillons ont été envoyés au laboratoire de Poznan (Poznan Radiocarbon Laboratory) pour mesure du TMR par  $^{14}\text{C}$ . Au total, le TMR de six horizons de surface et 10 profils a été mesuré et sept paléosols ont été datés.

Les principaux résultats des analyses courantes sont présentés de façon synthétique dans la partie trois. Les résultats des analyses site par site sont présentés de façon détaillée dans l'Atlas des sites en annexe 1.



# **PARTIE IV**

## **RESULTATS et DISCUSSIONS**



### LA LIBRAIRIE SPECTRALE D'HORIZONS DE SURFACE (étape 1)

Dans ce chapitre, nous examinons la capacité de la SPIR à discriminer et identifier des échantillons de sols de surface dont l'origine végétale est bien connue. Après avoir éliminé des sites de surface particuliers (vignoble, 1 site) et ceux ne présentant pas de garanties historiques suffisantes (4 sites), nous travaillons sur une population de 996 échantillons provenant de 30 sites forestiers (585 échantillons) et 21 sites prairiaux (411 échantillons). Au préalable, nous vérifions que certaines propriétés élémentaires du sol sont bien indépendantes de la couverture végétale. Nous examinerons différents niveaux écosystémiques, du plus simple au plus complexe. Pour la discrimination la plus élémentaire entre forêts et prairies, nous présenterons les différences entre les traitements mathématiques afin de confirmer les choix présentés au chapitre précédent. Enfin, nous discuterons des limites de l'échantillonnage, de l'outil et de la méthode de façon générale.

#### **8.1. Caractérisation chimique et physique des horizons de surface**

L'objectif de ces analyses est de vérifier que les propriétés élémentaires du sol sont indépendantes des différentes classes de couvert végétal.

##### **8.1.1. La quantité de matière organique dans les sols**

Le taux de carbone organique (C-org) mesuré par la méthode de Walkley et Black (1934) varie de 3,05 % pour la placette DID à 42,24 % pour BIN. Toutes les placettes ayant des taux faibles (< 5 %) sont sous forêt (Fig. 8.1). Cette pauvreté en carbone est propre à certains sols forestiers sableux dont l'épaisseur de l'horizon A est inférieure à 4 cm. Ainsi le prélèvement, dont l'épaisseur est systématiquement de 4 cm est composé de cet horizon A mais aussi d'une partie de l'horizon minéral sous-jacent, ce qui a pour effet de diminuer artificiellement la teneur en C. A l'autre extrémité, les deux placettes les plus riches sont également sous forêts. Parmi les valeurs intermédiaires se trouvent indifféremment des sols sous prairies et des sols sous forêts. Ainsi, en aucun cas, le taux de carbone ne peut être exprimé comme une fonction simple du couvert végétal. Toutefois, dans la perspective d'un élargissement du référentiel, nous veillerons, dans la mesure du possible, à intégrer des sols sous prairies pauvres en C-org.

### 8.1.2. Le $pH_{\text{eau}}$

Le  $pH_{\text{eau}}$  du sol varie de 3,24 pour la placette sous forêt RPA à 7,23 pour la placette sous prairie ZKB. Toutes les placettes ayant des  $pH$  supérieurs à 6,5 sont sous prairies (Fig. 8.2). Il s'agit en fait des sites de pelouses sèches sur substrat calcaire. Les autres placettes se répartissent entre 3,5 et 6,5 indépendamment du couvert végétal. Par conséquent, le  $pH$  est indépendant du type de couvert végétal à l'exception du cas particulier des pelouses sèches. L'échantillonnage de forêt sur substrat calcaire n'a pas suffi à gommer cette tendance. En effet, les sites sous forêts concernés sont souvent sur des sols plus développés et légèrement décarbonatés. Ainsi, le  $pH$  n'atteint jamais des valeurs aussi élevées que dans les rendzines sur lesquelles se développent les pelouses sèches.

Tout comme les variables liées à la matière organique, le  $pH$ , toutes conditions égales par ailleurs, varie en fonction de la végétation. Les conifères, notamment, sont bien connus pour leur pouvoir acidifiant. L'échantillonnage sur des substrats très variés permet d'obtenir des gammes de  $pH$  larges pour des couverts identiques. Ainsi, nous obtenons dans certains cas des  $pH$  moyens pour des forêts de conifères et des  $pH$  faibles pour des forêts de feuillus. Grâce à cet échantillonnage, nous sommes assurés de discriminer nos échantillons en fonction de l'origine de la MO et non pas en fonction d'une valeur de  $pH$  typique.

### 8.1.3. Relation des caractéristiques chimiques avec les groupes écosystémiques

Sur la figure 8.3, nous avons couplé les données sur le  $pH$  et le C-organique. Ces deux critères observés séparément sont indépendants du type de végétation (Fig. 8.1 et 8.2). Leur couplage révèle une légère séparation entre les sols sous prairies et les sols sous forêts. En effet, à taux de matière organique égal, les sols forestiers sont légèrement plus acides. Cette séparation est particulièrement nette pour les sols pauvres en matière organique. Ce contraste n'est pas strictement lié au type de végétation, puisque parmi les sols pauvres en C-organique, nous avons des types de sols bien spécifiques : des rendzines pour les prairies et des alocrisols pour les forêts.

### 8.1.4. Distribution granulométrique

Dans l'ensemble, les sols échantillonnés contiennent peu d'argile : seule une placette en comprend plus de 20 % (Fig. 8.4). Par conséquent, l'effet des minéraux argileux sur l'absorbance dans le proche infrarouge devrait être limité (*cf.* chapitre 3). Les sols, qu'ils soient sous prairies ou sous forêts, présentent une large gamme de textures, de très limoneux à très sableux. La distribution granulométrique de la fraction minérale est totalement indépendante du couvert végétal dans notre échantillonnage. Toutefois, les différences importantes de diamètre des particules va entraîner des variations importantes de l'intensité de l'absorbance dont il faudra tenir compte (*cf.* Chapitre 7)

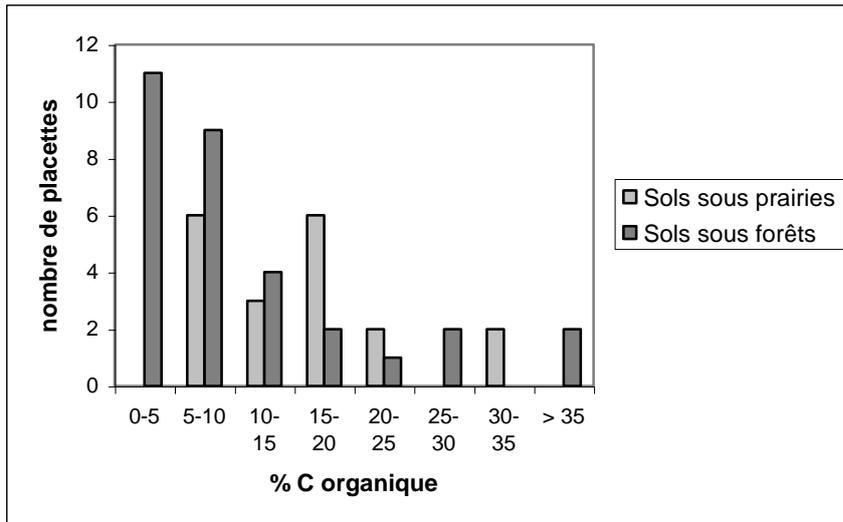


Fig. 8.1. : Répartition des sols sous forêts et des sols sous prairies en fonction de leur taux de C-organique mesuré par la méthode Walkley et Black (1934)

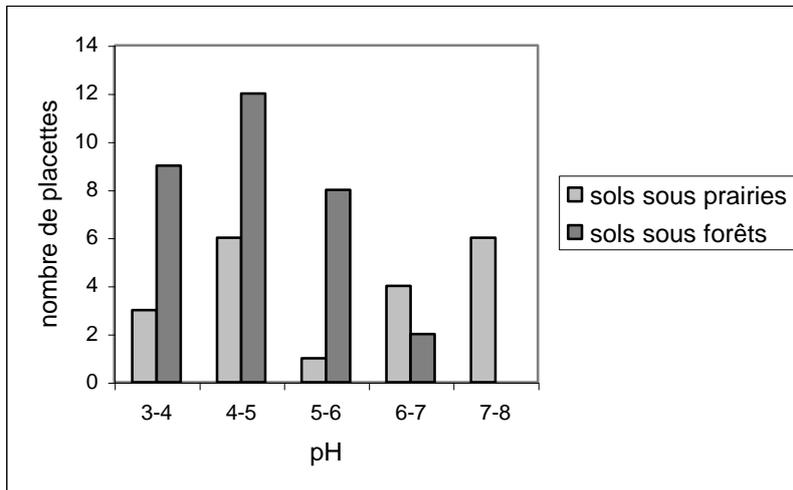


Fig. 8.2. : Répartition des sols sous forêts et des sols sous prairies en fonction de leur  $pH_{eau}$ .

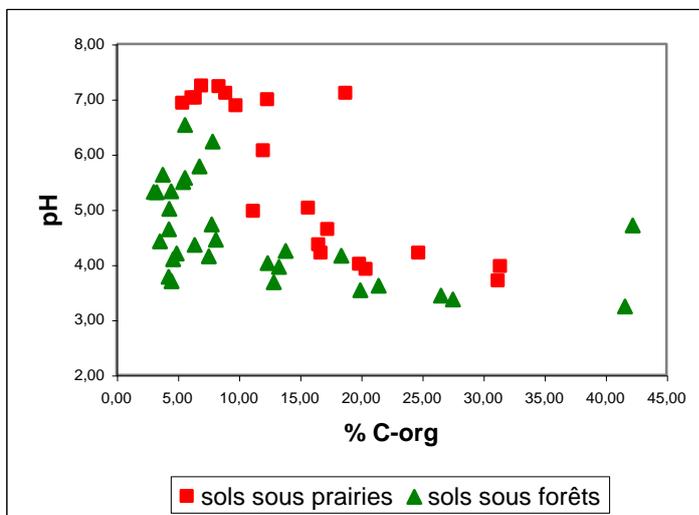


Fig. 8.3. : Relation entre le  $pH$  et le taux de C-org. pour les sols sous prairies et les sols sous forêts.

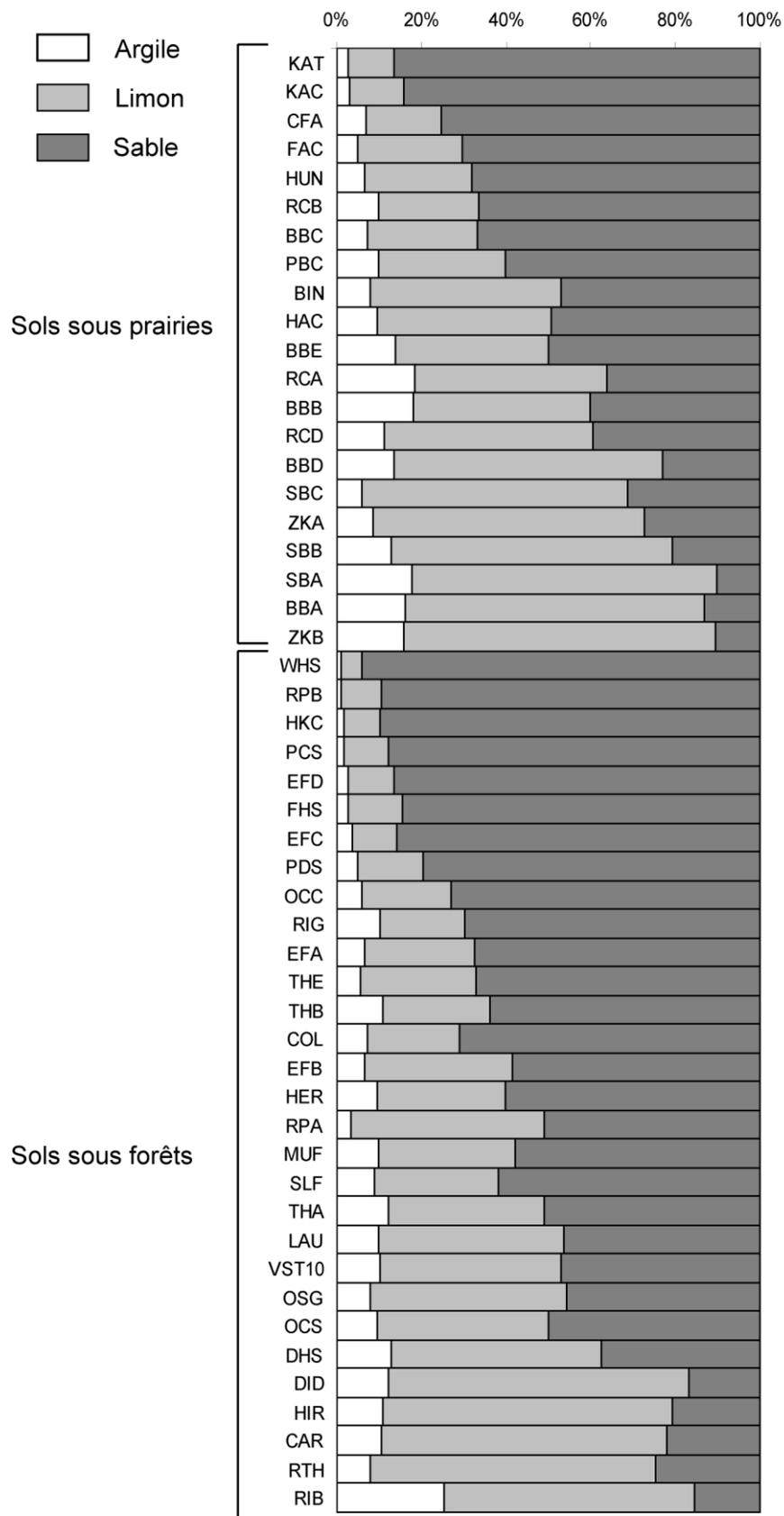


Fig. 8.4. : Distribution granulométrique de la fraction minérale pour les 51 placettes de surface.

## 8.2. Discrimination sur la population totale

### 8.2.1. Discrimination entre sols sous prairies et sols sous forêts

#### 8.2.1.1. Résultats

En travaillant uniquement avec deux classes (forêt, prairie), nous obtenons une seule fonction canonique discriminante. Elle peut être présentée sous forme d'histogramme de fréquence (Fig. 8.5).

La figure 8.5a présente les scores de l'AD1 effectuée sur les données avant prétraitement mathématique. Trois pics sont visibles : la sous-population des sols sous prairie présente une répartition normale à l'inverse de la sous-population de sols sous forêts qui présente une répartition bi-modale. Les deux sous-populations, bien que distinctes, se chevauchent et présentent une distance de Mahalanobis faible : 2,73 (Tab. 8.1). Seulement 61,9 % des échantillons sont classés correctement avec une probabilité supérieure à 0,95 et 37,1 % avec une probabilité supérieure à 0,99. La séparation entre les deux sous-populations est globalement mauvaise.

La figure 8.5b présente les scores de l'AD2 effectuée sur les données après prétraitements mathématiques (standardisation et dérivée seconde). Deux pics bien distincts, sans chevauchement, correspondent à chacune des deux sous-populations. La distance de Mahalanobis atteint 10,06. La totalité des échantillons est correctement classée avec une probabilité de 1. Les deux sous-populations présentent une répartition normale, ce qui autorise à calculer des probabilités d'appartenance à un groupe pour de nouveaux échantillons.

Les essais effectués sur une population plus petite de 370 échantillons (Ertlen *et al.*, sous presse) montrent que la standardisation et la dérivée seconde contribuent chacune à l'amélioration de la discrimination.

Fonction 1	Données brutes (A)		Données standardisées et dérivées (B)	
	Sols sous prairies	Sols sous forêts	Sols sous prairies	Sols sous forêts
Nombre d'échantillon	411	585	411	585
Ecart-type	0,894	1,066	1,013	0,991
Score moyen	1,62	-1,11	-5,91	4,15
Distance de Mahalanobis (D)	<b>2,73</b>		<b>10,06</b>	

Tab. 8.1. : Caractérisation statistique des deux populations d'échantillons (forêt-prairie) avant et après traitement mathématique

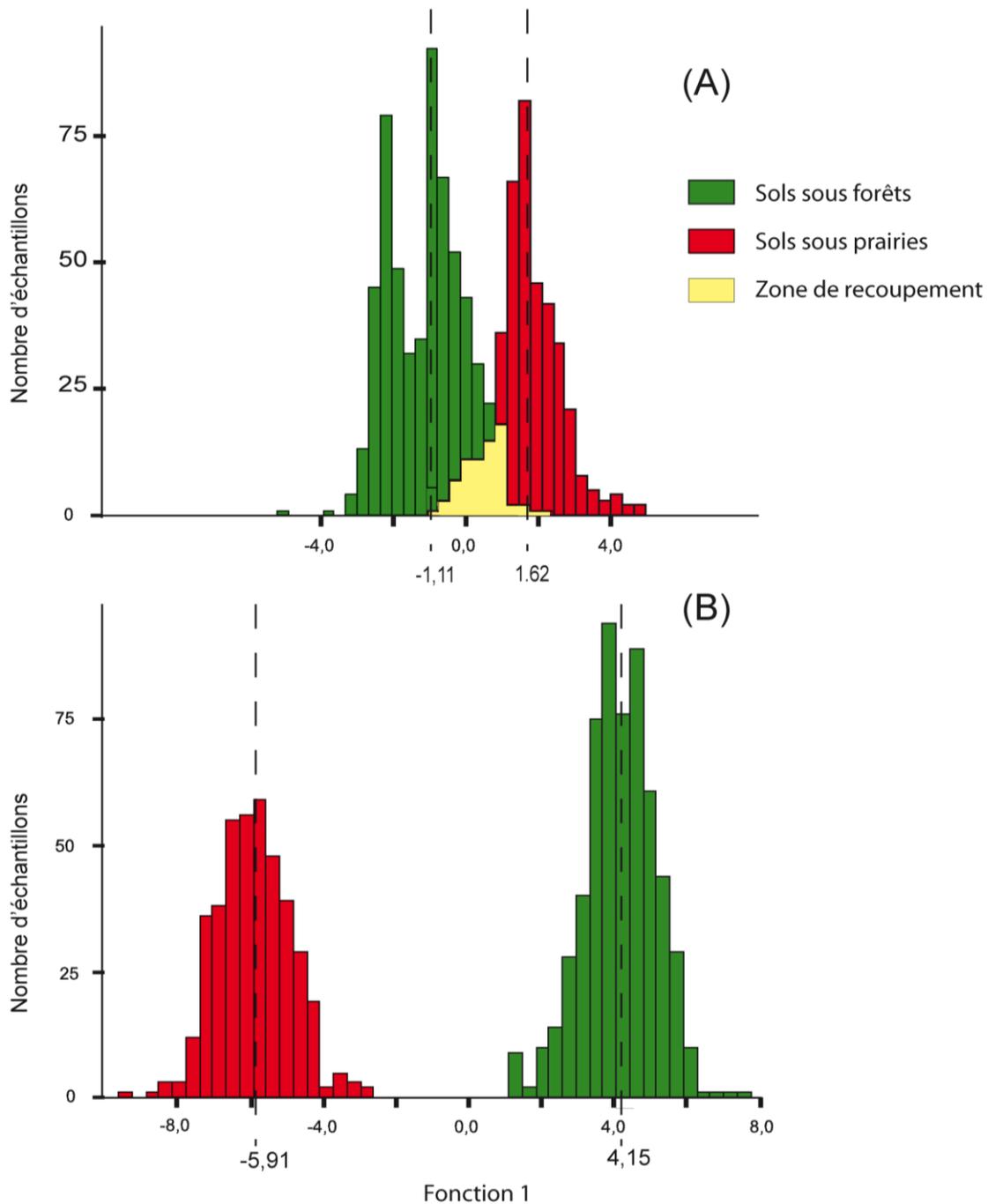


Fig. 8.5. : Fonction canonique de l'analyse discriminante entre les sols sous forêts et les sols sous prairies avant (A) et après (B) l'application des prétraitements mathématiques.

### 8.2.1.2. Apport du prétraitement mathématique

L'amélioration apportée par les prétraitements mathématiques est indiscutable. L'observation détaillée des scores de la fonction discriminante avant prétraitement (AD1) révèle que certains sites sont toujours mal classés tandis que d'autres sont toujours bien classés ; les sites carbonatés de la plaine rhénane, des collines loessiques et des collines calcaires sont presque toujours correctement classés. Il en est de même pour les sites sur substrat gréseux.

Or, ces sites sont également ceux dont la végétation est la plus inféodée au substrat (forêts sur grès, loëss et alluvions rhénans et pelouses sèches sur collines calcaires). En revanche, les sites sur substrats acides non gréseux qui présentent une grande variabilité de la végétation sont très mal classés. Par conséquent, l'effet du substrat semble important dans la matrice de données avant prétraitement. Notons encore que les sites OCC et OCS dérogent à la règle puisque ce sont des forêts sur collines calcaires. Or ces deux sites sont les seuls sites carbonatés mal classés, ce qui confirme notre hypothèse de l'effet du substrat.

Les roches mères, telle que le grès ou le loëss qui semblent participer à la discrimination sont aussi des substrats qui transmettent au sol des signatures granulométriques bien particulières (Fig. 8.6a). Or, il est reconnu que l'intensité de l'absorbance est proportionnelle à la taille des grains (Barnes *et al.*, 1989 ; McClure, 2001). Ainsi, en fonction de la taille des grains, le spectre se déplace verticalement sans être modifié dans sa forme. Ces variations permettent à l'algorithme de l'analyse discriminante de facilement reconnaître ces groupes, tandis que les groupes sur un substrat dont la signature granulométrique est plus aléatoire (Fig. 8.6b) sont difficilement reconnus. La standardisation permet de gommer quasiment totalement cet effet d'où une amélioration de la discrimination suite au prétraitement. Par ailleurs, l'effet de certains minéraux argileux (Russell, 2003), l'eau de constitution de certains minéraux, même en faible quantité et l'influence des carbonates de calcium (Gaffey, 1986 ; Lagacherie *et al.*, 2008) influence le spectre à des longueurs d'onde données. Compte tenu de notre population très contrastée en termes de carbonates, il n'est pas exclu que la matrice originale présente une variance élevée dans ces longueurs d'onde spécifiques. L'application d'une dérivée permet de faire ressortir des variations plus ténues qui sont masquées sur le spectre brut.

L'observation des coefficients de la fonction canonique avant prétraitement (AD1) révèle que seulement quatre bandes spectrales sont prises en compte dans l'analyse discriminante (Fig. 8.7). Nous pouvons relever deux bandes singulières. D'une part une bande proche de 1900 nm qui constitue le principal pic de l'eau (liaison O-H) dans le proche infrarouge (Burns et Ciurczack, 2001). Ceci montre que malgré le séchage prolongé et uniforme des échantillons, des différences persistent. D'autre part, la bande centrée sur 2490 nm est située à l'extrémité haute du spectre. Cette extrémité est connue pour subir une déviation curvilinéaire indépendante du matériau mesuré. L'application d'une fonction de « detrend » (*cf.* chapitre 7) couplée à la standardisation (traitement SNVD, *cf.* chapitre 7) corrige en partie cette déviation. Les bandes discriminantes actives après prétraitement (AD2) sont différentes et plus nombreuses (Fig. 8.13a). Nous reviendrons plus loin sur l'interprétation des coefficients de cette analyse discriminante.

Ainsi, l'analyse des bandes discriminantes confirme que le spectre brut n'est pas adapté pour extraire l'information recherchée sur la matière organique. La nature des prétraitements mathématiques et les explications physiques de leurs effets sont cohérentes avec nos objectifs. Par conséquent, nous avons utilisé ces prétraitements pour l'ensemble des analyses ultérieures.

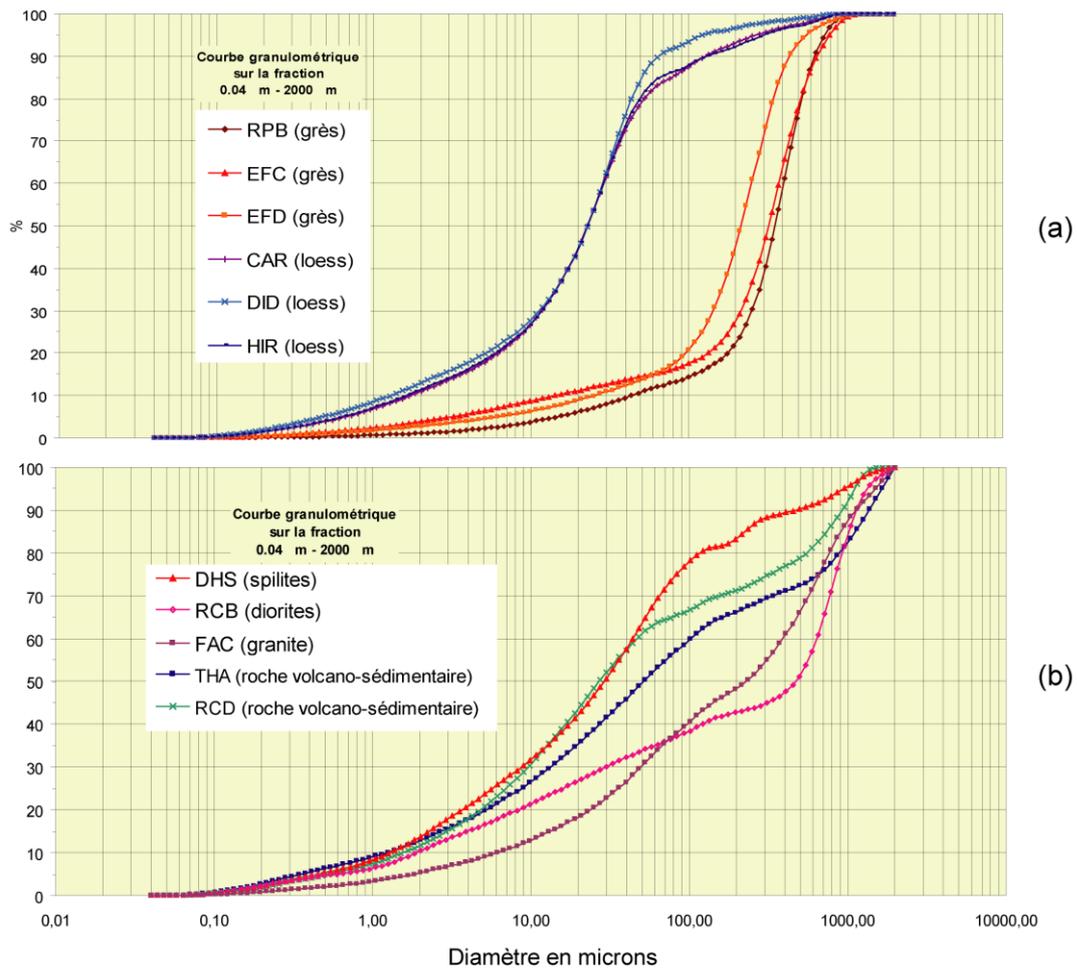


Fig. 8.6. : Signatures granulométriques de sols, spécifiques et héritées du substrat (a) ou peu différenciées (b)

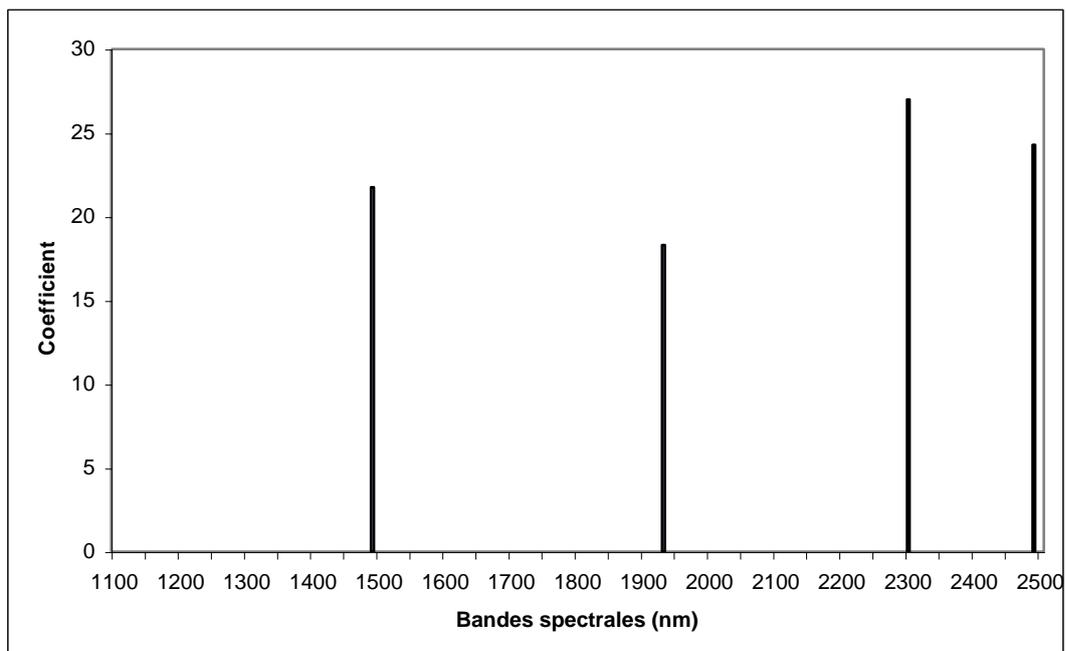


Fig. 8.7. : Coefficient de la fonction canonique avant prétraitement (AD1°)

### **8.2.1.3. Validation des résultats de la fonction discriminante**

Après prétraitement, la fonction canonique discriminante (AD2) sépare parfaitement les deux populations. La plupart des études en spectroscopie proche infrarouge procède en deux étapes : une phase de calibration puis une phase de validation. Une des pratiques les plus courantes, surtout dans le cas de petites populations, est la validation croisée qui consiste à découper la population en parts égales et à successivement retirer les parts pour constituer le lot de validation. Dans notre cas, la population est consistante. Le fait de retirer un site ou quelques sites de la matrice initiale ne modifie pratiquement pas la ou les fonctions canoniques. Par conséquent, le ou les sites utilisés pour validation obtiendraient les mêmes scores canoniques que s'ils appartenaient au lot de calibration. Dans ce cas, l'intérêt d'une validation croisée devient très limité. D'autre part, les deux groupes (forêt, prairie) discriminés après prétraitement présentent l'immense avantage d'être distribués suivant une loi normale et autorisent le calcul de probabilité (Fig. 8.5b).

### **8.2.2. Discrimination entre les grandes familles de formation végétale**

Après avoir posé les bases de notre démarche d'analyse spectrale en s'appuyant sur le contraste écosystémique le plus élémentaire (AD1 et 2), nous pouvons maintenant examiner le potentiel de la SPIR sur des contrastes écosystémiques plus complexes. Dans cette seconde étape, nous avons découpé notre population en cinq sous-populations homogènes : pelouses sèches, prairies, forêts de conifères, forêts mixtes et forêts de feuillus.

#### **8.2.2.1. Résultats**

L'analyse discriminante (AD3) génère 4 fonctions canoniques (soit le nombre de groupes -1) qui expliquent 100 % de la variance (Tab. 8.2). Ces fonctions sont hiérarchisées d'après leur valeur propre. Le petit nombre de classes et par conséquent le petit nombre de fonctions nous autorise encore à analyser individuellement les fonctions canoniques. Les scores des échantillons pour chacune des fonctions sont présentés sur la figure 8.8.

98,3 % des échantillons sont correctement classés par l'analyse discriminante (Tab. 8.3). Les erreurs de classement se produisent toutes entre les groupes forestiers. Une erreur seulement survient entre le groupe conifère et le groupe feuillu. Les 16 autres erreurs sont des forêts mixtes mal classées ou des forêts de feuillus et de conifères classées en forêts mixtes. Pour les groupes pelouses sèches et prairies, 100 % des échantillons sont correctement classés avec une probabilité supérieure à 0,99 (Tab. 8.4). Pour les groupes forestiers, les probabilités sont inférieures en raison des confusions à l'intérieur des groupes forestiers principalement avec le groupe forêts mixtes.

Fonction	Valeur propre	% de la variance	% cumulé
1	18,16	54,71	54,71
2	10,36	31,19	85,90
3	3,06	9,20	95,10
4	1,63	4,90	100,00

Tab. 8.2 : Valeurs propres et % de variance expliquée des 4 fonctions canoniques (AD3)

Classes observés \ Classes prédites	Classes prédites				
	Pelouse sèche	Prairie	Forêt de feuillus	Forêt mixte	Forêt de conifère
Sols sous pelouses sèches	100	0	0	0	0
Sols sous prairie	0	100	0	0	0
Sols sous forêts de feuillus	0	0	95,40	4,21	0,38
Sols sous forêts mixtes	0	0	0,91	98,18	0,91
Sols sous forêts de conifères	0	0	0	0,96	99,04

Tab. 8.3 : Pourcentage d'échantillons prédits par classes d'écosystèmes (niveau 2, 5 classes).

Classes	P>0,95	P>0,99	Effectif
Sols sous pelouses sèches	100	100	156
Sols sous prairie	100	100	255
Sols sous forêts de feuillus	91,5	85,7	261
Sols sous forêts mixtes	91,4	83,2	220
Sols sous forêts de conifères	96,2	96,2	105

Tab. 8.4 : Pourcentage par classe des échantillons correctement classés avec une probabilité supérieure à 0,95 et 0,99.

### 8.2.2.2. Interprétation des quatre fonctions canoniques

Sur le tableau 8.5, nous avons compilé les distances de Mahalanobis entre chaque classe pour chacune des fonctions. La première fonction, qui explique plus de 50 % de la variance, sépare très nettement les sols sous forêts des sols sous prairies. Les autres discriminations sont médiocres sur cette fonction. Ce résultat montre que l'opposition principale du point de vue écosystémique constitue également l'opposition principale du point de la nature de la matière organique. La seconde fonction discrimine parfaitement les prairies des pelouses sèches. Ces deux formations diverses et complexes du point de vue botanique et phytosociologique sont difficiles à définir du point de vue écosystémique. Les pelouses se différencient par la présence d'espèces calcicoles, mais ce contraste est-il suffisant en termes d'apport de matière organique pour s'exprimer au niveau spectral ? Dans ce cas, malgré les corrections apportées par les prétraitements, le substrat calcaire auquel sont inféodées les pelouses est soupçonné d'influencer la discrimination. Cette influence n'est cependant pas exclusive puisque les pelouses, toujours sur cette seconde fonction, sont totalement disjointes des forêts dont certaines se développent sur des substrats similaires. La troisième fonction qui

explique près de 10 % de la variance sépare de façon totalement disjointe les sols sous feuillus des sols sous conifères. Les sols sous forêts mixtes occupent une position intermédiaire avec un barycentre bien distinct des deux autres populations forestières. En revanche, une part importante des échantillons se superpose avec les feuillus ou avec les conifères. La quatrième fonction explique moins de 5 % de la variance et ne présente aucun couple de classe totalement disjoint. Les sols sous forêts mixtes et les sols sous conifères sont tout de même relativement éloignés. La compilation des fonctions trois et quatre (non présenté) permet de séparer à peu près correctement les trois classes forestières, mais des superpositions demeurent.

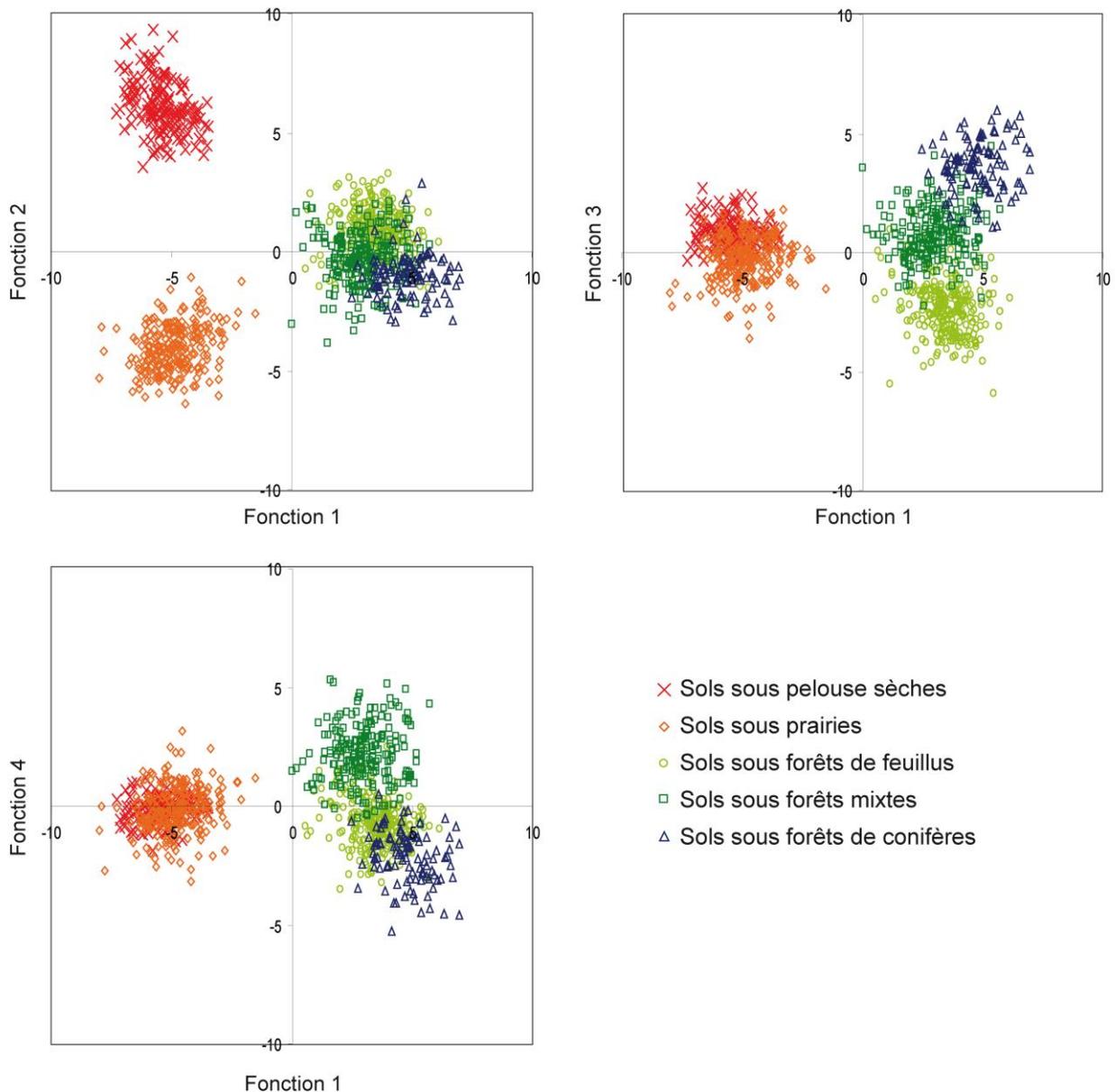


Fig. 8.8 : Fonctions canoniques de l'analyse discriminante (AD3) entre les cinq grandes classes de formations végétales (après prétraitement mathématique).

Distance de Mahalanobis (D)	Sols sous forêts de feuillus	Sols sous forêts mixtes	Sols sous forêts de conifères	Sols sous pelouses sèches	Sols sous prairies
<b>Fonction 1</b>					
Sols sous forêts de feuillus	0				
Sols sous forêts mixtes	0,48	0			
Sols sous forêts de conifères	1,31	1,80	0		
Sols sous pelouses sèches	<b>8,89</b>	<b>8,41</b>	<b>10,21</b>	0	
Sols sous prairies	<b>8,35</b>	<b>7,87</b>	<b>9,67</b>	0,54	0
<b>Fonction 2</b>					
Sols sous forêts de feuillus	0				
Sols sous forêts mixtes	1,25	0			
Sols sous forêts de conifères	1,95	0,70	0		
Sols sous pelouses sèches	<b>5,18</b>	<b>6,43</b>	<b>7,13</b>	0	
Sols sous prairies	4,98	3,73	3,03	<b>10,16</b>	0
<b>Fonction 3</b>					
Sols sous forêts de feuillus	0				
Sols sous forêts mixtes	3,14	0			
Sols sous forêts de conifères	<b>5,98</b>	2,84	0		
Sols sous pelouses sèches	3,06	0,08	2,92	0	
Sols sous prairies	2,03	1,11	3,96	1,04	0
<b>Fonction 4</b>					
Sols sous forêts de feuillus	0				
Sols sous forêts mixtes	2,86	0			
Sols sous forêts de conifères	1,44	4,30	0		
Sols sous pelouses sèches	0,62	2,24	2,06	0	
Sols sous prairies	0,53	2,33	1,97	0,09	0

Tab. 8.5 : Distance de Mahalanobis entre les cinq grandes classes de formations végétales. Les chiffres en gras correspondent aux couples de classes totalement disjoints.

### 8.2.2.3. Erreurs de classement des grandes familles de formation végétale

Ainsi, sur les quatre fonctions confondues, les sols sous forêts mixtes sont les seuls à ne jamais être totalement disjoints d'une autre population. Cela rejoint notre constat sur les erreurs de classement. Ceci peut évidemment être interprété comme une conséquence de la nature même de cette classe qui n'est qu'un mélange des deux autres classes forestières. D'ailleurs, en observant précisément quels sont les sites qui sont concernés par une superposition, il apparaît que les forêts mixtes dominées par les conifères tendent vers la classe des conifères, tandis que les forêts mixtes dominées par les feuillus tendent vers la classe des feuillus. D'autre part, les forêts de feuillus classées parmi les forêts mixtes sont des hêtraies pures échantillonnées dans les Vosges. Or, les conditions climatiques sont favorables au

développement d'une forêt mixte et nos données historiques sont partielles concernant la nature exacte des essences. Il n'est donc pas exclu que l'erreur de classement provienne d'une erreur de distribution de notre part. Le problème réside donc plus dans la définition des classes que dans la discrimination proprement dite. L'analyse discriminante des spectres proche infrarouge semble donc bien cohérente avec les grandes lignes écosystémiques.

### **8.2.3. Discrimination entre les 11 classes d'écosystèmes**

Nous avons retenu 11 classes. La classe des pelouses sèches n'est pas subdivisée, elle demeure identique à l'étape précédente. La classe des prairies est divisée entre les prairies dites secondaires de l'étage montagnard intermédiaire et les prairies subalpines qui se développent au-delà de 1300 m d'altitude. En fait, cette distinction correspond à l'ancienne distinction entre chaumes primaires et chaumes secondaires (Carbiener, 1966) qui considérait les premières comme des espaces toujours restés ouverts depuis le dernier maximum glaciaire. Sur le plan floristique, cette distinction est loin d'être évidente ; mais nous avons tout de même souhaité tester le pouvoir discriminant de la SPIR entre ces deux catégories. Les forêts de feuillus sont divisées en trois catégories : d'une part les hêtraies et les chênaies, et d'autre part une catégorie à forte biodiversité sans essences dominantes. Dans les deux premiers groupes, nous nous sommes limités aux sites fortement dominés par l'une ou l'autre essence. Pour les sites où aucune essence ne représentait plus de 50 % des ligneux, nous avons créé une troisième catégorie. Cette catégorie n'a pas beaucoup de sens du point de vue écosystémique. Nous aurions aussi bien pu éliminer ces sites ; cependant, à ce stade, nous avons décidé de travailler sur l'ensemble de la population et nous nous tenons à cette règle. Nous verrons plus loin les effets d'une approche plus sélective. Pour les forêts mixtes, nous avons distingué les hêtraies-sapinières des chênaies-sapinières. Enfin, pour les forêts de conifères, nous avons séparé les sapinières, les pineraies et la pessière. Dans ces trois derniers groupes, le nombre de sites est faible et appelle à la prudence quant à d'éventuelles conclusions.

#### **8.2.3.1. Résultats**

L'analyse discriminante génère 10 fonctions (= 11 groupes - 1). Les deux premières se détachent nettement et expliquent presque 69 % de la variance (Tab. 8.6). 97,3 % des échantillons sont correctement classés. Pour les pelouses sèches, les chênaie-sapinières et les 3 classes de conifères, 100 % des échantillons sont correctement classés (Tab. 8.7). Il existe quelques confusions entre les prairies secondaires et les prairies subalpines. Cependant, la discrimination est étonnamment bonne entre deux groupes peu différents du point de vue écosystémique. L'association systématique des pelouses subalpines avec des sols de type ranker cryptopodzolique contribue sans doute à cette discrimination, d'autant plus que ce type de pédogénèse se traduit par des taux de matière organique toujours élevés. Pour la hêtraie et la chênaie, il existe quelques confusions avec respectivement la hêtraie-sapinière et la chênaie-sapinière. Il faut noter que ces quelques erreurs se limitent toujours à quelques échantillons par site et ne concernent jamais un site dans son ensemble. Des confusions plus rares et plus

difficiles à expliquer à partir des observations de terrain existent également entre la hêtraie et la chênaie. Enfin, certains échantillons de la chênaie sont classés parmi les forêts à forte biodiversité. Pour ces forêts mal définies du point de vue écosystémique, des confusions existent avec les forêts de feuillus. Ces erreurs ont peu d'importance, compte tenu du caractère artificiel de cette classe. Finalement, pour la hêtraie-sapinière, les confusions sont rares et principalement avec la classe de la hêtraie. Ceci semble tout à fait normal pour des échantillons se trouvant directement à l'aplomb d'un ou plusieurs hêtres et ne recevant que très peu d'apport de litière de sapin. Le très bon classement des forêts mixtes, telles que la hêtraie-sapinière et la chênaie-sapinière est particulièrement révélateur de la qualité de la discrimination.

Toutefois, pour être rigoureux, il faut légèrement nuancer ces résultats. En effet, ce classement se fait sur la base des probabilités d'appartenance à chacun des groupes. Or, dans le cas où la probabilité est faible pour chacune des classes, la probabilité la moins mauvaise détermine la prédiction d'appartenance à un groupe. Nous avons donc reporté dans le tableau suivant (Tab ; 8.8) les pourcentages d'échantillons correctement classés dont les probabilités sont supérieures à 0,95 et 0,99. Pour certaines classes, et surtout pour la chênaie, les résultats apparaissent nettement inférieurs. En fait, la confusion avec les forêts à forte biodiversité est largement responsable de ces résultats plus médiocres. Il faut noter que dans cette classe, le chêne est pratiquement toujours présent, ce qui explique sans doute la mauvaise discrimination.

<u>Fonction</u>	<u>Valeur propre</u>	<u>% de la variance</u>	<u>% cumulé</u>
1	18,9	39,2	39,2
2	14,3	29,6	68,7
3	3,9	8,0	76,8
4	3,4	7,0	83,7
5	2,8	5,8	89,5
6	1,8	3,7	93,2
7	1,4	2,9	96,1
8	1,1	2,3	98,3
9	0,5	1,0	99,3
10	0,3	0,7	100

*Tab. 8.6. : Valeurs propres et % de variance expliquée des 10 fonctions canoniques (AD4)*

Classes observées \ Classes prédites	Classes prédites										
	Pelouse sèche	Prairie subalpine	Prairie secondaire	Hêtraie	Chênaie	Forêt à forte biodiversité	Hêtraie-sapinière	Chênaie-sapinière	Sapinière	Pessière	Pineraie
Pelouse sèche	<b>100</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Prairie subalpine	0	<b>96,67</b>	3,33	0	0	0	0	0	0	0	0
Prairie secondaire	0	1,21	<b>98,79</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
Hêtraie	0	0	0	<b>95,50</b>	1,80	0	2,70	0	0	0	0
Chênaie	0	0	0	1,11	<b>90,00</b>	4,44	0	4,44	0	0	0
Forêt à forte biodiversité	0	0	0	3,33	1,67	<b>95,00</b>	0	0	0	0	0
Hêtraie-sapinière	0	0	0	1,71	0,57	0	<b>97,14</b>	0	0	0	1
Chênaie-sapinière	0	0	0	0	0	0	0	<b>100</b>	0	0	0
Sapinière	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>100</b>	0	0
Pessière	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>100</b>	0
Pineraie	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>100</b>

Tab. 8.7. : Pourcentage d'échantillons prédits par classe d'écosystèmes (niveau 3, 11 classes).

Classes	% pour P>0,95	% pour P>0,99	Effectif
Pelouse sèche	100	100	156
Prairie subalpine	96,67	94,44	90
Prairie secondaire	96,36	93,33	165
Hêtraie	92,79	81,98	111
Chênaie	76,67	62,22	90
Forêt à forte biodiversité	81,67	73,33	60
Hêtraie-sapinière	91,43	88,57	175
Chênaie-sapinière	100	100	45
Sapinière	98,33	98,33	60
Pessière	100	100	15
Pineraie	100	100	30

Tab. 8.8. : Pourcentage par classe des échantillons correctement classés avec une probabilité supérieure à 0,95 et à 0,99.

### 8.2.3.2. Interprétation des 10 fonctions canoniques

Le décryptage individuel des fonctions devient plus fastidieux lorsque leur nombre augmente. C'est pourquoi nous ne présentons pas sous forme graphique les 10 fonctions comme nous l'avons fait pour les quatre fonctions à l'étape précédente. Nous ne présentons pas non plus les distances de Mahalanobis par fonction, et par couples de classes. Nous avons tout de même regroupé dans le tableau ci-après (Tab. 8.9) les barycentres de chaque classe pour chaque fonction. A ce niveau, la dispersion à l'intérieur des groupes appelée variance intragroupe est relativement faible et par conséquent les barycentres constituent de bons points de repères. Ainsi, ces données nous montrent que la première fonction présente toujours une opposition entre milieux ouverts (pelouses et prairies) et milieux fermés (forêts) et la seconde fonction est toujours celle qui discrimine parfaitement les pelouses des autres groupes. Les trois fonctions suivantes séparent bien les classes de conifères des autres classes et les classes de conifères entre elles. La fonction six sépare les chênaies-sapinières des autres groupes. Les fonctions suivantes, bien qu'elles présentent quelques tendances, ont toujours des distances de Mahalanobis faibles.

Groupes	Fonctions									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Pelouse sèche	5,4	6,8	1,2	-0,2	-0,3	-0,3	-0,3	-0,2	0,0	0,0
Prairie subalpine	5,5	-4,9	0,5	-0,6	-0,9	-0,8	2,7	0,5	-0,3	-0,2
Prairie secondaire	4,6	-4,6	-1,0	0,3	0,7	0,4	-1,6	-0,2	0,0	0,1
Hêtraie	-3,7	0,0	-1,4	-1,7	-0,3	-0,8	0,5	-2,3	0,4	0,1
Chênaie	-3,2	2,2	-2,7	2,3	0,0	0,2	0,4	0,0	-1,6	0,3
Forêt à forte biodiversité	-3,2	1,4	-3,1	1,1	0,3	-2,7	-0,5	1,9	1,1	-0,8
Hêtraie-sapinière	-3,9	-0,6	0,9	-1,4	-2,1	1,1	-0,5	0,8	0,0	0,0
Chênaie-sapinière	-1,2	1,4	-0,3	3,7	1,5	3,8	1,8	-0,2	1,5	-0,3
Sapinière	-3,8	0,5	1,7	-2,2	4,6	-0,3	0,5	1,2	0,0	1,1
Pessière	-4,7	-0,8	3,9	-2,1	5,2	0,8	-0,6	-1,3	-1,6	-3,7
Pineraie	-5,7	-4,2	6,9	5,9	-1,0	-2,7	-0,6	-1,0	0,1	0,4

Tab. 8.9. : Barycentre des groupes pour chacune des fonctions canoniques discriminantes. La distance de Mahalanobis est la distance entre les barycentres de deux groupes pour une fonction donnée.

### 8.2.3.3. Effet de site

Nous avons déjà discuté du problème des pelouses sèches inféodées aux substrats calcaires et à des sols de types rendzine. Au fur et à mesure que l'on augmente le nombre de classes, le nombre de sites par classe diminue et de nouveaux problèmes de ce type apparaissent. C'est le cas pour les pineraies qui, dans notre échantillonnage, ne sont représentées que par deux sites sur grès. L'effet de site est par conséquent fortement soupçonné d'influencer l'excellent isolement de cette classe. Paradoxalement, pour la classe pessière composée d'un seul site, l'effet de site ou de substrat ne peut pas être incriminé, puisque quatre autres sites très proches du point de vue géographique et pédologique (massif

du Rossberg) portent d'autres types de végétations. Par conséquent, l'effet de site aurait dû entraîner un mauvais classement de cette pessière parmi les autres types de végétation des sites proches. Toutefois, pour ces deux classes, notre population de sites souffre d'effectifs trop faibles pour être tout à fait significative. Pour la classe sapinière, la prédiction est excellente compte tenu de l'échantillonnage sur quatre sites éloignés à tous points de vue. Ainsi, bien que démontrée de manière incomplète, la discrimination entre les classes de conifères présente un fort potentiel.

Les classes sous hêtraie, sous chênaie et sous sapinière sont composées de plus de sites et bien réparties sur des substrats variés. La figure 8.9 qui se limite à la représentation des deux fonctions les plus significatives parmi les 10 montre bien que les différentes placettes sont regroupées en fonction de l'écosystème tandis que certaines placettes au substrat identique sont fortement éloignées. Seule deux placettes sous hêtres et sous chênes sur un même substrat gréseux se rapprochent et entraînent des confusions. D'ailleurs, la discrimination entre chênaies et hêtraies est imparfaite. La distance de Mahalanobis culmine seulement à 4 pour la fonction 4 (Tab 8.9). Pourtant, il est peu probable que les placettes qui composent ces deux groupes aient un passé de chênaie-hêtraie. Par conséquent, l'erreur de classement ne provient certainement pas d'une origine végétale ancienne mal connue. Cette difficulté de classement est peut être tout simplement liée à une grande proximité entre les matières organiques produites par ces deux essences. Nous verrons plus loin comment améliorer cette discrimination.

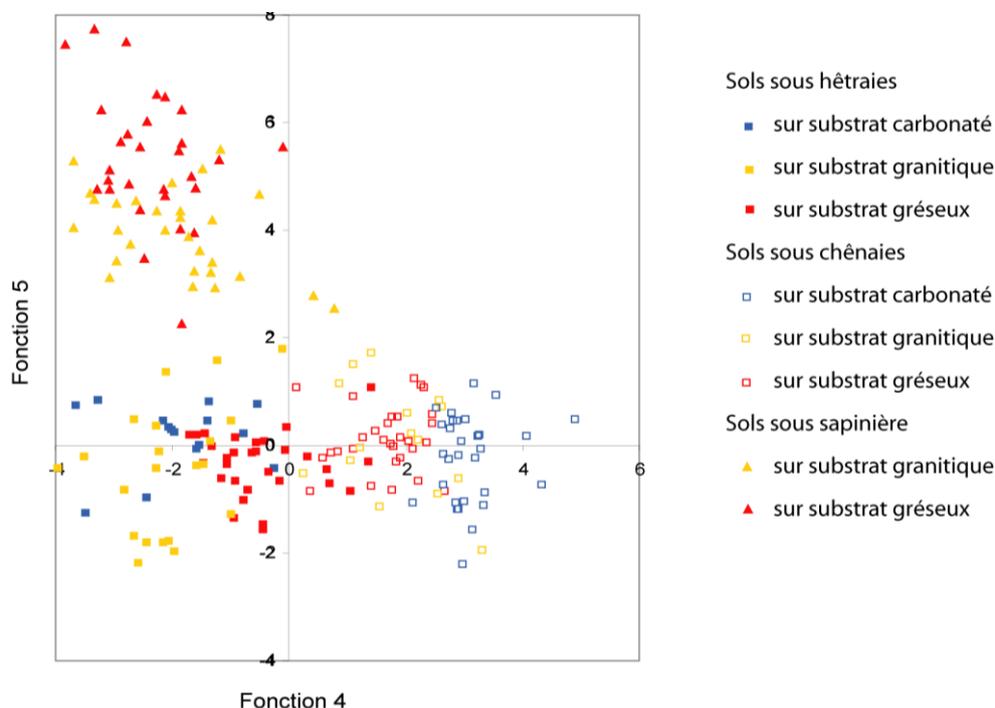


Fig. 8.9. : Scores des fonctions canoniques 4 et 5 de l'analyse discriminante à 11 classes pour les sols sous hêtraies, sous chênaies et sous sapinières croisés avec les grandes familles de substrats.

Les trois types d'écosystèmes sont convenablement séparés tandis que les différents groupes de substrat s'entrecroisent.

#### 8.2.3.4. Problème de définition des classes

Par ailleurs, les confusions sont importantes avec la classe « forêt à forte biodiversité ». Comme nous l'avons déjà évoqué, la nature même de cette classe est propice à confusion. Le choix des sites et le découpage des classes est ici directement en cause. Les forêts qui ne présentent aucune essence dominante mais plusieurs essences représentant respectivement 40, 30, 20, 10 % de la biomasse sont très nombreuses. Elles étaient peut être plus nombreuses avant toute intervention sylvicole. Par conséquent, les exclure totalement aurait créé un biais dans notre population de sites qui se veut représentative des écosystèmes alsaciens. La complexité de tels peuplements pourrait être compensée par un effort plus important d'échantillonnage.

- Premièrement, des classes beaucoup plus détaillées en fonction des proportions de chacune des essences pourraient être définies. (par exemple : 30 % de chêne, 20 % de frêne, 20 % d'orme, 10 % aulne...). Cette démarche peut cependant déboucher sur un nombre considérable de classes. De plus, la relation entre la biomasse ou le nombre d'arbres et les apports de litière n'est pas évidente. Des mesures de la biomasse et des pesées de la litière seraient nécessaires pour préciser cette relation.
- Deuxièmement, pour être cohérent dans notre démarche, il faudrait, pour chacune des classes, prélever plusieurs sites dans des conditions géographiques variées. Outre le fait de démultiplier le nombre de sites, cette démarche pose de vrais problèmes de prospection et d'existence des sites adéquats. Les interdépendances entre sol et végétation sont à l'origine de ces difficultés.
- Troisièmement, les proportions relatives des essences minoritaires et la présence même de certaines essences n'est renseignée par aucune source historique suffisamment fiable. Par conséquent, il n'existe aucune garantie de stabilité au-delà d'une durée égale à l'âge des arbres. Or, lorsque certains arbres atteignent exceptionnellement le seuil de 150 ans que nous avons fixé, ce sont souvent des arbres d'une seule et même essence (le chêne en général) tandis que les autres essences sont représentées par des individus plus jeunes.

Ainsi, nous avons conclu que cette démarche d'échantillonnage hyper détaillée est vaine. Nous traiterons donc les forêts à forte biodiversité comme des forêts de feuillus indifférenciées qui ne peuvent être abordées au niveau hiérarchique inférieur. A ce stade, nous considérons cet obstacle comme une limite structurelle de la méthode.

#### **8.2.4. Evolution des fonctions avec le nombre de classes**

Nous comparons ici les différentes fonctions et leurs valeurs propres pour les différents niveaux hiérarchiques (Tab. 8.2 et 8.6). Avec deux classes et une fonction, cette comparaison n'a pas de sens puisque toute l'information extraite est contenue dans une seule fonction. Pour les analyses discriminantes à 5 classes (4 fonctions) et 11 classes (10 fonctions), ces observations sont instructives. Les deux premières fonctions qui ont des valeurs propres élevées présentent les mêmes caractéristiques quel que soit le nombre de classes (5 ou 11). Pour la première fonction qui discrimine dans les deux cas les forêts des prairies, les valeurs propres sont presque égales. La seconde fonction dans l'analyse à 11 classes relève également la séparation nette des pelouses sèches. Cette similitude des premières fonctions signifie que l'information recherchée dans l'analyse à cinq classes est bien dominante. Ceci confirme d'une part que les grandes oppositions écosystémiques sont bien l'information dominante dans le spectre et d'autre part que l'influence du substrat et en particulier des substrats carbonatés est non négligeable. L'information qui permet de discriminer les sous-classes est plus marginale. Par conséquent, les discriminations plus fines, entre forêts de feuillus par exemple, sont de moins bonne qualité. Cette mauvaise discrimination peut s'expliquer par des différences faibles entre les matières organiques de ces différentes classes mais aussi par le fait que l'information est masquée par l'information dominante.

Pour tenter de mieux discriminer ces classes faiblement éloignées du point de vue des types de matière organique et s'affranchir, en partie, de l'effet du substrat nous proposons de travailler sur des sous populations d'échantillons plus homogènes du point de vue écosystémique afin de mieux cibler les variables qui contiennent l'information minoritaire.

### **8.3. Discrimination sur des sous populations.**

#### **8.3.1. Discriminations des milieux prairiaux**

Les discriminations entre les milieux prairiaux, pelouses sèches / prairies puis prairies secondaires / prairies subalpines n'ont pas véritablement rencontré d'obstacle dans notre approche sur la totalité de la population. Dans les deux cas, l'effet du substrat ou du sol sont jugés en partie responsables de cette bonne discrimination. La complexité des milieux prairiaux en terme de répartition de la biomasse ne nous permet de toute façon pas de préciser d'avantage l'origine de la matière organique. Le problème lié à leur grande biodiversité et surtout à l'absence d'essences dominantes est similaire au problème exposé plus haut concernant les forêts à forte biodiversité. Par conséquent, nous n'avons pas travaillé d'avantage sur la population de sols sous milieux ouverts.

### 8.3.2. Discriminations des milieux forestiers

Dans un premier temps, nous travaillons sur la totalité des échantillons de sols sous forêts afin d'examiner si les discriminations entre les grandes formations végétales (feuillus, conifères, mixtes) s'améliorent. Puis nous travaillerons sur des populations plus spécifiques opposant deux types d'écosystèmes précis.

#### 8.3.2.1. Discriminations au sein de la sous-population « forêts »

L'observation des classes prédites révèle une légère amélioration par rapport aux analyses effectuées sur la population totale (Tab. 8.10 et Fig. 8.10). Ce constat est surtout vrai pour les forêts de conifères. Les distances de Mahalanobis entre les groupes augmentent légèrement (Tab. 8.11). L'augmentation la plus importante se fait entre la classe « feuillus » et la classe « conifères » qui est toujours le seul couple totalement disjoint. Les classes « feuillus » et « mixtes » se superposent toujours largement. L'observation des probabilités ne présente aucune amélioration entre les deux démarches (Tab. 8.11). En fait, certains échantillons mal classés dans l'approche « population totale » sont correctement classés dans l'approche « sous-population » mais leur probabilité d'appartenir à la bonne classe demeure inférieure aux seuils exigeants que nous avons fixés.

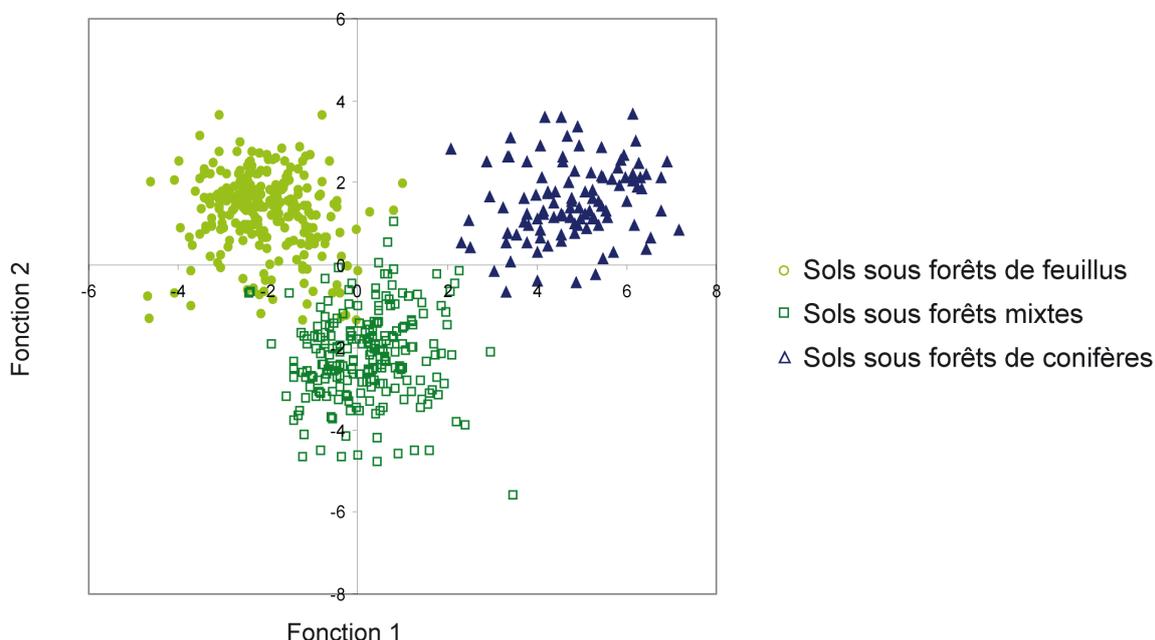


Fig. 8.10. : Fonctions canoniques de l'analyse discriminante (AD5) entre les trois grandes classes de forêts.

Classes prédites \ Classes observées	Population totale			Sous-population « forêt »		
	Forêt de feuillus	Forêt mixte	Forêt de conifères	Forêt de feuillus	Forêt mixte	Forêt de conifères
Forêt de feuillus	95,40	4,21	0,38	95,79	4,21	0
Forêt mixte	0,91	98,18	0,91	2,27	97,73	0
Forêt de conifères	0	0,96	99,04	0	0	100

Tab. 8.10. : Pourcentage d'échantillons prédits classes d'écosystèmes (niveau 2 forestier, 3 classes) pour les analyses discriminantes effectuées sur l'ensemble de la population et sur la sous-population « forêt ».

Classes \ Probabilité	Population totale		Sous-population « forêt »		Effectif
	P>0,95	P>0,99	P>0,95	P>0,99	
Forêt de feuillus	91,5	85,7	88,89	82,76	261
Forêt mixte	91,4	83,2	91,36	82,27	220
Forêt de conifères	96,2	96,2	97,14	96,19	105
Distance de Mahalanobis					
feuillus / conifères		5,98		<b>6,85</b>	
feuillus / mixte		3,14		3,46	
mixte / conifères		4,3		4,57	

Tab. 8.11. : Probabilités et distances de Mahalanobis pour les analyses discriminantes effectuées sur l'ensemble de la population et sur la sous-population « forêt ».

### 8.3.2.2. Discrimination au sein des sous-populations « forêts de feuillus » et « forêts mixtes »

A l'intérieur de la sous-population « forêt », nous pouvons encore effectuer des découpages pour travailler sur des sous-populations plus spécifiques. Cependant ces découpages sont limités par les exigences de l'outil statistique. En effet, comme nous l'avons vu dans le chapitre 7, le nombre d'observations (échantillons) ne doit jamais être inférieur au nombre de variables (136 bandes spectrales). Ainsi, le groupe « conifère » est exclu de cette approche en raison de l'insuffisance de l'échantillonnage. Pour le groupe de feuillus, nous excluons la classe dite « à forte biodiversité » pour des raisons de mauvaise définition que nous avons déjà évoquées. Donc, nous travaillons sur deux sous-populations : d'une part les chênaies et les hêtraies et d'autre part les hêtraies-sapinières et les chênaies-sapinières.

Dans les cas des chênaies et des hêtraies, la séparation est presque parfaite. Les deux populations sont totalement disjointes, la distance de Mahalanobis a doublé par rapport à l'approche précédente et 100 % des échantillons sont correctement classés. Un seul échantillon de chênaie a une probabilité d'appartenir à sa classe différente de 1. Cet échantillon est bien reconnaissable sur l'histogramme (Fig. 8.11) puisqu'il occupe une position centrale. L'amélioration de la prédiction paraît spectaculaire par rapport à la prédiction de ces deux classes lors de l'approche sur la totalité de la population avec 11 classes (Tab. 8.12). Cependant, cette amélioration est en partie trompeuse puisque une bonne partie des confusions qui existaient dans cette première approche ne se produisaient pas entre la hêtraie et la chênaie. Toutefois, les quelques erreurs qui se produisaient entre ces deux classes disparaissent et les probabilités d'appartenance à la bonne classe augmentent. L'algorithme se concentre donc bien sur l'information strictement nécessaire à la discrimination entre ces deux écosystèmes proches.

Pour les forêts mixtes, les conclusions sont très similaires (Fig. 8.12). L'amélioration est limitée puisque la discrimination était déjà de très bonne qualité entre ces deux classes lors de l'approche globale. A priori, il peut paraître curieux que la discrimination soit toujours aussi bonne que pour les feuillus (distance de Mahalanobis plus élevée). En effet, ajouter dans les deux écosystèmes de feuillus (hêtraie et chênaie) la même essence, à savoir le sapin, pour obtenir des forêts mixtes (hêtraie-sapinière et chênaie-sapinière) devrait introduire une confusion plus grande puisqu'une part de la matière organique est parfaitement identique. Cette vision est trop simpliste et il faut examiner plus en détail ces deux écosystèmes de forêts mixtes. En fait, la hêtraie-sapinière est souvent composée d'une proportion importante de sapin, pouvant dépasser 50 %. Ces sapins atteignent des hauteurs et des âges similaires aux hêtres et nous estimons qu'ils apportent en moyenne 50 % de la matière organique au sol. De son côté, la chênaie-sapinière présente une structure tout à fait différente. Sur les quatre sites que nous avons décrits, le sapin représente en moyenne 30 % des pieds. De plus, ces sapins occupent la strate intermédiaire et n'atteignent jamais la canopée dominée par le chêne. Leur taille reste toujours moyenne et il semble qu'ils dépérissent avant la maturité. D'autre part, la dynamique de cet écosystème est mal connue et sa stabilité même sur 150 ans est douteuse. Ainsi, nous estimons que les apports de litière par le sapin se situent autour de 10 % et ne dépassent jamais 20 %. Ainsi, en « ajoutant » des proportions très différentes de matière organique de sapin, la discrimination est facilitée puisque cette différence s'ajoute aux différences entre le chêne et le hêtre.

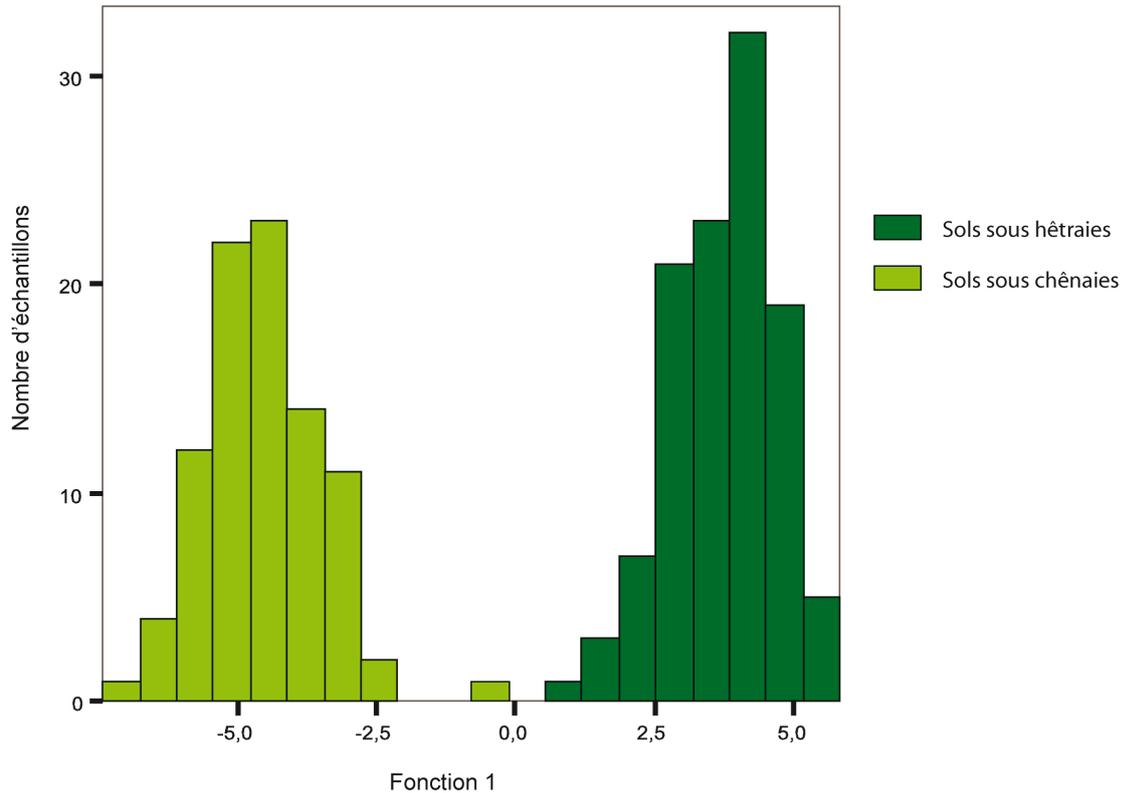


Fig. 8.11. : Fonction canonique de l'analyse discriminante entre les sols sous hêtraies et les sols sous chênaies

Classes observées	Classes prédites			
	Population totale		Sous-population « feuillus »	
	Hêtraie	Chênaie	Hêtraie	Chênaie
Hêtraie	95,5	1,8	100	0
Chênaie	1,11	90	0	100

Tab. 8.12. : Pourcentage d'échantillons correctement prédits par classes pour les analyses effectuées sur l'ensemble de la population et sur la sous-population « forêt de feuillus ».

Probabilité		Population totale		Sous-population « forêt »	
		P>0,95	P>0,99	P>0,95	P>0,99
	Hêtraie	92,79	81,98	100	100
	Chênaie	76,67	62,22	100	98,8
Distance de Mahalanobis	hêtraie / chênaie	4,00		8,28	

Tab. 8.13. : Probabilités et distances de Mahalanobis pour les analyses discriminantes effectuées sur l'ensemble de la population et sur la sous-population « forêts de feuillus ».

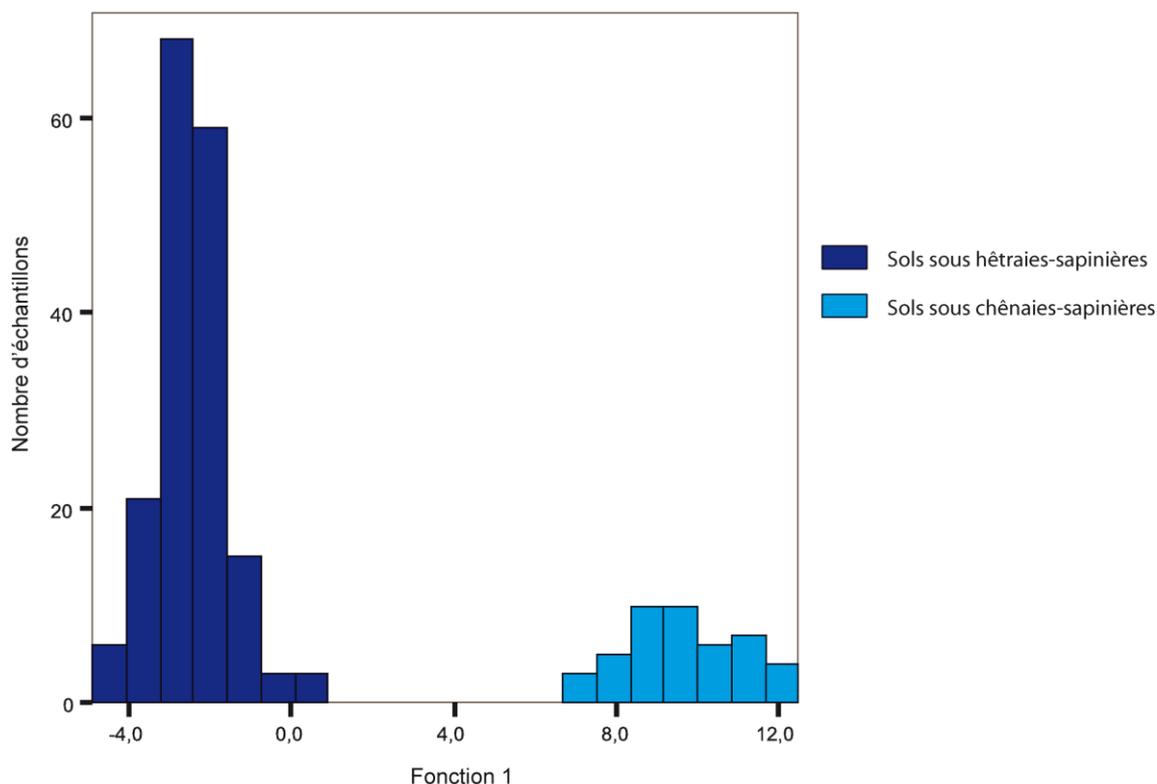


Fig. 8.12. : Fonction canonique de l'analyse discriminante entre les sols sous hêtraies-sapinière et les sols sous chênaies-sapinières

Classes observées	Classes prédites			
	Population totale		Sous-population « feuillus »	
	Hêtraie-sapinière	Chênaie-sapinière	Hêtraie-sapinière	Chênaie-sapinière
Hêtraie-sapinière	97,14	0	100	0
Chênaie sapinière	0	100	0	100

Tab. 8.14. : Pourcentage d'échantillons correctement prédits classe par classe pour les analyses discriminantes effectuées sur l'ensemble de la population et sur la sous-population « forêt mixte ».

Probabilité	Population totale		Sous-population « forêt »	
	P>0,95	P>0,99	P>0,95	P>0,99
Hêtraie-sapinière	91,43	88,57	100	100
Chênaie_sapinière	100	100	100	100
Distance de Mahalanobis	Hêtraie-sapinière / chênaie-sapinière		5,10	12,11

Tab. 8.15. : Probabilités et distances de Mahalanobis pour les analyses discriminantes effectuées sur l'ensemble de la population et sur la sous-population « forêt mixte ».

### 8.3.2.3. Intérêt de l'approche par sous-population

Les analyses discriminantes effectuées sur des sous-populations forestières confirment que le spectre proche infrarouge présente des différences significatives en fonction de l'origine de la matière organique. Cependant, les améliorations sont limitées. Dans l'ensemble, elles confirment que la matière organique provenant des conifères est très différente de celle provenant des feuillus et qu'une simple variation de la proportion respective des deux catégories est perceptible. La faible amélioration des résultats remet en question l'utilité de cette approche. De plus, dans la pratique cette approche seule ne semble pas la plus utile. En effet, le cas de figure le plus fréquent est l'échantillon totalement inconnu dont on veut connaître l'origine. Nous sommes plus rarement confrontés à un échantillon de forêt de feuillus dont on voudrait connaître l'origine précise.

En dépit de ces réserves, nous avons persisté dans cette approche parce qu'elle permet de lever un certain nombre d'ambiguïtés et de compléter nos interprétations. Comme nous l'avons déjà signalé à plusieurs reprises dans ce chapitre (§8.2.1.2, et 8.2.3.1), le substrat et le type de sol ont un effet suffisant sur certaines bandes spectrales pour fausser la prédiction, que ce soit en introduisant une confusion des classes ou en facilitant le classement par des caractères pédologiques semblables. Or, les sous-populations d'écosystèmes que nous présentons ci-dessus sont aussi les plus ubiquistes vis-à-vis des conditions géographiques. Dans notre échantillonnage, nous avons tenté au maximum de profiter de cette propriété pour éliminer tout risque d'effet de site. Cette plus grande robustesse n'affecte pas la qualité de la discrimination. Ceci nous conforte dans l'idée que les discriminations sont bien le fruit de différences de la matière organique liées à son origine.

D'autre part, l'approche sur des sous-populations à deux classes présente l'énorme avantage de produire une fonction discriminante unique. Premièrement, cette fonction unique est plus facile à représenter graphiquement et donc plus parlante. Cet avantage qui peut paraître futile prendra tout son sens lorsque nous examinerons des profils complets et que nous tenterons de suivre des dynamiques écosystémiques au sein du profil (*cf.* chapitre 9). Deuxièmement, dans cette configuration, il est beaucoup plus facile d'examiner et d'interpréter les coefficients de la fonction discriminante. En cas de fonctions multiples, malgré la possibilité d'identifier le rôle prépondérant de chacune des fonctions, l'information discriminante entre deux classes n'est jamais regroupée exclusivement sur une même fonction. Il devient alors très compliqué dans la matrice des coefficients d'identifier quelles longueurs d'onde contribuent à la discrimination d'une classe particulière.

Grâce à cette approche par sous-population, nous pouvons maintenant examiner quelles sont les longueurs d'onde spécifiques qui participent à la discrimination.

## **8.4. Longueurs d'ondes discriminantes**

Nous tentons ici par comparaison avec la littérature de comprendre quels sont les groupes organiques fonctionnels qui contribuent aux différentes discriminations.

### **8.4.1. Discrimination entre sols sous prairies et sols sous forêts**

Pour cette analyse 42 variables (bandes spectrales) sont utilisées. Les coefficients varient de -10,0 à 8,8. Cinq bandes spectrales se détachent (Fig. 8.13a). Ce sont ces cinq bandes que nous confrontons aux données de la littérature (Tab. 8.16). Les données complètes extraites de la littérature sont disponibles dans l'annexe 2A. Nous avons pris en compte dans la littérature toutes les bandes dans un intervalle de plus ou moins cinq nanomètres, puisque nos longueurs d'onde indiquent le centre d'une bande de 10 nm de large. En considérant les coefficients dans l'ordre décroissant de leur importance, nous avons d'abord des relations avec la cellulose, le soufre et les liaisons C-H. Dalal et Henry (1986) trouvent également une corrélation élevée entre le taux de carbone organique et la bande centrée sur 1740 nm. Ensuite, ce sont toujours des liaisons C-H et de la cellulose puis des aromatiques. La dernière bande retenue est associée à des protéines, à l'azote et toujours à la cellulose. Malheureusement, les composés qui semblent récurrents telle la cellulose sont rapidement détruits dans le sol. Ceci est inquiétant dans la perspective d'une application ultérieure à des échantillons contenant de la MO à TMR élevé.

### **8.4.2. Discrimination à l'intérieure des sous-populations forêts de feuillus et forêts mixtes**

Pour l'analyse discriminante entre hêtraies et chênaies, nous avons retenu uniquement les deux bandes spectrales aux coefficients les plus élevés parmi les 18 utilisées pour la discrimination (Fig. 8.13b). Six bandes spectrales sont communes à l'analyse discriminante entre forêts et prairies mais elles ont des coefficients faibles. En plus de la cellulose, il faut noter la présence parmi ces deux bandes de lignines, de cires et de tanins. Ces composés sont mieux conservés dans les sols que la cellulose et par conséquent plus intéressants dans notre démarche.

Pour la dernière analyse entre hêtraie-sapinière et chênaie-sapinière, nous nous sommes également contentés d'examiner les deux coefficients les plus élevés parmi 17 bandes (Fig. 8.13c). Seule la bande 2240 nm est référencée et associée à des protéines.

### 8.4.3. Interprétation des longueurs d'onde discriminante

Le premier constat est que toutes ces bandes sont associées à des groupes fonctionnels de la matière organique. Les bandes associées à des paramètres physiques comme l'humidité ou à des composés inorganiques comme les carbonates (annexe 2B) sont exclues ou ont des coefficients faibles. Ceci nous conforte dans l'idée que les différences que nous observons au sein de notre population proviennent bien de la matière organique et dépendent de son origine. Nous pouvons encore noter que le nombre de bandes significatives dans l'analyse diminue lorsque la discrimination testée devient plus spécialisée. Ceci nous conforte également dans l'idée que l'information qui sépare la hêtraie de la chênaie, par exemple, est plus ténue que l'information qui sépare les forêts des prairies.

Puisque des données existent et sont publiées et que nous avons de notre côté des informations sur les longueurs d'onde discriminantes, il eut été dommage de ne pas tenter cette comparaison. Cependant, ces comparaisons sont à considérer avec beaucoup de précautions :

- Premièrement, les données fournies dans la littérature sont issues de recherches empiriques qui n'ont pas de fondement théorique.
- Deuxièmement, une des principales caractéristiques du proche infrarouge est qu'il enregistre des harmoniques de vibration et des combinaisons de vibrations, et non pas des vibrations moléculaires fondamentales. Par conséquent, il est très difficile d'associer directement une longueur d'onde avec un processus de vibration et encore plus difficile de l'associer avec la molécule qui génère la vibration. De plus, les combinaisons de vibrations dépendent en partie de l'agencement des molécules.
- Troisièmement, comme une conséquence du deuxième point, toutes ces vibrations et combinaisons de vibrations se superposent dans le proche infrarouge.

Ainsi, du point de vue théorique, il paraît totalement illusoire de vouloir identifier des groupes fonctionnels. Lorsque les produits analysés sont presque purs, des tentatives sont envisageables. C'est le cas dans l'industrie agroalimentaire ou pharmaceutique. Pour les sols, compte tenu de leur grande hétérogénéité (*cf.* chapitre 1), l'approche qui consiste à comparer des spectres sans passer par la chimie moléculaire semble de loin la plus appropriée.

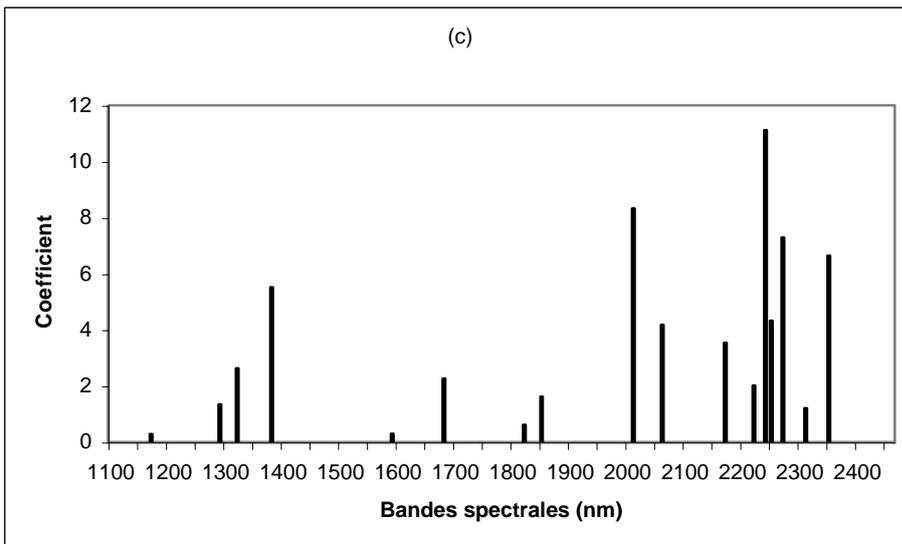
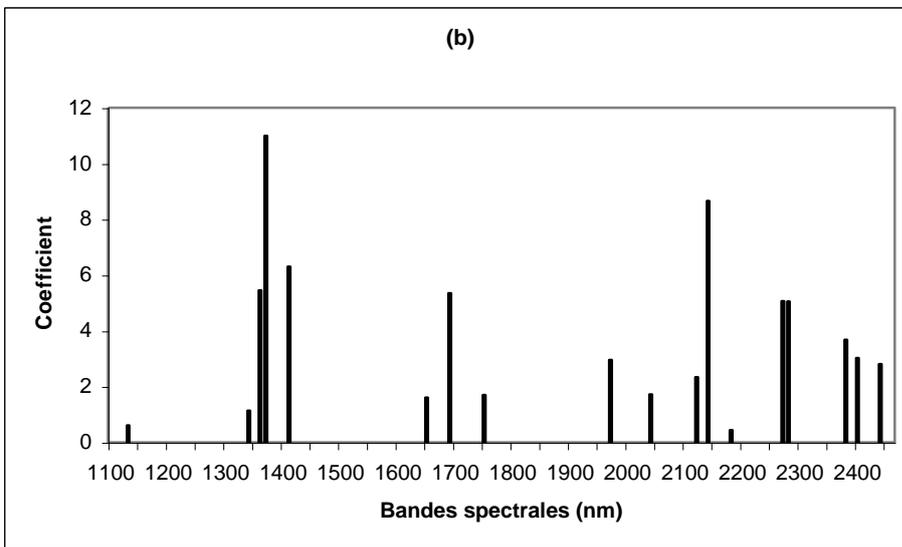
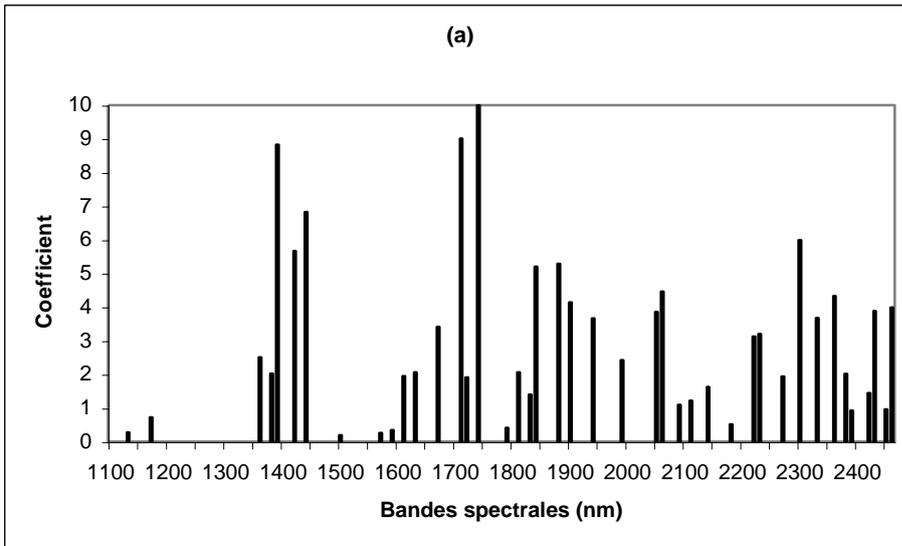


Fig. 8.13. : Coefficients des fonctions canoniques (valeurs absolues) pour chacune des bandes spectrales pour les discriminations forêt / prairie (a), hêtre / chêne (b) et hêtre-sapinière / chêne-sapinière (c)

Longueur d'onde	Type de vibration	Composant suggérer	Discrimination concernée	Référence
1395	C-H combinaison	C-H2	forêt/prairie	Shenk et al. 2001
1440	C-H combinaison	CH2	forêt/prairie	Shenk et al. 2001
1440	O-H étirement, 1ère harmonique	cellulose	forêt/prairie	Ali et al. 2000
1446	C-H combinaison	aromatique	forêt/prairie	Shenk et al. 2001
1705	C-H étirement, 1ère harmonique	CH3	forêt/prairie	Shenk et al. 2001
1736	O-H étirement.	cellulose	forêt/prairie	Fourty et al. 1996
1740	S-H étirement, 1ère harmonique	.-SH	forêt/prairie	Shenk et al. 2001
1744	-	C organique	forêt/prairie	Dalal et Henry 1986
2300	C-H étirement., CH2 déformation.	amidon cellulose	forêt/prairie	Fourty et al. 1996
2300	N-H étirement., C=O, C-H rotation	azote protéine	forêt/prairie	Fourty et al. 1996
2300	C-H pli 2ème harmonique	protéine	forêt/prairie	Shenk et al. 2001
1370	-	amidon cellulose	hêtraie/chênaie	Y.Roggo et al. 2004
2142	C=C	amidon, lignine, cire, tanins	forêt/prairie	E.Ben-Dor et al. 1997
2140	C-H étirement/C=O étirement, combinaison, déformation symétrique C-H	huile, NC=CH	hêtraie/chênaie	Shenk et al. 2001
2010	-	-	hêtraie-sapinière/ chênaie-sapinière	aucune référence
2240	C-H étirement.	protéine	hêtraie-sapinière/ chênaie-sapinière	Fourty et al. 1996

Tab. 8.16. : Relations entre les bandes spectrales et des composés fonctionnels d'après la littérature.

## 8.5. Comparaison avec les biomarqueurs

L'analyse qualitative et semi-quantitative des marqueurs biologiques lipidiques présents dans la matière organique d'horizons de surface de 13 sites – 6 prairies, 5 hêtraies et hêtraies sapinières, 2 chênaies – a permis de jeter les bases d'un référentiel moléculaire mettant en évidence la diversité des contributions végétales (Trendel *et al.*, soumis). L'identification structurale des biomarqueurs (composés aliphatiques, triterpènes polycycliques, stéroïdes, etc.) a été réalisée par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse portant sur des fractions (hydrocarbures saturés, aromatiques, monocétones, monoalcools) obtenues par chromatographie sur gel de silice des extraits organiques totaux. Parmi les résultats les plus significatifs, notons quelques exemples (Trendel *et al.* soumis) :

- Les distributions de composés aliphatiques (*n*-alcanes, *n*-méthylcétones, *n*-aldéhydes, *n*-alcools) abondants dans les cires cuticulaires, sont très discriminantes. Par exemple, les profils monomodaux à prédominance paire des *n*-alcools font apparaître un terme respectivement en C<sub>26</sub>, C<sub>28</sub> et C<sub>24</sub> pour les prairies, les hêtraies et les chênaies.
- Sur un plan individuel, des molécules témoignent d'apports organiques particuliers. Le 10-nonacosanol, typique des conifères, se retrouve dans trois sols sous sapinières.
- Des variations concernent les 3-oxytriterpènes typiques d'Angiospermes : par exemple la friedeline, bien qu'ubiquiste, montre une présence écrasante sous chênaies ; l'acétate naturel de 3-friedelanol apparaît spécifique des prairies, etc.
- Un hydrocarbure triterpénique insaturé non identifié et qui ne proviendrait pas de végétaux supérieurs mais plutôt de mousses ou de lichens, ne se trouve que dans les prairies.

L'analyse des marqueurs biologiques offre donc un potentiel indéniable en matière de caractérisation du couvert végétal. Aucun des résultats obtenus n'est en contradiction avec les données historiques ou avec la SPIR. Les deux approches sont complémentaires. Une comparaison directe n'est cependant pas possible, puisque les biomarqueurs lipidiques ne représentent qu'une infime partie de la matière organique totale que nous analysons par SPIR. L'étude des marqueurs biologiques, certes chronophage, offre toutefois une garantie supplémentaire qui permet de compenser l'effet « boîte noire » parfois reproché à l'approche statistique de la SPIR.

## Conclusion

La SPIR s'avère être un outil approprié pour discriminer des échantillons de surface de sols en fonction de l'origine végétale de la matière organique. L'échantillonnage est très robuste lorsqu'il s'agit de discriminer les grandes classes d'écosystèmes telles que forêts et prairies. Mécaniquement, cette robustesse diminue lorsque des discriminations plus spécifiques sont testées. Cette limite est dans certains cas liée à des carences de l'échantillonnage. Ces carences telles que le manque de sites sous épicéas ou sous pins pourront être comblées à l'avenir. De la même manière, le référentiel pourra être enrichi d'écosystèmes plus spécifiques ou d'écosystèmes provenant d'autres domaines bioclimatiques. Certaines différences ténues (chênaie-hêtraie) ont déjà montré le potentiel important de la SPIR en termes de résolution écosystémique. D'autre part, nous pouvons d'ores et déjà constater que les sites échantillonnés en République Tchèque ne se sont jamais distingués du point de vue spectral par rapport aux écosystèmes alsaciens équivalents. Le territoire d'application potentiel de la méthode, en l'état actuel du référentiel, est donc bien plus étendu que le territoire alsacien à l'intérieur duquel nous sommes cantonnés. Pour les autres zones bioclimatiques (méditerranéenne, tropicale, etc), un référentiel spécifique ou une extension du référentiel actuel est à envisager.

Concernant les traitements statistiques, nous avons fait le choix d'un outil simple pour limiter au maximum l'effet « boîte noire » que produisent parfois les statistiques multivariées. De nombreux autres outils ont été testés durant les quatre dernières années. Plusieurs approches ont été soumises à des spécialistes de la SPIR et à des spécialistes des statistiques. Nous avons finalement retenu celle qui fédérait le moins de critiques. Nos expériences et nos tergiversations permettent tout de même de retenir que les grandes classes d'écosystèmes sont toujours correctement discriminées et ce quel que soit l'outil utilisé.



### LES SPECTRES DE PROFILS COMPLETS DE SOLS (étape 2)

Les résultats obtenus dans le cadre de l'étape 1 se sont avérés positifs. Par conséquent, nous pouvons aborder cette seconde étape afin de vérifier si les discriminations entre les différents types d'écosystèmes sont conservées dans la profondeur du sol.

#### **9.1. Confrontation directe avec le référentiel de surface (approche 1)**

Tous les échantillons des profils sont considérés comme inconnus. Dans un premier temps, les fonctions discriminantes calculées à partir du référentiel de surface sont appliquées aux échantillons des profils. Tout comme pour le référentiel de surface, nous procédons de façon hiérarchique en examinant d'abord les discriminations élémentaires entre sols sous prairies et sols sous forêts, puis nous examinerons des distinctions écosystémiques plus spécifiques.

##### **9.1.1. Opposition forêt-prairie : approche globale**

Pour la fonction élémentaire discriminant les sols sous forêts et les sols sous prairies, les scores obtenus pour les échantillons de profondeur sont compris dans le même intervalle que les échantillons de surface (Fig. 9.1). Les pics de fréquence sont cependant bien moins marqués que pour les échantillons de surface et les valeurs se répartissent de façon plus homogène. Nous pouvons tout de même relever quatre pics. Un premier centré sur (-6) correspond bien au pic des échantillons de surface sous prairies. Un second pic, plus important, centré sur (-3) est légèrement décalé par rapport aux échantillons sous prairies. Il présente également une large épaulement du côté droit. Ceci constitue une quantité non négligeable d'échantillons occupant une position intermédiaire pour lesquels il est difficile d'attribuer une origine forestière ou prairiale. Les deux autres pics centrés sur 4 et 8 sont situés dans le domaine des sols sous forêts. Le plus important (4) est aligné sur le pic des horizons de surface de sols sous forêts. Le pic à peine marqué (8) présente des valeurs légèrement supérieures à toutes celles calculées pour le référentiel de surface. D'autre part, il faut noter que deux échantillons obtiennent des valeurs supérieures à 20. Ces deux échantillons proviennent d'une même carotte prélevée dans la forêt de Salajka. Or, les 5 autres carottes prélevées sur le même site ne présentent pas cette anomalie. Cette anomalie semble donc très locale. Par conséquent, nous avons écarté ces deux échantillons pour la présentation des résultats.

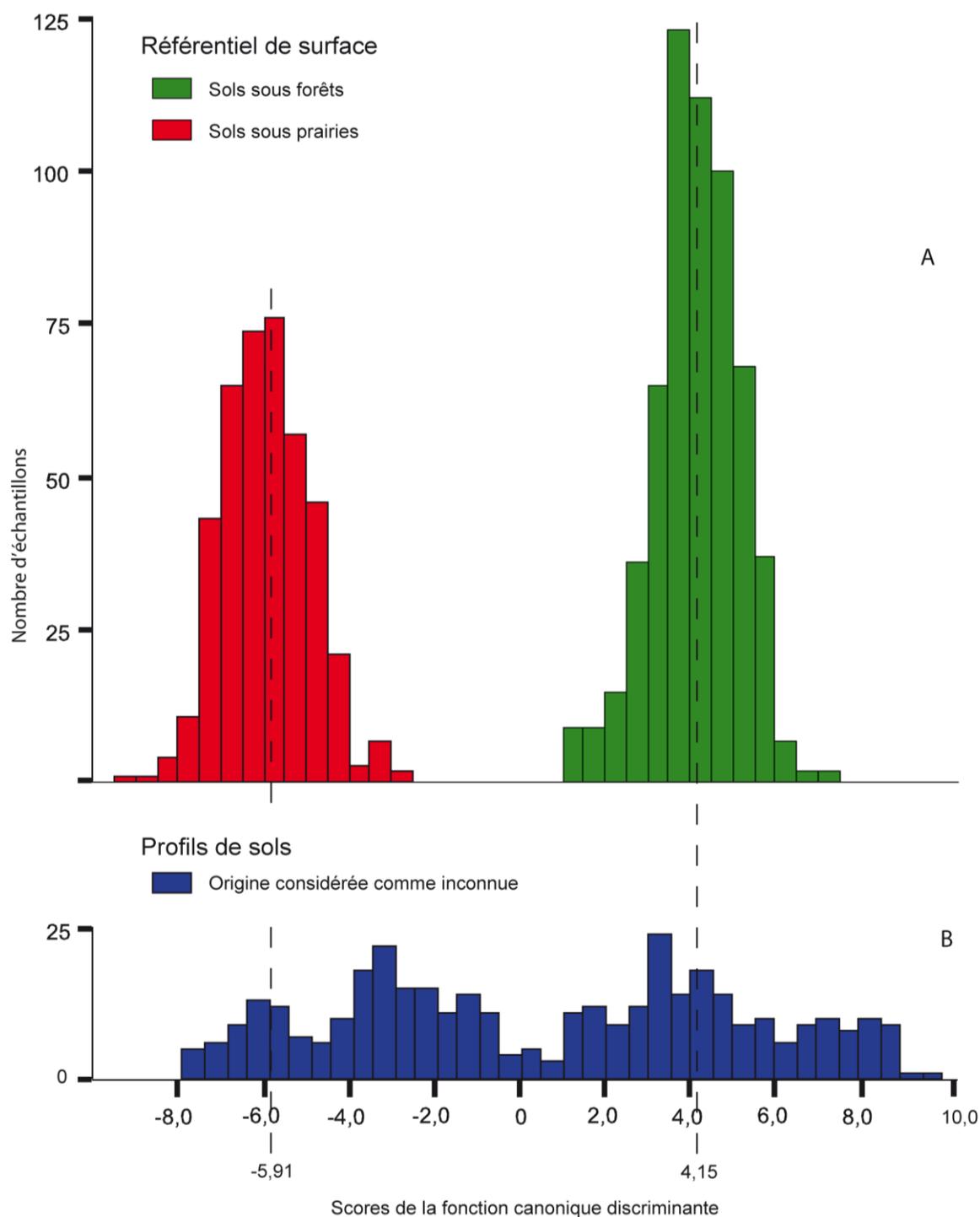


Fig. 9.1. : Scores de la fonction canonique discriminante élémentaire pour le référentiel de surface (A) et les profils de sol (B). La fonction est générée à partir du référentiel de surface et appliquée aux profils de sols.

### 9.1.1.1. Interprétation des scores de la fonction discriminante élémentaire

Au regard des échantillons prélevés sur des profils (Fig. 9.1), il est évident qu'une part non négligeable est classée avec une probabilité faible ou tout simplement mal classée. Plusieurs raisons peuvent justifier ce problème de classement.

- Premièrement, il est possible pour les profils dont l'histoire est la moins bien connue qu'un écosystème autre que prairial ou forestier ait occupé le site. Si cette hypothèse est vérifiée, notre approche est inappropriée puisqu'elle tente de classer un échantillon dans un groupe de classes auquel il n'appartient pas. Cependant, pour la grande majorité des sites, à l'exception du profil de Gottesheim (GOT), il est très improbable qu'ils aient été mis en culture pour des raisons climatiques ou topographiques.
- Deuxièmement, un certain nombre d'échantillons provenant des horizons profonds ont des taux de matière organique inférieurs à 1 %. Ce paramètre peut rendre délicat la reconnaissance de l'origine de la matière organique.
- Enfin, une majorité de sites a subi des changements de végétations. Compte-tenu du brassage de la matière organique au sein du profil, la plupart des échantillons est constituée d'un mélange de matières organiques provenant de plusieurs écosystèmes successifs. Il est normal qu'une classification strictement dichotomique soit mise en échec pour de tels échantillons.

En séparant les échantillons en fonction de la profondeur de prélèvement puis en fonction de la stabilité des écosystèmes, nous cherchons à expliquer cette répartition des scores sur la fonction discriminante élémentaire.

#### **9.1.1.2. Les scores en fonction de la profondeur**

Pour les échantillons prélevés entre 0 et 20 cm, la séparation est correcte et peu différente du référentiel de surface (Fig. 9.2). Quelques échantillons obtiennent une valeur proche de zéro. Ces échantillons indéterminés proviennent du profil MRN (sol hydromorphe sous prairie) dont la stabilité n'est pas avérée et dont le TMR déjà élevé dans les premiers centimètres présente un gradient fort. Il est donc probable que l'origine végétale de la matière organique ne soit pas exclusive d'une formation végétale. Pour les échantillons prélevés entre 20 et 40 cm, la séparation est toujours acceptable avec un intervalle vide entre 0 et 2. Pour les valeurs négatives (prairiales) deux pics commencent à se distinguer. D'une part, un pic centré sur (-7) et d'autre part un pic centré sur (-3). Le premier est entièrement inclus dans l'intervalle prairial du référentiel de surface tandis que le second se trouve à la marge. Les valeurs positives associées aux échantillons d'origine forestière présentent toujours un seul pic très émoussé. Il est entièrement inclus dans l'intervalle du référentiel de surface à l'exception de quelques échantillons ayant une valeur supérieure à 8. Ces échantillons aux valeurs élevées appartiennent au profil de Gottesheim (GOT) et de Wangenbourg (WPA) qui sont déjà très pauvres en matière organique à ces profondeurs. Parmi les valeurs légèrement négatives et mal classées se trouvent des échantillons des profils FALI 4 et FALI5. Ces deux profils respectivement sous prairie et sous forêt ont connu un changement de végétation récent. Dans ce niveau intermédiaire du sol, la matière organique issue de la végétation passée est largement mêlée à la matière organique issue de la végétation actuelle. Dans les deux cas, nous avons à faire à des MOS de forêts mêlées à des MOS de prairies.

Pour les niveaux inférieurs à 40 cm, les deux groupes sont nettement moins évidents à détecter. Des pics émoussés centrés sur (-2) et 8 sont détectables. Globalement la distinction nette entre une population d'origine forestière et une population d'origine prairiale décroît progressivement avec la profondeur. Cette disposition est en adéquation avec les mécanismes de répartition des MOS. Les horizons supérieurs sont dominés par des MOS issues de la végétation actuelle tandis que les horizons plus profonds contiennent majoritairement de la matière organique d'origines variées. Ceci est en accord avec les modèles de répartition bicompartimentaux de la MO.

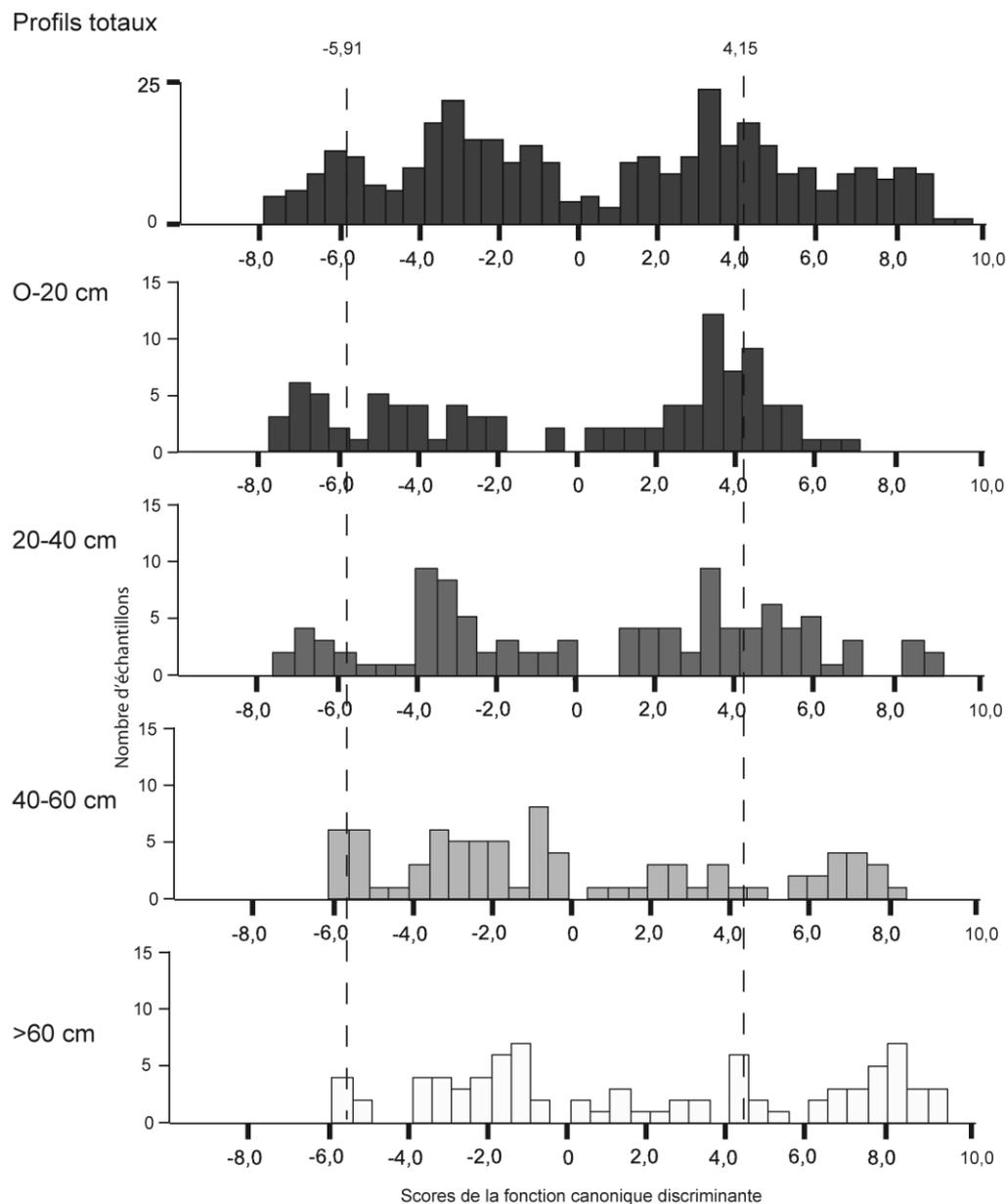


Fig. 9.2. : Scores de la fonction canonique discriminante élémentaire pour les profils de sol en fonction de la profondeur.

### 9.1.1.3. Comparaison des profils en fonction de leur stabilité écosystémique

L'examen séparé des profils identifiés comme stables et des profils ayant subi des changements est encore plus instructif (Fig. 9.3). Les profils stables, toutes profondeurs confondues, sont bien séparés en deux groupes. Un groupe centré sur 3 est très peu éloigné du groupe forestier de référence. Le groupe centré sur (-3) est en revanche nettement décalé par rapport au groupe prairial de référence. Les profils ayant subi un changement de végétation présentent une répartition chaotique entre -8 et 10. Ceci confirme que la mauvaise discrimination des échantillons profonds est liée à l'origine multiple des MOS. Une fois de plus, l'information extraite des spectres PIR semble en adéquation avec les réalités de terrain.

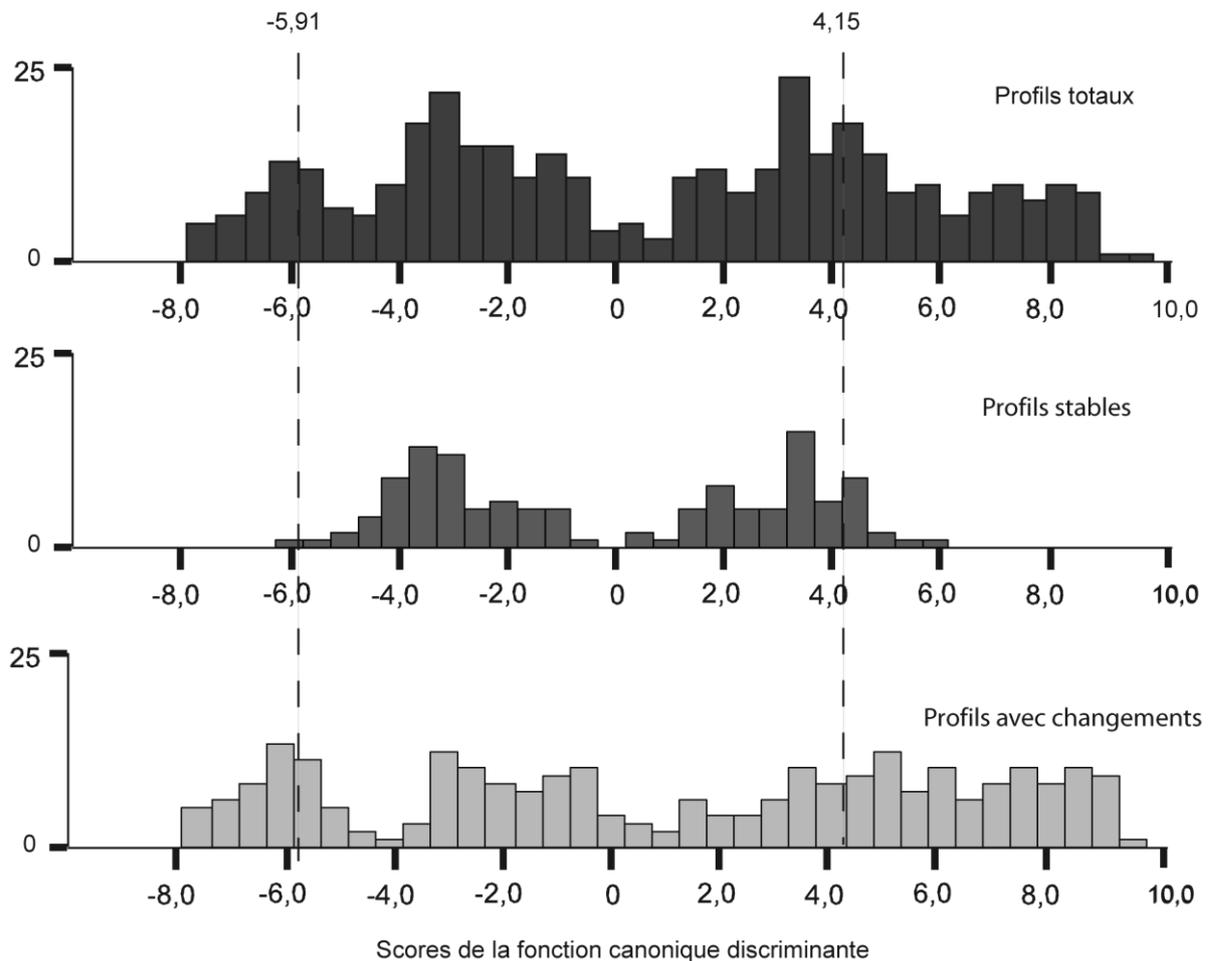


Fig. 9.3. : Scores de la fonction canonique discriminante élémentaire pour les profils stables et les profils avec changement de végétation.

### **9.1.2. Opposition forêt prairie - approche par profil**

Les observations générales sur l'ensemble des échantillons de profondeur semblent indiquer que le signal enregistré correspond bien à des variations et à des combinaisons de l'origine végétale de la matière organique. Pour confirmer ces observations, nous examinons maintenant ces mêmes scores profil par profil. Dans un premier temps, nous comparons les répétitions d'échantillonnage sur un même site afin de vérifier la reproductibilité des mesures, puis nous observerons successivement les profils stables et les profils avec changement de végétation.

#### **9.1.2.1. Comparaison des répétitions**

Suivant les sols et en fonction des contraintes techniques, ce sont de un à six profils qui ont été prélevés et analysés. Il faut distinguer les répétitions de prélèvement dans la fosse ou à la tarière que nous examinons ici des répétitions de mesures spectroscopiques (chapitre 7) qui sont effectuées systématiquement pour chaque échantillon. Nous avons représenté sur la figure 9.4 les six profils pour lesquels nous disposons de trois répétitions ou plus. Globalement, les répétitions sont peu éloignées les unes des autres. Nous pouvons tout de même relever quelques nuances.

Les sites CFP et GOP (prélevés dans des fosses) présentent chacun trois répétitions très proches. Le site FAP, également prélevé dans une fosse, présente des répétitions plus éloignées pour les échantillons entre 0 et 10 cm et au-delà de 50 cm. Une telle hétérogénéité de surface en contraste avec une homogénéité entre 15 et 60 cm a déjà été observée dans le massif du Hohneck lors de travaux préliminaires (Ertlen, 2005). Ces sites de prairies d'altitude sont généralement colonisés par un tapis très hétérogène de ligneux bas dominé par les myrtilles. Cette hétérogénéité se traduit par une hétérogénéité des MOS de surface. Les variations latérales de ce tapis au fil du temps gommement les hétérogénéités en profondeur. Le signal stable entre 10 et 50 cm a d'ailleurs une valeur médiane entre les extrêmes observés en surface. Les sites SJK et VST (prélevés à la tarière) et le site MHG (prélevé dans une tranchée archéologique) ont fait l'objet de répétitions plus éloignées du point de vue spatial : échelle décamétrique voire hectométrique. Ce changement d'échelle semble se traduire par des scores plus éloignés. Les répétitions du site SJK forment tout comme FAP une sorte de X avec des répétitions homogènes entre 20 et 60 cm, et hétérogènes en surface et en profondeur. L'hétérogénéité de surface est sans doute imputable à des variations du sous-bois à court terme ou à l'hétérogénéité des apports de bois mort par les chablis très nombreux sur ce site. A l'exception de GOP et CFP, tous les profils présentent une plus forte hétérogénéité au-delà de 60 cm. Or, à ces profondeurs, les processus de bioturbation devraient entraîner une très bonne homogénéisation des matières organiques. En fait, ces horizons très profonds sont aussi les plus pauvres en matière organique. Ceci pourrait expliquer le caractère indéterminé des scores de la fonction discriminante. Le site GOP est très pauvre en matière organique sur la quasi totalité du profil. Les répétitions sont très similaires ; en revanche, les scores, presque tous

supérieures à 8, sont en-dehors de l'intervalle obtenu pour les échantillons de surface et ne permettent pas de classer ce profil dans l'une ou l'autre des deux grandes familles écosystémiques.

Il semblerait donc que la mauvaise discrimination des échantillons en fonction de l'origine végétale des MOS entre 40 et 60 cm et dans une moindre mesure entre 20 et 40 cm est bien liée à des mélanges plus ou moins complexes de MO ayant une origine végétale différente. En revanche, au delà de 60 cm et sur le site GOP, la mauvaise discrimination semble plutôt liée à un obstacle technique dû à une quantité de MO trop faible.

Globalement, les répétitions sont de bonne qualité et les mesures semblent reproductibles. Il est tout de même recommandé, en particulier dans les horizons superficiels, d'effectuer plusieurs mesures afin de prendre en compte l'hétérogénéité spatiale à grande échelle. Bien que moins précis du point de vue de la résolution verticale, les prélèvements à la tarière prennent mieux en compte les variations latérales que les prélèvements dans une fosse forcément limités du point de vue spatial. Par la suite, nous présenterons les résultats sous forme d'une courbe unique représentant la moyenne des répétitions.

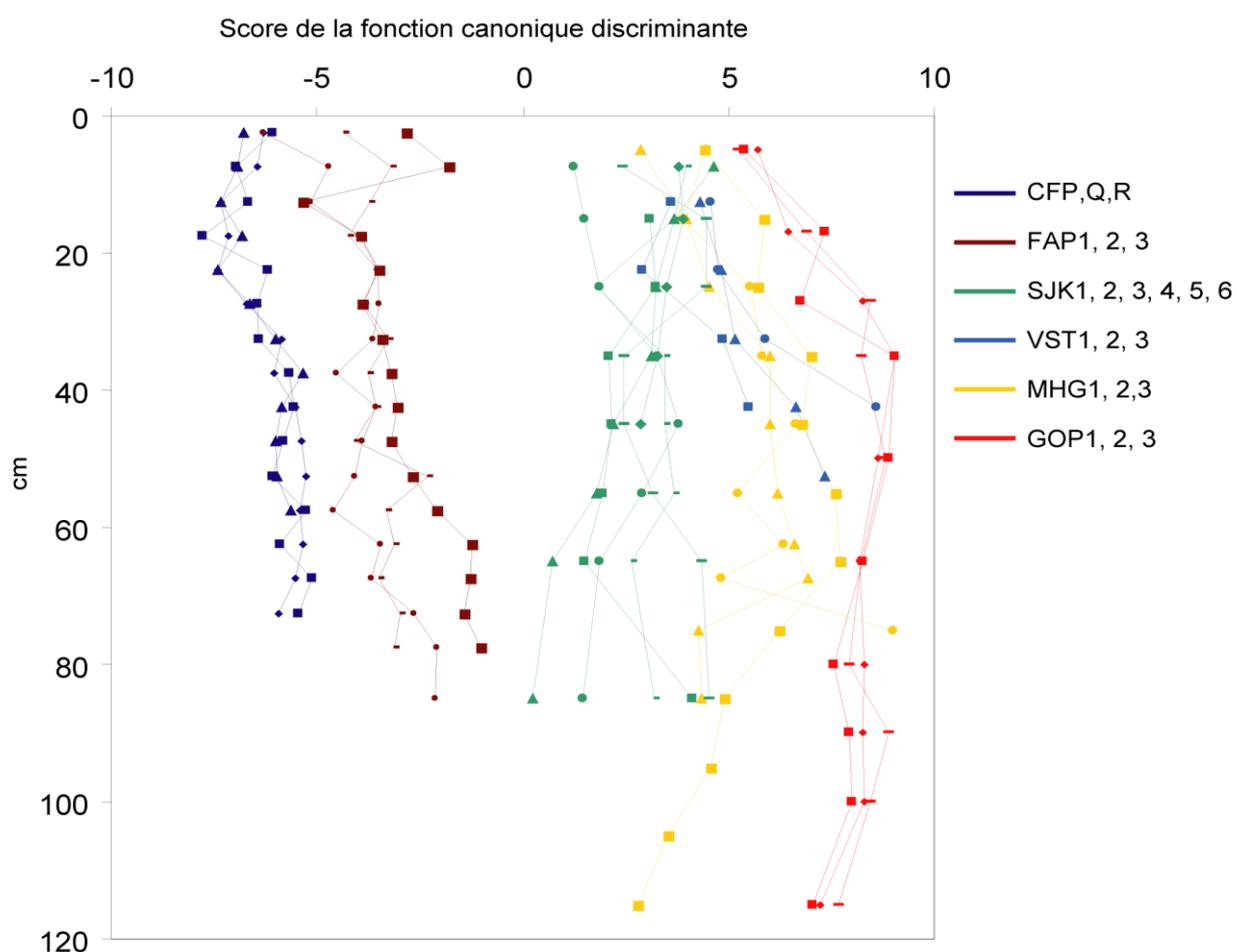


Fig. 9.4. : Comparaison des scores de la fonction discriminante pour les profils de sols comprenant plusieurs répétitions.

### 9.1.2.2. Profils stables

A l'exception du site de l'Elmerforst (EFP), les sites identifiés comme stables par les méthodes historiques et paléoécologiques ont également des scores constants sur toute l'épaisseur du profil (Fig. 9.5). Les profils prairiaux (FAP et GAF1 et 2) dévient légèrement vers le centre en profondeur. Le profil de Salajka (SJK) présente la meilleure stabilité, due en partie à un plus grand nombre d'échantillons par horizon (6 au lieu de 3). Le site de l'Elmerforst (EFP) est relativement stable jusqu'à 30 cm. En revanche, les échantillons prélevés à 45 et 55 cm ont un signal de sol sous prairie. Le dernier échantillon occupe une position centrale. Sa très faible teneur en matière organique invite à la prudence.

Les sites prairiaux, GAF2 en particulier, ont des scores qui tendent vers zéro au delà de 50 cm. Ce score semble indiquer que la matière organique n'est pas strictement d'origine prairiale. Les ligneux bas et un passé forestier très ancien sont les deux hypothèses les plus crédibles pour expliquer cette tendance. Pour le site sous forêt EFP, il faut rappeler que nos informations concernant la stabilité n'excèdent pas 800 ans. A priori, la stabilité sur les premiers trente centimètres est en adéquation avec la stabilité observée sur 800 ans. Nous développerons plus loin le couplage entre le TMR et les changements du point de vue spectral. Les autres sites tels que SJK ou VST n'offrent pas non plus une garantie de stabilité pluriséculaire, mais ils semblent tout de même exempts de toute influence prairiale.

### 9.1.2.3. Profils avec changement de végétation reconnu

Entre 0 et 10 cm, tous les sites avec changements ont des scores en adéquation avec la végétation actuelle (Fig. 9.6). Au delà de 40 cm, à l'exception du site du Petit Hohneck (PHOH), tous les profils ont des scores intermédiaires entre 0 et (-4). Entre 10 et 40 cm, la convergence est plus ou moins rapide. Entre 10 et 20 cm, les échantillons du Rossberg (ROS 1-3-4) ont des scores presque identiques malgré une végétation actuelle très différente. A l'exception du profil FALI5 et dans une moindre mesure FALI4, les profils ont une tendance unique partant des valeurs forestières ou prairiales pour se rapprocher du centre. Or, la pédoanthracologie indique plutôt des scénarios avec de multiples changements sur le long terme (Goepf, 2007).

En fait, compte tenu du brassage des matières organiques, les épisodes forestiers et prairiaux successifs sont mélangés et produisent en profondeur un signal moyen. Ce signal moyen ou indéterminé pourrait également être interprété comme un échec de classification lié à une transformation trop importante des MO initiales ou à des quantités trop faibles de MO. Mais, sur les profils stables présentés ci-dessus, les quantités de MO en profondeur sont similaires et les processus de dégradation sont les mêmes. Or, pour ces profils, le signal forestier ou prairial est conservé même s'il dévie légèrement par rapport au référentiel de surface. Donc, c'est bien l'hypothèse d'un mélange de matière organique d'origine variée qui semble la plus solide pour expliquer le signal moyen observé pour un certain nombre d'échantillons

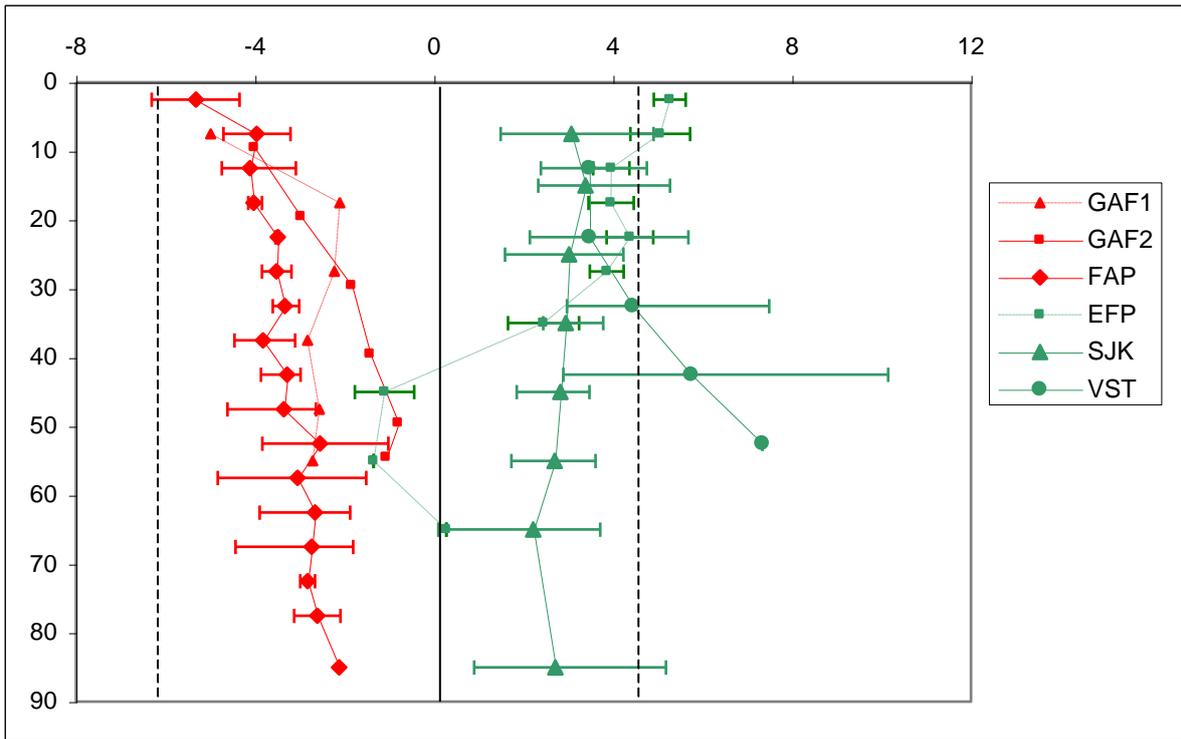


Fig. 9.5 : Scores de la fonction canonique discriminante pour des profils stables.

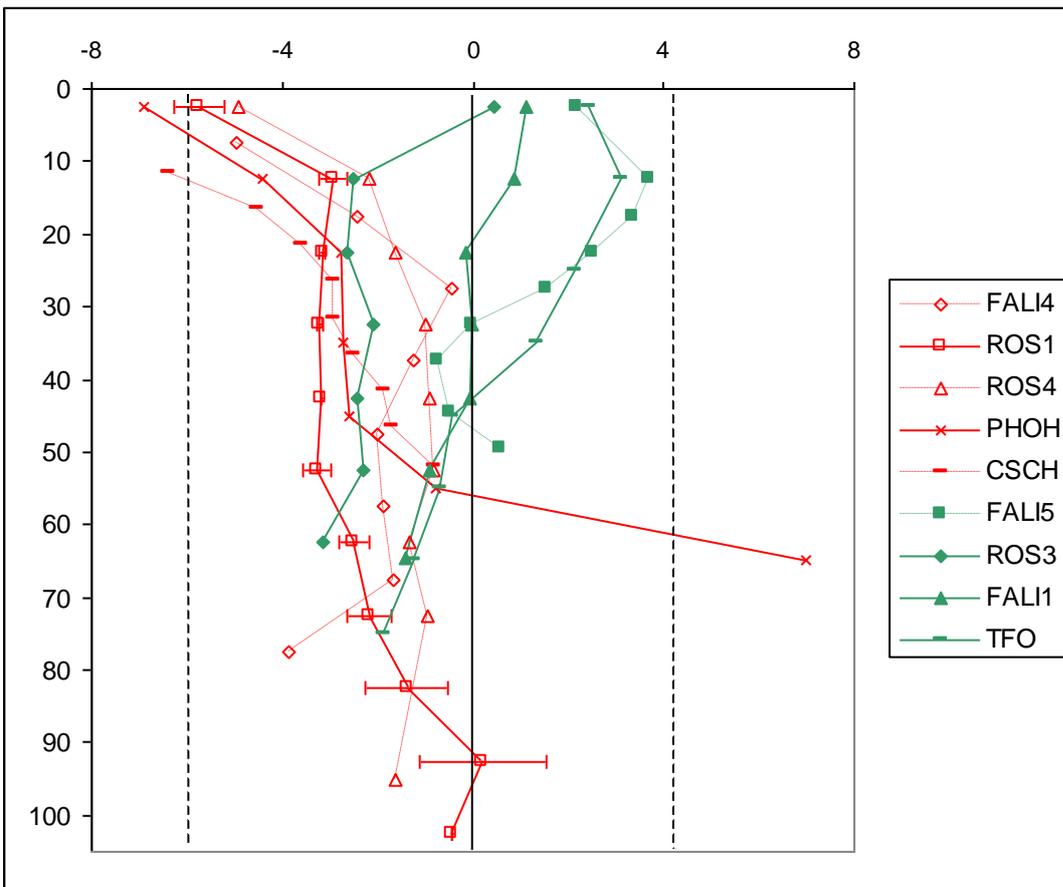


Fig. 9.6 : Scores de la fonction canonique discriminante pour des profils avec changement de végétation.

Puisque les discriminations, au regard des profils stables, semblent se conserver en profondeur, nous pouvons maintenant vérifier si les distinctions écosystémiques plus fines sont également conservées.

### **9.1.3. Reconnaissance d'écosystème spécifique-approche par profil**

Dans cet exercice, nous sommes limités par des données fragmentaires. Nous écartons les prairies que nous n'avons pu distinguer entre elles de manière satisfaisante dans le référentiel de surface. Tout d'abord, nous examinons l'évolution des forêts stables. En effet, si le passé forestier sur le moyen terme est avéré, nous souhaitons examiner d'éventuels changements dans la composition de ces forêts. Tout d'abord, au regard de la distinction simple entre forêt de feuillus, mixte et de conifères puis de façon plus précise.

#### **9.1.3.1. Evolution des forêts anciennes (niveau 2)**

Les échantillons des trois profils sous forêts stables ne se superposent pas parfaitement aux trois groupes (« sous feuillus », « sous forêts mixtes », « sous conifères ») définis dans le référentiel de surface (Fig. 9.7). Les échantillons de la hêtraie-sapinière SJK sont tous bien regroupés et relativement proches du groupe « forêts mixtes ». Malgré l'absence de superposition, la confusion avec un autre groupe n'est pas possible.

Le site VST sous hêtraie a un signal bien superposé aux échantillons de surface qui se partagent entre les trois groupes. Dans ce cas, il est nécessaire d'observer l'évolution des scores avec la profondeur. La représentation de deux fonctions canoniques en fonction de la profondeur n'offre pas une lecture aisée. Comme la représentation d'une seule fonction offre une vision partielle et biaisée, la représentation des probabilités d'appartenance aux trois groupes en fonction de la profondeur constitue une bonne alternative (Fig. 9.8). Cette représentation est également à considérer avec prudence, dans la mesure où la somme des probabilités est toujours égale à 1. Ainsi, un échantillon éloigné de tout groupe obtiendra une probabilité élevée pour le groupe dont il est le plus proche. Pour VST, ces probabilités sont fiables puisque tous les échantillons sont proches d'un groupe. Le profil indique une transition progressive de la profondeur vers la surface d'un signal de conifères vers un signal de feuillus en passant par un signal intermédiaire de forêts mixtes.

Pour les échantillons de la chênaie EFP, la prudence est de mise, puisqu'ils sont à la fois éloignés du groupe « sous feuillus » et du groupe « sous conifères » (Fig. 9.7). Les échantillons sont tantôt légèrement plus proches d'un groupe et tantôt plus proches de l'autre, d'où des oscillations nombreuses et rapides. L'absence de signal « forêts mixtes » à la charnière entre les deux groupes invite d'autant plus à la prudence. Nous pouvons, au mieux, conclure que ce profil a connu par le passé des apports de MO provenant de conifères, contrairement à la situation actuelle (Fig. 9.8).

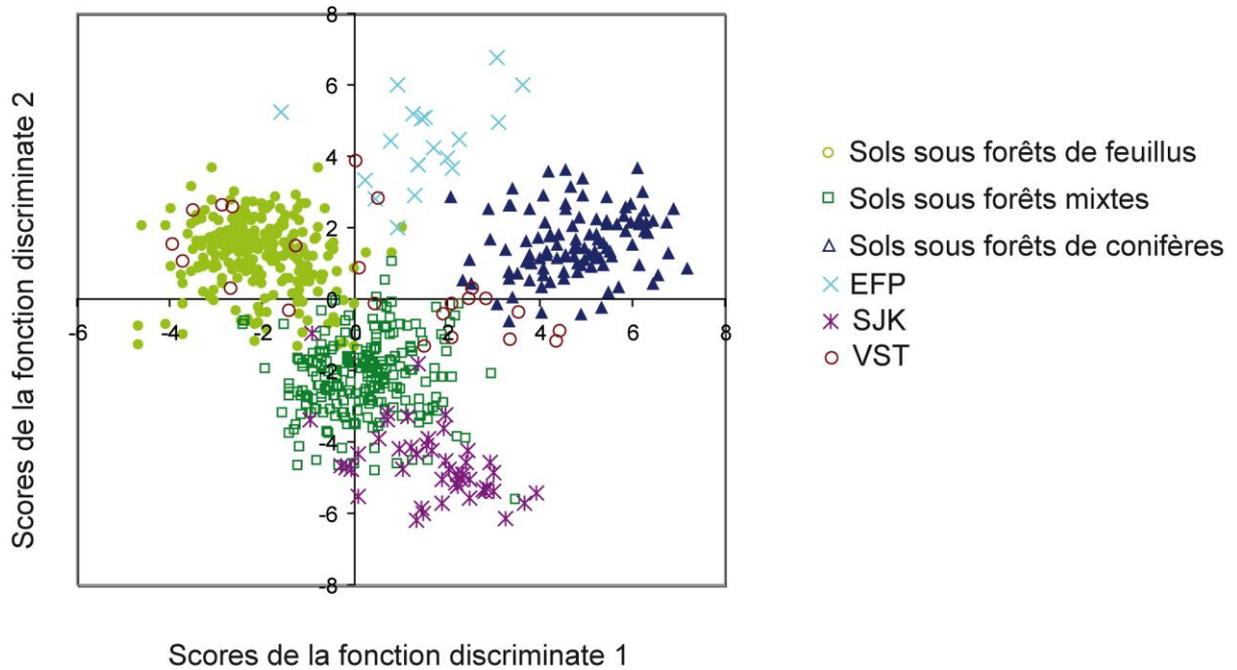


Fig. 9.7. : Fonctions canoniques discriminantes générées à partir des sols sous forêts du référentiel de surface (cf. § chap. 8) et appliquées aux échantillons de profils stables.

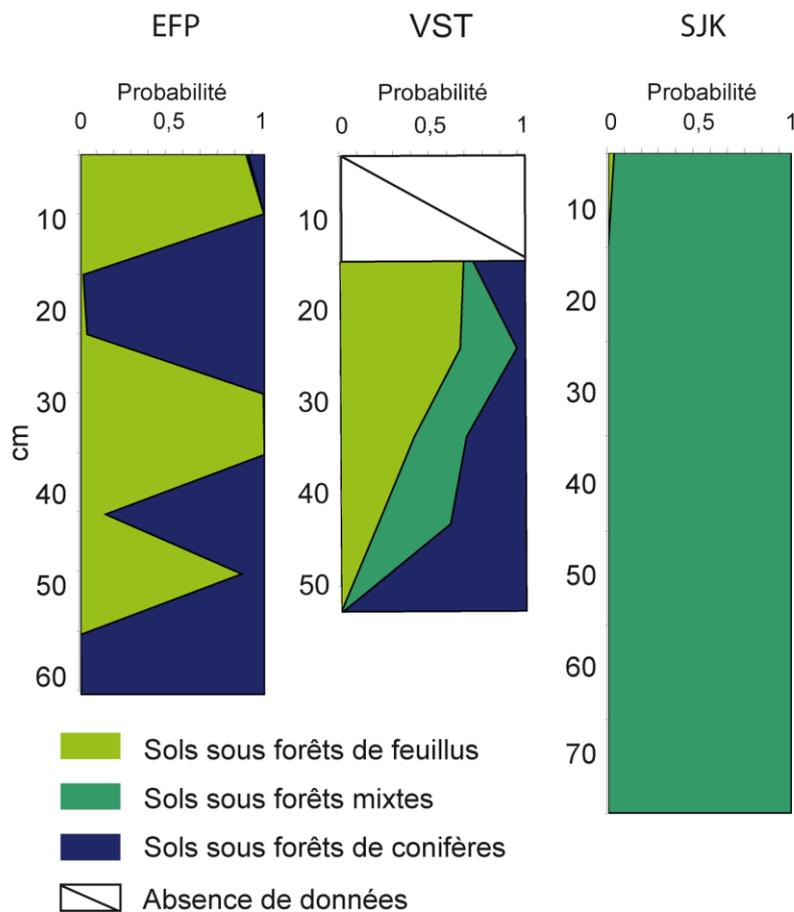


Fig. 9.8. : Evolution sur le profil des probabilités d'appartenance aux groupes « sous feuillus », « sous forêts mixtes » et « sous conifères » pour les sites EFP, VST et SJK

Ce sol très sableux se développe sur une formation de pente d'origine gréseuse. Aucune trace de podzolisation n'est observée sur le profil. Cependant, les quantités très faibles de matière organique ne permettent pas d'observer à l'œil nu si une fraction importante de cette MO est issue du lessivage. Un tel mécanisme pourrait expliquer ces variations brutales qui seraient indépendantes des variations historiques du couvert végétal à l'instar des variations observés pour le  $^{14}\text{C}$  par Becker-Heidmann et Scharpenseel (1986, fig. 4.9). Toujours dans ce contexte pauvre en matière organique, un transit de MO anciennes avec les processus de versant peut également expliquer cette répartition atypique. Pour le site SJK la probabilité d'appartenir au groupe forêt mixte est égale à 1 sur tout le profil ce qui traduit une grande stabilité des apports de matière organique.

### **9.1.3.2. Evolution des forêts anciennes (niveau 3)**

Pour les profils VST et SJK, nous pouvons maintenant franchir un nouveau palier en confrontant ces deux profils au référentiel de surface découpé en 11 classes. Pour le profil EFP, nous n'avons pas souhaité poursuivre l'exploration puisque les résultats sont déjà jugés insuffisamment fiables au stade précédent.

Pour cette nouvelle étape, le profil SJK présente toujours la même stabilité (Fig. 9.9). Le signal de hêtraie-sapinière observé en surface est parfaitement uniforme sur l'ensemble du profil, y compris pour les échantillons de profondeur très pauvres en matière organique. Nous reviendrons plus loin sur les aspects temporels pour tenter de déterminer à quel laps de temps correspond une telle stabilité. Dans tous les cas, l'absence totale de variations du signal ne nous permet pas de réfuter l'origine primaire de cette forêt avancée par les gestionnaires.

L'examen du profil VST (Fig. 9.9) nous confirme que le signal de surface décroissant avec la profondeur est bien celui d'une hêtraie. Le changement de signal en profondeur est plus difficile à décrypter puisqu'il est dominé par la classe des forêts à forte biodiversité. Or, dans notre référentiel, ces forêts sont dépourvues de conifères. La comparaison avec la figure 9.8 révèle donc un paradoxe puisqu'elle classe les horizons profonds de ce profil en forêt mixte puis en forêt de conifères. Ainsi, nos conclusions devront se limiter à l'existence d'un passé forestier constant dominé seulement récemment par la hêtraie pure. La présence de conifères ainsi que d'autres essences de feuillus que le hêtre est probable mais demeure au stade d'hypothèse. L'étude de biomarqueurs sur des profils complets de sols devrait permettre de confirmer ces hypothèses

### **9.1.3.3. Evolution des sites avec changement de végétation**

Les profils avec changement de végétation sont tous situés dans les Vosges à une altitude supérieure à 900 m. La pédoanthracologie nous confirme que le passé forestier de ces sites est toujours dominé par le hêtre et le sapin. Les charbons de tilleuls et de pins ont respectivement plus de 6000 et 10 000 ans et sortent de notre champ d'investigation. Les

autres charbons sont, ou des essences héliophiles présentes dans les clairières de la hêtraie-sapinière, ou des ligneux bas ubiquistes.

Parmi ces sites, les prairies ROS1-2, ROS4, PHOH et CSCH ne présentent aucune variation. La probabilité d'appartenir au groupe prairie est constante et égale à 1 (non présenté). Pourtant, nous avons constaté sur la figure 9.6 que les scores de ces profils se rapprochaient en profondeur des scores de sols sous forêts. Cette tendance est insuffisante pour faire diminuer la probabilité d'appartenance au groupe prairie. En effet, les probabilités varient rapidement à proximité de la médiane entre deux groupes. En revanche, dès qu'elle se rapproche légèrement d'un groupe, la probabilité calculée est invariablement de 1. Ceci traduit une limite importante de l'approche fondée sur les probabilités. Nous examinerons plus loin une approche différente pour comprendre l'évolution du spectre sur ces cinq profils.

Les profils ROS3, TFO3, FALI1, FALI5 et FALI4 présentent des contrastes plus marqués qui entraînent des variations importantes des probabilités (Fig. 9.10). ROS3 actuellement sous hêtraie-sapinière présente une transition dès les premiers centimètres vers un signal de pessière. Ce faciès pour lequel nous ne disposons d'aucun indice de référence fiable sur la placette est présent sur le massif du Rossberg à des altitudes similaires (*cf.* site de surface THE). Par conséquent, ce classement est plausible. La forte domination du signal forestier correspond avec les données fournies par les monomères de la lignine (Martin 2000). A l'extrémité inférieure du profil, le signal devient prairial. Ceci est en accord avec l'histoire du massif affecté par de nombreux défrichements. Cette placette aurait été affectée uniquement par les plus anciens de ces défrichements. Pour les quatre autres profils se situant dans le massif du Hohneck (à l'exception de FALI 4), le signal est prairial en profondeur et forestier en surface.

TFO3 présente une transition progressive d'un signal de prairie vers un signal de hêtraie-sapinière en passant par un signal de chênaie-sapinière puis de hêtraie. Hormis l'absence de hêtraie-sapinière en surface, FALI 1 présente un schéma très similaire. Pour FALI5, seul un signal de chênaie-sapinière succède à la prairie. Concernant FALI4, actuellement sous prairie, le signal est rapidement remplacé par un signal de chênaie-sapinière.

La présence répétée d'un signal de chênaie-sapinière constitue une hypothèse très peu plausible compte tenu de l'altitude de ces profils et de l'absence totale de charbon de chêne dans l'éventail pédoanthracologique. Par conséquent, il faut revenir sur les réserves émises lors de l'examen précis du référentiel de surface. Il était apparu que le groupe de chênaies-sapinières correspondait plutôt à un groupe de feuillus légèrement influencé par les conifères. Dans cette définition plus souple, il n'est pas surprenant de retrouver ce groupe à l'interface entre la prairie et la hêtraie-sapinière. En effet, dans les Vosges, les faciès pionniers sont presque toujours constitués de hêtres. Les conifères apparaissent uniquement dans un second temps.

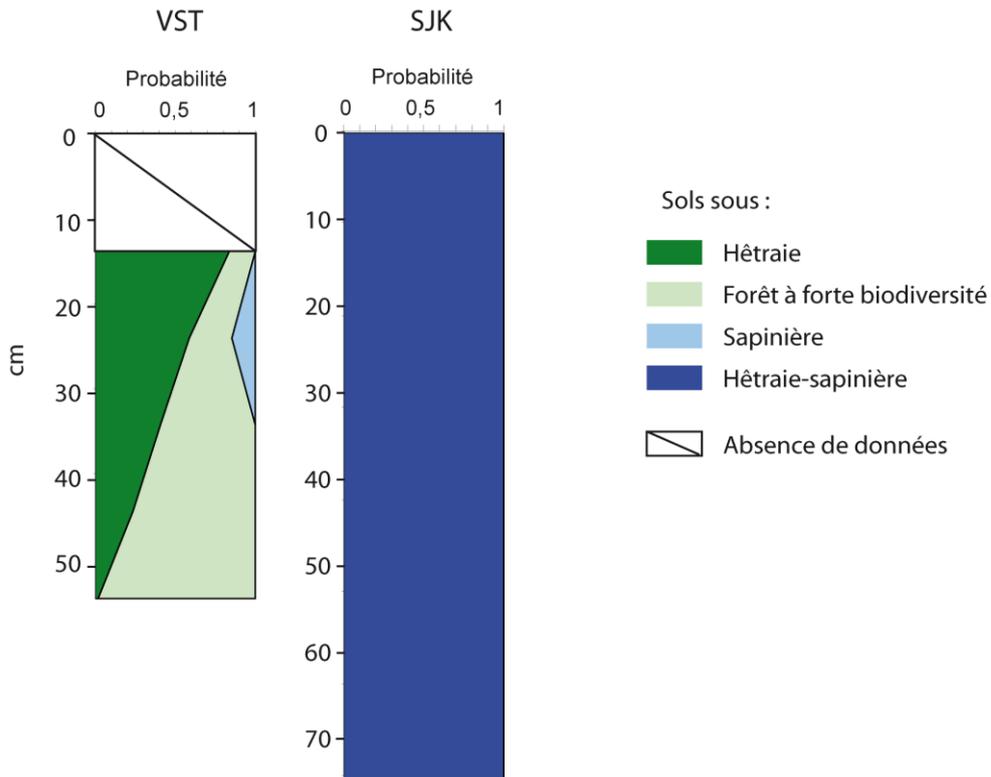


Fig. 9.9. : Evolution sur les profils VST et SJK des probabilités d'appartenance aux différentes formations forestières.

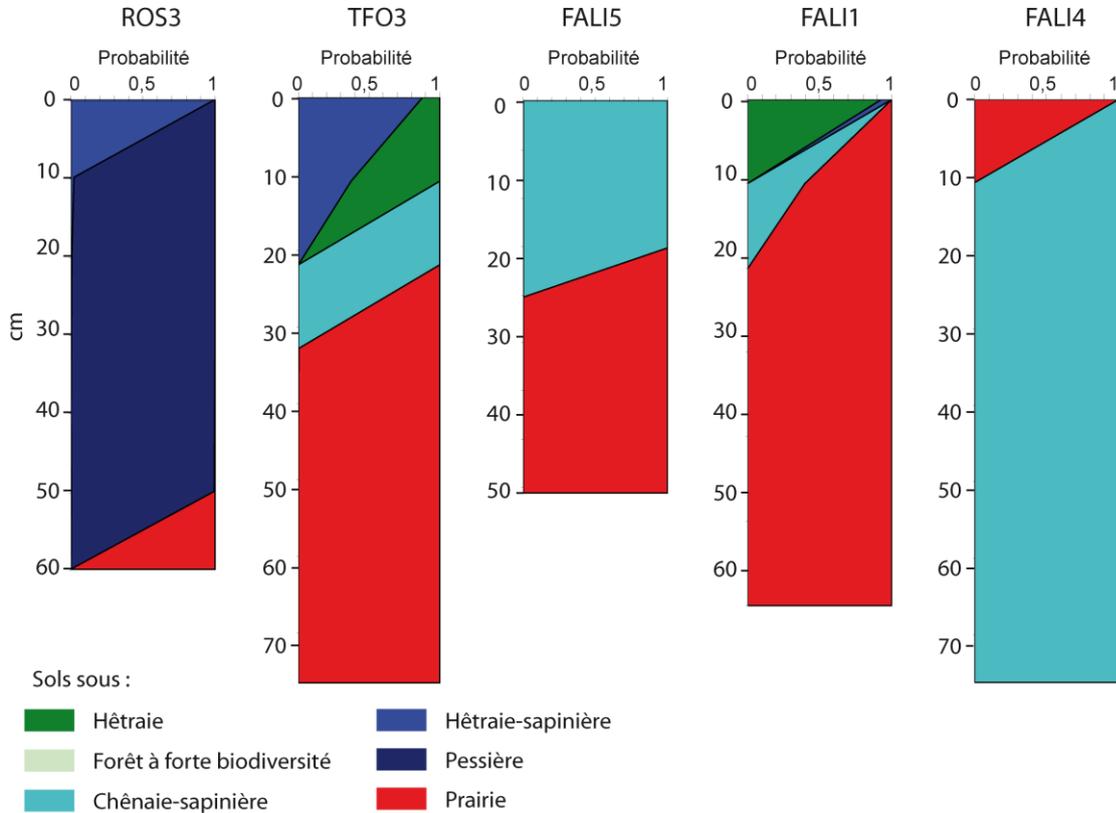


Fig. 9.10 : Evolution sur le profil des probabilités d'appartenance aux différentes formations végétales.

Dans cette logique de transition, les profils TFO3, FAL11 et dans une moindre mesure FAL15 sont particulièrement instructifs. En effet, d'après les données de référence, TFO3 et FAL11 présentent des scénarios similaires de reconquête forestière à des stades d'avancement différents. FAL11 est encore au stade de la hêtraie pionnière tandis que pour TFO3 la hêtraie-sapinière est déjà bien installée. Or, le signal PIR évolue de façon identique sur ces deux profils avec un décalage vers le bas et une présence marquée de la hêtraie-sapinière en surface pour TFO3. De son côté, FAL11 présente une influence prairiale presque jusqu'au sommet du profil, ce qui traduit un passé prairial récent. Le profil FAL15 est plus problématique puisqu'en surface il obtient un classement dans le groupe de la chênaie-sapinière. Or, la végétation actuelle est une hêtraie parsemée de quelques épicéas. L'absence d'un tel faciès dans notre référentiel est sans doute la cause principale de ce classement hasardeux. Mais une fois de plus, en renommant ce groupe forêt de feuillus à faible influence de conifères le classement devient plus crédible. Quant à l'imprégnation de ce signal jusque vers 25 cm, elle traduit une histoire forestière déjà ancienne.

Bien que les processus de reconquête forestière soient fortement dépendants de l'évolution de la pression pastorale, nous pouvons constater qu'à ces stades d'évolution différents correspond un gradient d'altitude. L'échantillonnage à l'échelle du massif et non pas à l'échelle du versant ou de l'écotone invite à une grande prudence quant à la confrontation de tels gradients. Cependant, cet indice est encourageant dans la perspective d'études futures mieux ciblées sur l'évolution d'un écotone dans l'espace et dans le temps.

#### **9.1.3.4. Evolution des prairies anciennes**

Pour un certain nombre de prairies anciennes, la pédoanthracologie nous indique des phases de défrichements qui témoignent au moins ponctuellement de la présence de forêts. Cette influence semble se confirmer par la tendance du signal à se rapprocher d'un signal forestier. Mais cette tendance est insuffisante pour infléchir la probabilité d'appartenance à un groupe forestier. Avec l'approche que nous proposons ci-dessus, il est impossible de savoir de quel type de forêt se rapproche le signal puisque la matière organique de forêt demeure largement minoritaire. Pour dépasser cette difficulté, nous proposons de confronter ces échantillons prairiaux à tendance forestière à un référentiel composé uniquement de forêts. Ainsi, nous forçons l'algorithme à classer l'échantillon dans un groupe forestier, ceci tout en sachant que l'influence forestière est minoritaire. Bien sûr, nous ne prenons pas en compte les résultats des horizons supérieurs pour lesquels le signal est purement prairial. Nous avons fixé un seuil arbitraire. La distance de Mahalanobis entre les deux groupes (forêt, prairie) du référentiel de surface est de 10,06. Les échantillons proches de la médiane ont des probabilités contrastées et ont déjà été traités ci-dessus (§ 9.1.3.2). Les échantillons que nous traitons ici ont des valeurs intermédiaires entre le groupe prairial centré sur (-5,91) et la médiane située à (-0,82). Nous avons pris la médiane de ce nouveau segment (-3,33) et considéré que les échantillons qui franchissaient ce seuil étaient sous influence de matières organiques

minoritaires d'origine forestière. Notons par ailleurs que seulement 5 échantillons parmi les 411 sous prairie du référentiel de surface sont supérieurs à ce seuil. Lorsque le score d'un échantillon sur la fonction élémentaire est inférieure à (-3,33) l'appartenance à un groupe forestier n'est pas considérée (hachure rouges sur les figure 9.11 et 9.12). Lorsqu'il est supérieur, nous tentons de décrypter quel type de forêt fournit une quantité minoritaire de matière organique.

Pour les profils du Rossberg (Fig. 9.11), les échantillons de profondeur tendent vers une forêt mixte. Entre 10 et 50 cm, cette tendance est partagée avec une forêt de feuillus pour le profil ROS1-2. Ceci est en accord avec les charbons de hêtres et de sapins identifiés dans ces profils. Le nombre important de charbons d'essences pionnières dans le profil ROS1-2 confirme également l'existence de phases d'ouvertures auxquelles ont pu succéder des hêtraies pionnières pures comme c'est le cas actuellement sur le massif du Rossberg (*cf.* placette THA du référentiel de surface).

Les profils du Petit Hohneck (PHOH) et du col du Schaefferthal (CSCH) présentent chacun un pic de conifère respectivement à 30 et 40 cm de profondeur. Ce pic est précédé d'une forêt de feuillus avec une maigre transition de forêt mixte. Nous n'avons pas de référence suffisamment précise à opposer à ces résultats. D'après les données SPIR, il semblerait que la présence des conifères soit plus marquée dans le massif du Hohneck que dans le massif du Rossberg.

Nous avons utilisé la même approche pour les profils que nous avons considérés comme stables, mais dont le signal franchit légèrement en profondeur le seuil fixé (Fig. 9.12). Il s'agit des trois profils aux altitudes les plus élevées du massif du Hohneck. Le signal en profondeur tend toujours vers la forêt mixte. Pour le profil FAP, la pédoanthracologie révèle également la présence de charbons de hêtres et de sapins.

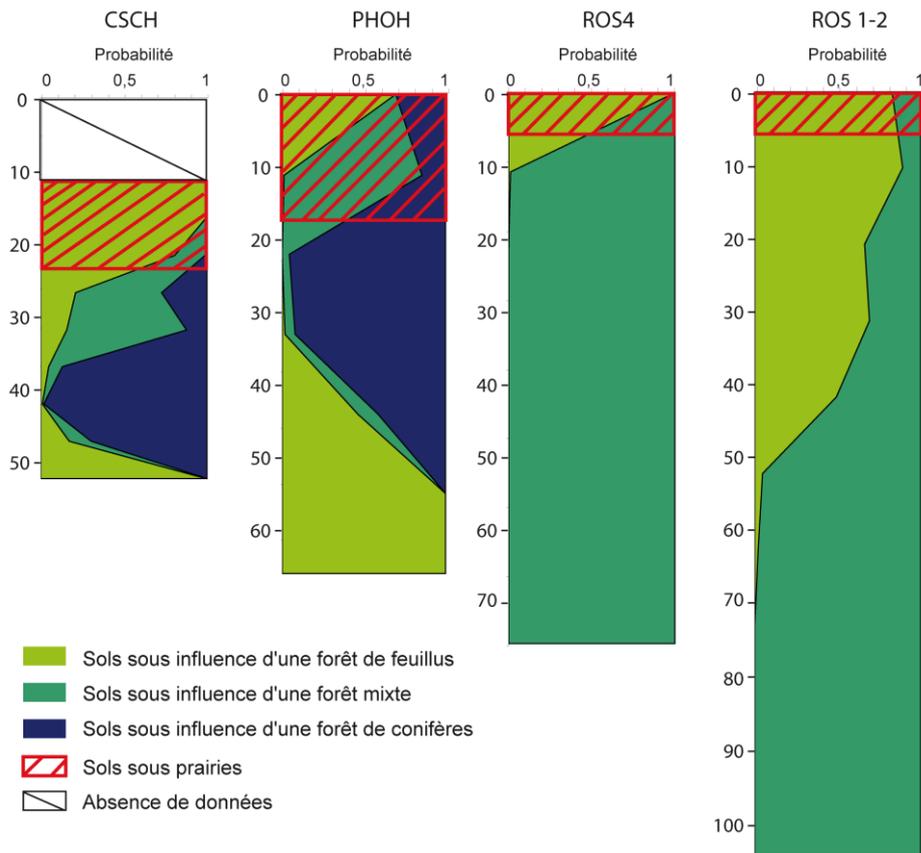


Fig. 9.11 : Evolution sur des profils à dominantes prairiales des probabilités d'appartenance aux différentes formations forestières.

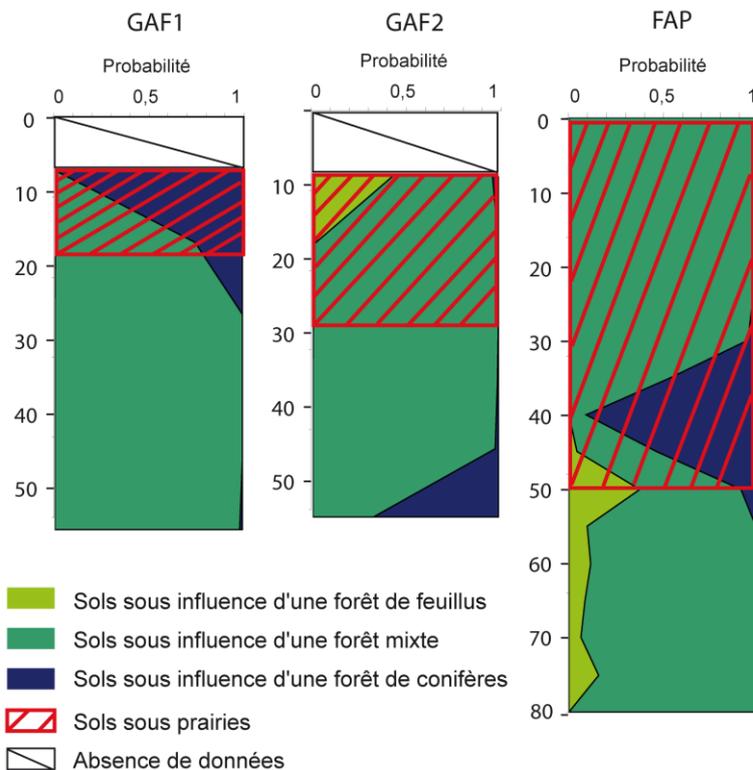


Fig. 9.12 : Evolution sur des profils prairiaux des probabilités d'appartenance aux différentes formations forestières.

#### **9.1.4. Limite de l'approche par confrontation directe au référentiel de surface**

Les limites évoquées au chapitre 8 concernant le référentiel de surface se répercutent lors de cette étape. Les insuffisances de l'échantillonnage tout comme les limites structurelles sont un frein au bon classement des échantillons. A ces problèmes s'ajoutent des problèmes spécifiques aux horizons profonds.

L'avantage de cette première approche est que la modélisation s'appuie sur un échantillonnage large présentant peu d'incertitudes sur l'origine de la matière organique. En revanche, les échantillons de profils sont parfois très différents des échantillons de surface. La quantité de matière organique notamment est un paramètre qui présente de fortes variations dès les premiers centimètres. Par conséquent, nous confrontons des échantillons d'horizons profonds globalement pauvres en MO à des échantillons de surface beaucoup plus riches. Cet appauvrissement en MO augmente mécaniquement la proportion de la fraction minérale héritée du substrat. Ainsi, l'effet de ce dernier augmente potentiellement. Cependant, nous constatons sur la figure 9.2 que les échantillons de profondeur ont tendance à s'éloigner de tous les groupes de surface plutôt que de se rapprocher d'un groupe dans lequel un substrat identique serait bien représenté.

Les résultats obtenus pour la fonction élémentaire (forêt-prairie) sont très encourageants puisque les scénarios stables ou avec changements de végétation sont toujours détectés par la SPIR. La lecture des scénarios avec changement est délicate en profondeur puisque la plupart des profils ne présentent pas une variation nette du signal, mais tendent plutôt vers un signal moyen. Cette limite ne semble pas propre à la SPIR, mais plutôt aux archives pédologiques qui sont brassées au sein du profil. Lorsque l'on examine l'appartenance à des classes plus spécifiques, les résultats sont plus aléatoires. Ils sont surtout plus difficiles à discuter compte tenu de la fiabilité limitée des données de référence dans le domaine. Cependant, très peu de profils sont classés dans un groupe fantaisiste compte tenu de l'étagement bioclimatique. Seul la classe chênaie-sapinière est régulièrement attribuée à des profils dont les conditions climatiques actuelles et passées sont incompatibles avec la présence du chêne. Mais nous avons déjà discuté du problème de définition de cette classe qui devra être surmonté en perfectionnant le référentiel de surface avant de tirer de plus amples conclusions.

## **9.2. Utilisation des données paléoécologiques en amont de la modélisation (approche 2)**

Les précautions prises dans le couplage des données paléoécologiques avec les données sur le TMR nous permettent tout juste d'atteindre le nombre de 136 échantillons, le minimum nécessaire (*cf.* chapitre 7) pour construire le modèle. Parmi les échantillons, seulement deux profils complets (forestiers) sont retenus. Les autres échantillons proviennent en général des 30 premiers centimètres.

Dans un premier temps, nous examinons, de la même manière que nous l'avons fait pour le référentiel de surface, la qualité de la discrimination entre sols sous prairies et sols sous forêts pour ces 136 échantillons d'horizon profonds de référence. Nous traitons les échantillons dans leur globalité, puis nous observons l'évolution des scores avec la profondeur. Ensuite, nous appliquons la fonction discriminante aux autres échantillons de profils pour lesquels les données paléocéologiques sont partielles.

### 9.2.1. Discrimination entre horizons sous forêts et horizons sous prairies

Le groupe de sols sous forêts est totalement disjoint du groupe de sols sous prairies. Chacun des groupes est concentré sur une petite fourchette de valeur et la distance de Mahalanobis entre les deux groupes est de 23,96 (Fig. 9.13). Ce résultat est spectaculaire puisque cette distance n'est que de 10,06 pour le référentiel de surface (Fig. 8.5) et atteint à peine 6 pour les profils stables calculée lorsqu'elle est calculée à partir du référentiel de surface (approche 1, fig. 9.3). Toutefois, ces résultats sont à considérer avec précaution puisque le nombre d'observation (136) est égal au nombre de groupe (2) plus le nombre de variables (134 bandes spectrales). Nous sommes donc dans les conditions limites de l'utilisation d'une analyse discriminante.

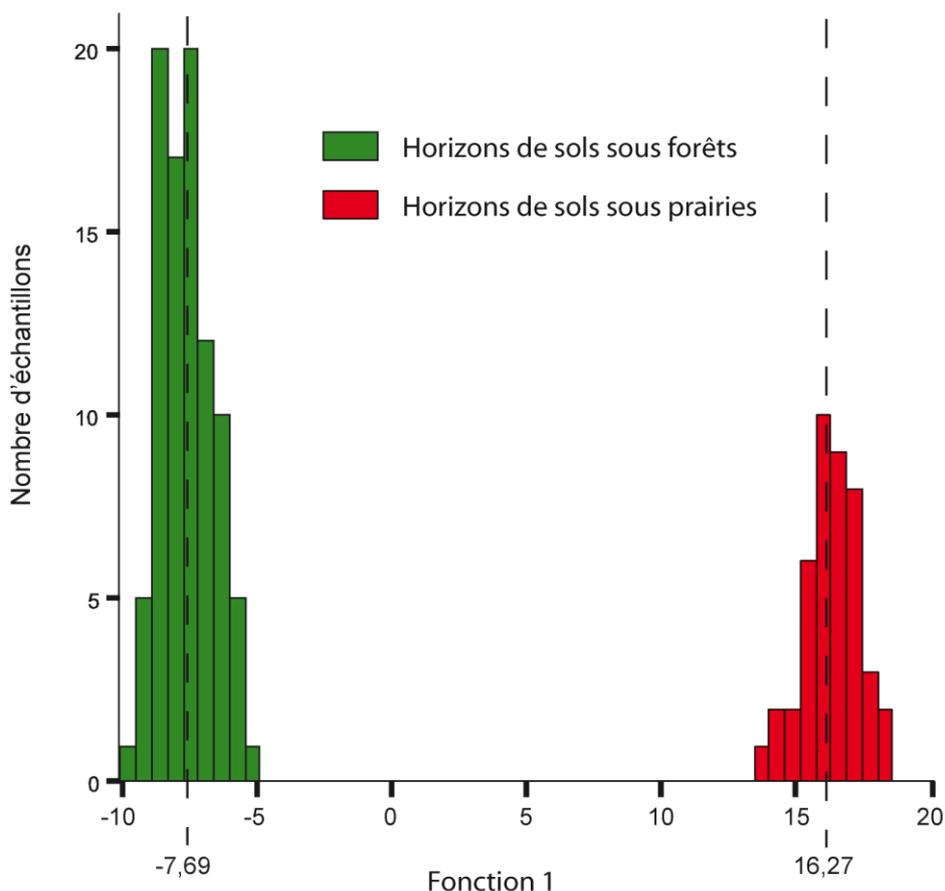


Fig. 9.13 : Scores de la fonction discriminante élémentaire pour les horizons de référence

## **9.2.2. Augmentation de la qualité de la discrimination en profondeur : quelques hypothèses**

Ces résultats sont inattendus. En effet, les échantillons de profondeur sont, de manière générale, plus pauvres en MO que les échantillons de surface. La discrimination en fonction de l'origine végétale de la matière organique devrait donc être plus difficile. Cette intuition s'avèrerait fautive et nous devons chercher à comprendre pourquoi

### **9.2.2.1. Effet du substrat**

Si la proportion de matière organique diminue, l'effet de la fraction minérale héritée du substrat devrait être amplifié. Cet « effet substrat » peut contribuer à une amélioration « artificielle » de la discrimination si les substrats sont mal répartis entre les groupes. Or, il faut bien admettre que l'échantillonnage composé de 13 profils, dont 10 ont été prélevés dans les Hautes-Vosges fait pâle figure à côté de l'échantillonnage de surface composé de 53 sites couvrant tout l'espace alsacien. Le groupe des horizons sous prairies, en particulier, est composé de 6 profils prélevés dans le massif granitique du Hohneck et d'un profil prélevé au Champ du Feu (sur granite également). Cependant, si un paramètre de nature géologique ou pédologique est à l'origine de la discrimination, les profils forestiers FAL15 et TFO3 devraient être classés sous prairie puisqu'ils ont également été prélevés dans le massif du Hohneck. Or, ils sont parfaitement classés et très proches des autres profils forestiers. En fait, tous les sols de l'échantillonnage se développent sur roches acides. Ceci constitue une différence majeure par rapport au référentiel de surface qui comprend également de nombreux sites forestiers et prairiaux sur substrats carbonatés (calcaire, loess, alluvions rhénans). Or, nous avons déjà constaté qu'une partie des fonctions discriminantes est fortement corrélée à la nature carbonatée ou non du substrat (*cf.* chapitre 8 § 8.1.2.2). D'ailleurs, des prédictions quantitatives des carbonates de calcium (Lagacherie *et al.*, 2008) et du pH (Chang *et al.*, 2001), qui est une variable en grande partie dépendante de la première, ont déjà été données avec des résultats satisfaisants

Ainsi, malgré la faiblesse de l'échantillonnage, l'effet du substrat ne peut pas être à l'origine d'une amélioration de la discrimination. En revanche, il est soupçonné de la dégrader dans le cas du référentiel de surface. Pour vérifier cet effet, nous sommes revenus au référentiel de surface et nous avons appliqué une analyse discriminante entre sols sous forêts et sols sous prairies en excluant les placettes sur substrats carbonatés. La distance de Mahalanobis augmente légèrement en passant de 10,1 à 10,7 (histogramme non présenté). Mais cette amélioration est très faible et ne peut expliquer à elle seule la distance de Mahalanobis de près de 24 obtenue ci-dessus. Il faut donc chercher ailleurs les raisons de cette amélioration.

### 9.2.2.2. Diversité écosystémique et nombre d'échantillons

Parmi les 7 fosses de milieux ouverts, toutes sont sous des prairies subalpines ou des prairies secondaires situées au-delà de 1000 m d'altitude. Par conséquent, la diversité de la végétation à l'intérieur de ce groupe est bien moindre que pour le référentiel de surface complet. Parmi les 6 profils de milieux forestiers, la diversité est à peine supérieure puisque 4 sont sous hêtraies-sapinières, 1 sous hêtraie et le dernier sous chênaie. Dans ce cas, la différence de diversité avec le référentiel de surface est encore plus marquée. Pour tester cette hypothèse, nous avons sélectionné parmi le référentiel de surface 6 placettes sous prairies et 6 placettes sous forêts relativement proches du point de vue écosystémique et toutes sur substrat acide. Puis nous avons réduit le nombre d'échantillons par placette de manière à obtenir une population de 136 échantillons. Nous avons ainsi simulé des conditions proches du référentiel constitué par les 13 profils. La distance de Mahalanobis s'élève alors à 13,8. De manière générale, plus la diversité écosystémique du panel de placettes est faible et plus la distance de Mahalanobis est élevée. Il en est de même pour le nombre de placettes. Cette tendance est facilement explicable : plus le nombre de placettes est faible et plus il est facile pour l'algorithme de trouver des dénominateurs communs propres à un groupe (forêt ou prairie). Cette règle est valable pour le dénominateur commun recherché - l'origine végétale - ou pour les dénominateurs communs que nous cherchons à éviter : quantité de matière organique, type de substrat, autres facteurs non identifiés. Cependant, la distance de Mahalanobis demeure toujours éloignée de 24. Par conséquent, la diversité écosystémique des profils de référence n'est pas non plus suffisante pour justifier la spectaculaire augmentation de la distance de Mahalanobis.

### 9.2.2.3. MO stables et MO labiles

Il faut alors chercher l'explication dans la nature des matières organiques à l'intérieur du profil. Les 5 premiers centimètres qui sont analysés dans le cadre du référentiel de surface contiennent tous les types de MO, des plus labiles aux plus stables. La proportion relative des matières organiques labiles décroît fortement avec la profondeur (cf. ; chapitre 1 fig. 1.14). Par conséquent, les échantillons des horizons profonds contiennent une proportion bien plus importante de matières organiques stables. Nous pouvons émettre l'hypothèse que les matières organiques stables sont mieux différenciées en fonction de leur origine végétale. En d'autres mots, les matières organiques stables seraient spécifiques d'un écosystème alors que les matières organiques labiles seraient ubiquistes. Malheureusement, nous n'avons pas de données suffisantes sur la chimie des matières organiques analysées. Les travaux exploratoires en biogéochimie indiquent que les biomarqueurs lipidiques, très récalcitrants à la biodégradation, sont bien spécifiques d'un écosystème. Cependant, dans les sols, ils représentent une fraction très minoritaire, même parmi les matières organiques stables. Ainsi, ces résultats vont dans le sens de notre hypothèse mais ne suffisent pas à la valider. D'autre part, la fraction labile est souvent constituée de petites molécules à la structure simple et peu différenciée. Par exemple, Trouvé *et al.* (1996) ont montré, au Congo, qu'entre les sols sous

savanes et les sols sous forêts, les sucres sont ubiquistes et varient uniquement dans leurs proportions. Or, toutes ces molécules organiques même de petite taille s'expriment nécessairement sur le spectre PIR. Si elles produisent dans le PIR un signal indépendant de leur origine végétale, nous pouvons supposer qu'elles sont à l'origine d'une discrimination moins bonne des horizons de surface. Cependant, leur effet n'est pas suffisant pour masquer les différences puisque la discrimination au sein du référentiel de surface, même si elle est inférieure, demeure de très bonne qualité.

Pour les sols forestiers, nous pouvons évoquer un autre mécanisme de répartition qui concerne les matières organiques d'origine racinaire. Les essences ligneuses que nous tentons de reconnaître ont des racines qui colonisent l'ensemble du profil. Ainsi, en minorant les mécanismes de transport (qui sont moins intenses dans les horizons profonds), nous pouvons considérer que les arbres sont les principaux fournisseurs en MO d'origine racinaire des horizons profonds. A l'inverse, dans les horizons superficiels, les essences de sous-bois contribuent de façon non négligeable aux intrants racinaires. Or, ces essences ne sont pas nécessairement spécifiques des milieux forestiers. Lorsque ce sont des graminées, nous pouvons même les considérer comme des intruses puisqu'elles constituent la famille dominante des prairies. Ainsi, la confusion introduite par certaines espèces de sous-bois n'est pas distribuée de façon homogène dans le sol, mais se concentre en surface.

Cette dernière hypothèse qui semble la plus plausible nécessitera d'être testée de façon plus approfondie au moyen d'analyses chimiques spécifiques.

### **9.2.3. Approche par profil**

L'observation des scores en fonction de la profondeur confirme l'excellente discrimination entre les deux groupes. Par ailleurs les scores sont très stables le long du profil en dépit de variations importantes du taux de matière organique. La plus grande distance entre les deux groupes par rapport à l'approche 1 nous permettra d'examiner avec plus de finesse l'évolution du signal pour les profils ayant connu des changements de végétation.

### **9.2.4. Application de la nouvelle fonction à tous les profils**

Dans l'ensemble, les résultats, ou plutôt les tendances, sont les mêmes que celles observées lors de l'approche 1 (Fig. 9.14 et 9.15). Seul le profil ROS 3 présente une grande stabilité, contrairement aux observations précédentes. Les données paléoécologiques de ce profil ne nous permettent pas de trancher mais indiquent plutôt une bonne stabilité à l'échelle pluriséculaire. Dans l'ensemble, les changements de signal sont plus nets, mieux lisibles et les profondeurs auxquelles s'amorcent les changements sont facilement identifiables.

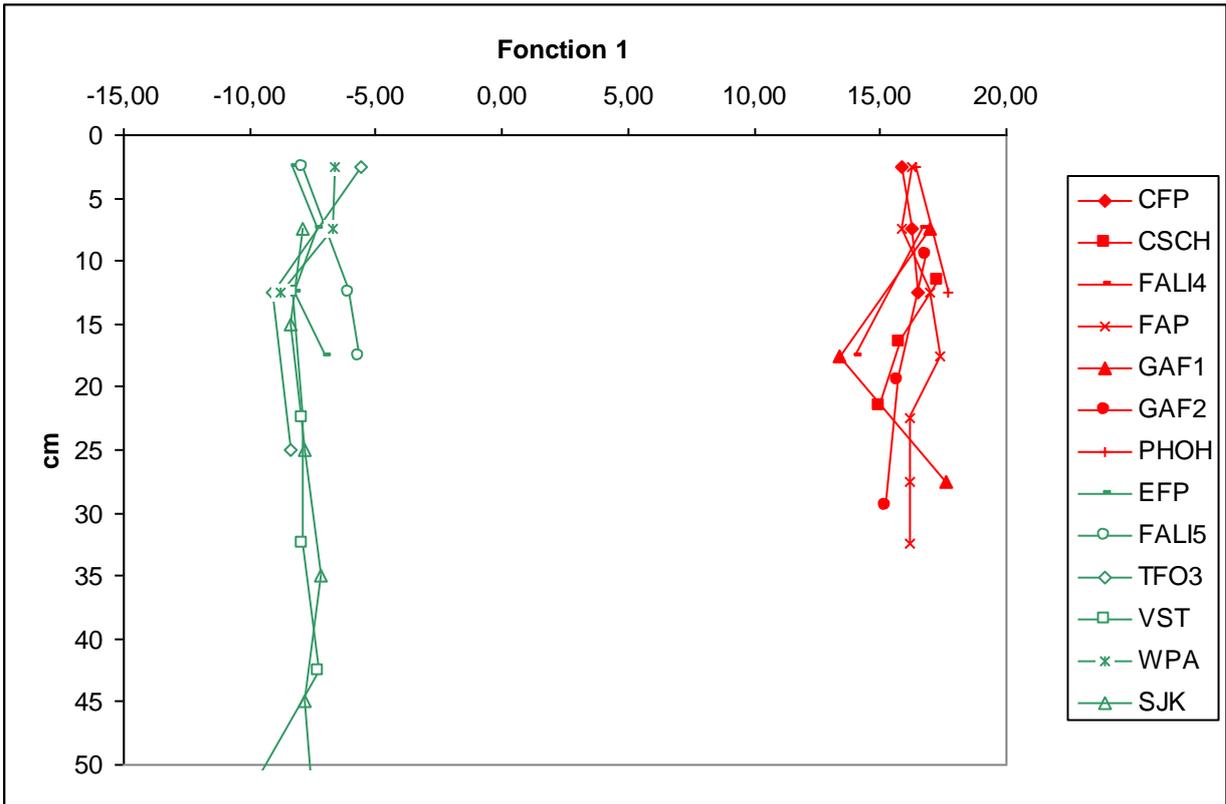


Fig. 9.14 : Scores de la fonction discriminante élémentaire pour les horizons de référence en fonction de la profondeur.

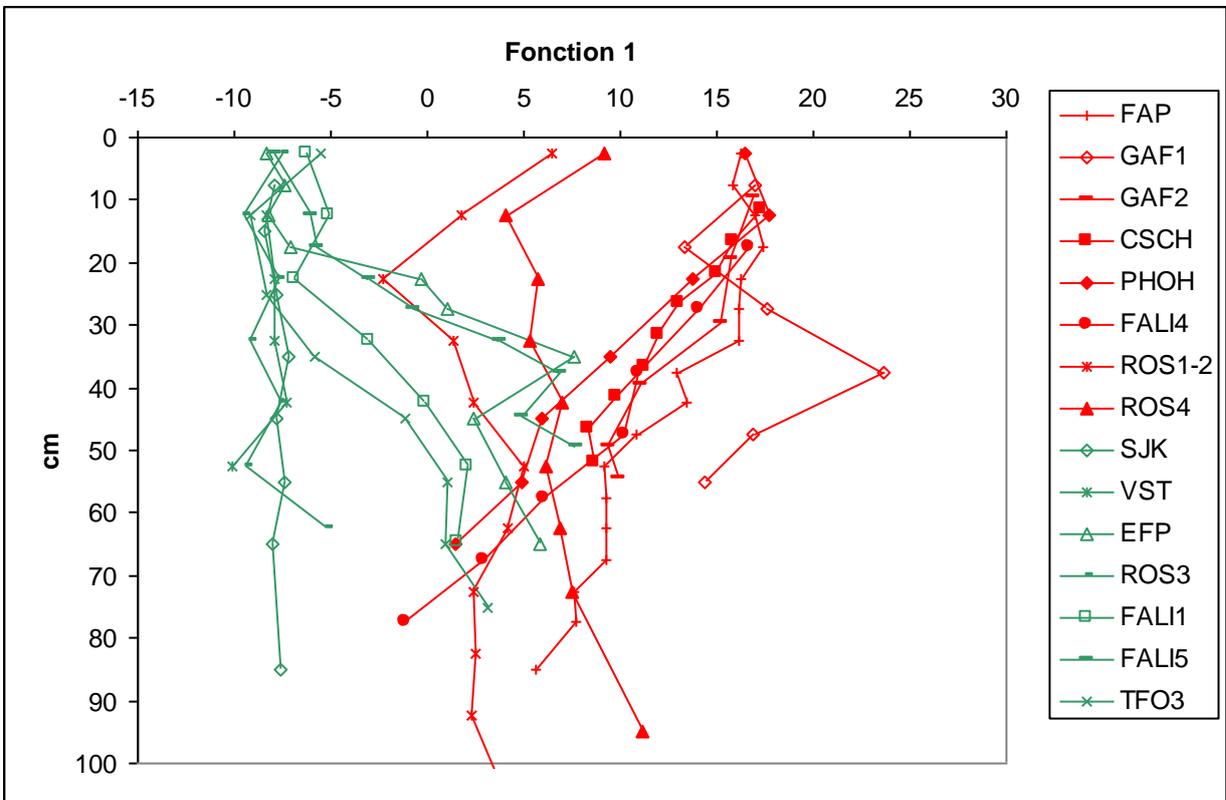


Fig. 9.15 : Scores de la fonction discriminante élémentaire appliquée à la totalité des profils.

Les profils ROS1-2 et ROS4 occupent une position intermédiaire dès la surface, ce qui traduit bien l'histoire très contrastée de cette chaume. Quatre profils forestiers amorcent un virage vers un signal prairial à des profondeurs allant de 15 à 40 cm. Pour les profils prairiaux qui tendent vers un signal forestier, les virages sont plus difficiles à identifier. Certains profils ont un signal qui se stabilise dans la zone médiane, tandis que d'autres migrent de façon continue vers le groupe opposé.

Pour tenter d'associer ces changements de signal à des changements de végétations bien identifiés dans le temps, nous allons maintenant examiner les scores non plus en fonction de la profondeur mais en fonction des Temps Moyens de Résidence.

### 9.3. Aspects temporels : couplage avec les mesures de TMR

#### 9.3.1. Modélisation de la matière organique ancienne sur le profil

Nous avons vu dans le chapitre 1 qu'il est possible de modéliser sur le profil les quantités de matière organique d'origine ancienne par la formule :

$$Q_{zt} = Q_{z0} \cdot e^{-t/Tz}$$

avec  $Q = \text{constante} = Q_f + Q_p$

Avec  $Q_f$  la matière organique d'origine forestière et  $Q_p$  la matière organique d'origine prairiale

Nous nous plaçons dans le cas de figure le plus simple d'une végétation initiale forestière remplacée au temps  $t$  par une prairie ou inversement. Connaissant le TMR ( $T$ ) à une profondeur donnée  $z$  (Fig. 9.16), et en considérant que la quantité initiale de matière organique à cette profondeur ( $Q_{z0}$ ) est stable, nous pouvons calculer la proportion de matière organique provenant de la végétation initiale ( $Q_{zt}$ ). En faisant varier le TMR, nous obtenons une courbe de l'évolution de la proportion de matière organique initiale sur le profil (Fig. 9.17). Comme le TMR, la proportion de matière organique issue de la végétation initiale (ancienne) augmente avec la profondeur. Puisque nous ne connaissons pas toujours la date du changement de végétation de façon très précise, nous faisons varier  $t$  afin d'obtenir plusieurs courbes de décroissance. Le modèle est appliqué à chacun des 7 profils pour lesquels nous disposons d'au moins trois valeurs de TMR. Le TMR est extrapolé de manière linéaire entre deux âges mesurés par  $^{14}\text{C}$ , afin d'obtenir une résolution verticale identique à celle des mesures SPIR.

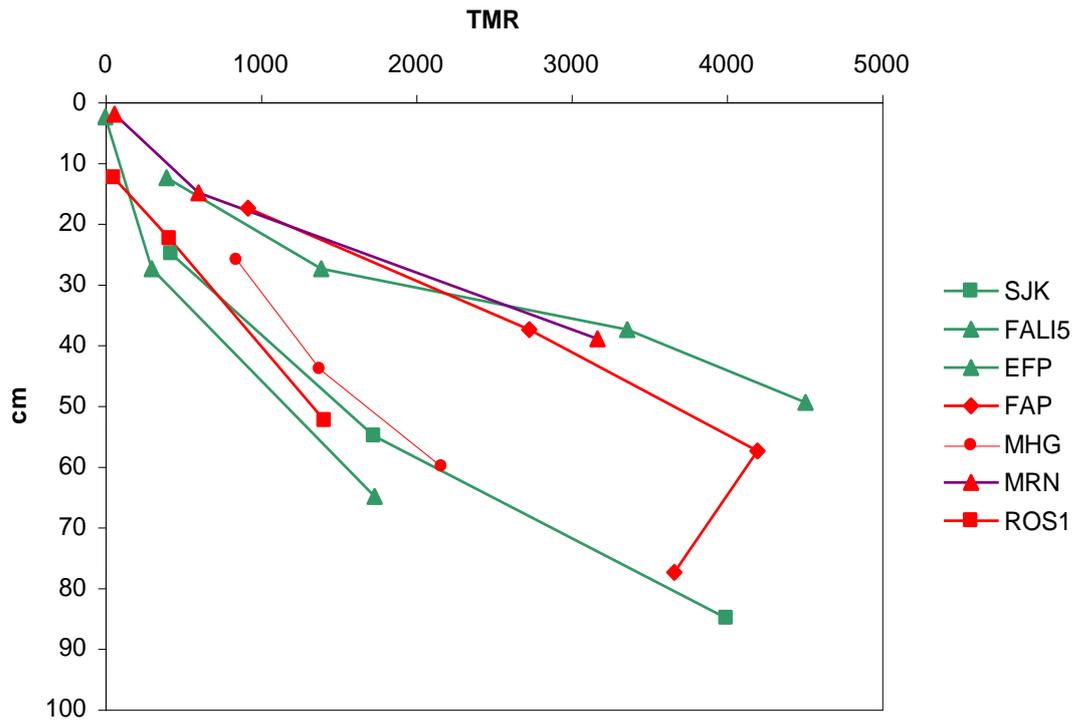


Fig. 9.16 : Mesure du TMR par  $^{14}\text{C}$  pour 7 des profils analysés par SPIR

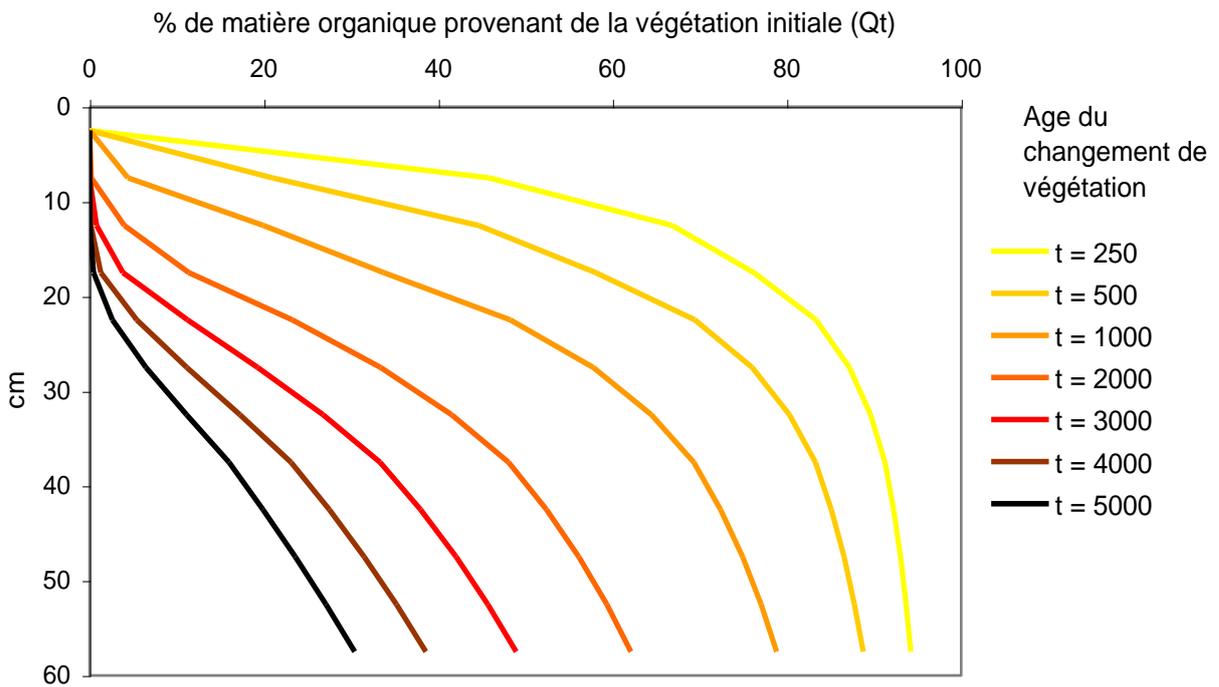


Fig. 9.17. : Exemple de courbes de décroissance de la matière organique provenant de la végétation initiale (ancienne) pour un profil  $\lambda$  de sol ayant connu un changement de végétation au temps  $t$

### 9.3.2. Traduction du signal PIR en pourcentage de matière organique d'origine prairiale ou forestière

Nous avons vu précédemment que les profils ayant connu un changement de végétation ont des signatures spectrales différentes en surface et en profondeur. Pour la distinction élémentaire entre sols sous prairies et sols sous forêt, la signature s'exprime très simplement sous forme d'une fonction unique qui produit un score différent en fonction de l'origine de la MO. Nous avons considéré que le score moyen obtenu à partir du référentiel de surface pour la population de sols sous prairies -5,91 (*cf.* fig. 8.5) correspond à un taux de 100 % de matière organique provenant d'essences prairiales. Inversement, le score de 4,15 (*cf.* fig. 8.5) correspond à un taux de 100 % de matière organique provenant d'essences forestières. A partir de ce postulat, nous pouvons traduire l'ensemble des scores des profils en proportion de matière organique de prairies et de forêts, en appliquant une fonction linéaire entre -5,91 et 4,2. Nous avons utilisé les scores calculés à partir de la fonction générée par le référentiel de surface (approche 1, §9.1). Les scores calculés en s'appuyant sur les données paléoécologiques (approche 2, §9.2) ne sont pas utilisés ici puisqu'ils ne sont pas totalement indépendants du modèle de décroissance calculé ci-dessus (notamment (t) la date du changement de végétation). Par ailleurs, tous les scores inférieurs à (-5,91) se voient attribuer le taux de 100 % de MO de prairie et les scores supérieurs à 4,15 le taux de 100% de MO de forêts. Ainsi, nous obtenons, pour chaque profil, la courbe de décroissance estimée de la matière organique initiale d'après les données SPIR. Pour tous les profils actuellement sous forêt, nous calculons une courbe de décroissance de la matière organique de prairie, et pour les profils sous prairie une courbe de décroissance de la matière organique de forêt. Cette démarche présente l'inconvénient de ne pas considérer les changements multiples de végétations.

### 9.3.3. Confrontation des deux approches

Nous examinons d'abord les profils actuellement sous prairie qui ont un passé forestier (Fig. 9.18). Le profil ROS1-2 se superpose très bien à la courbe  $t = 2000$  entre 50 et 100 cm de profondeur. Entre 10 et 50 cm, le profil présente un taux stable de 30 % de MO forestière. Les données pédoanthracologiques nous indiquent une importante phase de défrichement autour de 2100 BP (6 charbons sur les profils ROS2 et ROS4) (Goepp, 2007 ; Schwartz *et al.*, 2005). Entre l'Antiquité et l'Actuel, seuls trois charbons sont identifiés. Ceci peut être interprété comme une phase importante d'ouverture à l'Antiquité suivi de deux millénaires dominés par la prairie. C'est exactement ce scénario qui est décrit par la SPIR en dessous de 50 cm. Au -dessus de 50 cm, la courbe dévie de ce scénario en indiquant un taux de MO de forêt supérieur. Ce taux peut s'expliquer soit par des phases de forêts de plus courte durée entre 2000 BP et l'actuel ou par la présence de ligneux bas dont le réseau racinaire affecte plus particulièrement les premiers décimètres du profil.

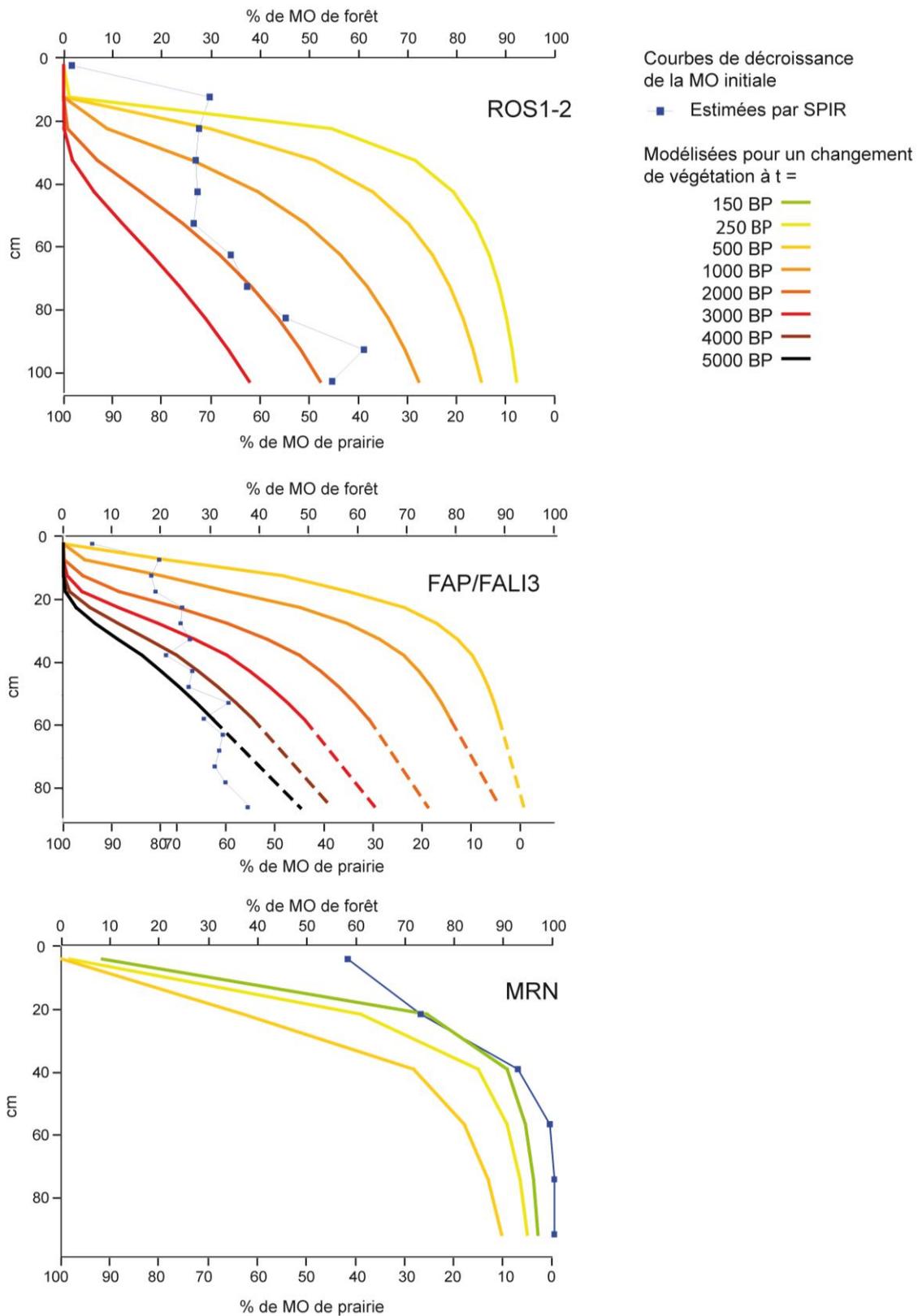


Fig. 9.18. : Confrontation des données SPIR de profils anciennement sous forêts avec le modèle de décroissance de la matière organique initiale

Le second profil (FAP) présente une forme très similaire sans pour autant atteindre des pourcentages élevés de matière organique de forêt en profondeur. Entre 40 et 70 cm, la courbe SPIR se situe entre les courbes  $t = 4000$  et  $T = 5000$  du modèle. Les charbons identifiés dans ce massif sont pour la plupart datés entre 3500 et 2500 BP. Par conséquent, la courbe SPIR surestime légèrement l'âge de la dernière grande période forestière. Dans les 40 centimètres supérieurs, un taux de 20 % de MO de forêt se maintient tout comme pour ROS 1-2 avec les mêmes hypothèses. Cependant, ce profil situé au sommet de la crête principale des Vosges à une altitude de 1300 m est très peu propice à une recolonisation rapide de la forêt. Il est donc tout à fait plausible que les derniers millénaires aient été dominés par la prairie (Goepf, 2007). Dans ce cas, l'hypothèse d'une influence des ligneux bas est à privilégier. Pour le troisième profil (MRN), nous disposons de très peu de données. La placette est sous prairie à la fin du XIXe siècle (carte allemande) tandis que le plan de finage présente des ambiguïtés. D'après la carte de Cassini du milieu du XVIIIe siècle, la placette est sous forêt. Par conséquent, la courbe de décroissance indiquant un changement à 150 ans est crédible mais nécessite des vérifications.

Ensuite, nous examinons les profils forestiers anciennement sous prairie (Fig. 9.19). Le profil FAL15 se situe dans le même massif que FAP. Il a connu une importante phase de défrichement à l'Age du Bronze. Entre l'Antiquité et le Bas Moyen-âge, aucun charbon n'est identifié. A la différence de FAP il se situe à une altitude moindre dans un secteur bien plus abrité. Ceci pourrait signifier la présence d'une forêt en continu entre l'Antiquité et le Bas Moyen-âge. La courbe SPIR entre 15 et 40 cm est bien superposée à la courbe de fermeture  $t = 2000$ . En dessous de 40 cm, elle indique plutôt une phase de défrichement. La partie inférieure de la courbe pourrait traduire la phase de défrichement de l'Age du Bronze tandis que la partie intermédiaire correspondrait à une phase de reconquête forestière à l'Antiquité.

Pour le profil EFP, la courbe SPIR indique une phase de fermeture amorcée aux alentours de l'an 1000, elle-même précédée d'une phase de défrichement. Les seules données dont nous disposons attestent d'une forêt stable depuis 800 ans au moins. Le scénario suggéré par la SPIR n'est donc pas incompatible avec ces données.

Enfin, à titre d'essai, nous avons confronté deux profils de forêts stables au modèle (Fig. 9.20). Le profil SJK présente un taux de 10 % de matière organique de prairie quasiment stable sur tout le profil. Même en fixant un  $t$  très élevé, la courbe SPIR ne présente jamais de similitude avec le modèle. Le taux faible de matière organique de prairie peut s'expliquer par la présence d'espèces de sous-bois similaires à certaines espèces de prairies ou par la méthode de transformation des données. En effet, nous avons attribué le taux de 100 % aux échantillons ayant atteint ou dépassé le score moyen du référentiel de surface. Par conséquent, les échantillons forestiers ayant un score légèrement inférieur à 4 obtiennent un pourcentage inférieur à 100 % alors qu'ils appartiennent encore très nettement à la population de sols sous forêts. Ce problème pourrait être contourné en partie en utilisant, plutôt que la moyenne, les

extrémités des pics du référentiel de surface ou l'écart type des deux sous-populations. Mais ces autres approches ne permettraient pas de décrypter certaines nuances fines.

Pour le profil MHG, le taux de matières organique de prairies décolle à peine du 0 et ne suit jamais les courbes de décroissance du modèle. Ce sol tout, comme SJK, semble s'être développé sous un couvert végétal très largement dominé par la forêt.

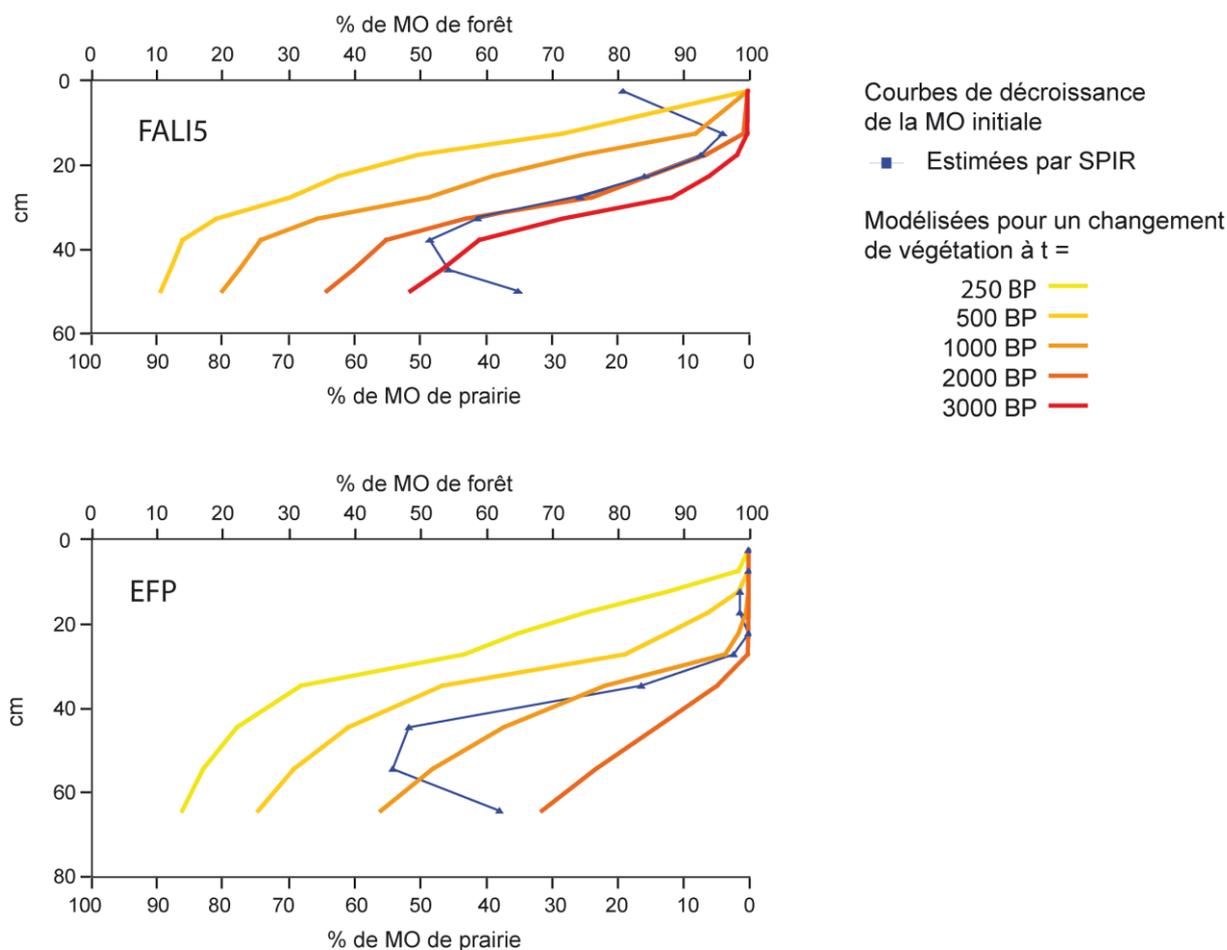


Fig. 9.19. : Confrontation des données SPIR de profils anciennement sous prairie avec le modèle de décroissance de la matière organique initiale

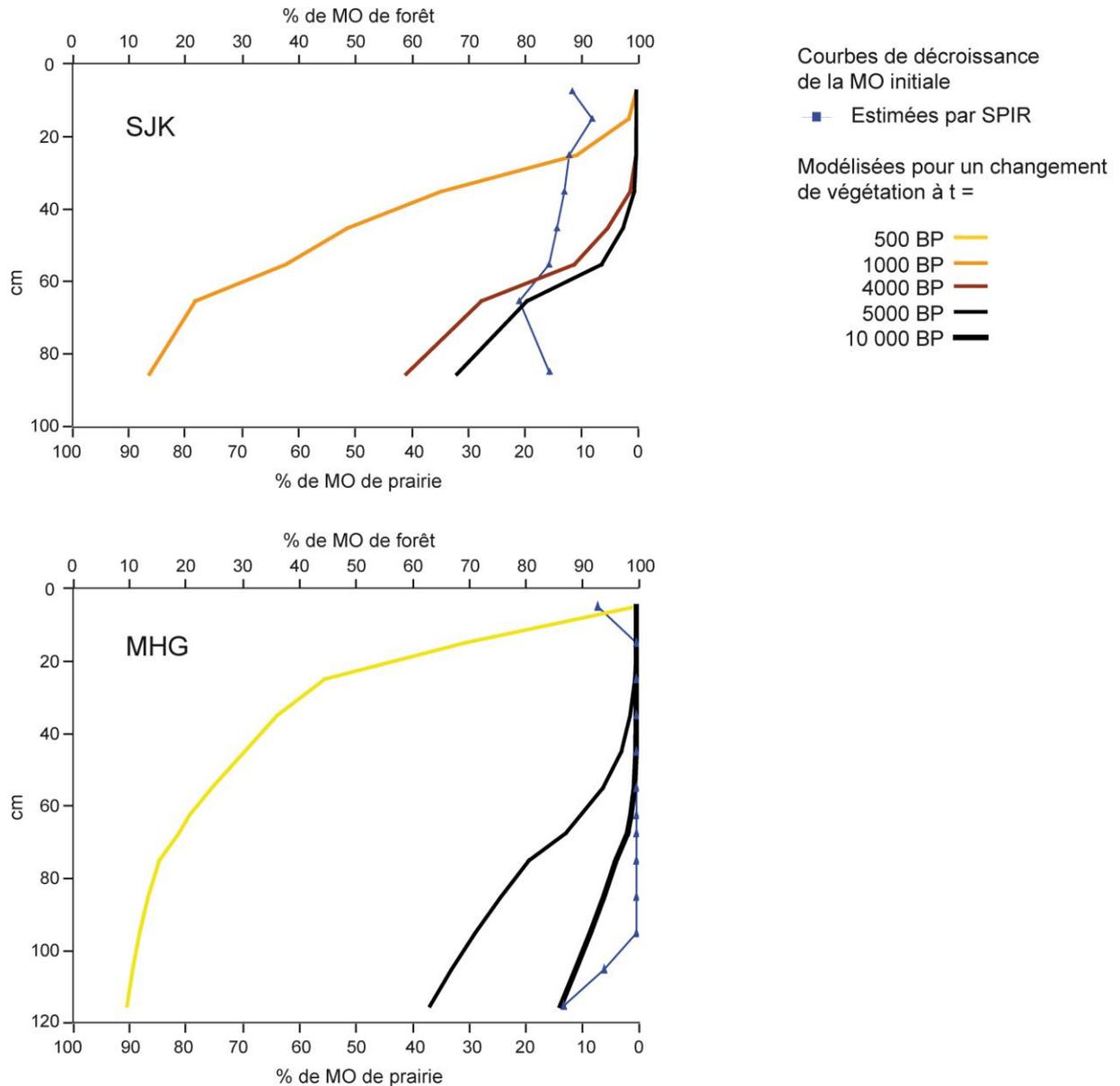


Fig. 9.20. : Confrontation des données SPIR de profils forestier stables avec le modèle de décroissance de la matière organique initiale

### 9.3.4. Apports et limites de la modélisation

A l'exception de la partie supérieure de deux profils actuellement sous prairies, les courbes estimées par SPIR ont des allures très similaires aux courbes de décroissance modélisées à l'aide des mesures du TMR. Certaines courbes ou portions de courbes se superposent même parfaitement avec une des courbes du modèle. Les interprétations temporelles qui découlent de ce couplage sont presque toujours en accord avec les données de la pédoanthracologie au niveau de l'ordre de grandeur. Cependant, les données pédoanthracologiques peuvent prêter à des interprétations divergentes puisqu'elles indiquent des épisodes de feux ponctuels qui n'ont pas nécessairement une signification claire sur des périodes longues. Toutefois, le succès de ce couplage nous conforte un peu plus dans l'idée

que la SPIR est capable de reconnaître l'origine végétale de matières organiques anciennes. Ces premiers résultats méritent un approfondissement tant du côté de la SPIR que du côté des données de référence. En particulier, des données de référence plus précises justifieront une utilisation plus approfondie du modèle qui intégrera plusieurs changements de végétation. Certains profils SPIR (EFP, FALI5) présentent deux virages distincts qu'il serait alors possible de modéliser.

## **Conclusion**

L'analyse par SPIR d'échantillons de sols profonds au TMR élevé permet de distinguer la matière organique selon qu'elle provient d'écosystèmes forestiers ou d'écosystèmes prairiaux. La difficulté à lire des scénarios complexes impliquant plusieurs changements de végétation est principalement due à la dynamique complexe des MOS dans le profil. La transformation des MOS en profondeur ne semble pas être un facteur limitant puisque le couplage avec la modélisation a montré que le signal SPIR traduit correctement des changements de végétation majeurs s'étant produits il y a plusieurs millénaires. La reconnaissance d'écosystèmes précis a montré certaines limites. L'échantillonnage et le panel de données de référence devront être complétés avant de conclure plus largement sur le potentiel de la SPIR. Toutefois, le décalage du signal en profondeur entre deux profils ayant connu une dynamique de reconquête décalée dans le temps, (Fig. 9.10) laisse entrevoir un fort potentiel dans le suivi des écotones et de leurs dynamiques.



### LES SPECTRES DE PALEOSOLS (étape 3)

La matière organique analysée par SPIR dans des horizons profonds de sols semble conserver des spécificités en fonction de l'origine végétale ancienne. Les matières organiques analysées lors de l'étape 2 ont un TMR de quelques siècles ou parfois quelques millénaires. Cependant, le signal semble moins perceptible lorsque la profondeur et *a fortiori* le TMR augmente. Parce que ces limites sont fréquentes dans l'utilisation des archives pédologiques, cette troisième étape qui cible les paléosols doit permettre de tester des matières organiques à la fois plus anciennes et mieux conservées. En retenant uniquement les horizons supérieurs des paléosols, nous disposons de 85 échantillons provenant de 25 paléosols (chapitre 5 et annexe 1 dont un A3 dépliant p. 369)

#### 10.1. Approche globale

##### 10.1.1. Résultats

Les scores obtenus pour les paléosols, calculés à partir de la fonction générée par le référentiel de surface, présentent un pic principal centré sur 8 (Fig. 10.1). Les valeurs se répartissent de (-2) à 15 et présentent des pics secondaires centrés sur 0, 3 et 13. Le décalage avec le référentiel de surface est important. La très grande majorité des échantillons obtient un score positif. Aucun échantillon n'obtient un score compris dans la fourchette des sols sous prairies. Une part importante des échantillons obtient un score supérieur à tous les scores du référentiel de surface. En considérant ces résultats bruts, une petite part des échantillons est constituée d'un mélange entre matières organiques de prairie et matières organiques de forêt, une autre part majoritaire est constituée de matières organiques de forêts et une dernière part obtient des scores très élevés qu'il est difficile d'interpréter. Ainsi, la majorité de nos paléosols auraient été sous forêt durant la période ayant directement précédé leur enfouissement.

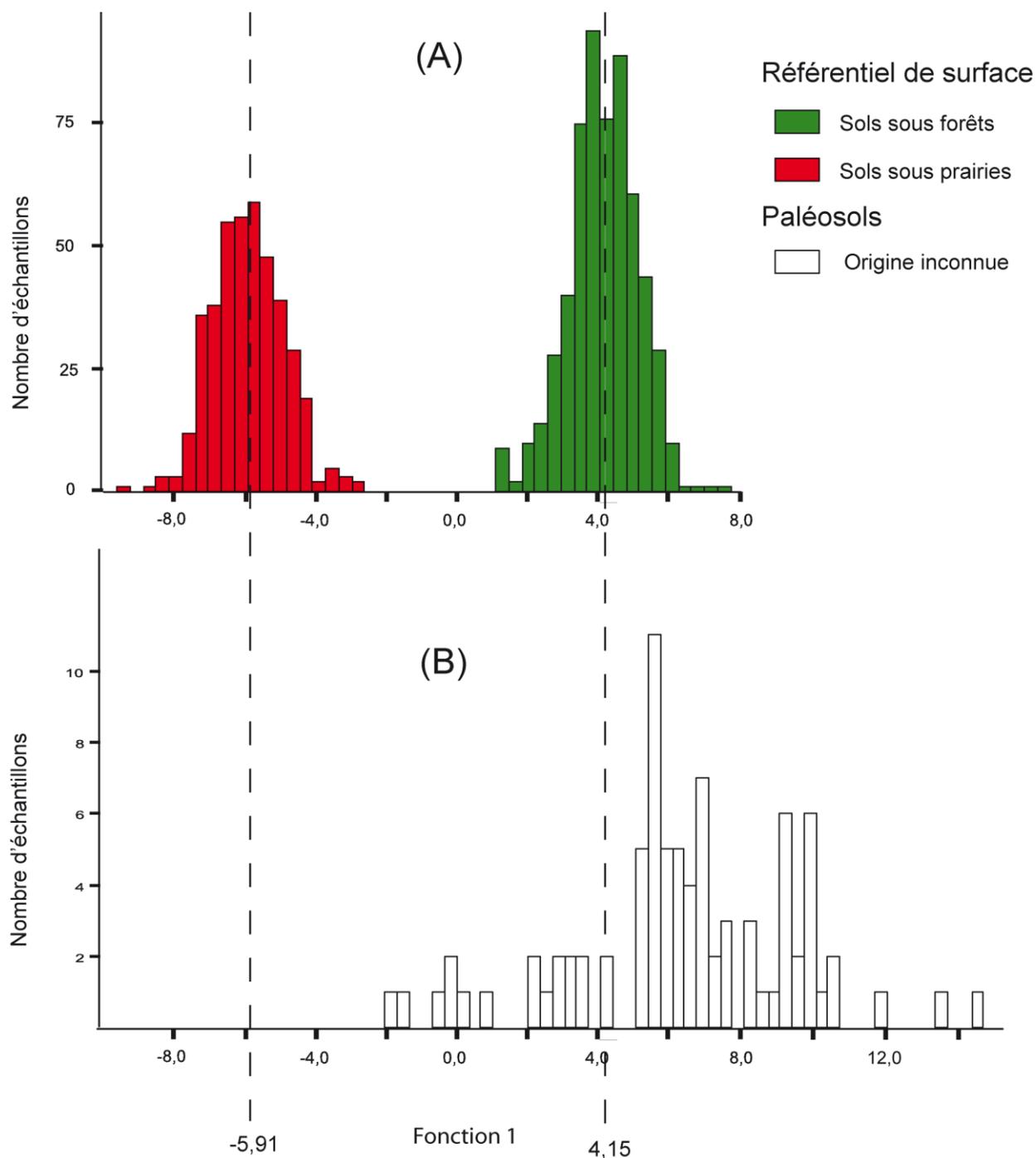


Fig. 10.1. : Score de la fonction canonique discriminante élémentaire appliquée au référentiel de surface (A) et aux paléosols (B)  
La fonction est générée à partir du référentiel de surface et appliquée aux paléosols.

### 10.1.2. Problème de classement

Tout comme pour les profils de sols lors de l'approche 1, nous ne pouvons pas exclure qu'un certain nombre de ces paléosols aient été colonisés par un type d'écosystème autre que les prairies ou les forêts, ou par un agrosystème. C'est le cas en particulier pour les paléosols du Kochersberg (fouille LGV) qui ont été découverts dans un contexte archéologique dense

postérieur au Néolithique. Un tel obstacle ne pourra être surmonté que par l'élargissement du référentiel de surface. Parmi les échantillons qui obtiennent un score atypique et élevé se trouvent la plupart des paléosols sur loess. Nous examinerons ultérieurement ces paléosols plus en détail.

Deux autres hypothèses peuvent être avancées pour expliquer un classement presque uniforme des paléosols parmi les sols sous forêts. La première hypothèse est liée à la conservation différentielle des matières organiques. Si les MO spécifiques des sols sous prairies qui nous ont permis d'établir la fonction discriminante se conservent moins longtemps que les MO spécifiques des sols sous forêts, le classement de paléosols anciens peut être faussé. Ceci expliquerait que certains échantillons ont un classement atypique difficilement interprétable ou un classement « sous forêt » en raison de la présence d'abord minoritaire de marqueurs de forêt qui deviennent prépondérants avec la dégradation des autres marqueurs.

La dernière hypothèse est une explication paléoenvironnementale. Evidemment, le nombre limité de paléosols ne permet pas d'exclure le caractère totalement fortuit de ce classement. Peut être que les paléosols auxquels nous avons eu accès ont tous eu un passé forestier pour des raisons totalement aléatoires. Mais nous pouvons également nous interroger sur le potentiel des paléosols à se conserver en fonction du couvert végétal. Les sols sous forêts tout comme les sols sous prairies sont, à nos latitudes et dans le contexte géomorphologique alsacien, peu sensibles à l'érosion. La mise en culture est en revanche un facteur déclenchant des processus d'érosion. Or, nos paléosols se situent tous dans des secteurs cultivables et ont pour la plupart été scellés pendant ou après la révolution néolithique (à l'exception des paléosols isohumiques pléistocènes). L'hypothèse que les sols sous prairies d'origine naturelle ou anthropique aient été préférentiellement cultivés et donc érodés n'est pas tout à fait exclue. Ainsi les zones de prairie seraient plutôt des zones de départ de matériel tandis que les zones de forêt seraient des zones de dépôt. Dans ce cas, le scellement des paléosols « forestiers » sous d'épaisses couches de sédiments correspondrait à une occupation contrastée entre l'amont et l'aval. A ces hypothèses générales, il faut ajouter un examen détaillé du contexte de chacun des paléosols.

## **10.2. Approche par paléosol**

En l'absence de véritables données paléoécologiques pour la plupart des paléosols, nous revenons dans cette partie plus en détail sur le contexte géomorphologique et archéologique ainsi que sur la pédogénèse des paléosols afin de confronter les résultats de la SPIR à des hypothèses d'occupation du sol.

### 10.2.1. Les sols médiévaux

Nous avons échantillonné trois paléosols médiévaux. Deux paléosols (STK et DIN) ont été prélevés sous des pierriers (murgers appelés localement *steinrudel* ; fig. 10.2 ). La fonction première de ces murgers est le stockage des éléments grossiers retirés des champs par épierrement pour la mise en culture de sols bruns calcaires peu épais. Le rôle de structuration du parcellaire par les limites spatiales qu'ils engendrent n'est que secondaire. Ce sont les datations de la matière organique des paléosols (TMR = 800 ans) et de charbons de bois prélevés dans les paléosols (1300 BP) qui ont permis de fixer l'origine médiévale de cette utilisation du territoire (Schwartz *et al.*, 2003, 2008). Les deux paléosols ont une signature intermédiaire entre les références sous prairies et sous forêts (Tab. 10.1). Parmi l'ensemble des paléosols, ils obtiennent les scores les plus faibles sur la fonction élémentaire.

Ils ne sont isolés de la surface que par un pierrier dépourvu de matrice fine. Le risque de pollution est par conséquent important. Le paléosol STK présente même un TMR moderne dans sa partie très superficielle indiquant un rajeunissement par de la matière organique subcontemporaine. Cependant, si une faible quantité de MO est suffisante pour rajeunir le TMR (quelques pourcents) une proportion importante (au moins 50 %) est nécessaire pour infléchir le signal SPIR. Le paléosol STK est sous forêt depuis 1760 au moins. La pollution récente, même faible, est donc constituée de MO forestière. Ainsi, une proportion non négligeable de matière organique sous prairies devait être présente au moment de l'enfouissement. Du point de vue de l'occupation du sol, ceci signifie que le défrichement n'a pas été suivi directement par l'épierrement (enfouissement du paléosol). Une phase intermédiaire peut être consacrée au pâturage ou à un autre type de culture a précédé la construction du parcellaire. D'ailleurs les charbons de bois dans le paléosol témoins d'un défrichement sont datés du Haut Moyen-âge alors que la matière organique indique plutôt un enfouissement au Bas Moyen-âge. La présence d'une terrasse sous le murger confirme ces hypothèses : elle indique clairement qu'entre le défrichement et l'érection du murger a eu lieu une phase d'utilisation agricole préalable

Un troisième paléosol (ENA) a été prélevé dans le cadre de la fouille préventive du chantier d'extension de l'École Nationale d'Administration au centre ville de Strasbourg. D'abord considéré, au vu de la stratigraphie, comme le paléosol du Bas Moyen-âge s'étant développé dans le jardin d'une abbaye, le prélèvement a ensuite été daté par  $^{14}\text{C}$  (datation de la MO) et a révélé une origine plus ancienne (1620 BP). Le matériau parental est constitué d'alluvions rhénanes. Ce paléosol a très clairement une signature forestière (Fig. 10.3). Ce type de milieu forestier alluvial est bien représenté dans notre référentiel de surface, ce qui rend le résultat crédible. Cependant, l'absence de données archéologiques pour la période charnière entre l'Antiquité et le Moyen Age ne permet pas de conclure sur la possible présence d'une forêt.

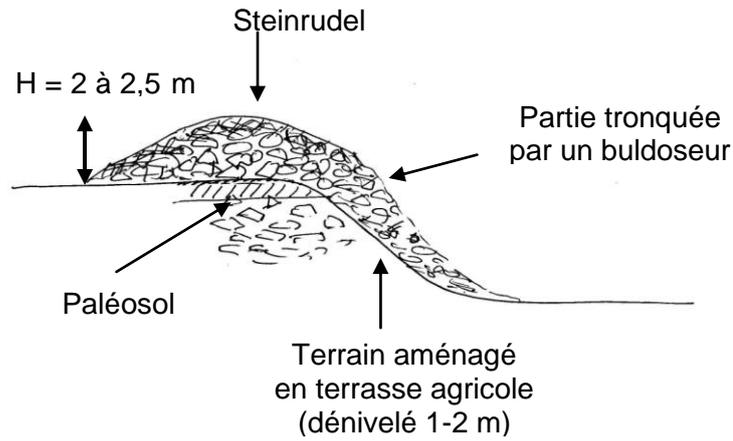


Fig. 10.2. : Croquis de la coupe dans un murger à Dinsheim, 67. Le paléosol STK à Osenbach (68) est scellé dans des conditions similaires sur une terrasse de moindre dimension (50 cm)

Paléosols		Age BP	Nombre d'échantillons	Score moyen de la fonction élémentaire
		DIN	800-1300	5
	STK	800-1300	3	0,93
	ENA	1620	3	5,63
référence sols sous prairies				-5,91
références sols sous forêts				4,15

Tab. 10.1 : Scores moyens des paléosols médiévaux pour la fonction élémentaire générée à partir du référentiel de surface



+40-+25 cm : remblais récents terreux

+25-0 cm : remblais de briques et gravats avec très peu de matrice de graviers et sables

0- 40 cm : Sable grossier et graviers dans une matrice limono-argileuse gris foncé au sommet devenant plus claire vers la base (gradient de couleur très progressif), quelques fragments de briques rouge, traces de vers (fossiles?), traces de racines actuelles (rares)

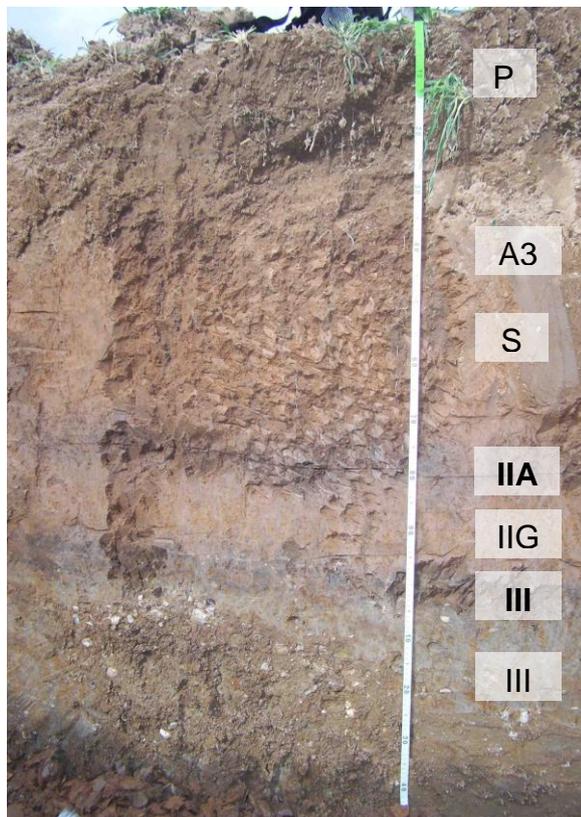
Horizon supérieur de sol qui semble bien scellé malgré l'origine récente et indéterminée des gravats qui le surmontent. Il faut noter qu'un horizon similaire est visible au moins en deux autres endroits du chantier, scellé sous des éléments différents (fondation des abattoirs et fossé adjacent aux abattoirs). Transition progressive vers :

40-85 cm : Limono sableux gris jaunâtre avec traces verticales de vers concentrant des traces d'oxyde de fer. Un tesson à 50 cm. Probablement le matériau parental du paléosol ci-dessus

Fig. 10.3. : Sommet de la stratigraphie levée sur le chantier de fouille de l'ENA, Strasbourg, 67 (rapport de fouille inédit, en cours).

## 10.2.2. Les paléosols holocènes du secteur de Colmar

Plusieurs des paléosols échantillonnés se sont développés dans la plaine ello-rhénane ou sur le cône alluvial de la Fecht. Or, les traits marqués d'hydromorphie et la pierrosité de certains sols alluviaux indiquent un terrain peu propice à la mise en culture et favorable au développement d'une forêt alluviale. Les deux paléosols de la stratigraphie d'Houssen (HOP1 et HOP2) correspondent à des phases de stabilité entrecoupées par des phases d'activité importante du cône alluvial (Fig. 10.4). La fonction SPIR élémentaire produit des scores élevés légèrement supérieurs aux scores de la population de sols sous forêts (Tab. 10.2) Une reprise active de la dynamique liée à des défrichements à l'amont peut très bien expliquer l'enfouissement de paléosols « forestiers ». Un troisième paléosol comprenant des artefacts gallo-romains était également observable à une faible profondeur. Il n'a pas été échantillonné compte tenu du risque trop important de pollution.



P : 0-26 cm ; horizon de labour (HOU1)

A3 (HOU2) : 26-40/45 cm ; frais ; 7,5YR4/2 ; limoneux, légèrement sableux ; struct. polyédrique anguleuse, fine, aspect massif ; bonne microporosité ; quelques racines fines ( $\varnothing < 1$  mm) ; transition distincte avec :

S (HOU3) 40/45-72/76 cm ; 5YR4/5 ; limono-argileux : frais ; structure massive, mais bonne microporosité ; nombreuses galeries verticales de vers de terre anéciques ; petites taches de Fer (jaunes) et de Mn (noires) ; transition distincte avec :

IIA1 (HOP1, HOU4) : 72/76-78/82 cm ; frais ; 5YR3,5/3 ; très bioturbé (nombreuses taches du S et du IISg) ; taches Mn et Fe, très petites (qqes mm) ; limono-argileux ; transition nette avec :

IISg : 78/82-95/97 cm ; frais ; 5YR4/4 ; marbré, avec des taches plus claires, d'autres plus jaunes et d'autres organiques ; limono-argileux ; transition distincte ;

IIIA1 (HOP2, HOU5) : 95/97-102/106 cm ; frais ; 5YR3/3 ; argilo-limoneux ; niveau de charbons de bois, diffus, dans la moitié supérieure ; pour le reste id précédent ;

IIIgo (HOU6) ; 102/106 à +145 cm frais; 5YR5/2 (fond) ; argilo-limoneux ; passées à graviers (calcaire, granite,...) 50 % de taches jaunes

(Photo D. Schwartz)

Fig. 10.4. : Stratigraphie du site du château d'eau à Houssen (68) comprenant les paléosols HOP1 et HOP2 décrits et prélevés dans le cadre d'un diagnostic archéologique.

Les paléosols qui se trouvent dans la plaine à la périphérie du cône (HOR et HOW, GRH, SCD) scellent un niveau gallo-romain (Fig. 10.5). Dans ce cas, la suspicion d'une mise en culture avant enfouissement d'un sol plutôt fertile est forte et les résultats de la SPIR qui indiquent un passé forestier sont à prendre avec beaucoup de précautions. Cependant, dans ce secteur, il est récurrent de voir apparaître les artefacts gallo-romains dans les trente centimètres

supérieurs du paléosol sans organisation stratigraphique. Une hypothèse forte explique cette disposition par une importante bioturbation postérieure à l'occupation et à l'abandon du site. Ceci signifie que le paléosol a été enseveli bien après l'abandon du site et que par conséquent il a pu connaître une période forestière postérieure à l'Antiquité.

Toujours dans la plaine rhénane, le paléosol échantillonné sur le chantier de fouille du Zénith (ZEN ; fig. 10.6) a également livré une signature forestière (Tab. 10.2). Un examen plus détaillé du signal a également révélé une proximité avec les signatures de feuillus (Fig. 10.7), ce qui est en accord avec les conditions d'hydromorphie observées sur le paléosol. En effet, les conifères supportent mal les conditions hydromorphes.



P : (0-30 cm) horizon de labour

(30-120 cm) Limons de débordement présentant peu de stratifications. L'absence de carbonates indique une origine ellane.

(120-170 cm) Paléosol hydromorphe (HOR) se développant sur des alluvions grossières. Le paléosol contient des artefacts gallo-romains non stratifiés se répartissant sur plus de 30 cm d'épaisseur.

Fig. 10.5. : Paléosol hydromorphe (HOR) contenant des artefacts gallo-romains relevés dans le cadre d'un diagnostic archéologique à Horbourg (68).

Paléosols	Age BP	Nombre d'échantillons	Score moyen de la fonction élémentaire
HOP1	4800 ± 40	5	9,74
HOP2	7240 ± 35	5	9,90
SCD	gallo-romain	5	3,32
GRH	gallo-romain	5	5,76
HOR	gallo-romain	3	5,35
HOW	gallo-romain	5	6,32
ZEN	9750 ± 60	5	6,05
référence sols sous prairies			-5,91
références sols sous forêts			4,15

Tab. 10.2. : Scores moyens des paléosols holocènes du secteur de Colmar pour la fonction élémentaire générée à partir du référentiel de surface.

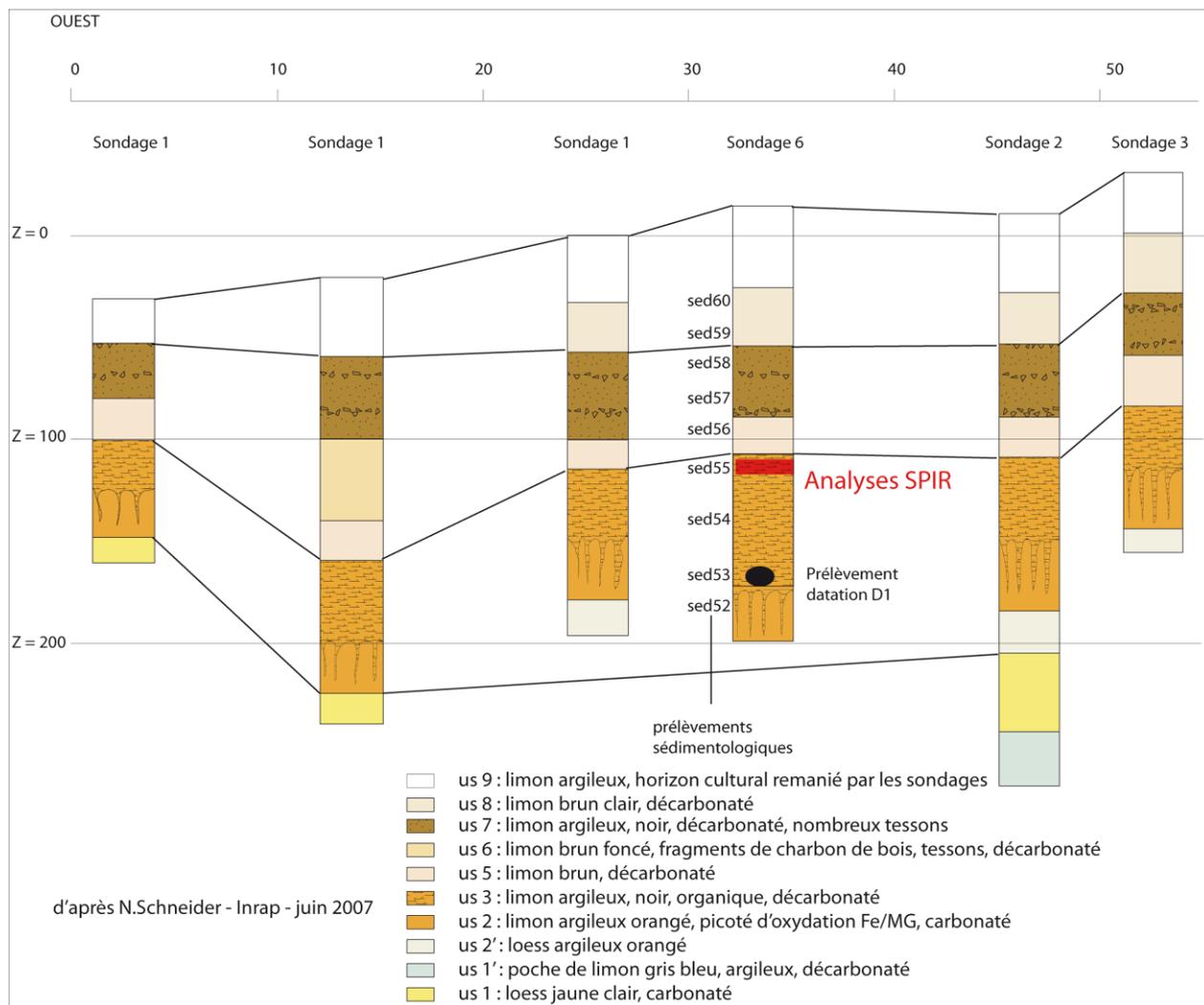


Fig. 10.6. : Position stratigraphique du paléosol ZEN (us3) dans le paléo vallon relevé sur le chantier archéologique du Zenith, Eckbolsheim, 67 (coupes relevées et dessinées par N. Schneider, INRAP, juin 2007)

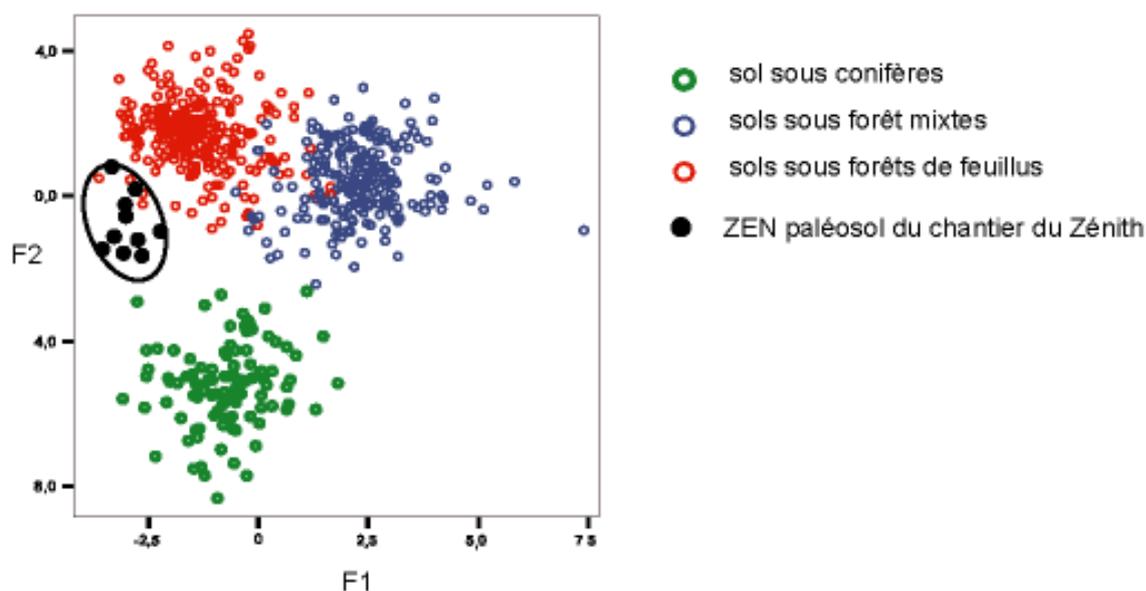


Fig. 10.7. : Score du paléosol ZEN pour les fonctions discriminantes entre sols sous forêts générées à partir du référentiel de surface

### 10.2.3. Les paléosols holocènes du Kochersberg

L'observation indépendante des paléosols sur lœss révèle que ces derniers ont tous des scores très élevés (Tab. 10.3). Ils contribuent largement à l'important décalage relevé lors de l'approche globale (Fig. 10.8). Par conséquent, il est difficile de les classer dans un groupe, même s'ils sont nettement plus proches du groupe de sols sous forêts. Admettre que ce score traduise une signature de matière organique provenant de forêts soulève de nouvelles interrogations. Pour mieux comprendre le développement de ces sols, il faut d'abord distinguer les sols isohumiques datés en général du Pléistocène des luvisols et sols bruns de l'Holocène.

Parmi les paléosols échantillonnés dans les secteurs lœssiques, plusieurs renferment des niveaux archéologiques protohistoriques ou gallo-romains (Fig. 10.9). Ils sont généralement scellés à faible profondeur sous des colluvions de lœss remaniés. Ils présentent des degrés d'évolution variés allant du sol brun peu développé au luvisol très structuré présentant des traces importantes de lessivage. Ces sols à l'état fonctionnel contiennent moins de matière organique que les sols isohumiques et peu de matière organique de façon générale. Ainsi, après fossilisation, les taux de matière organique sont très faibles. Ceci constitue une première limite d'analyse. Ensuite, compte tenu du contexte archéologique, la probabilité pour que ces sols aient été cultivés avant leur enfouissement est très probable. Un de ces paléosols (S9SD255) a révélé lors du décapage en plan des traces fossilisées de labours à l'araire. Par conséquent, notre référentiel de surface, en l'état n'est pas approprié pour tirer des conclusions à partir des scores obtenus.

Code	Type de sol	Nombre d'échantillons	Datation	Score moyen de la fonction élémentaire
Paléosols :S9SD268	sol hydromorphe	1	protohistorique	11,7
S7SD341	sol brun	2	gallo-romain	9,0
S7SD298	sol brun	1	gallo-romain	9,0
S9SD255	sol brun	1	protohistorique	10,4
S10SD278	sol brun	2	gallo-romain	9,8
S7SD22	luvisol	1	gallo-romain	9,3
S8SD305	luvisol	1	protohistorique	8,2
référence sols sous prairies				-5,91
références sols sous forêts				4,15

Tab. 10.3. : Scores moyens des paléosols sur lœss du Kochersberg pour la fonction élémentaire générée à partir du référentiel de surface

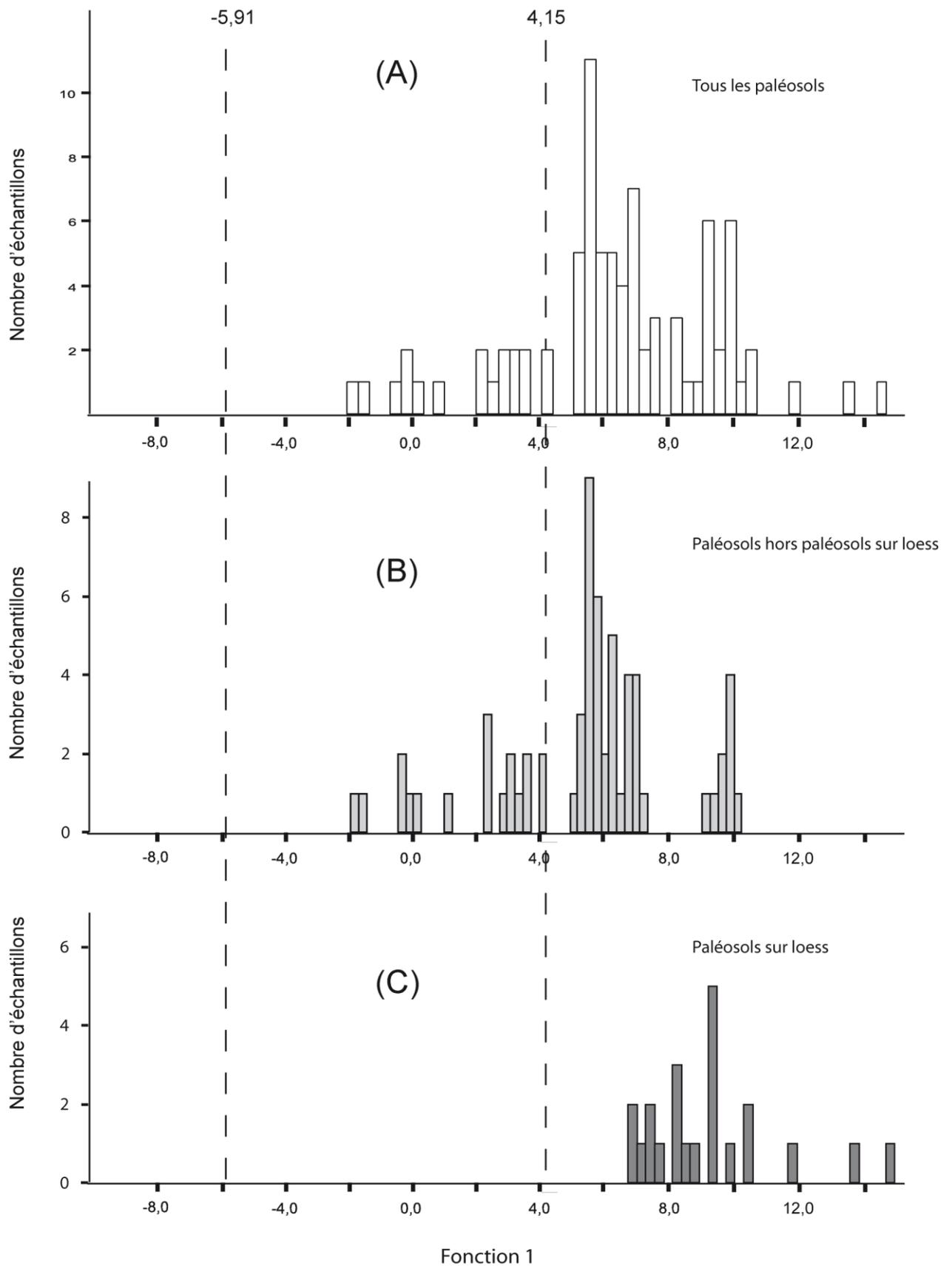


Fig. 10.8. : Score de la fonction canonique discriminante élémentaire pour l'ensemble des paléosols (A), pour les paléosols sur loess (C) et pour les autres paléosols (B).



Le niveau d'occupation romain apparaissant sous 40 cm de colluvions (débris d'un bâtiment) a partiellement scellé un sol développé sur les colluvions sous-jacent. Ce paléosol (S7SD341) d'une épaisseur totale de 60 cm n'a pas subi de processus d'érosion et peut témoigner de l'environnement ayant précédé la construction du bâtiment. Cependant sa faible profondeur d'enfouissement ne permet pas d'exclure des perturbations postérieures (ex : bioturbation) rendant difficiles l'utilisation des méthodes paléoenvironnementales

*Fig. 10.9. : Paléosol scellé par une occupation gallo-romaine, relevé dans le cadre du diagnostic archéologique de la ligne à grande vitesse (TGV, Est), secteur 7, sondage G297, Duntzenheim, 67.*

#### **10.2.4. Les paléosols isohumiques**

Une partie des sols sous loëss ont été décrits comme des sols isohumiques et datés du Pléistocène (Fig. 10.10). Ils obtiennent également des scores très élevés proches du groupe de sols sous forêts (Tab. 10.4). Or, de tels sols se développent actuellement dans des environnements steppiques. Ces observations sont à considérer avec prudence puisque certains sols isohumiques actuels se trouvent sous des steppes dites « boisées », dominées par le mélèze (Fig. 10.11). En écho à ces considérations, dans un des paléosols isohumiques analysés (ZMK), nous avons observé un nombre important de micro-charbons qui ont été identifiés comme provenant de mélèzes et de pins (Sferna, communication orale).

Il ne s'agit pas pour autant de conclure que tous les paléosols isohumiques analysés ont été couverts par une steppe à mélèze avant leur enfouissement. Plusieurs démarches sont à envisager pour tester cette hypothèse. Nous avons pu analyser à titre exploratoire quelques sols isohumiques actuels provenant de République Tchèque, du Pérou et de Mongolie. Malheureusement, le nombre d'échantillon analysés (1 par site) et de sites (3 sites) est trop faible pour construire un référentiel. Leur confrontation au référentiel existant révèle des signatures forestières. Pour comprendre le passé de ces sols, il faudra étendre notre référentiel de surface à une gamme complète de formations steppiques, boisées et « classiques ». D'autre part, il sera sans doute préférable de travailler sur une sous-population d'échantillons composée uniquement de sols carbonatés. Enfin, d'autres déterminations pédoanthracologique et l'analyse de biomarqueurs moléculaires dans des paléosols isohumiques permettront de renforcer les données de références anciennes, afin de confirmer la validité de la démarche.

Code	Type de sol	Nombre d'échantillons	Datation	Score moyen de la fonction élémentaire
Paléosols	S8SD344	2	19290 ± 90 BP	7,0
	S8SD294	2		6,8
	ZMC	2	30000 ± 400 BP	14,1
	ZMK1	2	39000 ± 1000 BP	7,8
	ZMK2	2	37000 ± 1000 BP	9,3
référence sols sous prairies				-5,91
références sols sous forêts				4,15

Tab. 10.4 : Scores moyens des paléosols isohumiques pour la fonction élémentaire générée à partir du référentiel de surface.

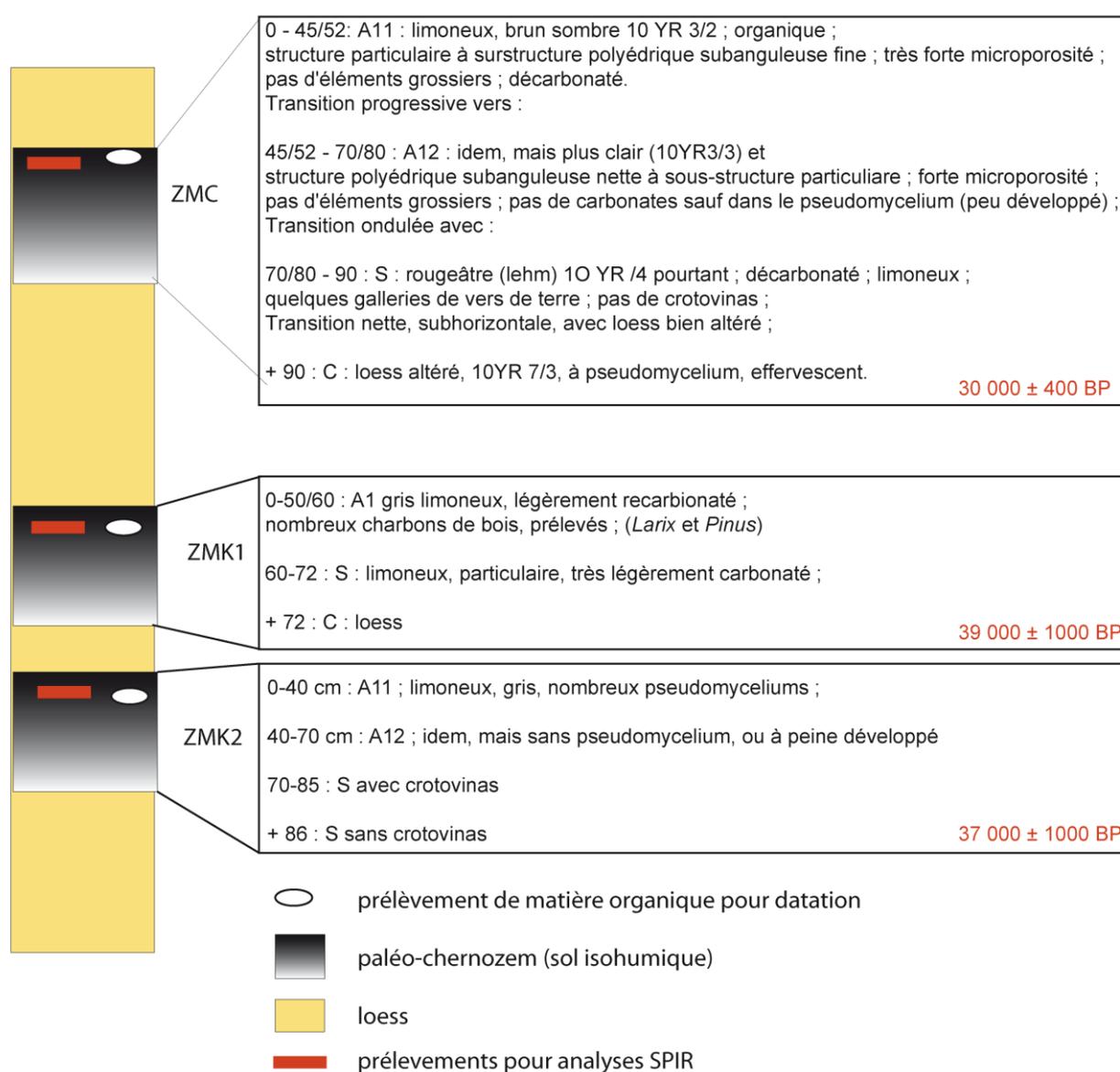


Fig. 10.10. : Schéma simplifié de la stratigraphie quaternaire de Zemechy, CZ



*Fig. 10.11 : Steppe boisée à mélèzes, Mongolie, photo D. Schwartz*

## **Conclusion**

L'absence de véritables références paléoécologiques est un handicap dans cette étape. Le décalage important entre le signal de certains paléosols et le référentiel de surface ne pourra être éclairé qu'au regard de données plus précises. Les associations de types de sols avec un type de végétation (chernozem-steppe, par exemple) sont des indices alternatifs mais représentent un risque de raisonnement circulaire. En effet, si le type de sol est utilisé comme référence, le risque de confondre des traits typiques d'une pédogénèse avec l'origine des matières organiques est important.

Globalement, les paléosols les moins anciens semblent présenter les scores les plus proches du référentiel de surface et les plus crédibles. Paradoxalement, les paléosols les plus récents sont aussi ceux qui ont la plus forte probabilité d'avoir été cultivés. Pour cette raison, l'intégration dans notre référentiel de surface de sols cultivés constitue un des enjeux majeurs du développement de la méthode.



# CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

## 1. Synthèse des acquis

Au terme de cette étude, il nous est possible de dresser un premier bilan concernant les potentialités de la méthode que nous développons.

En premier lieu, la SPIR est capable de séparer des échantillons d'horizons de surface de sols en fonction de l'origine végétale des matières organiques qu'ils contiennent. Cette séparation est sans ambiguïté entre des sols sous forêts et des sols sous prairies. Des séparations très nettes sont également observées entre des écosystèmes plus spécifiques tels que les forêts de conifères et les forêts de feuillus. Pour les distinctions les plus fines, des esquisses de discriminations sont observées et devront être confirmées par un renforcement du référentiel spectral des horizons de surface.

L'examen des profils de sols permet de montrer que la discrimination entre sols sous forêts et sols sous prairies se conserve bien en profondeur pour les écosystèmes stables sur le long terme. L'utilisation de données paléoécologiques sur le long terme comme référence permet d'améliorer la discrimination entre horizons profonds. Pour les sites ayant connu un ou plusieurs changements majeurs de végétation, la signature SPIR est intermédiaire entre les populations de sols sous prairies et sous forêts. L'absence de changements brutaux du signal s'explique par la spécificité des archives pédologiques et notamment par le brassage important des constituants à l'intérieur du profil. La confrontation du signal SPIR le long du profil avec un modèle de décroissance de la matière organique d'origine ancienne démontre que notre méthode permet de reconstruire des scénarios d'évolution de la végétation, même si cet aspect reste à approfondir.

La confrontation de paléosols avec le référentiel de surface produit des résultats plus contrastés. L'absence de données paléoécologiques de référence solides ne nous permet pas encore de dresser des conclusions définitives. L'inadéquation entre les milieux représentés dans le référentiel de surface et les milieux dans lesquels se sont développés certains paléosols est une des principales limites de cette troisième étape.

Parmi les limites relevées pour les trois étapes, aucune ne paraît totalement insurmontable. Elles devront faire l'objet de développements méthodologiques complémentaires. Dès à présent, les résultats révèlent un fort potentiel de l'outil SPIR dans une démarche de reconstruction des dynamiques des paléovégétations. L'approche par profils de sols encore fonctionnels permet de retracer l'histoire des derniers millénaires pour les régions tempérées. Si nous parvenons à l'avenir à confirmer le potentiel de la méthode sur les paléosols, c'est une bonne partie du Quaternaire qui pourra être explorée.

Il faut distinguer, d'une part, la nécessité de développements méthodologiques futurs, et d'autre part, le potentiel d'utilisation dans l'étude des paléoenvironnements. A l'intérieur des développements méthodologiques, nous distinguons encore ce qui relève du perfectionnement de l'outil et ce qui contribue à élargir son champ disciplinaire d'application.

## **2. Développements méthodologiques appliqués aux archives pédologiques**

Ces perspectives s'inspirent principalement des limites que nous avons rencontrées lors des trois étapes de mise au point méthodologique.

### **2.1. Etape 1**

Tout d'abord, le référentiel de surface devra être étendu avec deux objectifs principaux. Le premier objectif consiste à combler un certain nombre de lacunes à l'intérieur de notre zone d'étude. Du point de vue écosystémique, des milieux spécifiques n'ont pas été échantillonnés ou peu. Il s'agit des prairies humides du Ried, des mégaphorbiaies vosgiennes, des érablaies sur éboulis, des pessières, des forêts alluviales pionnières, etc. La plupart de ces formations n'a pas été échantillonnée de façon prioritaire, soit parce qu'elles sont marginales, soit parce que leur statut de pionnières les rend éphémères et par conséquent difficilement perceptibles dans les horizons profonds.

Du point de vue de l'occupation du sol, les milieux cultivés constituent la principale lacune. Leur absence dans le référentiel n'est pas seulement la conséquence d'un choix de notre part. L'acquisition de spectres de matière organique provenant strictement d'un type de culture constitue un véritable verrou méthodologique. En effet, des milieux cultivés qui répondent aux critères de stabilité du couvert que nous avons fixés et notamment la période de 150 ans sont quasiment inexistantes ou introuvables. Dans ce cas, il faut envisager des approches différentes. L'existence de quelques rares sites d'essais agronomiques sur le long terme constitue une piste sérieuse. Le site de Rothamsted en Angleterre suivi depuis le XIX<sup>e</sup> siècle est l'un des plus emblématiques. Sur d'autres sites, moins anciens, nous serons certainement amenés à revoir nos critères de stabilité à la baisse. Une autre solution consiste à considérer des systèmes de culture dans leur ensemble en prenant connaissance des différentes rotations de cultures et en considérant la MO des horizons de surface comme

un mélange « agricole » dans lequel aucun système spécifique ne domine. Malheureusement, les mutations agricoles du XXe siècle ont bien souvent entraîné des modifications profondes des systèmes de culture (monoculture de maïs, par exemple). A ce titre, seules les parcelles de vigne bénéficient d'une stabilité intéressante. A ce problème de référence, s'ajoute le problème de la comparaison entre les milieux cultivés protohistoriques et historiques d'une part et les milieux actuels d'autre part. L'analogie est beaucoup plus délicate que pour les milieux naturels et semi-naturels. De plus, les systèmes anciens étaient rarement sédentaires et également soumis à des rotations. L'archéologie agraire expérimentale pourrait permettre de contourner une partie des décalages importants entre les références disponibles et les systèmes anciens. Mais, dans ce cas également, le problème de la durée de l'expérience se posera.

Le second objectif de consolidation du référentiel de surface réside dans l'extension spatiale de celui-ci ; d'abord à l'intérieur de la zone tempérée puis à d'autres zones bioclimatiques. Les essais en République Tchèque n'ont posé aucun problème de transfert. A l'intérieur de la zone tempérée, le référentiel n'aura sans doute besoin que de quelques adaptations. Des essais en cours sur des pelouses méditerranéennes à comparer aux pelouses sèches calcaires permettront d'en dire un peu plus sur le potentiel de transfert à une autre zone bioclimatique. La construction d'un référentiel adapté à d'autres zones bioclimatiques dépendra certainement du succès initial de la méthode dans la zone tempérée. Les paléosols isohumiques échantillonnés en Alsace et en République Tchèque se sont développés sous des conditions climatiques très différentes de l'actuel. Le besoin de références pour décrypter l'origine de leur matière organique nous attire vers les milieux continentaux steppiques. Les quelques opportunités d'échantillonnage effectués en Mongolie ou au Pérou ne suffisent pas pour l'instant à bâtir un vrai référentiel. Des démarches similaires à celles menées en Alsace devront être entreprises pour mieux décrypter ces paléoenvironnements.

## **2.2. Etape 2**

Le référentiel de profils complets se cantonne principalement au massif vosgien. L'élargissement nécessaire à d'autres milieux et d'autres domaines bioclimatiques est également souhaitable. Parmi les deux approches utilisées, la seconde qui s'appuie sur des données paléoenvironnementales de référence semble plus performante que celle qui se contente d'une confrontation avec le référentiel de surface. Par conséquent, il faudra privilégier cette approche. Cependant, la disponibilité de données de référence et le coût de leur acquisition place l'extension de ce référentiel dans un cadre beaucoup plus contraint que le référentiel de surface. Seule la collaboration avec des équipes d'archéologues et de paléoenvironnementalistes permettra d'étendre et de consolider cette approche. La recherche de sites déjà bien documentés constitue une priorité.

### 2.3. Etape 3

Concernant les paléosols, le premier point à résoudre est l'extension du référentiel de surface aux milieux actuels analogues aux paléo milieux dans lesquels se sont développés les paléosols. Nous avons déjà discuté de cette perspective dans le cadre de l'étape 1. L'autre enjeu est de collecter des données paléoécologiques solides sur les paléosols. Les biomarqueurs moléculaires devraient à l'avenir fournir des informations importantes aux échelles locales. En renonçant à l'échelle strictement locale, la palynologie peut également fournir des références importantes.

## 3. Autres développements méthodologiques

Comme nous l'avons déjà souligné, les applications quantitatives de la SPIR en pédologie sont nombreuses et ouvrent de nombreuses perspectives dans la gestion des sols (Cécillon *et al.*, 2009a). Ici nous présentons uniquement quelques pistes concernant des applications qualitatives de la spectroscopie en science du sol et dans le domaine de l'environnement de façon générale.

L'objectif de ce travail était de s'appuyer sur la connaissance des dynamiques de la matière organique à l'intérieur du profil pour tenter de reconnaître l'empreinte d'une végétation passée. Une fois que le potentiel de la SPIR sera totalement démontré et admis, il sera possible d'étudier, à l'instar des travaux menés à l'aide de l'isotope <sup>13</sup> du carbone (Balesdent *et al.*, 1998), les dynamiques de la matière organique en s'appuyant sur des scénarios connus ou en introduisant dans le sol des matières organiques dont la signature est bien connue. Dans cette perspective, l'analyse par SPIR de fractions spécifiques du sol est une piste prometteuse.

La SPIR pourrait également apporter son concours dans des disciplines connexes de la pédologie. En analysant la signature végétale de matériaux terrigènes prélevés dans un cours d'eau ou dans des dépôts alluviaux, il sera possible de reconnaître l'origine spatiale des sédiments. Ainsi, il sera possible de déterminer si les matériaux érodés proviennent plutôt des berges, des zones cultivées ou d'autres zones du bassin versant. Dans une perspective paléoenvironnementale, l'analyse de sédiments plus anciens, en milieu lacustre par exemple, permettrait de reconstruire l'environnement végétal du bassin d'alimentation.

Dans l'étude des tourbières, des travaux préliminaires ont déjà été menés (McTiernan *et al.*, 1998). La SPIR, qui permet de caractériser le type de tourbières ne fournit pas une information régionale ou sub-locale comme le fait la palynologie, mais permettrait de restituer l'évolution écologique de la tourbière : phase de tourbière boisée, assèchement etc.

Enfin, il ne faut pas oublier que la SPIR n'est pas le seul outil spectroscopique en plein essor. La spectroscopie dans le moyen infrarouge (MIR) présente également des

avantages intéressants. Nous n'avons pas eu l'occasion de tester cet outil, mais les résultats obtenus pour des applications quantitatives méritent qu'une attention particulière soit portée sur le potentiel de la MIR pour des applications qualitatives.

#### **4. Applications environnementales et paléoenvironnementales**

Les applications paléoenvironnementales sont nombreuses. De façon générale, cet outil nous permet de reconstruire la végétation du passé. Une résolution spatiale fine couplée à une répétition des mesures rendue possible par les faibles coûts permet d'accéder à de nouvelles approches.

Le suivi d'un écotone et de sa vitesse de déplacement est possible aux échelles métriques et pluriséculaires. Cette thématique est importante puisqu'elle devrait nous permettre de prédire la vitesse de fermeture d'un milieu pâturé lors de son abandon ou suite à un changement climatique.

Dans le cadre de fouilles archéologiques, la SPIR devrait permettre un maillage fin des sites étudiés et de leur périphérie. Ceci permettra de mieux comprendre l'organisation spatiale de l'environnement direct des occupations humaines.

Sur des pas de temps plus longs, l'étude des paléosols par la SPIR permettra d'améliorer la connaissance des paléovégétations et de leurs évolutions durant les périodes interglaciaires du Quaternaire. Nous avons constaté dans l'étude de stratigraphies comprenant plusieurs paléosols isohumiques que la question de leur environnement végétal n'est pas tranchée. Surtout, elle apparaît plus complexe que lorsqu'elle est interprétée au seul regard des traits pédologiques ou géomorphologiques.

Si le problème des systèmes de culture est surmonté et qu'un référentiel est constitué, la SPIR pourra également apporter des informations nouvelles sur les pratiques spatiales et culturelles des populations protohistoriques et historiques.

---

Ainsi, entre acquis et promesses, le développement de travaux sur l'utilisation qualitative des propriétés de la SPIR appliquée aux matières organiques des sols ouvre des perspectives dans un large champ thématique.

---



## BIBLIOGRAPHIE

- Adam T., 2002. Une approche de l'évolution paysagère des hautes-Chaumes du Hohneck et du Rossberg. Aspects descriptif, interprétatifs et méthodologiques. Mémoire de DEA "Systèmes spatiaux et environnement", Faculté de géographie, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 100 p.
- Al-Abbas, Swain A.H. et Baumgardner M. F., 1972. Relating organic matter and clay content to the multispectral radiance of soils. *Soil Science*, 114, 477-495.
- Albrecht R., Joffre R., Gros R., Le Petit J., Terrom G. et Périssol C., 2008. Efficiency of near-infrared reflectance spectroscopy to assess and predict the stage of transformation of organic matter in the composting process. *Bioresource Technology*, 99, 2, 448-455.
- Alexandre A., Meunier J. D., Lézine A. M., Vincens A. et Schwartz D., 1997. Phytoliths: indicators of grassland dynamics during the late Holocene in intertropical Africa. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 136, 1-4, 213-229.
- Alexandre A., Meunier J.-D., Mariotti A. et Soubies F., 1999. Late Holocene Phytolith and Carbon-Isotope Record from a Latosol at Salitre, South-Central Brazil. *Quaternary Research*, 51, 2, 187-194.
- Algayer B., 2008. Typologie des contacts entre forêts et chaumes vosgiennes et analyse des dynamiques associées. Mémoire de master 2, géographie environnementale, Faculté de géographie, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 103 p.
- Ali M., Emsley A. M., Herman H. et Heywood R. J., 2001. Spectroscopic studies of the ageing of cellulosic paper. *Polymer*, 42, 7, 2893-2900.
- Anderson C., Fuller F. et Epstein W. W., 1979. Nonpolar pentacyclic triterpenes of the medicinal fern *Polypodium subpetiolatum*. *Journal of Natural Products*, 42, 168-173.
- Andreoli R., Rosique T., Schmidt M. et Carozza J.-M., 2006. La dernière phase glaciaire du haut bassin de la Fecht (Vosges, France) : dynamique de l'englacement et chronologie relative de la déglaciation. *Géomorphologie*, 1, 23-36.
- Andreux F., 1979. Genèse et propriétés des molécules humiques. In : Bonneau M. et Souchier B. *Pédologie 2. Constituants et propriétés du sol*, Masson, Paris, p. 97-122.
- Anonyme, 1910 (?). *S'Elsass uewer alles*. 80 p.
- Arai Y., Yamaide M., Yamazaki S. et Ageta H., 1991. Fern constituents: triterpenoids isolated from *Polypodium vulgare*, *P. fauriei* and *P. virginianum*. *Phytochemistry*, 30, 3369-3377.
- Awiti A. O., Walsh M. G., Shepherd K. D. et Kinyamario J., 2008. Soil condition classification using infrared spectroscopy: A proposition for assessment of soil condition along a tropical forest-cropland chronosequence. *Geoderma*, 143, 1-2, 73-84.

- Baize D. et Girard M.-C., 2008. Référentiel pédologique. Quae, Versailles, 405 p.
- Baize D. et Jabiol B., 1995. Guide pour la description des sols. INRA, Paris, 375 p.
- Baldock J. A. et Skjemstad J. O., 2000. Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack. *Organic Geochemistry*, 31, 7-8, 697-710.
- Balek C. L., 2002. Buried artifacts in stable upland sites and the role of bioturbation: A review. *Geoarchaeology*, 17, 1, 41-51.
- Balesdent J., Besnard E., Arrouays D. et Chenu C., 1998. The dynamics of carbon in particle-size fractions of soil in a forest-cultivation sequence. *Plant and Soil*, 201, 1, 49-57.
- Balesdent J. et Guillet B., 1982. Les datations par le  $^{14}\text{C}$  des matières organiques des sols. Contribution à l'étude de l'humification et du renouvellement des substances humiques. *Science du sol*, 2, 93-112.
- Barnes R. J., Dhanoa M. S. et Lister S. J., 1989. Standard Normal Variate Transformation and De-trending of Near-Infrared Diffuse Reflectance Spectra. *Applied Spectroscopy*, 43, 772-777.
- Barthès B., Brunet D., Ferrer H., Chotte J. L. et Feller C., 2006. Determination of total carbon and nitrogen content in a range of tropical soils using near infrared spectroscopy: influence of replication and sample grinding and drying. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 14, 341-348.
- Barthès B., Brunet D., Hien E., Enjalric F., Conche S., Freschet G. T., d'Annunzio R. et Toucet-Louri J., 2008. Determining the distributions of soil carbon and nitrogen in particle size fractions using near-infrared reflectance spectrum of bulk soil samples. *Soil Biology and Biochemistry*, 40, 6, 1533-1537.
- Bartoli F. et Guillet B., 1977. Etude comparée des diagrammes phytolithiques et polliniques d'un podzol des Vosges gréseuses. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, série D*, 284, 353-356.
- Battmann J., 2008. Etude d'une phase de défrichement dans le massif du Rossberg (Haut-Rhin). Analyse de la microtopographie par laserscanning. Mémoire de master 1, géographie environnementale, Faculté de géographie, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 65 p.
- Beatty, 1981. The role of treefalls and forest microtopography in pattern formation in understory communities. Thèse, Cornell University, 143 p.
- Becker-Heidmann P. et Scharpenseel H. W., 1986. Thin layer  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\Delta^{14}\text{C}$  monitoring of "lessive" soil profiles. *Radiocarbon*, 28, 2A, 383-390.
- Becker-Heidmann P. et Scharpenseel H. W., 1989. Carbon isotope dynamics in some tropical soils. *Radiocarbon*, 31, 3, 672-679.
- Becker-Heidmann P. et Scharpenseel H. W., 1992. Studies of soil organic matter dynamics using natural carbon isotopes. *The science of the Total Environment*, 117/118, 305-312.

- Bellon-Maurel V., Grenier P., Crochon M. et Roger J.-M., 2003. Spectroscopie optique pour caractériser l'état physiologique de plantes : quelques exemples. *Ingénieries*, NS2, 35-45.
- Ben-Dor E. et Banin A., 1995. Near-Infrared Analysis as a Rapid Method to Simultaneously Evaluate Several Soil Properties. *Soil Science Society of America Journal*, 59, 2, 364-372.
- Ben-Dor E., Inbar Y. et Chen Y., 1997. The reflectance spectra of organic matter in the visible near-infrared and short wave infrared region (400-2500 nm) during a controlled decomposition process. *Remote sensing environment*, 61, 1-15.
- Ben-Gera I. et Norris K. H., 1968. Determination of moisture content in soybeans by direct spectrophotometry. *Israeli Journal Agricultural Research*, 18, 124-132.
- Bernhœft C., 1894. *Strasbourg, Metz et les Vosges : 150 vues phototypiques*.
- Bernoux M., Cerri C. C., Neill C. et de Moraes J. F. L., 1998. The use of stable carbon isotopes for estimating soil organic matter turnover rates. *Geoderma*, 82, 43-58.
- Bertrand G., 1986. La végétation dans le géosystème. *Phytogéographie des montagnes Cantabriques centrales Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, 57, 3.
- Bertrand C. et Bertrand G., 1995. La géographie et les sciences de la nature. In : Bailly A., Ferras R. et Pumain D., *Encyclopédie de Géographie*, Economica, Paris, p. 91-109.
- Bird M., Santrůckova H., Lloyd J. et Lawson E., 2002. The isotopic composition of soil organic carbon on a north-south transect in western Canada. *European Journal of Soil Science*, 53, 393-403.
- Blanck J. P., Wacquart J. P., Paquet H., Tricart J., Usselman P. et Vogt H., 1971. Contribution à l'étude des formations loessiques d'Eguisheim (Sud-Ouest de Colmar, Haut-Rhin, France). *Bulletin du Service de la carte géologique Alsace-Lorraine*, 24, 57-91.
- Boeuf R., Durand E. et Hauschild R., 2007. Approche phytoécologique des milieux forestiers alluviaux rhénans. Actes du colloque "European floodplains", Strasbourg 07-09/07.
- Bonneau M. et Souchier B., 1979. *Constituants et propriétés du sol*. Paris, 477 p.
- Bornand, 1978. Altération des matériaux fluvi-glaciaires, genèse et évolution des sols sur terrasses quaternaire dans la moyenne vallée du Rhône. Thèse, Université de Montpellier, 325 p.
- Bouché M., 1972. *Lombriciens de France*. INRA, Paris, 671 p.
- Boudot J.-P., 1983. Végétation. In : *Encyclopédie de l'Alsace*, Publitotal, Strasbourg, p. 7540-7542.
- Bouillon A. (ed), 1964. *Etudes sur les termites africaines*. Masson, Paris, 414 p.

- Boulet R., Pessenda L. C. R., Telles F. C. et Melfi A. J., 1995. Une évaluation de la vitesse de l'accumulation superficielle de matière par la faune du sol à partir de la datation des charbons et de l'humine du sol. Exemple des latosols des versants du lac Campestre, Salitre, Minas Gerais, Bresil. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Série Ila*, 320, 4, 287-294.
- Bowers S. A. et Hanks R. J., 1965. Reflection of radiant energy from soils. *Soil Science*, 100, 130-138.
- Brown D. J., Brickleyer R. S. et Miller P. R., 2005. Validation requirements for diffuse reflectance soil characterization models with a case study of VNIR soil C prediction in Montana. *Geoderma*, 129, 3-4, 251-267.
- Brown J. L., 1976. Etude de la perturbation des horizons du sol par un arbre qui se renverse et de son impact sur la pédogenèse. *Canadian Journal of Soil Science*, 57, 173-186.
- Brown J. L. et Martel Y., 1981. Intérêt des chablis dans l'étude des paléosols. *Géographie Physique et Quaternaire*, 35, 1, 87-92.
- Brunet D., Barthes B. G., Chotte J.-L. et Feller C., 2007. Determination of carbon and nitrogen contents in Alfisols, Oxisols and Ultisols from Africa and Brazil using NIRS analysis: Effects of sample grinding and set heterogeneity. *Geoderma*, 139, 1-2, 106-117.
- Brunet D., Bernoux M. et Barthès B. G., 2008. Comparison between predictions of C and N contents in tropical soils using a Vis-NIR spectrometer including a fibre-optic probe versus a NIR spectrometer including a sample transport module. *Biosystems Engineering*, 100, 3, 448-452.
- Bull I. D., Bergen P. F. v., Nott C. J., Poulton P. R. et Evershed R. P., 2000. Organic geochemical studies of soils from the Rothamsted classical experiments--V. The fate of lipids in different long-term experiments. *Organic Geochemistry*, 31, 5, 389-408.
- Bürger K., 2007. Impact des anciennes formes d'utilisation sur les sols forestiers dans les Vosges et en Forêt Noire. Actes du colloque: «La mémoire des forêts», Nancy, 14-16 dec. 2004, 175-180.
- Burns D. A. et Ciurczack E. W. (ed), 2001. *Handbook of Near-Infrared Analysis*. second edition, Revised and Expanded, Marcel Dekker, New York, 814 p.
- Cannell M. G. R., 1982. *World forest biomass and primary production data*. Academic press, London, 391 p.
- Carbiener R., 1963. Remarques sur un type de sol encore peu étudié : le "ranker cryptopodzolique" de l'étage subalpin des massif hercyniens français. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 256, 11, 4967-4969.
- Carbiener R., 1966. *La végétation des Hautes-Vosges dans ses rapports avec les climats locaux, les sols et la géomorphologie. Comparaison avec la végétation subalpine d'autres massifs montagneux à climat allochtone d'Europe occidentale*. Thèse, Paris, 112 p.

- Carbiener R., 1970. un exemple de type forestier exceptionnel pour l'Europe Occidentale : la forêt du lit majeur du Rhin au niveau du fossé rhénan (Fraxino-Ulmetum). Intérêt écologique et biogéographique, Comparaison avec d'autres forêts thermophiles. *Vegetatio*, 20, 97-148.
- Carbiener R. et Schnitzler A., 1990. Evolution of major pattern models and processes of alluvial forest of the Rhine in the rift valley (France/Germany). *Vegetatio*, 88, 115-129.
- Carcaillet C., 2001a. Are Holocene wood-charcoal fragments stratified in alpine and subalpine soils? Evidence from the Alps based on AMS  $^{14}\text{C}$  dates. *The Holocene*, 11, 2, 231-242.
- Carcaillet C., 2001b. Soil particles reworking evidences by AMS  $^{14}\text{C}$  dating of charcoal. Brassages particulaires dans des sols mis en évidence à l'aide de datations au  $^{14}\text{C}$  par AMS. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science*, 332, 1, 21-28.
- Carcaillet C. et Talon B., 1996. Aspects taphonomiques de la stratigraphie et de la datation de charbons dans les sols : exemple de quelques sols des Alpes. *Géographie Physique et Quaternaire*, 50, 233-244.
- Casner J., 2001. Analyse des monomères de la lignine par Electrophorèse Capillaire : Application à l'histoire des Hautes -Chaumes du Hohneck et du Rossberg (massif vosgien). Mémoire de maîtrise de géographie physique, Faculté de géographie, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 74 p.
- Cécillon L., Cassagne N., Czarnes S., Gros R. et Brun J.-J., 2008. Variable selection in near infrared spectra for the biological characterization of soil and earthworm casts. *Soil Biology and Biochemistry*, 40, 7, 1975-1979.
- Cécillon L., Barthès B. G., Gomez C., Ertlen D., Genot V., Hedde M., Stevens A. et Brun J. J., 2009a. Assessment and monitoring of soil quality using near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS). *European Journal of Soil Science*, 60, 770-784.
- Cécillon L., Cassagne N., Czarnes S., Gros R., Vennetier M. et Brun J.-J., 2009b. Predicting soil quality indices with near infrared analysis in a wildfire chronosequence. *Science of The Total Environment*, 407, 3, 1200-1205.
- Chabbi A., Kögel-Knabner I. et Rumpel C., 2009. Stabilised carbon in subsoil horizons is located in spatially distinct parts of the soil profile. *Soil Biology and Biochemistry*, 41, 2, 256-261.
- Chagny A., 1932. *Visions de France*.
- Chaline J. et Thevenin A., 1972. Deux terriers de spermophiles dans les sables rouges vosgiens d'Achenheim et l'âge des industries sous-jacentes sur galets brisés du Bas-Rhin. *Revue archéologique de l'Est*, 23, 3-4, 205-216.
- Chang C. W., Laird D. A., Mausbach M. J. et Hurburgh C. R. J., 2001. Near-infrared reflectance spectroscopy - Principal components regression analyses of soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 65, 480-490.

- Chenu C. et Plante A. F., 2006. Clay-sized organo-mineral complexes in a cultivation chronosequence: revisiting the concept of the 'primary organo-mineral complex'. *European Journal of Soil Science*, 57, 4, 596-607.
- Chodak M., Ludwig B., Khanna P. et Beese F., 2002. Use of near infrared spectroscopy to determine biological and chemical characteristics of organic layers under spruce and beech stands. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift für Pflanzenernahrung und Bodenkunde*, 165, 1, 27-33.
- Ciurczack E. W., 2001. Principles of Near-Infrared Spectroscopy. In : Burns D. A. et Ciurczack E. W., *Handbook of Near-Infrared Analysis*, Marcel Dekker, New York, p. 7-18.
- Clark R. N., King T. V. V., Klejwa M., Swayze G. A. et Vergo N., 1990. High Spectral Resolution Reflectance Spectroscopy of Minerals. *J. Geophys. Res.*, 95, 126853-12680.
- Cloître M., 2005. Les microtopographies des chaumes du massif du Rossberg (Vosges) : vestige d'un défrichement du XVIIIe siècle en relation avec des pratiques charbonnières ? Mémoire de maîtrise de géographie physique, Faculté de géographie, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 92 p.
- Cohen M., Dabral S., Graham W., Prenger J. et Debusk W., 2006. Evaluating Ecological Condition Using Soil Biogeochemical Parameters and Near Infrared Reflectance Spectra. *Environmental Monitoring and Assessment*, 116, 1, 427-457.
- Commissariat général au développement durable, 2009. CORINE Land Cover, France, Guide d'utilisation. Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du développement durable et de l'Aménagement du territoire, Paris, 22 p.
- Confalonieri M., Fornasier F., Ursino A., Boccardi F., Pintus B. et Odoardi M., 2001. The potential of near infrared reflectance spectroscopy as a tool for the chemical characterisation of agricultural soils. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 9, 2, 123-131.
- Coûteaux M.-M., Berg B. et Rovira P., 2003. Near infrared reflectance spectroscopy for determination of organic matter fractions including microbial biomass in coniferous forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 35, 12, 1587-1600.
- Coûteaux M. M., McTiernan K. B., Berg B., Szuberla D., Dardenne P. et Bottner P., 1998. Chemical composition and carbon mineralisation potential of scots pine needles at different stages of decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*, 30, 5, 583-595.
- Cozzolino D., Kwiatkowski M. J., Damberg R. G., Cynkar W. U., Janik L. J., Skouroumounis G. et Gishen M., 2008. Analysis of elements in wine using near infrared spectroscopy and partial least squares regression. *Talanta*, 74, 4, 711-716.
- Dalal R. C. et Henry R. J., 1986. Simultaneous Determination of Moisture, Organic Carbon, and Total Nitrogen by Near Infrared Reflectance Spectrophotometry. *Soil Science Society of America Journal*, 50, 1, 120-123.
- Davidson D. A., Carter S., Boag B., Long D., Tipping R. et Tyler A., 1999. Analysis of pollen in soils: processes of incorporation and redistribution of pollen in five soil profile types. *Soil Biology and Biochemistry*, 31, 5, 643-653.

- de Freitas H. A., Pessenda L. C. R., Aravena R., Gouveia S. E. M., de Souza Ribeiro A. et Boulet R., 2001. Late Quaternary Vegetation Dynamics in the Southern Amazon Basin Inferred from Carbon Isotopes in Soil Organic Matter. *Quaternary Research*, 55, 1, 39-46.
- De Valk E. J., 1981. Late Holocene and present vegetation of the Kastelberg (Vosges, France). Thèse, State University of Utrecht, Utrecht, 294 p.
- Deiller A.-F., 2003. Régénération des espèces ligneuses dans les forêts alluviales rhénanes à bois du en Alsace : dynamique, stratégies, facteurs. Thèse, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 167 p.
- Delègue M.-A., Fuhr M., Schwartz D., Mariotti A. et Nasi R., 2001. Recent origin of a large part of the forest cover in the Gabon coastal area based on stable carbon isotope data. *Oecologia*, 129, 1, 106-113.
- Demoule J.-P., 2007. La révolution néolithique en France. La Découverte, Paris, 179 p.
- Denny C. S. et Goodlett J. C., 1956. Microrelief resulting from fallen trees. US Geological Survey, professional paper, 288, 59-66.
- Desjardins T., Andreux B., Volkoff B. et Cerri C. C., 1994. Organic carbon and  $^{13}\text{C}$  contents in soils and soil size-fractions, and their changes due to deforestation and pasture installation in eastern Amazonia. *Geoderma*, 61, 103-118.
- Desjardins T., Filho A. C., Mariotti A., Chauvel A. et Girardin C., 1996. Changes of the forest-savanna boundary in Brazilian Amazonia during the Holocene revealed by isotope ratios of organic carbon. *Oecologia*, 108, 749-756.
- Dick D. P., Nunes Gonçalves C., Dalmolin R. S. D., Knicker H., Klamt E., Kögel-Knabner I., Simões M. L. et Martin-Neto L., 2005. Characteristics of soil organic matter of different Brazilian Ferralsols under native vegetation as a function of soil depth. *Geoderma*, 124, 3-4, 319-333.
- Doll D., 1985. L'évolution des essences forestières dans le canton de Munster (1850-1984). *Revue Forestière Française*, 37, 6, 491-500.
- Dunn B. W., Batten G. D., Beecher H. G. et Ciavarella S., 2002. The potential of near-infrared reflectance spectroscopy for soil analysis — a case study from the Riverine Plain of south-eastern Australia. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 42, 5, 607-614.
- Dupouey J.-L., Sciama D., Laffite J.-D., George-Leroy M. et Dambrine E., 2007. Impact des usages agricoles antiques sur la végétation en forêt de Saint-Amond : interaction avec le traitement sylvicole actuel. Actes du colloque: «La mémoire des forêts», Nancy, 14-16 dec. 2004, 181-189.
- Dupuis J., 1966. Carte pédologique de la France à l'échelle du millionième. Commission de la carte pédologique de la France, Paris, 2 p.
- Ertlen D., 2005. Utilisation de la méthode NIRS (Near InfraRed Spectrometry) pour caractériser la source végétale des matières organiques du sol. Aspects méthodologiques et premiers résultats sur des milieux tempérés et tropicaux (Vosges, Cameroun). Mémoire de DEA, Faculté de Géographie, Strasbourg, 40 p.

- Ertlen D., Schwartz D. et Brunet D. (sous presse). La spectrométrie dans le proche infrarouge (SPIR) appliquée à la matière organique des sols : un outil de reconstitution de l'histoire des végétations aux échelles locales. Perspectives et limites d'une méthode qualitative en cours d'élaboration. In : D. Galop (éd.), Actes Coll. RTP « Paysage et Environnement. De la reconstitution du passé aux modèles prospectifs », 27-30 sept. 2006, Chilhac, PUFC, p. 45-54
- Ertlen D., Schwartz D., Brunet D., 2006. La spectrométrie dans le proche infrarouge (SPIR) appliquée à la matière organique des sols. Un outil de reconstitution de l'histoire des végétations aux échelles locales. Poster, Colloque RTP « Paysage et environnement : de la reconstitution du passé aux modèles prospectifs », 27-30 sept., Chilhac
- Ertlen D., Schwartz D., Brunet D., 2007a. Identification de la source végétale de la matière organique des sols par SPIR, Communication orale aux 6èmes rencontres HélioSPIR, « La spectrométrie proche infrarouge en Sciences du Sol », 25-26 oct., Grenoble (+ résumé 1 p.).
- Ertlen D., Schwartz D., Brunet D., 2007b. Utilisation de la spectrométrie dans le proche infrarouge (SPIR) pour déterminer la source végétale de la matière organique des sols. Comm. orale aux 9es Journées Nationales de l'Étude des Sols, 3-5 avril, Angers (+ résumé 2 p.)
- Ertlen D., Schwartz D., Brunet D., 2008. Near infrared spectroscopy as a tool to identify soil organic matter origin. Comm. orale à Eurosoil, 25-29 août, Vienna, Austria (+ résumé p.137)
- Ertlen D., Schwartz D., Brunet D., Schneider N., Gebhardt A., Boës E., 2009a. Identification de la source végétale des matières organiques du sol par spectroscopie proche infrarouge. Exemples d'applications à des paléosols alsaciens en contexte archéologique. Poster au colloque Archéométrie, 6-10 avril, Montpellier (+ com. orale + résumé p. 118)
- Ertlen D., Schwartz D. et Brunet D. 2009b. Reconstitution de paléovégétations par l'étude de la matière organique des sols en spectroscopie proche infrarouge (SPIR). Comm. orale aux 10es Journées d'Étude des Sols, 11-15 mai, Strasbourg (+ résumé p. 23)
- Ertlen D., Schwartz D., Trautmann M., Webster R. et Brunet D. (sous presse). Discriminating between organic matter in soil from grass and forest by near infrared spectroscopy (NIRS). *European Journal of Soil Science*.
- Ertlen D. et Schwartz D. (accepté) Utilisation d'archives géohistoriques dans une démarche de mise au point d'une nouvelle méthode paléoécologique. *Géocarrefour*, 11 p.+ figures
- Eusterhues K., Rumpel C., Kleber M. et Kögel-Knabner I., 2003. Stabilisation of soil organic matter by interactions with minerals as revealed by mineral dissolution and oxidative degradation. *Organic Geochemistry*, 34, 12, 1591-1600.
- Eusterhues K., Rumpel C. et Kögel-Knabner I., 2007. Composition and radiocarbon age of HF-resistant soil organic matter in a Podzol and a Cambisol. *Organic Geochemistry*, 38, 8, 1356-1372.

- Fedoroff N. et Courty M. A., 2002. Paléosols et sols reliques. In : Miskovsky J. C. Géologie de la préhistoire, Association pour l'étude de l'environnement géologique de la préhistoire, Paris, p. 277-316.
- Fedoroff N., Courty M. A., Thompson M. L. et Lowell A. D., 1990. Micromorphological Evidence of Paleoenvironmental Change in Pleistocene and Holocene Paleosols. In : Developments in Soil Science, Elsevier, Amsterdam, p. 653-665.
- Feller C., 1994. La matière organique dans les sols tropicaux à argile 1:1. Recherche de compartiments organiques fonctionnels. Une approche granulométrique. Thèse, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 393 p.
- Ferdier A., Malrain F., Mattern V., Meniel P., Nissen-Jaubert A. et Pradat B., 2006. Histoire de l'agriculture en Gaule 500 av. J.-C.-1000 apr. J.-C. Errance, Paris, 231 p.
- Fernández Pierna J. A. et Dardenne P., 2008. Soil parameter quantification by NIRS as a Chemometric challenge at Chimimétrie 2006. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 91, 1, 94-98.
- Flageollet J.-C., 2003. Sur les traces des glaciers vosgiens. CNRS, Paris, 212 p.
- Foley W. J., McIlwee A., Lawler I., Aragonés L., Woolnough A. P. et Berding N., 1998. Ecological applications of near infrared reflectance spectroscopy - a tool for rapid, cost-effective prediction of the composition of plant and animal tissues and aspects of animal performance. Oecologia, 116, 293-305.
- Fourty T., Baret F., Jacquemoud S., Schmuck G. et Verdebout J., 1996. Leaf optical properties with explicit description of its biochemical composition: Direct and inverse problems. Remote Sensing of Environment, 56, 2, 104-117.
- Fu X., Ying Y., Zhou Y. et Xu H., 2007. Application of probabilistic neural networks in qualitative analysis of near infrared spectra: Determination of producing area and variety of loquats. Analytica Chimica Acta, 598, 1, 27-33.
- Gaffey S. J., 1986. Spectral reflectance of carbonate minerals in the visible and near infrared (0.35–2.55  $\mu\text{m}$ ): Calcite, aragonite and dolomite. American Mineralogist, 71, 151-162.
- Gall J. C., 2005. Alsace, des fossiles et des hommes. Une histoire géologique de la plaine rhénane et du massif vosgien. La Nuée Bleue, Strasbourg, 120 p.
- Gall J. C., Grauvogel-Stamm L. et Papier F., 2006. Archives de Grès : l'Alsace il y a 240 millions d'années. Communauté de communes du Pays de la Petite-Pierre, La Petite Pierre, 90 p.
- Galtier O., Dupuy N., Le Dréau Y., Ollivier D., Pinatel C., Kister J. et Artaud J., 2007. Geographic origins and compositions of virgin olive oils determined by chemometric analysis of NIR spectra. Analytica Chimica Acta, 595, 1-2, 136-144.
- Gardner W. S. et Menzel D. W., 1974. Phenolic aldehydes as indicators of terrestrially-derived organic matter in the sea. Geochimica Cosmochimica Acta, 38, 813-822.
- Garnier E., 2004. Terre de conquêtes. La forêt vosgienne sous l'Ancien Régime. Fayard, Paris, 620 p.

- Gass J.-C., 1988. Les forêts de Strasbourg et les conditions de leur appropriation. *Saisons d'Alsace*, 101, 35-50.
- Gebhardt A., 1993. Soil micromorphological evidence of soil deterioration since the Mid-Holocene in Brittany, France. *The Holocene*, 3, 3, 333-341.
- Gebhardt A., 2007. Impacts anthropiques anciens sur les sols forestiers. Quelques études de cas en contexte archéologique et expérimental. Actes du colloque: «La mémoire des forêts», Nancy, 14-16 dec. 2004, 211-218.
- Geladi P., 2003. Chemometrics in spectroscopy. Part 1. Classical chemometrics. *Spectrochimica Acta Part B*, 58, 767-782.
- Genot V., Colinet G., Dardenne P., Billo B., Legrain X. et Bock L., 2007. Etude de la performance de la spectroscopie proche infrarouge pour la mesure de caractéristiques du sol nécessaires au conseil de fumure. Comm. au colloque: "9es Journées Nationales de l'étude de Sols", Angers, 3-5 avril, résumé 379-380.
- Gerasimov I. P., 1971. Nature and originality of paleosols. In : Yaalon D. H., *Paleopedology. Origin, nature and dating of paleosols*. ISSS/Israel Univ. Press, Jerusalem, p. 15-27.
- Geyh M. A., Benzler J. H. et Roeschmann G., 1971. Problems of dating pleistocene and holocene soils by radiometric methods. In : Yaalon D. H., *Paleopedology. Origin, nature and dating of paleosols*. ISSS/Israel Univ. Press, Jerusalem, p. 63-75.
- Ghosh S. et Rodgers J., 2001. NIR Analysis of Textiles. In : Burns D. A. et Ciurczack E. W., *Handbook of Near-Infrared Analysis*, p. 573-608.
- Gillon D. et David J.-F., 2001. The use of near infrared reflectance spectroscopy to study chemical changes in the leaf litter consumed by saprophageous invertebrates. *Soil Biology and Biochemistry*, 33, 2159-2161.
- Gillon D., Houssard C. et Joffre R., 1999. Using near-infrared reflectance spectroscopy to predict carbon, nitrogen and phosphorus content in heterogeneous plant material. *Oecologia*, 118, 2, 173-182.
- Gillon D. et Joffre R., 1992. Predicting the stage of decay of decomposing leaves by near infrared reflectance spectroscopy. *Canadian Journal of Forestry Research*, 23, 2552-2559.
- Gobat J.-M., Aragno M. et Matthey W. (ed), 2003. *Le sol vivant : bases de pédologie, biologie des sols*. 2e éd. rev. et augm., Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 568 p.
- Goepp S., 2007. Origine, histoire et dynamique des Hautes-Chaumes du massif vosgien. Déterminismes environnementaux et actions de l'Homme. Thèse, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 286 p.
- Goepp S. et Schwartz D., 2007. Les rankers cryptopodzoliques des Hautes-Chaumes des Vosges. Comm. au colloque: "Actes des 9es Journées nationales de l'Etude des Sols", Angers, résumé 97-98.

- Goepp S., Schwartz D., Thinon M. et Jeunesse C., 2007. Pédoanthracologie, dynamiques de végétation et anthropisation dans les Vosges (Hautes-Rhin, France). Actes du colloque: «La mémoire des forêts», Nancy, 14-16 dec. 2004, 35-44.
- Gomez C., Viscarra Rossel R. A. et McBratney A. B., 2008. Soil organic carbon prediction by hyperspectral remote sensing and field vis-NIR spectroscopy: An Australian case study. *Geoderma*, 146, 3-4, 403-411.
- González-Martín I., Hernández-Hierro J. M., Morón-Sancho R., Salvador-Esteban J., Vivar-Quintana A. et Revilla I., 2007. Determination of the percentage of milk (cow's, ewe's and goat's) in cheeses with different ripening times using near infrared spectroscopy technology and a remote reflectance fiber-optic probe. *Analytica Chimica Acta*, 604, 2, 191-196.
- Grossman Y. L., Ustin S. L., Jacquemoud S., Sanderson E. W., Schmuck G. et Verdebout J., 1996. Critique of stepwise multiple linear regression for the extraction of leaf biochemistry information from leaf reflectance data. *Remote Sensing of Environment*, 56, 3, 182-193.
- Guerrero C., Mataix-Solera J., Arcenegui V., Mataix-Beneyto J. et Gomez I., 2007. Near-Infrared Spectroscopy to Estimate the Maximum Temperatures Reached on Burned Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 71, 3, 1029-1037.
- Guggenberger G., Christensen B. T. et Zech W., 1994. Land-use effects on the composition of organic matter in particle-size separates of soil: I. Lignin and carbohydrate signature. *European Journal of Soil Science*, 45, 4, 449-458.
- Guggenberger G., Zech W., Haumaier L. et Christensen B. T., 1995. Land-use effects on the composition of organic matter in particle-size separates of soils: II. CPMAS and solution  $^{13}\text{C}$  NMR analysis. *European Journal of Soil Science*, 46, 1, 147-158.
- Guillet B., 1972. Relation entre l'histoire de la végétation et la podzolisation dans les Vosges. Thèse, Université de Nancy, Nancy, 112 p.
- Guillet B., 1979. Etude du renouvellement des matières organiques des sols par les radioisotopes ( $^{14}\text{C}$ ). In : Bonneau M. et Souchier B. *Pédologie 2. Constituants et propriétés du sol*, p. 210-226.
- Guillet B., 1990. Le vieillissement des matières organiques et des associations organo-minérales des andosols et des podzols. *Science du Sol*, 28, 4, 285-300.
- Hammond A. P., Goh K. M., Tonkin P. J. et Manning M. R., 1991. Chemical pretreatments for improving the radiocarbon dates of peats and organic silts in a gley podzol environment: Grahams Terrace, North Westland. *New Zealand Journal of Geology & Geophysics*, 34, 2, 191-194.
- Hartmann H. P. et Appel T., 2006. Calibration of near infrared spectra for measuring decomposing cellulose and green manure in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 38, 5, 887-897.
- Hauteville Y., Michels R., Malartre F. et Trouiller A., 2006. Vascular plant biomarkers as proxies for palaeoflora and palaeoclimatic changes at the Dogger/Malm transition of the Paris Basin. *Organic Geochemistry*, 37, 610-625.

- Hebting Y., Schaeffer P., Behrens A., Adam P., Schmitt G., Schneckenburger P., Bernasconi S. et Albrecht P., 2006. Biomarker evidence for a major preservation pathway of sedimentary organic carbon. *Science*, 312, 1627-1631.
- Hedde M., Lavelle P., Joffre R., Jiménez J. J. et Decaëns T., 2005. Specific functional signature in soil macro-invertebrate biostructures. *Functional Ecology*, 19, 785-793.
- Hedges J. I., Ertel J. R. et Léopold E. B., 1982. Lignin geochemistry of a late Quaternary sediment core from Lake Washington. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 46, 1869-1877.
- Hedges J. I. et Mann D. C., 1979a. The characterization of plant tissues by their lignin oxidation products. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 43, 1803-1807.
- Hedges J. I. et Mann D. C., 1979b. The lignin geochemistry of marine sediments from the southern Washington coast. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 43, 1809-1818.
- Henderson T. L., Baumgardner M. F., Franzmeier D. P., Stott D. E. et Coster D. C., 1992. High Dimensional Reflectance Analysis of Soil Organic Matter. *Soil Science Society of America Journal*, 56, 3, 865-872.
- Hetier J., Guillet B., Brousse R., Delibrajs G. et Maury R., 1983. <sup>14</sup>C dating of buried soils in the volcanic Chaine des Puys (France). *Bulletin of Volcanology*, 46, 2, 193-201.
- Himly F., 1959. Inventaire principal des cartes et plans anciens. Archives Départementales du Bas-Rhin, Strasbourg.
- Hindle P. H., 2001. Historical Development. In : Burns D. A. et Ciurczack E. W., *Handbook of Near-Infrared Analysis*, Marcel Dekker, New-York, p.1-8.
- Hiukka R., 1998. A multivariate approach to the analysis of pine needle samples using NIR. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 44, 1-2, 395-401.
- Howard M., 2001. Qualitative Discriminant Analysis. In : Burns D. A. et Ciurczack E. W., *Handbook of Near-Infrared Analysis*, Marcel Dekker, New-York, p. 363-400.
- Jabiol B., Brethes A., Brun J.-J., Ponge J.-F. et Toutain F., 1994. Une classification morphologique et fonctionnelle des formes d'humus. Propositions de Référentiel Pédologique. *Revue Forestière Française*, 46, 2, 152-166.
- Jabiol B., Brêthes A., Ponge J.-F., Toutain F. et Brun J. J., 1995. L'humus sous toutes ses formes. CRDP, Nancy, 63 p.
- Jackson S. T. et Kearsley J. B., 1998. Quantitative representation of local forest composition in forest floor pollen assemblages. *Journal of Ecology*, 86, 3, 474-490.
- Jacob J.-C., 1984. Landes de Westhalten. *Bulletin de la Société Industrielle de Mulhouse*, 795, 4, 3.
- Jacob J., Disnar J. R., Boussafir M., Spadano Albuquerque A. L., Sifeddine A. et Turcq B., 2005. Pentacyclic triterpene methyl ethers in recent lacustrine sediments (Lagoa do Caço, Brazil). *Organic Geochemistry*, 36, 449-461.

- Jacob J., Disnar J.R., Bardoux G., 2008. Carbon isotope evidence for sedimentary miliacin as a tracer of *Panicum miliaceum* (broomcorn millet) in the sediments of lake le Bourget (French Alps). *Organic Geochemistry*, 39, 1077-1080.
- Jehin P., 1993. Les Hommes contre la forêt. L'exploitation des forêts dans le Val d'Orbey au XVIIIe siècle. La Nuée Bleue, Strasbourg.
- Jenkinson D. S. et Coleman K., 2008b. The turnover of organic carbon in subsoils. Part 2. Modelling carbon turnover. *European Journal of Soil Science*, 59, 2, 400-413.
- Jenkinson D. S., Harkness D. D., Vance E. D., Adams D. E. et Harrison A. F., 1992. Calculating net primary production and annual input of organic matter to soil from the amount and radiocarbon content of soil organic matter. *Soil Biology & Biochemistry*, 24, 4, 295-308.
- Jenkinson D. S., Poulton P. R. et Bryant C., 2008a. The turnover of organic carbon in subsoils. Part 1. Natural and bomb radiocarbon in soil profiles from the Rothamsted long-term field experiments. *European Journal of Soil Science*, 59, 2, 391-399.
- Jenkinson D. S. et Rayner J. H., 1977. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Science*, 123, 298-305.
- Jocteur Monrozier L. et Duchaufour P., 1986. Données récentes sur l'humification. *Science du sol*, 25, 4, 337-388.
- Joffre R., Ågren G. I., Gillon D. et Bosatta E., 2001. Organic matter quality in ecological studies : theory meets experiment. *Oikos*, 93, 451-458.
- Joffre R., Gillon D., Dardenne P., Agneessens R. et Biston R., 1992. The use of near-infrared reflectance spectroscopy in litter decomposition studies. *Annales des Sciences Forestières*, 49, 481-488.
- John B., Yamashita T., Ludwig B. et Flessa H., 2005. Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soils under different types of land use. *Geoderma*, 128, 1-2, 63-79.
- Juteau T. et Rocci G., 1965. Contribution à l'étude pétrographique du massif volcanique dévonien de Schirmeck (Bas-Rhin). *Bulletin du Service de la carte géologique Alsace-Lorraine*, 18, 3, 145-176.
- Juvigné E., 1977a. La zone de dispersion des poussières émises par une des dernières éruptions du volcan du Laachersee (Eifel). *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.*, 21, 3, 323-342.
- Juvigné E., 1977b. Une retombée de poussières volcaniques au nord du massif central français. *Revue de Géographie Physique et de Géologie Dynamique*, 19, 3, 235-240.
- Kelley S. S., Jellison J. et Goodell B., 2002. Use of NIR and pyrolysis-MBMS coupled with multivariate analysis for detecting the chemical changes associated with brown-rot biodegradation of spruce wood. *FEMS Microbiology Letters*, 209, 1, 103-107.
- Kelly E. F., Amundson R. G., Marino B. D. et Deniro M. J., 1991. Stable isotope ratios of carbon in phytoliths as a quantitative method of monitoring vegetation and climate change. *Quaternary Research*, 35, 2, 222-233.

- Kiem R. et Kögel-Knabner I., 2003. Contribution of lignin and polysaccharides to the refractory carbon pool in C-depleted arable soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 35, 1, 101-118.
- Koerner W., 1999. Impacts des anciennes utilisations agricoles sur la fertilité du milieu forestier actuel. Thèse, Université Diderot, Paris, 188 p.
- Koerner W., Benoît M., Dambrine E. et Dupouey J.-L., 1999a. Influence des anciennes pratiques agricoles sur la végétation et les sols des forêts reboisées dans le massif vosgien. *Revue Forestière Française*, 51, 2, 231-238.
- Koerner W., Dambrine E., Dupouey J.-L. et Benoît M., 1999b.  $\delta^{15}\text{N}$  of forest soil and understorey vegetation reflect the former agricultural land use. *Oecologia*, 121, 421-425.
- Koerner W., Dupouey J.-L., Dambrine E. et Benoît M., 1997. Influence of past land use on the vegetation and soils of present day forest in the Vosges mountains. *Journal of Ecology*, 85, 351-358.
- Kögel-Knabner I., 2000. Analytical approaches for characterizing soil organic matter. *Organic Geochemistry*, 31, 7-8, 609-625.
- Kögel-Knabner I., 2002. The macromolecular organic composition of plant and microbial residues as inputs to soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 34, 2, 139-162.
- Koller R. et Party J.-P. (ed), 1994. Guide des sols d'Alsace. Région Alsace, Strasbourg.
- Kooistra L., Wanders J., Epema G. F., Leuven R. S. E. W., Wehrens R. et Buydens L. M. C., 2003. The potential of field spectroscopy for the assessment of sediment properties in river floodplains. *Analytica Chimica Acta*, 484, 2, 189-200.
- Lagacherie P., Baret F., Feret J.-B., Madeira Netto J. et Robbez-Masson J. M., 2008. Estimation of soil clay and calcium carbonate using laboratory, field and airborne hyperspectral measurements. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3, 825-835.
- Langhor R., 1993. Type of tree windthrow, their impact on the environment and their importance for the understanding of archaeological excavation data. *Helinium*, 33, 1, 36-49.
- Langhor R., 2001. L'anthropisation du paysage pédologique agricole de la Belgique depuis le Néolithique ancien - Apports de l'Archéopédologie. *Etude et Gestion des Sols*, 8, 2, 103-117.
- Le Bas C., 2007. Carte des sols dominant de France. INRA Unité INFOSOL, Orléans
- Legros J. P., 2007. Les grands sols du monde. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 574 p.
- Leifeld J. et Kögel-Knabner I., 2005. Soil organic matter fractions as early indicators for carbon stock changes under different land-use? *Geoderma*, 124, 1-2, 143-155.
- Libby W., 1962. Radiocarbon dating. Univ. Chicago press, Chicago, 175 p.

- Lobell D. B. et Asner G. P., 2002. Moisture Effects on Soil Reflectance. *Soil Science Society of America Journal*, 66, 3, 722-727.
- Ludwig B., Khanna P. K., Bauhus J. et Hopmans P., 2002. Near infrared spectroscopy of forest soils to determine chemical and biological properties related to soil sustainability. *Forest Ecology and Management*, 171, 121-132.
- Luib F., 1907. *Die Vogesen : 35 Naturaufnahmen*.
- Mahato S. B., Nandy A. K. et Roy G., 1992. Triterpenoids. *Phytochemistry*, 31, 2199-2249.
- Malley D. F., Yesmin L., Wray D. et Edwards S., 1999. Application of near-infrared spectroscopy in analysis of soil mineral nutrients. *Soil Science and Plant Analysis*, 30, 999 - 1012.
- Malller L. A. et Lutringer J. J., 2004. Les fermes et les refuges du massif du Rossberg. *Bulletin du cercle cartophile de Thann et de la Vallée de la Thur*, 3, 1-60.
- Maman O., 1997. Analyse des produits d'électrolyse de la lignine par électrophorèse capillaire : application à la reconnaissance de signatures d'écosystèmes dans les sols, les paléosols et les sédiments. Thèse, Orléans, 119 p.
- Maman O., Marseille F., Guillet B., Disnar J.-R. et Morin P., 1996. Separation of phenolic aldehydes, ketones and acids from lignin degradation by capillary zone electrophoresis. *Journal of Chromatography A*, 755, 1, 89-97.
- Mariotti A. et Peterschmitt E., 1994. Forest savanna ecotone dynamics in India as revealed by carbon isotope ratios of soil organic matter. *Oecologia*, 97, 4, 475-480.
- Martens H. A. et Dardenne P., 1998. Validation and verification of regression in small data sets. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 44, 1-2, 99-121.
- Martin C., 2000. Analyse des monomères de la lignine de sols de prairie et de sols forestiers échantillonnés au Rossberg dans les Vosges. Mémoire de Maîtrise de science de l'environnement, Faculté de géographie, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 25 p.
- McBratney A. B., Minasny B. et Viscarra Rossel R., 2006. Spectral soil analysis and inference systems: A powerful combination for solving the soil data crisis. *Geoderma*, 136, 1-2, 272-278.
- McCarty G. W., Reeves J. B., III, Reeves V. B., Follett R. F. et Kimble J. M., 2002. Mid-Infrared and Near-Infrared Diffuse Reflectance Spectroscopy for Soil Carbon Measurement. *Soil Science Society of America Journal*, 66, 2, 640-646.
- McClure W. F., 2001. Analysis using Fourier transforms. In : Burns D. A. et Ciurczack E. W., *Handbook of Near-Infrared Analysis*, p. 261-305.
- McTiernan K. B., Coûteaux M.-M., Berg B., Calvo de Anta R., Gallardo A., Kratz W., Piussi P., Remacle J. et Virzo de Santo A., 2003. Changes in chemical composition of *Pinus sylvestris* needle litter during decomposition along a European coniferous forest climatic transect. *Soil Biology and Biochemistry*, 35, 801-812.

- McTiernan K. B., Garnett M. H., Mauquoy D., Ineson P. et Côtéaux M.-M., 1998. Use of near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS) in palaeoecological studies of peat. *The Holocene*, 8, 6, 729-740.
- Moron A. et Cozzolino D., 2002. Application of near infrared reflectance spectroscopy for the analysis of organic C, total N and pH in soils of Uruguay. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 10, 215-221.
- Mouazen A. M., Karoui R., De Baerdemaeker J. et Ramon H., 2006. Characterization of Soil Water Content Using Measured Visible and Near Infrared Spectra. *Soil Science Society of America Journal*, 70, 4, 1295-1302.
- Munaut A. V., 1967. Recherches paléocologiques en basse et moyenne Belgique. *Acta Geographica Lovaniensia*, 6, 191 p.
- Mutuo P. K., Shepherd K. D., Albrecht A. et Cadisch G., 2006. Prediction of carbon mineralization rates from different soil physical fractions using diffuse reflectance spectroscopy. *Soil Biology and Biochemistry*, 38, 7, 1658-1664.
- Nierop K. G. J., van Lagen B. et Buurman P., 2001. Composition of plant tissues and soil organic matter in the first stages of a vegetation succession. *Geoderma*, 100, 1-2, 1-24.
- Niranjan Reddy V. L., Ravikanth V., Prabhakar Rao T., Diwan P. V. et Venkateswarlu Y., 2001. A new triterpenoid from the fern *Adiantum lunulatum* and evaluation of antibacterial activity. *Phytochemistry*, 56, 173-175.
- Office National des Forêts, 1997. Forêt domaniale de Guebwiller (Haut-Rhin) : Réserve biologique domaniale. ONF, Guebwiller.
- Ohmoto T., Ikuse M. et Natori S., 1970. Triterpenoids of the Gramineae. *Phytochemistry*, 9, 2137-2148.
- Otto A. et Simoneit B. R. T., 2001. Chemosystematics and diagenesis of terpenoids in fossil conifer species and sediment from the Eocene Zeitz formation, Saxony, Germany. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 65, 3505-3527.
- Otto A., Simoneit B. R. T. et Rember W. C., 2005. Conifer and angiosperm biomarkers in clay sediments and fossil plants from the Miocene Clarkia formation, Idaho, USA. *Organic Geochemistry*, 36, 907-922.
- Otto A. et Wilde V., 2001. Sesqui-, di-, and triterpenoids as chemosystematic markers in extant conifers. A review. *The Botanical Review*, 297, 1543-1545.
- Palmborg C. et Nordgren A., 1996. Partitioning the variation of microbial measurements in forest soils into heavy metal and substrate quality dependent parts by use of near infrared spectroscopy and multivariate statistics. *Soil Biology and Biochemistry*, 28, 6, 711-720.
- Pansu M. et Gautheyrou J., 2003. L'analyse du sol, minéralogique, organique et minérale. Springer, Paris, 993 p.
- Pant P. et Rastogi P., 1979. The Triterpenoids. *Phytochemistry*, 18, 1095-1108.

- Parmentier D., 2007. Vosges. Massif d'histoire, terre de liberté. La Nuée Bleue, Strasbourg, 177 p.
- Parton W. J., Sanford R. L., Sanchez P. A. et Stewart J. W. B., 1989. Modelling soil organic matter in tropical soils. In : Coleman K., Oades J. M. et Uehara G., Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems, p. 153-171.
- Pescator B., 1984. Les Chablis. Mise au point et premiers résultats de mesure dans le bassin versant de la Petite Fecht (Vosges). Mémoire de Maîtrise, Faculté de géographie, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 169 p.
- Pessenda L. C. R., Aravena R., Melfi A. J., Telles F. C., Boulet R., Valencia E. P. E. et Tomazello M., 1996. The use of carbon isotopes ( $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$ ) in soil to evaluate vegetation changes during the Holocene in central Brazil. Radiocarbon, 38, 191-201.
- Pessenda L. C. R., Boulet R., Aravena R., Rosolen V., Gouveina S. E. M., Ribeiro A. S. et Lamotte M., 2001. Origin and dynamics of soil organic matter and vegetation changes during the Holocene in a forest-savanna transition zone, Brazilian Amazon region. The Holocene, 11, 250-254.
- Piperno D. R., 1988. Phytolith analysis. An archaeological and geological perspective. Academic press, San Diego, 280 p.
- Piperno D. R. et Becker P., 1996. Vegetational History of a Site in the Central Amazon Basin Derived from Phytolith and Charcoal Records from Natural Soils. Quaternary Research, 45, 2, 202-209.
- Polach H. A. et Costin A. B., 1971. Validity of soil organic matter radiocarbon dating: buried soils in snowy mountains, southeastern Australia as example. In : Yaalon D. H., Paleopedology. Origin, nature and dating of paleosols. ISSS/Israel Univ. Press, Jerusalem, p. 63-75.
- Quideau S. A., Anderson M. A., Graham R. C., Chadwick O. A. et Trumbore S. E., 2000. Soil organic matter processes: characterization by  $^{13}\text{C}$  NMR and  $^{14}\text{C}$  measurements. Forest Ecology and Management, 138, 1-3, 19-27.
- Ramdane M., 1981. Approche géographique de l'hydromorphie et rapports avec l'utilisation du sol. Exemple du Sundgau, Alsace, France. Thèse, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 102 p.
- Rameau J.-C., Mansion D. et Dumé G., 1993. Flore Forestière française : guide écologique illustré. Institut pour le développement forestier, Paris, 2421 p.
- Reeves III J., McCarty G. et Meisinger J. J., 1999. Near infrared reflectance spectroscopy for the analysis of agricultural soils. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 7, 3, 179-193.
- Reeves III J., McCarty G. et T. M., 2002. The potential of diffuse reflectance spectroscopy for the determination of carbon inventories in soils. Environmental Pollution, 116, S277-S284.
- REKLIP, 1995. Atlas Climatique du Fossé Rhénan Méridional. Institut für Geowissenschaften, Karlsruhe, 212 p.

- Richardson A. D., Reeves J. B. et Gregoire T. G., 2004. Multivariate analyses of visible/near infrared (VIS/NIR) absorbance spectra reveal underlying spectral differences among dried, ground conifer needle samples from different growth environments. *New Phytologist*, 161, 1, 291-301.
- Rieger J.-P., 1949. Les forêts des Sept communes de la vallée de la Bruche. *Revue d'Alsace*, 89, 124-138.
- Rieley G., Collier R. J., Jones D. M. et Eglinton G., 1991. The biogeochemistry of Ellesmere lake, U.K. – I : Source correlation of leaf wax inputs to the sedimentary lipid record. *Organic Geochemistry*, 17, 901-912.
- Ries-Kaut M., Kintzinger J. P. et Albrecht P., 1988.  $\omega$ -Feruloyloxyacids, a novel class of polar lipids in peat soil. *Naturwissenschaften*, 75, 305-307.
- Riga A., Van Praag H. J. et Brigode N., 1971. Rapport isotopique naturel de l'azote dans quelques sols forestiers et agricoles de Belgique soumis à différents traitements culturaux. *Geoderma*, 6, 213-222.
- Rinnan R. et Rinnan A., 2007. Application of near infrared reflectance (NIR) and fluorescence spectroscopy to analysis of microbiological and chemical properties of arctic soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 39, 1664-1673.
- Rochel X., 2004. Gestion forestière et paysages dans les Vosges d'après les registres de martelages du XVIII<sup>e</sup> siècle. Essai de biogéographie historique. Thèse, Université Nancy 2, Nancy, 489 p.
- Roggo Y., Chalus P., Maurer L., Lema-Martinez C., Edmond A. et Jent N., 2007. A review of near infrared spectroscopy and chemometrics in pharmaceutical technologies. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 44, 3, 683-700.
- Roggo Y., Duponchel L., Ruckebusch C. et Huvenne J.-P., 2003. Statistical tests for comparison of quantitative and qualitative models. *Journal of Molecular Structure*, 654, 253-262.
- Roggo Y., Roesler C. et Ulmschneider M., 2004. Near infrared spectroscopy for qualitative comparison of pharmaceutical batches. *Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 36, 777-786.
- Roose E., 1977. Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest. Vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales. ORSTOM, Paris, 108 p.
- Rosén P., 2005. Total Organic Carbon (TOC) of Lake Water During the Holocene Inferred from Lake Sediments and Near-infrared Spectroscopy (NIRS) in Eight Lakes from Northern Sweden. *Biogeochemistry*, 76, 3, 503-516.
- Ruellan A., 1971. The history of soils : Some problems of definition and interpretation. In : Yaalon D. H., *Paleopedology. Origin, nature and dating of paleosols*. ISSS/Israel Univ. Press, Jerusalem, p. 3-13.
- Rumpel C., Eusterhues K. et Kögel-Knabner I., 2004. Location and chemical composition of stabilized organic carbon in topsoil and subsoil horizons of two acid forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 36, 1, 177-190.

- Rumpel C., Kögel-Knabner I. et Bruhn F., 2002. Vertical distribution, age, and chemical composition of organic carbon in two forest soils of different pedogenesis. *Organic Geochemistry*, 33, 10, 1131-1142.
- Russell C. A., 2003. Sample preparation and prediction of soil organic matter properties by near infra-red reflectance spectroscopy. *Soil Science and Plant Analysis*, 34, 11-12, 1557-1572.
- Scharpenseel H. W. et Becker-Heidmann P., 1992. Twenty-five years of radiocarbon dating soils: paradigm of erring and learning. *Radiocarbon*, 34, 3, 541-546.
- Scharpenseel H. W. et Pietig F., 1969. Alterbestimmung von Böden durch die Radiokohlenstoffdatierungsmethode III Böden mit Bt-Horizon und fossile Schwarzerde. *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Bodenkunde*, 122, 2, 145-153.
- Scharpenseel H. W. et Pietig F., 1970. University of Bonn Natural Radiocarbon measurement III. *Radiocarbon*, 12, 1, 19-39.
- Scharpenseel H. W. et Pietig F., 1971. University of Bonn natural radiocarbon measurements IV. *Radiocarbon*, 13, 2, 189-212.
- Scharpenseel H. W., Ronzani C. et Pietig F., 1968. Comparative age determination on different humic-matter fractions. *Actes du colloque: «Isotopes and radiation in soil organic matter studies.»*, Vienne, 15-16 juillet 1968.
- Schimann H., Joffre R., Roggy J.-C., Lensi R. et Domenach A.-M., 2007. Evaluation of the recovery of microbial functions during soil restoration using near-infrared spectroscopy. *Applied Soil Ecology*, 37, 3, 223-232.
- Schmitt L., 2001. Typologie hydro-géomorphologique fonctionnelle de cours d'eau : Recherche méthodologique appliquée aux systèmes fluviaux d'Alsace. Thèse, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 323 p.
- Schnitzler A., 1988. Typologie phytosociologique, écologie et dynamique des forêts alluviales du complexe géomorphologique ello-rhénan (Plaine Rhénane centrale d'Alsace). Thèse, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 494 p.
- Schnitzler A., 1995. Successional status of trees in gallery forest along the river Rhine. *Vegetation Science*, 6, 479-486.
- Schöning I. et Kögel-Knabner I., 2006. Chemical composition of young and old carbon pools throughout Cambisol and Luvisol profiles under forests. *Soil Biology and Biochemistry*, 38, 8, 2411-2424.
- Schwartz D., 1991. Intérêt de la mesure du  $\delta^{13}\text{C}$  des sols en milieu naturel équatorial pour la connaissance des aspects pédologiques et écologiques des relations savane-forêt. Exemples du Congo. *Cahier de l'Orstom, série Pédologie*, 26, 4, 327-341.
- Schwartz D., 1997. Commentaire à la note de Richard Oslisly, Bernard Peyrot, Salah Abdessadok et Lee White: Le site de Lopé 2: un indicateur de transition écosystémique ca 10 000 BP dans la moyenne vallée de l'Ogooué (Gabon). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science*, 325, 5, 389-391.

- Schwartz D., 2004. Les sols à l'épreuve du temps. Dossier pour la Science, Hors-série "Le temps des datations", p. 45-49.
- Schwartz D., Battmann J., Cloitre M. et Goepp S., 2009. Mise en évidence d'une phase de défrichement sur le Rossberg (68) par l'approche pédologique de microtopographies et leur cartographie LIDAR. Comm. au colloque: "10èmes journées d'étude des sols", Strasbourg, 12-14 mai, résumé p. 45-46.
- Schwartz D., Bernardy L., Jouve-Litaudon C. et Vonna A., 2003. Le Bickenberg à Osenbach (Haut-Rhin). Etude d'un paysage d'enclos médiéval sur les collines calcaires sèches sous-vosgiennes. *Revue géographique de l'Est*, 43, 3, 81-94.
- Schwartz D., Ertlen D., Goepp S., Caspard M., Gebhardt A., Basoge F. et Koupaliantz L., 2008. Etudes actuelles sur un type de parcellaire encore très peu connu en Alsace : les paysages d'enclos. Extension, typologie, éléments de datation. Comm. au colloque: "'Des Hommes aux champs" pour une archéologie des espaces ruraux dans le Nord de la France, du Néolithique au Moyen Age." Caen, 8-9 oct., résumé.
- Schwartz D., Mariotti A., Lanfranchi R. E. et Guillet B., 1986.  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratios of soil organic matter as indicator of vegetation changes in the Congo. *Geoderma*, 39, 97-103.
- Schwartz D., Mariotti A., Trouvé C., van den Borg K. et Guillet B., 1992. Etude des profils isotopiques  $^{13}\text{C}$  et  $^{14}\text{C}$  d'un sol ferrallitique sableux du littoral congolais. Implications sur la dynamique de la matière organique et l'histoire de la végétation. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science*, 315, 11, 1411-1417.
- Schwartz D., Thinon M., Goepp S., Schmitt C., Casner J., Rosique T., Wuscher P., Alexandre A., Dambrine E., Martin C. et Guillet B., 2005. Premières datations directes de défrichements protohistoriques sur les chaumes secondaires des Vosges (Rossberg, Haut-Rhin). Approche pédoanthracologique. *Comptes Rendus Géosciences*, 337, 14, 1250-1256.
- Sgard J., Bresch F. et Canaguier Y., 1976. Les paysages dans l'aménagement du massif vosgien - Schéma d'orientation et d'aménagement du massif vosgien. OREAM Lorraine, OEDA Alsace, Mission régionale de Franche-Comté,, Metz, 67 p.
- Shenk J. S., Workman J. J. J. et Westerhaus M. O., 2001. Application of NIR Spectroscopy to Agricultural Products. In : Burns D. A. et Ciurczack E. W., *Handbook of Near-Infrared Analysis*, Marcel Dekker, New-York, p. 419-474.
- Shepherd K. D., Palm C. A., Gachengo C. N. et Vanlauwe B., 2003. Rapid Characterization of Organic Resource Quality for Soil and Livestock Management in Tropical Agroecosystems Using Near-Infrared Spectroscopy. *Agronomy Journal*, 95, 5, 1314-1322.
- Shepherd K. D. et Walsh M. G., 2002. Development of Reflectance Spectral Libraries for Characterization of Soil Properties. *Soil Science Society of America Journal*, 66, 3, 988-998.
- Sheppard N., Willis H. A. et Rigg J. C., 1985. International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC). Names, symbols, definitions, and units of quantities in optical spectroscopy (Recommendations 1984). *Pure & Applied Chemistry*, 57, 105-120.

- Simoes Lobo P. F., Flexor J. M., Rapaire J. L. et Sieffermann G., 1974. Essai de détermination du temps de résidence des fractions humiques de deux sols ferrallitiques par l'utilisation du radiocarbonate naturel et thermonucléaire. Cahier de l'Orstom, série Pédologie, 12, 1, 115-123.
- Sittler C. et Ochsenbein G., 1986. Tourbières. In : Encyclopédie de l'Alsace, Publitotal, Strasbourg.
- Smith P., Smith J. U., Powlson D. S., McGill W. B., Arah J. R. M., Chertov O. G., Coleman K., Franko U., Frolking S., Jenkinson D. S., Jensen L. S., Kelly R. H., Klein-Gunnewiek H., Komarov A. S., Li C., Molina J. A. E., Mueller T., Parton W. J., Thornley J. H. M. et Whitmore A. P., 1997. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. *Geoderma*, 81, 1-2, 153-225.
- Spielvogel S., Prietzel J. et Kögel-Knabner I., 2007. Changes of lignin phenols and neutral sugars in different soil types of a high-elevation forest ecosystem 25 years after forest dieback. *Soil Biology and Biochemistry*, 39, 2, 655-668.
- Stephens E. P., 1956. The uprooting of trees : a forest process. Comm. au colloque: "Soil Science Society Proceedings", résumé p. 113-197.
- Stevens A., van Wesemael B., Bartholomeus H., Rosillon D., Tychon B. et Ben-Dor E., 2008. Laboratory, field and airborne spectroscopy for monitoring organic carbon content in agricultural soils. *Geoderma*, 144, 1-2, 395-404.
- Stolter C., Julkunen-Tiitto R. et Ganzhorn J. U., 2006. Application of near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) to assess some properties of a sub-arctic ecosystem. *Basic and Applied Ecology*, 7, 2, 167-187.
- Stone E. L., 1975. Windthrow influences on spatial heterogeneity in a forest soil. . *Mitteilungen der Eidgenössischen Anstalt für das Forstliche Versuchswesen*, 51, 77-87.
- Stoner E. R. et Baumgardner M. F., 1981. Characteristic variations in reflectance of surface soils. *Soil Science Society of America Journal*, 45, 1161-1165.
- Talbot M. R. et Johannessen T., 1992. A high resolution palaeoclimatic record for the last 27,500 years in tropical West Africa from the carbon and nitrogen isotopic composition of lacustrine organic matter. *Earth and Planetary Science Letters*, 110, 23-37.
- Talon B., Carcaillet C. et Thinon M., 1998. Etudes pédoanthracologiques des variations de la limite supérieure des arbres au cours de l'Holocène dans les Alpes françaises. *Géographie Physique et Quaternaire*, 52, 2, 195-208.
- Thinon M., 1978. La pédoanthracologie : une nouvelle méthode d'analyse phytocronologique depuis le néolithique. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences série D*, 287, 1203-1205.
- Thinon M., 1992. L'analyse pédoanthracologique : Aspects méthodologiques et applications. Thèse, Université de Aix-Marseille, 317 p.

- Thuriès L., Bonnal L., Davrieux F. et Bastianelli D., 2007. Possible use of near infrared spectroscopy for management of the composting process. Comm. au colloque: "International Conference on Near Infrared Spectroscopy", Chichester, 9-15 avril, résumé 786-788.
- Tipping R., Bunting M. J., Davies A. L., Murray H., Fraser S. et McCulloch R., 2009. Modelling land use around an early Neolithic timber in north east Scotland from high spatial resolution pollen analyses. *Journal of Archaeological Science*, 36, 1, 140-149.
- Toutain F., 1984. Biologie des sols. In : Livre jubilaire du cinquanteaire. AFES, Plaisir, p. 253-271.
- Trendel J.-M., Schaeffer P., Adam P., Ertlen D. et Schwartz D., soumis. Molecular typification of soil surface horizons from the Vosges Massif (France). *Organic Geochemistry*.
- Tricart J. et Killian J., 1979. L'éco-géographie et l'aménagement du milieu naturel. Maspero, Paris, 326 p.
- Trouvé C., Disnar J. R., Mariotti A. et Guillet B., 1996. Changes in the amount and distribution of neutral monosaccharides of savanna soils after plantation of *Pinus* and *Eucalyptus* in the Congo. *European Journal of Soil Science*, 47, 1, 51-59.
- Trumbore S. E., 1993. Comparison of carbon dynamics in tropical and temperate soils using radiocarbon measurements. *Global Biogeochemical Cycles*, 7, 2, 275-290.
- Trumbore S. E., Davidson E. A., de Camargo P. B., Nepstad D. C. et Martinelli L. A., 1995. Belowground cycling of carbon in forests and pastures of eastern Amazonia. *Global Biogeochemical Cycles*, 9, 4, 515-528.
- Tsuzuki K., Ohashi A., Arai Y., Masuda K., Takano A., Shiojima K., Ageta H. et Cai S.-Q., 2001. Triterpenoids from *Adiantum caudatum*. *Phytochemistry*, 58, 363-367.
- Urbano-Cuadrado M., Luque de Castro M. D., Pérez-Juan P. M., García-Olmo J. et Gómez-Nieto M. A., 2004. Near infrared reflectance spectroscopy and multivariate analysis in oenology: Determination or screening of fifteen parameters in different types of wines. *Analytica Chimica Acta*, 527, 1, 81-88.
- Vågen T.-G., Shepherd K. D. et Walsh M. G., 2005. Sensing landscape level change in soil fertility following deforestation and conversion in the highlands of Madagascar using Vis-NIR spectroscopy. *Geoderma*, 133, 281-294.
- van Bergen P. F., Bull I. D., Poulton P. R. et Evershed R. P., 1997. Organic geochemical studies of soils from the Rothamsted Classical Experiments--I. Total lipid extracts, solvent insoluble residues and humic acids from Broadbalk Wilderness. *Organic Geochemistry*, 26, 1-2, 117-135.
- van Bergen P. F., Nott C. J., Bull I. D., Poulton P. R. et Evershed R. P., 1998. Organic geochemical studies of soils from the Rothamsted Classical Experiments--IV. Preliminary results from a study of the effect of soil pH on organic matter decay. *Organic Geochemistry*, 29, 5-7, 1779-1795.

- Vancampenhout K., Dercon G., Buurman P., Swennen R., Cadisch G., Wouters K. et Deckers J., 2008a. Soil organic matter as a proxy for climate and environment in last-interglacial palaeosols. Comm. au colloque: "Eurosoil", Vienna, 25.29 août, résumé p. 137.
- Vancampenhout K., Wouters K., Caus A., Buurman P., Swennen R. et Deckers J., 2008b. Fingerprinting of soil organic matter as a proxy for assessing climate and vegetation changes in last interglacial palaeosols (Veldwezelt, Belgium). *Quaternary Research*, 69, 1, 145-162.
- Vassenev I. I. et Targulian V. O., 2008. Rates and characteristic periods of soil-forming processes activated due to windthrows in spruce forests at the central region of Russia. Comm. au colloque: "Eurosoil", Vienna, 25.29 août, résumé p. 163.
- Velasquez E., Lavelle P., Barrios E., Joffre R. et Reversat F., 2005. Evaluating soil quality in tropical agroecosystems of Colombia using NIRS. *Soil Biology and Biochemistry*, 37, 5, 889-898.
- Velasquez E., Pelosi C., Brunet D., Grimaldi M., Martins M., Rendeiro A. C., Barrios E. et Lavelle P., 2007. This ped is my ped: Visual separation and near infrared spectra allow determination of the origins of soil macroaggregates. *Pedobiologia*, 51, 1, 75-87.
- Viscarra Rossel R. A., 2008. The Soil Spectroscopy Group and the development of a global spectral library. Comm. au colloque: "3rd Global Workshop on Digital Soil Mapping", Logan, Utah, USA, 30 sept. - 3 oct.
- Viscarra Rossel R. A., McGlynn R. N. et McBratney A. B., 2006b. Determining the composition of mineral-organic mixes using UV-vis-NIR diffuse reflectance spectroscopy. *Geoderma*, 137, 1-2, 70-82.
- Viscarra Rossel R. A., Walvoort D. J. J., McBratney A. B., Janik L. J. et Skjemstad J. O., 2006a. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma*, 131, 59-75.
- Vogt H., 1992. Le relief en Alsace. Oberlin, Strasbourg, 239 p.
- von Eller P., 1984. Guide géologique régional. Vosges, Alsace. Masson, Paris, 182 p.
- von Lützw M., Kögel-Knabner I., Ekschmitt K., Flessa H., Guggenberger G., Matzner E. et Marschner B., 2007. SOM fractionation methods: Relevance to functional pools and to stabilization mechanisms. *Soil Biology and Biochemistry*, 39, 9, 2183-2207.
- Walkley A. et Black C. A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposal modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37, 29-38.
- Wang Y., Amundson R. et Trumbore S., 1996. Radiocarbon Dating of Soil Organic Matter. *Quaternary Research*, 45, 3, 282-288.
- Weber A., 1924. Album pour les amis des Vosges.

- Webster E. A., Tilston E. L., Chudek J. A. et Hopkins D. W., 2008. Decomposition in soil and chemical characteristics of pollen. *European Journal of Soil Science*, 59, 3, 551-558.
- Wernert P., 1957. Stratigraphie paléontologique et préhistorique des sédiments quaternaires d'Alsace, Achenheim. Mémoire n°14, Service de la carte géologique d'Alsace Lorraine, 262 p.
- Wetzel D. L., 1983. Near-infrared reflectance analysis. Sleeper among spectroscopic techniques. *Analytical chemistry*, 55, 12, 1165A-1176A.
- Wioland A., 1905. Unter-Elsass : Illustrations-Werk. 100 Ansichten.
- Woillard G., 1978. Grande Pile peat bog : a continuous pollen record for the last 140 000 years. *Quaternary Research*, 9, 1-21.
- Wuscher P., 2000. Problème de méthodologie en archéologie du paysage. L'exemple du massif du Rossberg. Mémoire de Maîtrise d'Histoire, Université Marc Bloch, Strasbourg, 89 p.
- Yaalon D. H., 1971. Soil-forming processes in time and space. In : Yaalon D. H., *Paleopedology. Origin, nature and dating of paleosols*. ISSS/Israel Univ. Press, Jerusalem, p. 29-39.
- Yamashita T., Flessa H., John B., Helfrich M. et Ludwig B., 2006. Organic matter in density fractions of water-stable aggregates in silty soils: Effect of land use. *Soil Biology and Biochemistry*, 38, 11, 3222-3234.
- Žárník M., Samec P. et Friedl M., 2006. Ústav pro hospodářskou úpravu lesů Brandýs nad Labem, pobočka Frýdek. The Forest Management Institute Brandýs n. L., branch Frýdek, Místek, Czech Republic, 5 p.
- Zhao J., Chen Q., Huang X. et Fang C. H., 2006. Qualitative identification of tea categories by near infrared spectroscopy and support vector machine. *Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 41, 1198-1204.

# LISTE DES ANNEXES

## Annexe 1 : Atlas des sites

### Sites du référentiel de surface et profils de sols associés

BBA : pelouse sèche du Bollenberg, sommet Nord-Est.....	283
BBB : pelouse sèche du Bollenberg, sommet Nord-Est.....	284
BBC : pelouse sèche du Bollenberg, sommet Sud .....	285
BBD : pelouse sèche du Bollenberg, sommet Sud .....	286
BBE : pelouse sèche du Bollenberg, sommet Nord-Ouest.....	287
SBA : pelouse sèche du Strangenberg.....	288
SBB : pelouse sèche du Strangenberg.....	289
SBC : pelouse sèche du Strangenberg.....	290
ZKA : pelouse sèche du Zinkoepfle .....	291
ZKB : pelouse sèche du Zinkoepfle .....	292
RCA : prairie pâturée du Thanner Hubel.....	293
RCD : prairie pâturée du Rossberg.....	294
ROS1-2 : alocrisol du Rossberg sous prairie, versant Sud-Ouest (Goepp, 2007) .....	295
ROS 4 : Alocrisol du Rossberg sous prairie, versant Est (Goepp, 2007) .....	296
HUN : ancien pâturage du Hundsruck .....	297
PBC : prairie pâturée du Petit Ballon .....	298
HAC : prairie de fauche du Haicot .....	299
CFA : prairie pâturée du Champ du Feu, Domaine du Vieux Pré.....	300
CFP : profil sous CFA, alocrisol (cambisol).....	300
RCB : prairie du Champ du Feu .....	302
KAC : prairie pâturée du Kastelberg .....	303
KAT : prairie de fauche du Kastelberg .....	304
FAC : prairie pâturée du Falimont.....	305
FAP : profil sous FAC, ranker cryptopodzolique (umbrisol).....	305
FAP / FALI3 : ranker cryptopodzolique du Falimont, sommet (Goepp, 2007) .....	306
FALI1 : alocrisol du Falimont sous hêtraie pionnière, versant Sud-Ouest (Goepp 2007) .....	307
FALI4 : alocrisol du Falimont sous prairie, versant Nord-Est (Goepp 2007).....	308
FALI5 : alocrisol du Falimont sous forêt, versant Nord-Est (Goepp 2007).....	309
GAF1 : ranker cryptopodzolique du Gazon du Faing, sous prairie (Goepp, 2007) .....	310
GAF2 : ranker cryptopodzolique du Gazon du Faing, sous prairie (Goepp, 2007) .....	311
PHOH : alocrisol du Petit Hohneck sous prairie (Goepp 2007) .....	312
CSCH : alocrisol du col du Schaeferthal sous prairie (Goepp 2007) .....	313
MAS : champ bombé sous prairie à Guewenheim .....	314
MUN : champ bombé sous prairie à Griesbach-au-Val .....	314
CAR : hêtraie du Stoeffelhag.....	315
DID : forêt à forte biodiversité, colline St Gall .....	316
HIR : hêtraie du Breitholtz .....	317
BIN : forêt alluviale à forte biodiversité, Rohrzembs .....	318
COL : chênaie alluviale à forte biodiversité de Colmar.....	319
RIB : chênaie alluviale du Ried Brun .....	320
RIG : forêt alluviale à forte biodiversité du Ried Gris .....	321
MUF : forêt à forte biodiversité du Prinzenwald .....	322
MHG : profil sous MUF, gleysol .....	322
MRN : sol hydromorphe du Ried Noir .....	324
EFA, chênaie de l'Elmerforst, forêt de l'Œuvre Notre Dame .....	325
EFP, profil sous EFA : alocrisol (cambisol) .....	325
EFB : hêtraie de l'Elmerforst, forêt de l'Œuvre Notre Dame.....	327
EFC : sapinière, forêt de l'Oedenwald .....	328
EFD : sapinière, forêt de l'Oedenwald .....	329

VST : hêtraie de la réserve V Studenem, CZ.....	330
VSP : profil sous VST, alocrisol (cambisol).....	330
OCC : chênaie-charmaie du Kalkoffen .....	332
OCS : chênaie-sapinière du Kalkoffen.....	333
OSG : chênaie-sapinière du Hohberg.....	334
HKC : chênaie du Haut Koenigsbourg .....	335
PCS : chênaie-sapinière du petit-Ballon .....	336
BLH : chênaie-sapinière, route du Hundsrucken.....	337
PDS : Hêtraie du Plan Diebolt Scherrer.....	338
THA : hêtraie pionnière du Rossberg.....	339
THB : hêtraie-sapinière du Rossberg.....	340
THE : pessière du Rossberg.....	341
ROS3 : alocrisol du Rossberg sous forêt (Goepf 2007) .....	342
RTH : forêt mixte du Rothutel .....	343
FHS: hêtraie-sapinière du Rundkopf, enclave de Rouffach .....	344
DHS : hêtraie-sapinière, forêt domaniale du Donon.....	345
WHS : hêtraie-sapinière du Kohlberg .....	346
TFO3 : alocrisol des Trois Fours, sous hêtraie-sapinière (Goepf, 2007) .....	347
SLF : hêtraie-sapinière de la réserve de Salajka, CZ.....	348
SJK : profil sous SLF, alocrisol (cambisol) (Žárník <i>et al.</i> , 2006) .....	348
Tab. 3.. Basic analytical data – texture in % from locality Salajka 2. ....	349
HER : sapinière, forêt Domaniale du Herrenberg.....	350
LAU : sapinière, forêt Domaniale de Guebwiller .....	351
RPA : pineraie du vallon du Rothbach .....	352
RPB : pineraie du Bruderthal.....	353
GOP : luvisol sur le chantier archéologique de Gottesheim .....	354

## Paléosols

STK : paléosol sous un murger médiéval à Osenbach .....	355
DIN : paléosol sous un murger médiéval à Dinsheim .....	356
HOP1 et HOP2 : paléosols hydromorphes du cône de la Fecht .....	357
HOR, HOW, GRH, SCD : paléosol gallo-romain scellé sous des alluvions .....	357
ZEN : paléosol hydromorphe, chantier du Zenith.....	358
ZMC, ZMK1-2 : paléosols de la stratigraphie Pleistocène de Zemechy .....	359
S7 SD21 : paléosol contenant des artefacts gallo-romains.....	360
S7 SD297 : paléosol scellé sous les vestiges d'une villa romaine .....	360
S7 SD341 : paléosol à proximité de la villa romaine .....	360
S8SD294 : paléosol isohumique scellé sous des colluvions loessiques .....	361
S8SD347 : paléosol isohumique scellé sous des colluvions loessiques .....	361
S8SD305 paléosol (luvisol) scellé sous des colluvions loessiques .....	363
S9 SD 255 : paléosol entaillé par des traces de labours à l'araire .....	363
S9 SD 268 : paléosol hydromorphe scellé sous des colluvions loessiques (Thomas <i>et al.</i> 2008).....	364
S10 SD 278 : paléosol scellé sous un bâtiment gallo-romain (Jodry <i>et al.</i> 2008) .....	364

## **ANNEXE 2A.....** 370

Tableau des longueurs d'onde du proche infrarouge et groupes fonctionnels associés suggérés dans la littérature (compilation auteur) .....	371
--	-----

## **ANNEXE 2 B.....** 376

B Tableau des propriétés chimiques, physiques et biologiques du sol et qualité de la prédiction par spectroscopie proche infrarouge (Cécillon <i>et al.</i> 2009a).....	376
---	-----

## **ANNEXE 3 .....** 379

Nomenclature CORINE Land Cover simplifiée .....	379
---	-----

## BBA : pelouse sèche du Bollenberg, sommet Nord-Est

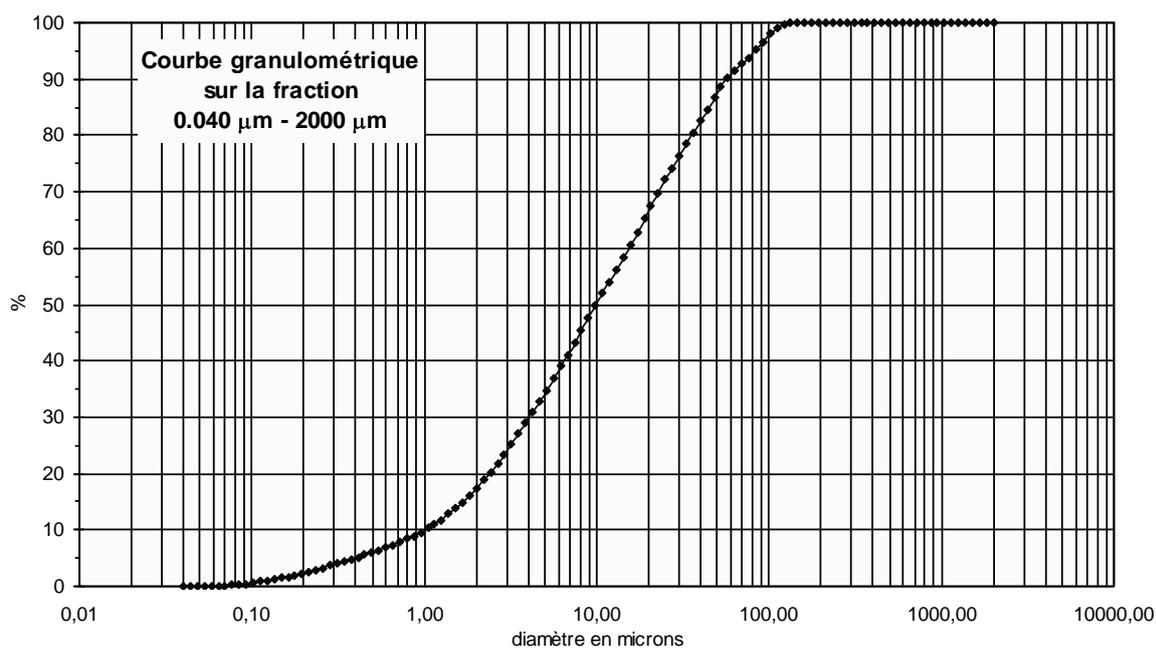


Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Bollenberg	Alti. :	310 m	Formation vég. :	Pelouse sèche
Commune :	Westhalten, 68	Pente :	5°	Principales essences :	Graminées
Lat. :	47°56'38"N	Exposition :	S	Historique :	Milieu ouvert depuis 1760 au moins
Long.:	07°15'48"E				

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	5,45	13,28	6,92	16,1	49,1	21,5	13,3	0

### Type de sol

<b>CPCS :</b>	Rendzine
<b>RP 2008 :</b>	Rendosol
<b>WRB 2006 :</b>	Calcic leptosol
<b>Roche mère</b>	Calcaire



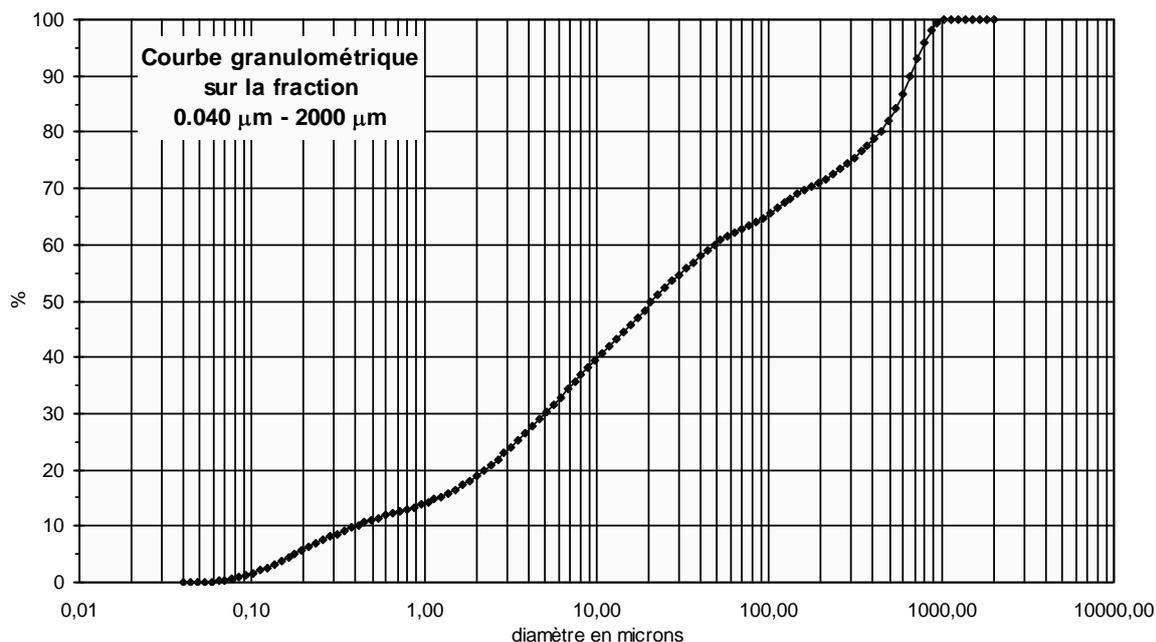
## BBB : pelouse sèche du Bollenberg, sommet Nord-Est

Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Bollenberg	Alti. :	310 m	Formation vég. :	pelouse sèche
Commune :	Westhalten, 68	Pente :	5°	Principales essences :	Prunus spinosa, graminées
Lat. :	47°56'41"N	Exposition :	S-E	Historique :	Milieu ouvert depuis 1760 au moins
Long. :	07°15'58"E				

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	6,47	15,02	7,01	18,1	30,3	11,6	10,9	29,1

### Type de sol

<b>CPCS :</b>	Rendzine
<b>RP 2008 :</b>	Rendosol
<b>WRB 2006 :</b>	Calcic leptosol
<b>Roche mère</b>	Calcaire

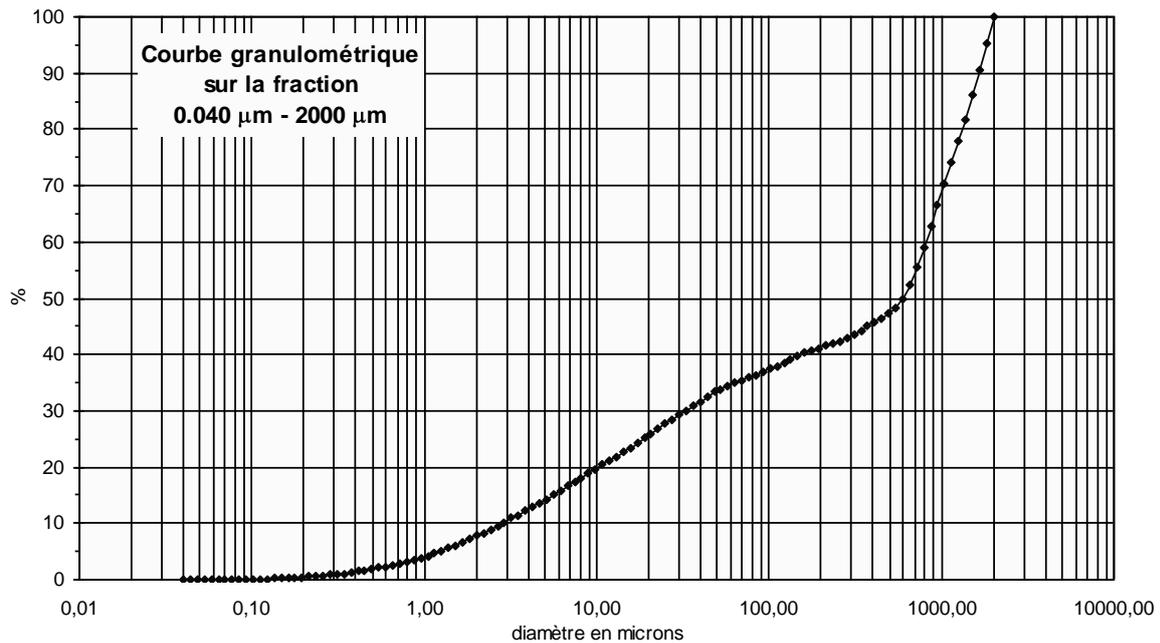


## BBC : pelouse sèche du Bollenberg, sommet Sud

Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Bollenberg	Alti. :	290 m	Formation vég. :	pelouse sèche
Commune :	Orschwihr, 68	Pente :	0°	Principales essences :	Graminées
Lat. :	47°55'54" N	Exposition :	sommet	Historique :	Milieu ouvert depuis 1760 au moins
Long. :	07°14'38" E				

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	8,97	18,61	7,10	7,2	17,9	8,2	7,8	58,9

Type de sol	
CPCS :	Rendzine
RP 2008 :	Rendosol
WRB 2006 :	calcic leptosol
Roche mère	calcaire



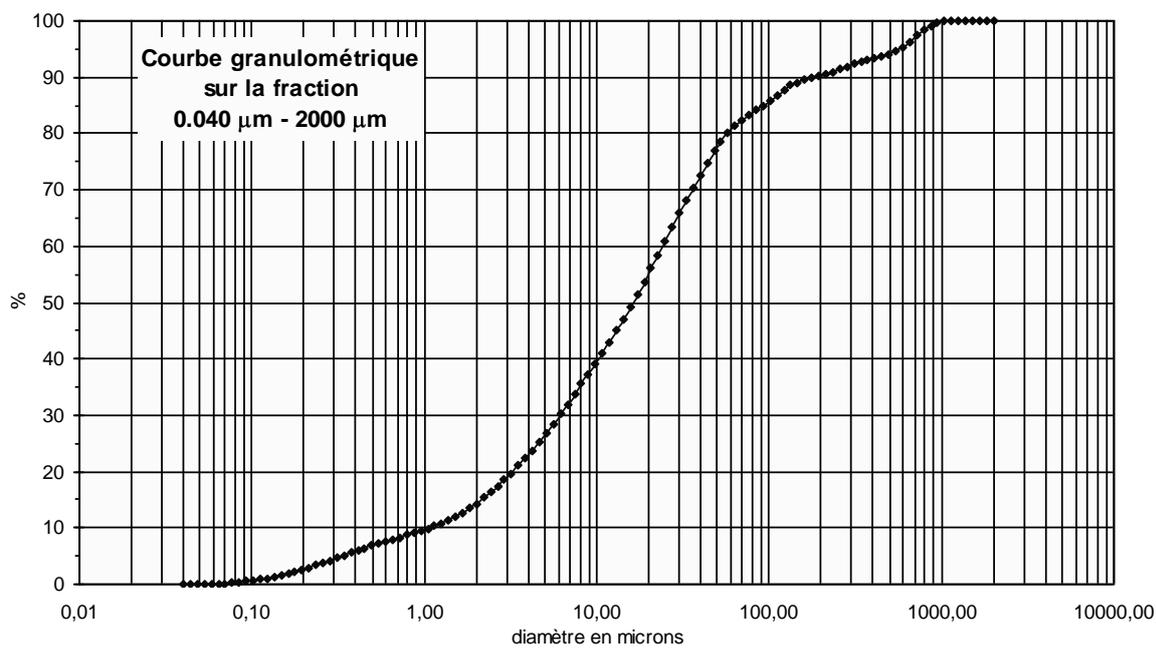
## BBD : pelouse sèche du Bollenberg, sommet Sud

Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Bollenberg	Alti. :	290 m	Formation vég. :	pelouse sèche
Commune :	Orschwihr, 68	Pente :	0°	Principales essences :	Graminées
Lat. :	47°55'57"	Exposition :	sommet	Historique :	Milieu ouvert depuis 1760 au moins
Long. :	07°14'37"				

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	9,82	21,12	6,87	13,5	40,2	23,2	13,4	9,7

### Type de sol

<b>CPCS :</b>	Rendzine
<b>RP 2008 :</b>	Rendosol
<b>WRB 2006 :</b>	Calcic leptosol
<b>Roche mère</b>	Calcaire



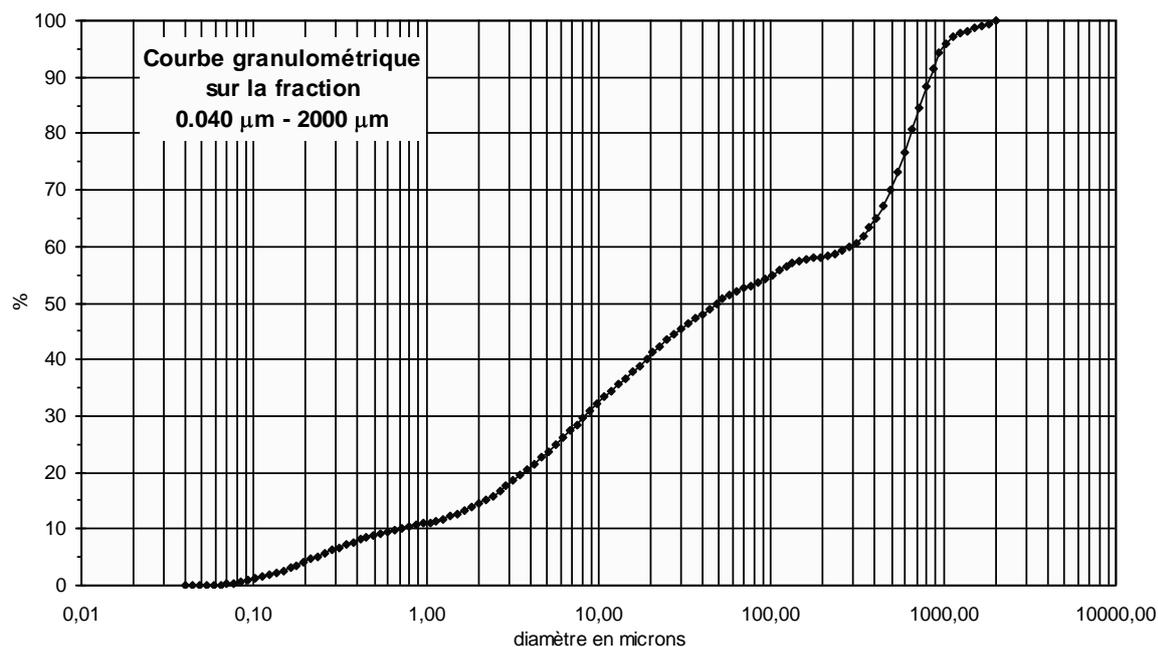
## BBE : pelouse sèche du Bollenberg, sommet Nord-Ouest



Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Bollenberg	Alti. :	364 m	Formation vég. :	pelouse sèche
Commune :	Westhalten, 68	Pente :	0°	Principales essences :	Prunus spinosa, rosiers, régénération : chêne, pin
Lat. :	47°56'57" N	Exposition :	sommet	Historique :	Milieu ouvert depuis 1760 au moins
Long. :	07°15'31" E				

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	6,22	14,09	7,02	13,8	26,3	9,8	8,3	41,8

Type de sol	
<b>CPCS :</b>	Rendzine
<b>RP 2008 :</b>	Rendosol
<b>WRB 2006 :</b>	Calcic leptosol
<b>Roche mère</b>	Calcaire



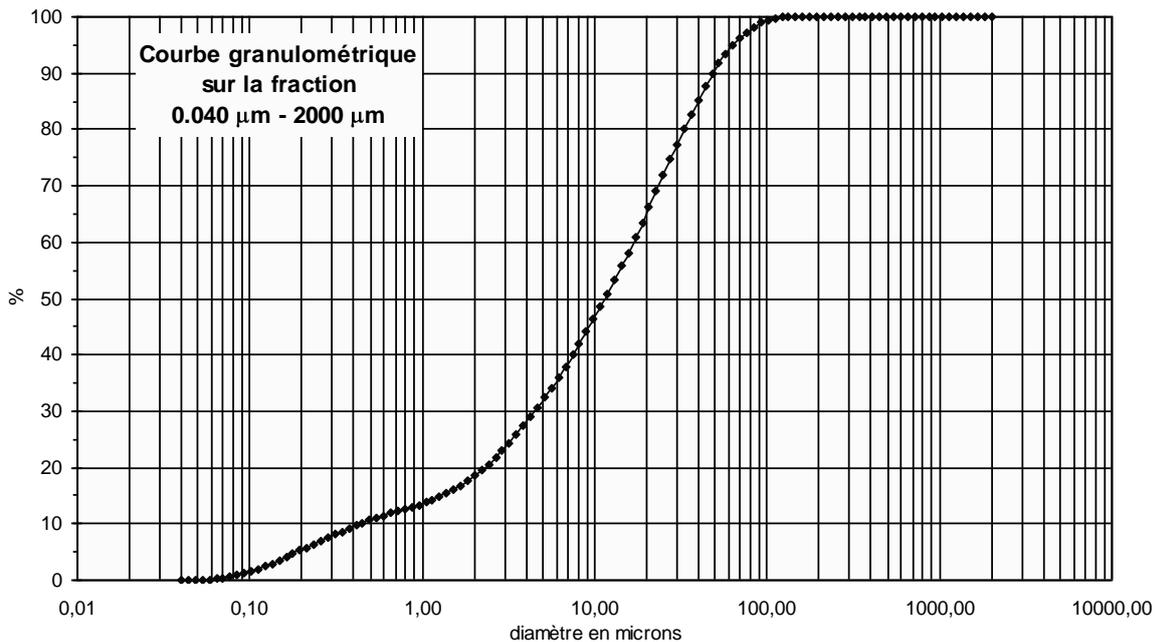
# SBA : pelouse sèche du Strangenberg



Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Strangenberg	Alti. :	400 m	Formation vég. :	Prairie
Commune :	Westhalten, 68	Pente :	0°	Principales essences :	Graminées
Lat. :	47°57'52" N	Exposition :	Sommet	Historique :	Milieu ouvert depuis 1760 au moins
Long. :	07°16'13" E				

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	12,05	24,19	6,06	17,6	45,9	26,3	10,2	0,0

Type de sol	
CPCS :	Rendzine
RP 2008 :	Rendosol
WRB 2006 :	Calcic leptosol
Roche mère	Calcaire

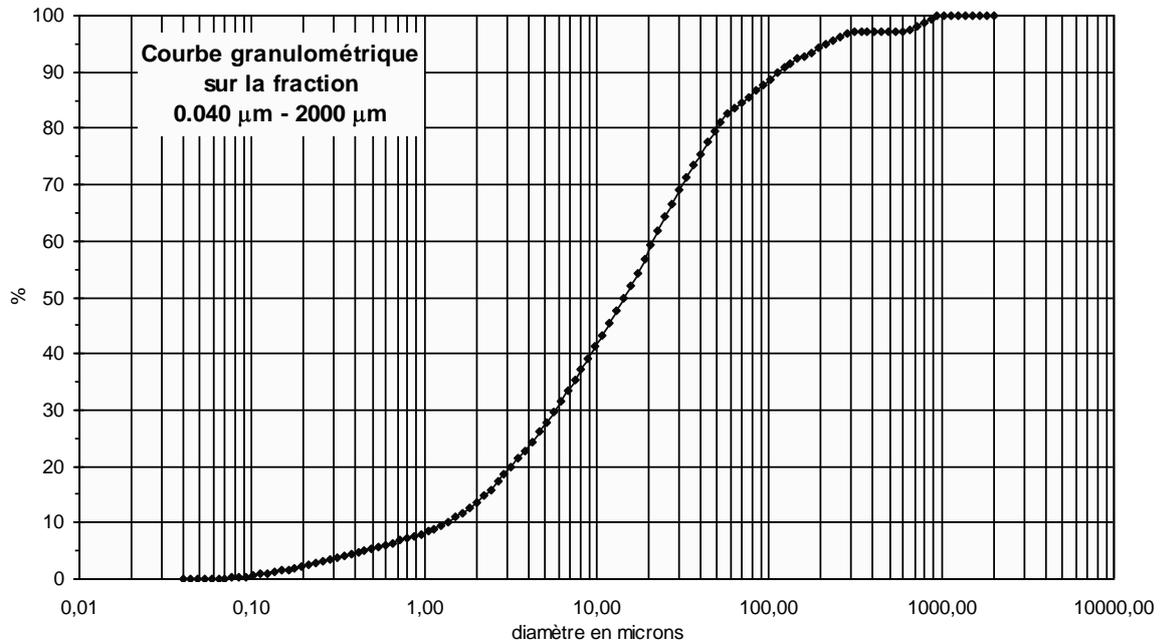


# SBB : pelouse sèche du Strangenberg

Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Strangenberg	Alti. :	400 m	Formation vég. :	Prairie
Commune :	Westhalten, 68	Pente :	0°	Principales essences :	Prunus spinosa, rosiers, graminées
Lat. :	47°57'48" N	Exposition :	Sommet	Historique :	Milieu ouvert depuis 1760 au moins
Long. :	07°16'10" E				

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	12,39	24,47	6,98	12,7	44,1	22,6	14,8	5,8

Type de sol	
<b>CPCS :</b>	Rendzine
<b>RP 2008 :</b>	Rendosol
<b>WRB 2006 :</b>	Calcic leptosol
<b>Roche mère</b>	Calcaire



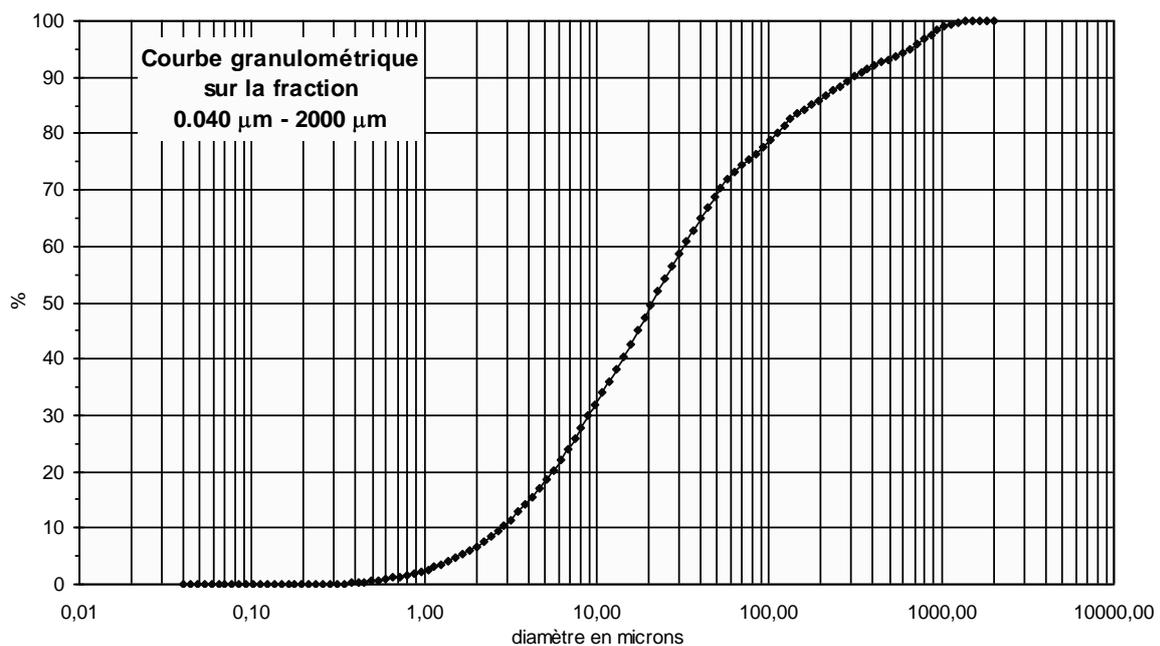
## SBC : pelouse sèche du Strangenberg



Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Strangenberg	Alti. :	400 m	Formation vég. :	Prairie
Commune :	Westhalten, 68	Pente :	20°	Principales essences :	Graminées
Lat. :	47°57'52" N	Exposition :	E-NE	Historique :	Milieu ouvert depuis 1760 au moins
Long. :	07°16'10" E				

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	18,78	34,70	7,10	5,9	41,3	21,4	17,2	14,1

Type de sol	
<b>CPCS :</b>	Rendzine
<b>RP 2008 :</b>	Rendosol
<b>WRB 2006 :</b>	Calcic leptosol
<b>Roche mère</b>	Calcaire



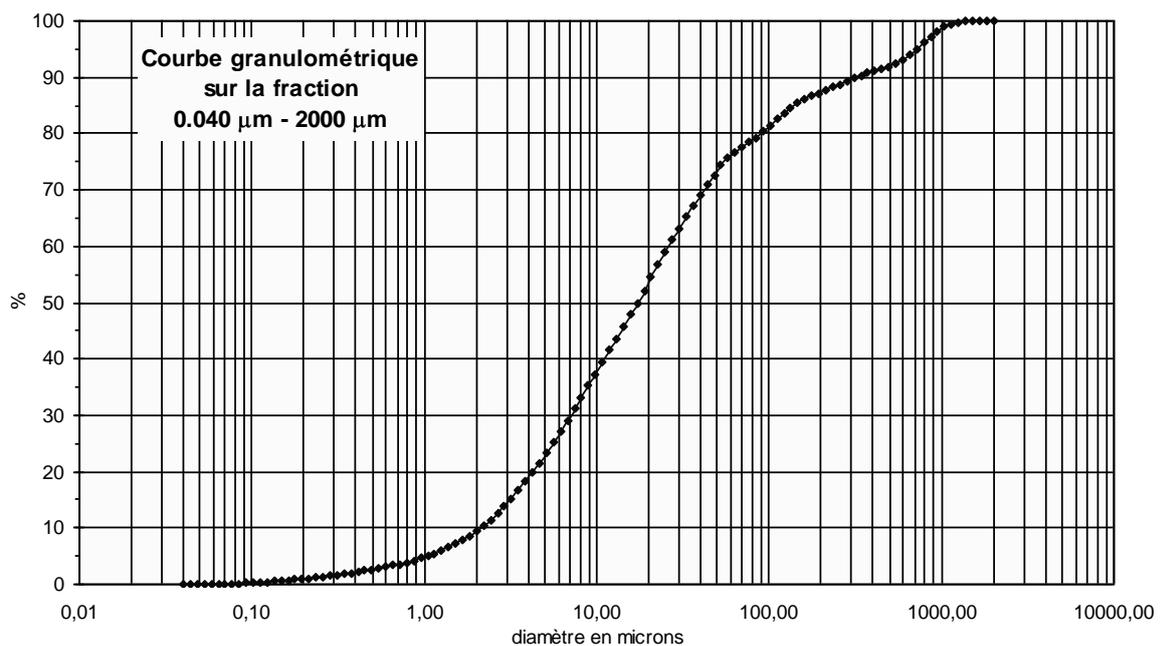
## ZKA : pelouse sèche du Zinkoepfle



Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Zinnkoepfle	Alti. :	440 m	Formation vég. :	Prairie
Commune :	Westhalten, 68	Pente :	10°	Principales essences :	Prunus spinosa, graminées
Lat. :	47°58'04" N	Exposition :	S-SE	Historique :	Milieu ouvert depuis 1760 au moins
Long. :	07°15'16" E				

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	8,43	18,50	7,22	8,6	43,5	20,5	14,4	12,9

Type de sol	
<b>CPCS :</b>	Rendzine
<b>RP 2008 :</b>	Rendosol
<b>WRB 2006 :</b>	Calcic leptosol
<b>Roche mère</b>	Calcaire



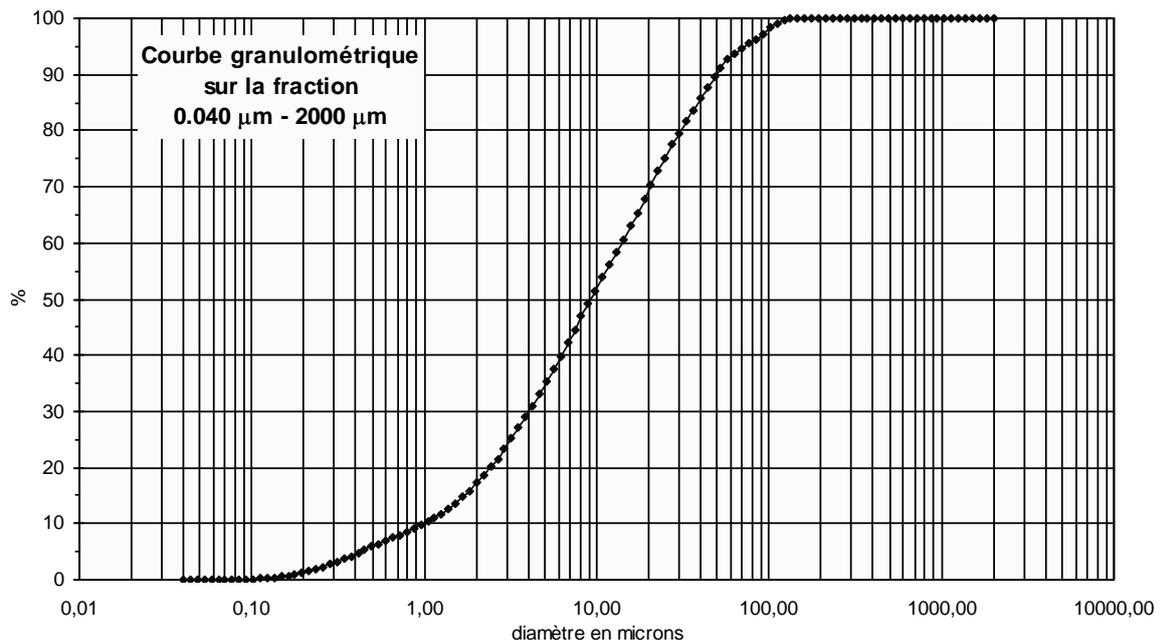
## ZKB : pelouse sèche du Zinkoepfle



Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Zinkoepfle	Alti. :	430 m	Formation vég. :	Prairie
Commune :	Westhalten, 68	Pente :	10°	Principales essences :	Graminées
Lat. :	47°58'02" N	Exposition :	S-SE	Historique :	Milieu ouvert depuis 1760 au moins
Long. :	07°15'16" E				

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	7,01	15,14	7,23	15,9	52,0	21,7	10,4	0,0

Type de sol	
CPCS :	Rendzine
RP 2008 :	Rendosol
WRB 2006 :	Calcic leptosol
Roche mère	Calcaire



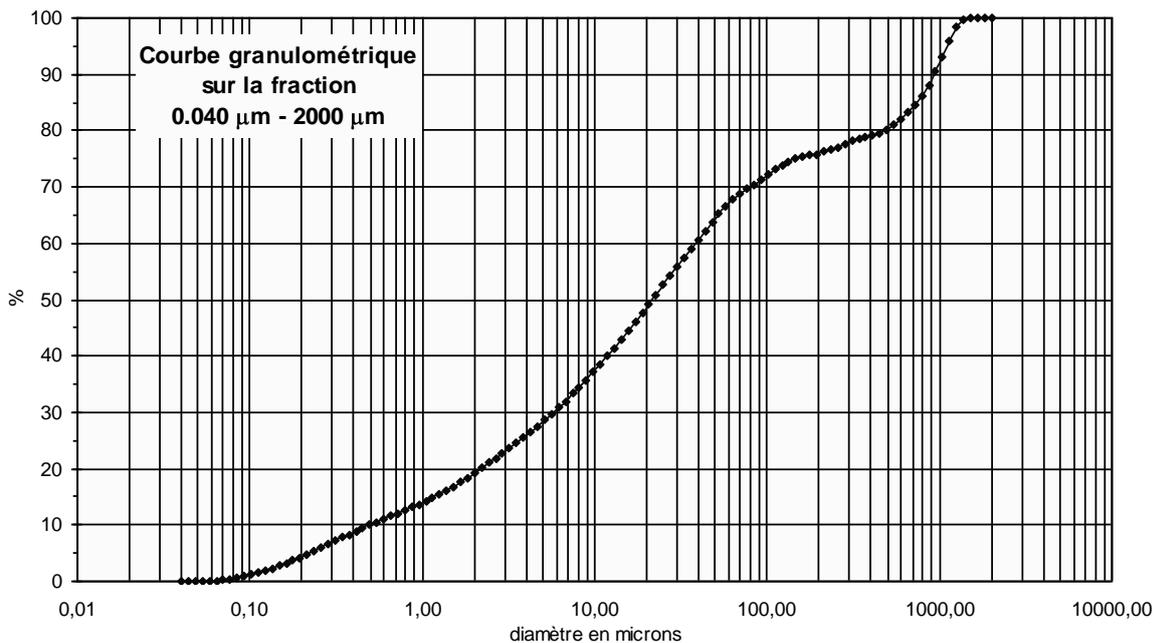
# RCA : prairie pâturée du Thanner Hubel



Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Rosberg	Alti. :	1120 m	Formation vég. :	Prairie
Commune :	Bourbach-le-Haut, 68	Pente :	5°	Principales essences :	graminées
Lat. :	47°49'14" N	Exposition :	S-SW	Historique :	Sous prairie depuis 1760 au moins
Long. :	07°01'35" E				

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	16,75	35,19	4,20	18,4	29,2	16,2	12,0	24,2

Type de sol	
<b>CPCS :</b>	Sol brun acide
<b>RP 2008 :</b>	Alocrisol
<b>WRB 2006 :</b>	Cambisol
<b>Roche mère</b>	Volcano sédimentaire



## RCD : prairie pâturée du Rossberg

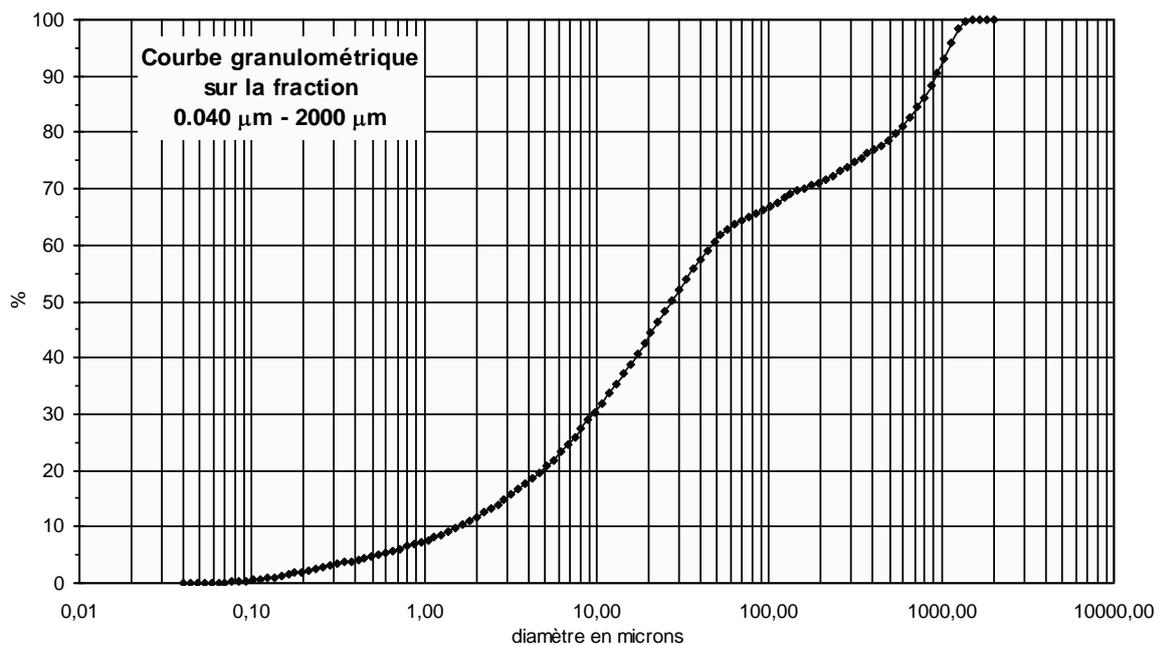


Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Rossberg	Alti. :	1170 m	Formation vég. :	Prairie
Commune :	Moosch, 68	Pente :	10°	Principales essences :	graminées
Lat. :	47°49'20" N	Exposition :	N-E	Historique :	Sous prairie depuis 1760 au moins
Long. :	07°00'40" E				

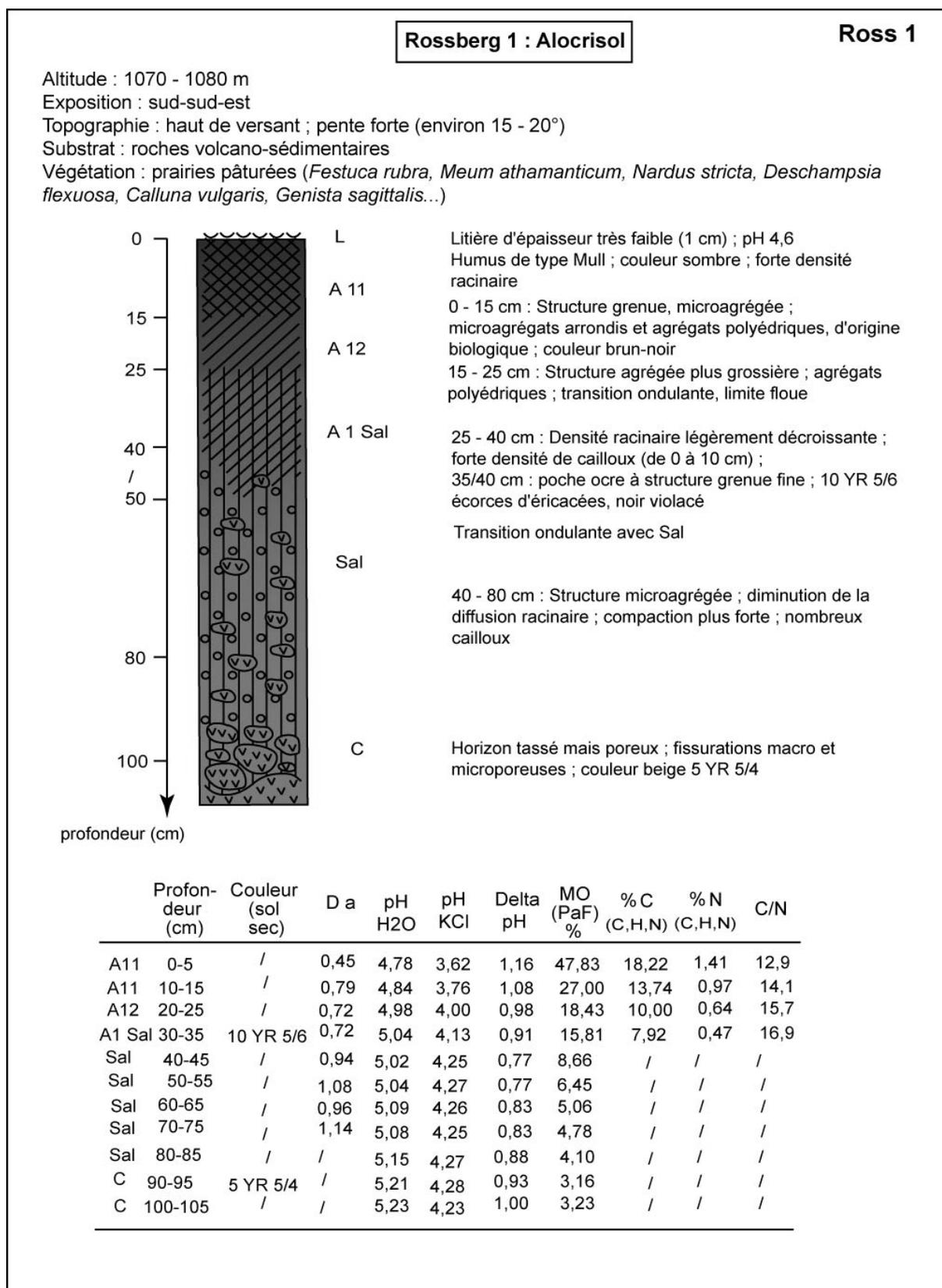
Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	24,77	65,07	4,20	11,1	31,4	18,0	10,6	28,9

### Type de sol

<b>CPCS :</b>	Sol brun acide
<b>RP 2008 :</b>	Alocrisol
<b>WRB 2006 :</b>	Cambisol
<b>Roche mère</b>	Labradorite



# ROS1-2 : alocrisol du Rossberg sous prairie, versant Sud-Ouest (Goepf, 2007)



# ROS 4 : Alocriisol du Rossberg sous prairie, versant Est (Goepf, 2007)

## Rossberg 4 : alocriisol

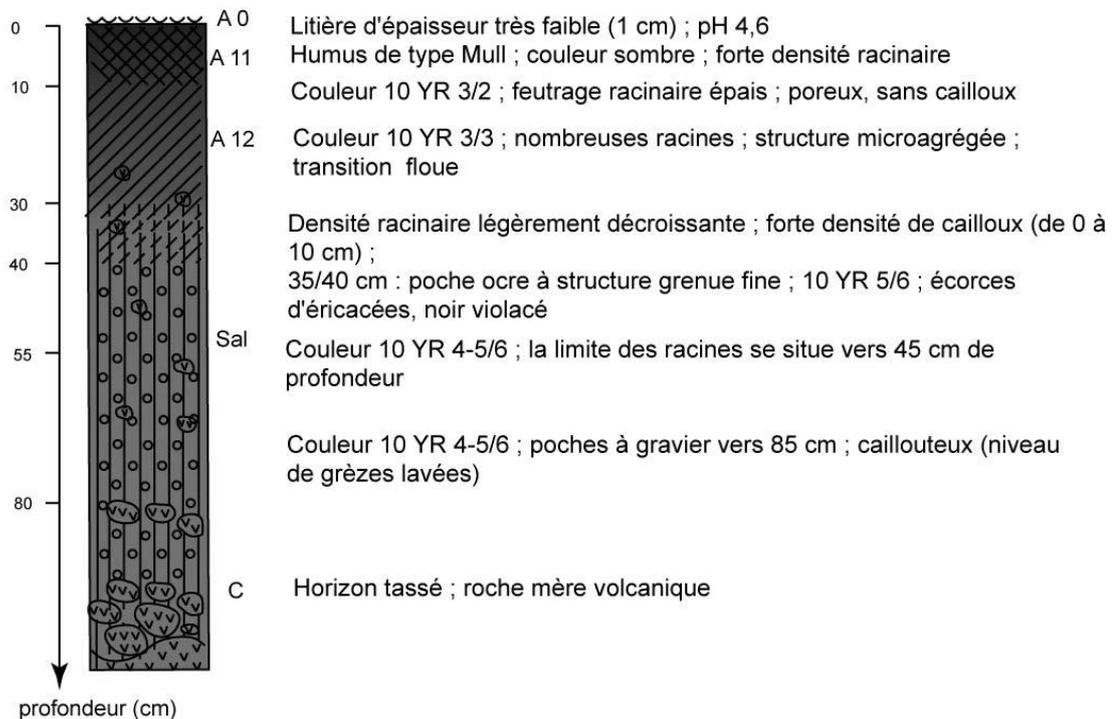
Ross 4

Altitude : 1100 m

Topographie : milieu de versant, pente de 20 - 25°

Substrat : roches volcano-sédimentaires

Végétation : prairies pâturées (*Festuca rubra*, *Meum athamanticum*, *Nardus stricta*, *Deschampsia flexuosa*, *Genista sagittalis*...)



	Profondeur (cm)	Couleur (sol sec)	D a	pH H2O	pH KCl	Delta pH	C orga. (W&B) %	C %	N %	C/N
A11	0-5	10 YR 3/2	0,45	4,46	3,61	0,85	18,9	13,38	1,10	12,1
A12	10-15	10 YR 3/3	/	4,41	3,91	0,50	/	8,59	0,72	12,0
A12	20-25	/	0,72	4,62	4,09	0,53	5,3	6,09	0,50	12,2
A1 Sal	30-35	10 YR 5/6	/	4,77	4,18	0,59	/	4,09	0,33	12,3
Sal	40-45	/	0,94	4,82	4,18	0,64	1,2	/	/	/
Sal	50-55	10 YR 4-5/6	/	4,91	4,13	0,78	/	/	/	/
Sal	60-65	/	0,96	4,94	4,17	0,77	1,9	/	/	/
Sal	70-75	/	/	5,07	4,14	0,93	/	/	/	/
C	90-100	/	/	5,00	3,96	1,04	0,8	/	/	/

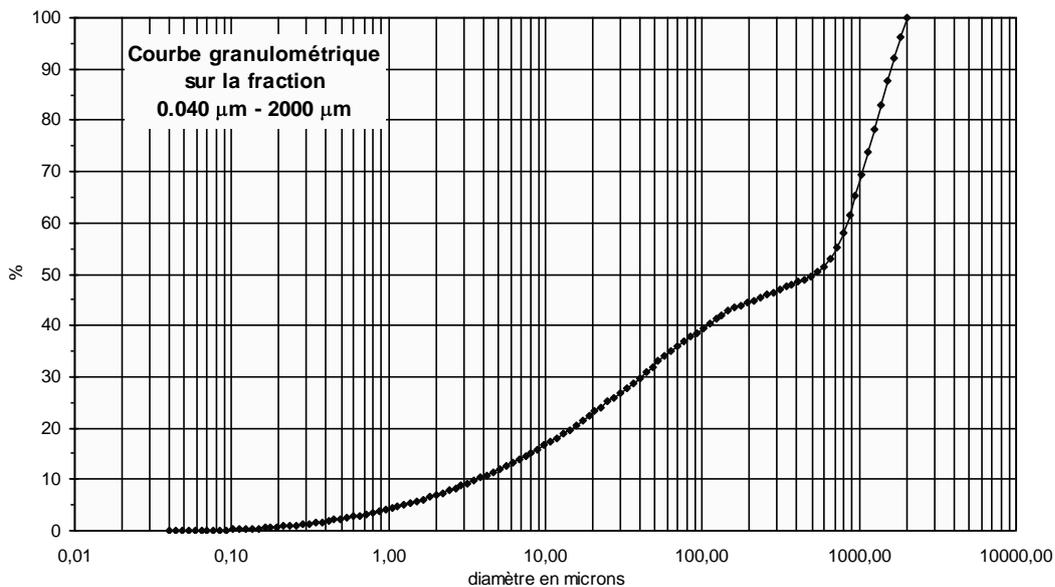
# HUN : ancien pâturage du Hundsruck



Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Rosberg	Alti. :	785 m	F. vég. :	Prairie en voie de fermeture
Commune :	Bourbach-le haut, 68	Pente :	10°	Principales essences :	Helianthemum vulgare ++, Achillea millefolium ++, Thymus serpyllum ++, Hypericum perforatum ++, Galium verum +, Galium mollgo +, Festuca sp. +, Euphorbia sp. (+), cf. Avena pratensis (+), Dianthus carthesianorum (□), Dactylis glomera (□), Lotus corniculatus (□), Trifolium campestre (□), Trifolium pratense (□), Campanula sp. (□), Ombellifère sp. (□)
Lat. :	47°48'17"N	Exposition :	S-W	Historique :	Sous prairie depuis 1760 au moins; en voie de fermeture
Long. :	07°02'42"E				

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	11,24	21,66	4,96	6,5	15,7	9,6	12,6	55,5

Type de sol			
CPCS	RP 2008	WRB 2006	Roche mère
Sol brun acide	Alocrisol	Cambisol	Latite à biotite



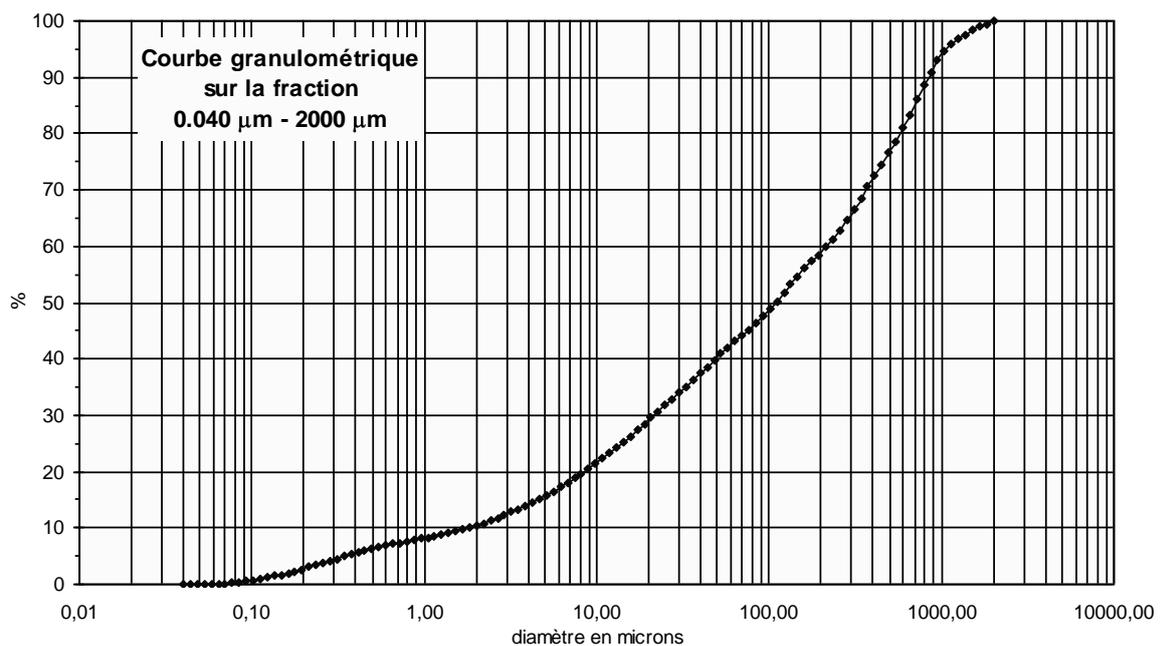
## PBC : prairie pâturée du Petit Ballon



Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Petit Ballon	Alti. :	1150 m	Formation vég. :	Prairie
Commune :	Sondernach, 68	Pente :	8°	Principales essences :	
Lat. :	47°59'07"N	Exposition :	S-W	Historique :	Sous prairie depuis 1760 au moins
Long. :	07°07'07"E				

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	17,32	28,78	4,63	10,0	18,4	11,4	18,7	41,5

Type de sol	
<b>CPCS :</b>	Sol brun acide
<b>RP 2008 :</b>	Alocrisol
<b>WRB 2006 :</b>	Cambisol
<b>Roche mère</b>	Granite



## HAC : prairie de fauche du Haicot



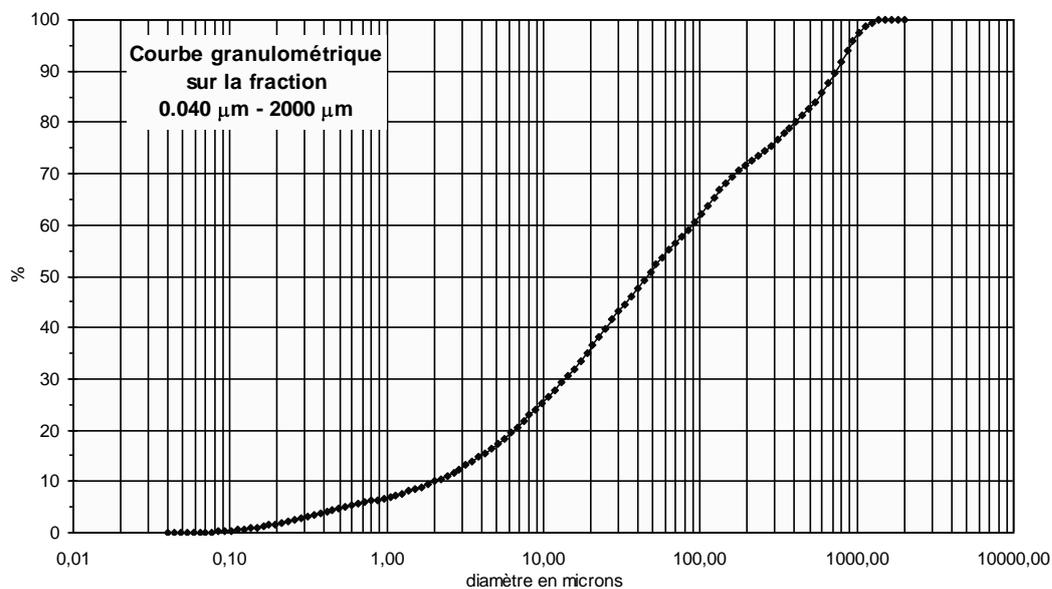
Photo D. Schwartz

Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Haicot	Alti. :	1080 m	Formation vég. :	Prairie
Commune :	Sainte-Marie aux Mines, 68	Pente :	7°	Principales essences :	Trèfle blanc, trèfle des prés, dactyle, phléole, houlque laineuse, flouve odorante, diverses fétuques, <i>Meum athamanticum</i> , <i>rumex sp.</i> , rhinante crête-de-coq, <i>campanula sp.</i> , <i>campanula rotundifolia</i> , achillée millefeuille, renoncule sp., <i>hypericum quadrangulum</i> , plantain lancéolé, crételle, raygrass,
Lat. :	48°11'44"N	Exposition :	N	Historique :	Prairie depuis 130 ans au moins
Long. :	07°08'26"E				

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	15,74	29,62	5,02	9,4	25,5	15,8	20,8	28,4

### Type de sol

CPCS	RP 2008	WRB 2006	Roche mère
Sol brun acide	Alocrisol	Cambisol	Granite



CFA : prairie pâturée du Champ du Feu, Domaine du Vieux

Pré

CFP : profil sous CFA, alocrisol (cambisol)



**A0 A1** : 0-3/9cm (moyenne 6 cm) ; feutrage litière ; racines ; mousse plus ou moins décomposées plus un peu d'organo-minéral

**A1** : 3/9-28/29cm horizon organo-minéral ; brun ; structure microagrégée « fluffy » ; nombreuses racines très fines ; quelques éléments grossiers (3-4 cm de diamètre). Transition nette avec :

**A3** : 28/29-38-40 cm ; organo-minéral ; gris-brun ; structure grenue ; texture limoneuse ; éléments grossiers (<3-4 cm) ; racines très fines. Transition subhorizontale nette avec :

**S** : 38/40->80 cm jaune ; limoneux ; nombreux éléments grossiers décimétriques (<30 cm), souvent plat et disposés à plat (formation de pente ?) ; granodiorite, lave, roche verte ( ?) ; racines très fines jusque vers 50cm (en dessous quelques rares racines) ; structure « fluffy » (microagrégée) à surstructure massive

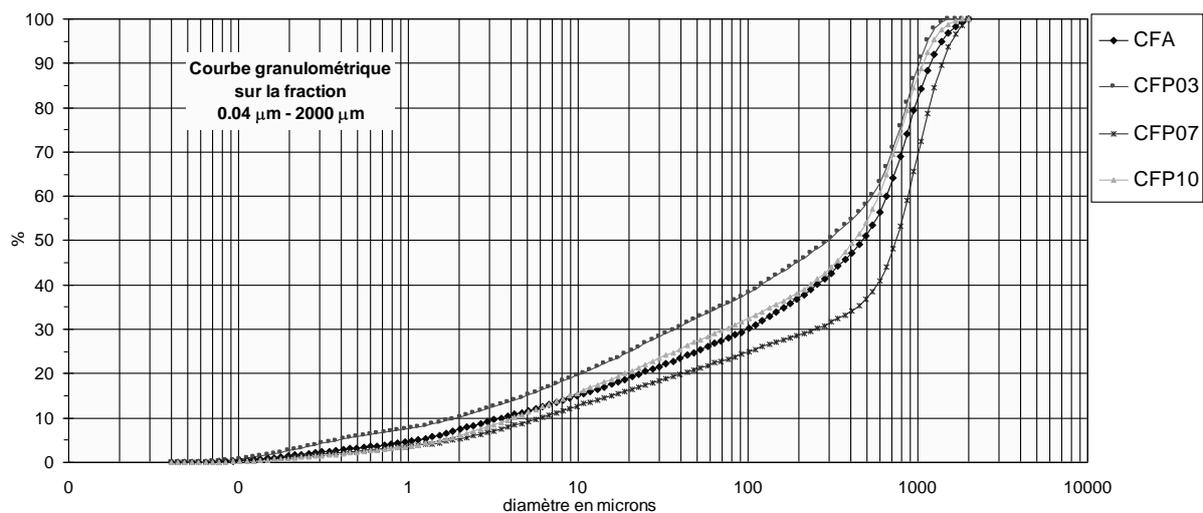
(Hauteur du profil 80 cm)

Localisation	Topographie	Végétation	
Lieu dit : Champ du feu	Alti. : 1070 m	Formation vég. :	Prairie
Commune : Belmont, 67	Pente : 5°	Principales essences :	callunes++, myrtilles, mousses, meum, fétuque, genet sagité, graminées spp.
Lat. : 48° 23' 58" N Long. : 7° 15' 41" E	Exposition : S-O	Historique :	Milieu ouvert depuis 130 ans au moins

Code	Prof. cm	C org. %	PAF %	TMR	pH	Granulométrie				
						A %	LF %	LG %	SF %	SG %
CFA	0-4	19,92	33,26	-	4,00	6,9	11,7	6,1	12,0	63,2
CFP03	10-15	4,51	20,06	-	4,09	9,7	14,6	7,7	13,0	54,9
CFP07	30-35	13,14	19,01	-	4,37	5,0	10,9	4,9	7,7	71,4
CFP10	45-50	3,19	9,18	-	4,42	5,6	14,3	7,0	11,1	61,9

### Type de sol

**CPCS :** Sol brun acide  
**RP 2008 :** Alocrisol  
**WRB 2006 :** Cambisol  
**Roche mère** Granite



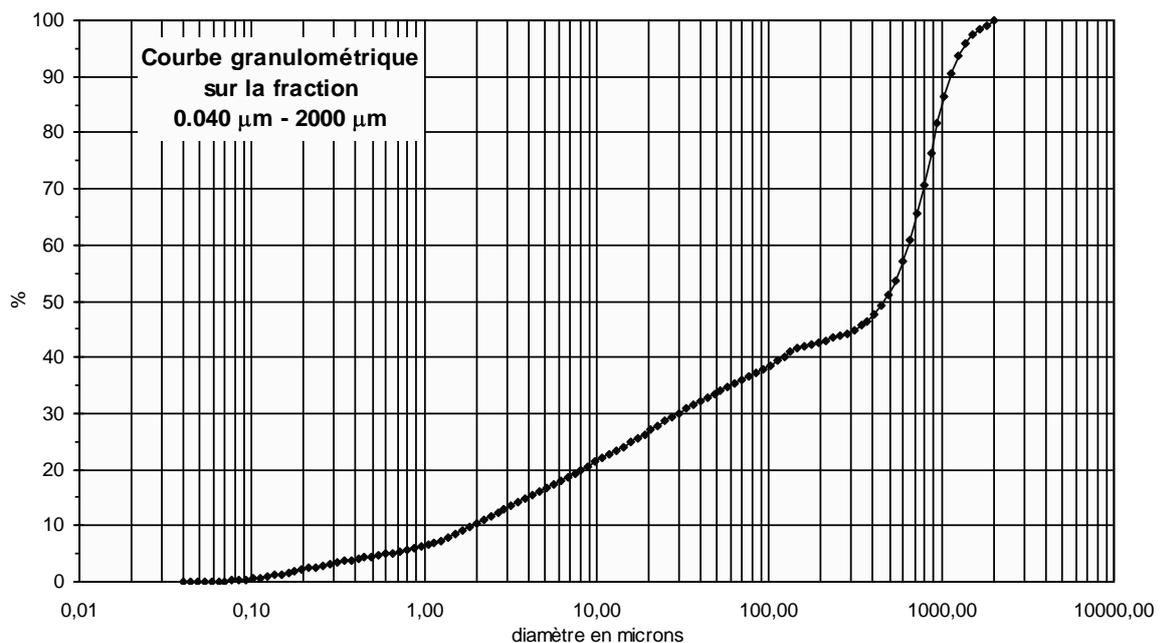
## RCB : prairie du Champ du Feu



Localisation	Topographie	Végétation	
Lieu dit : Champ du feu	Alti. : 1080 m	Formation vég. :	Prairie
Commune : Belmont, 67	Pente : 5°	Principales essences :	Dominance des Graminées, Myrtilles, Mousses
Lat. : 48° 23' 54" N Long. : 07° 15' 49" E	Exposition : O	Historique :	Sous prairie depuis 1890 au moins

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	16,59	44,61	4,35	9,7	16,5	7,2	9,2	57,3

Type de sol	
<b>CPCS :</b>	Sol brun acide
<b>RP 2008 :</b>	Alocrisol
<b>WRB 2006 :</b>	Cambisol
<b>Roche mère</b>	Diorites



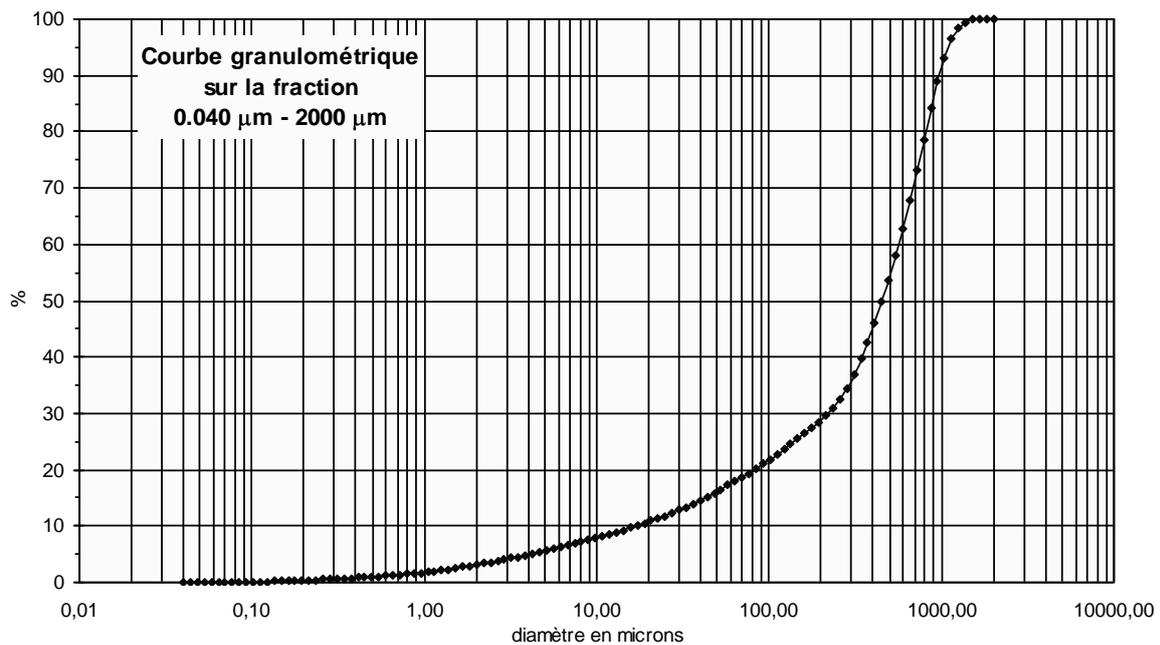
# KAC : prairie pâturée du Kastelberg



Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Hohneck	Alti. :	1350 m	Formation vég. :	Prairie
Commune :	Metzeral, 68	Pente :	0°	Principales essences :	Cf. Goepp 2007 Site du Kastelberg
Lat. :	48°01'20" N	Exposition :	Sommet	Historique :	Prairie pâturée depuis 500 ans au moins
Long. :	7°00'10" E				

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	20,44	40,91	3,91	2,9	7,5	5,3	12,5	71,7

Type de sol	
	Ranker
<b>CPCS :</b>	cryptopodzolique
<b>RP 2008 :</b>	Rankosol
<b>WRB 2006 :</b>	Umbrisol
<b>Roche mère</b>	Granite



## KAT : prairie de fauche du Kastelberg

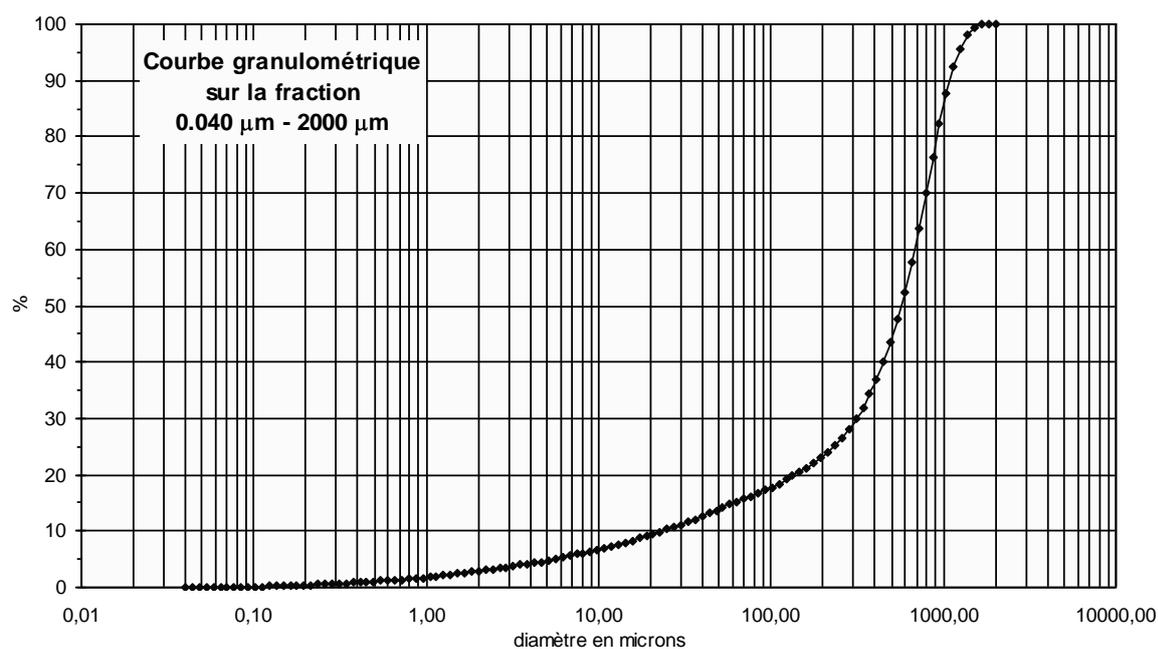


Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Hohneck	Alti. :	1350 m	Formation vég. :	Prairie
Commune :	Metzeral, 68	Pente :	0°	Principales essences :	Cf. Goepp 2007 Site du Kastelberg
Lat. :	48°01'20" N	Exposition :	Sommet	Historique :	Prairie depuis 500 ans au moins
Long. :	07°00'11" E				

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	31,46	52,21	3,96	2,7	6,3	4,5	9,3	77,1

### Type de sol

	Ranker
<b>CPCS :</b>	cryptopodzolique
<b>RP 2008 :</b>	Rankosol
<b>WRB 2006 :</b>	Umbrisol
<b>Roche mère</b>	Granite



## FAC : prairie pâturée du Falimont

FAP : profil sous FAC, ranker cryptopodzolique (umbrisol)



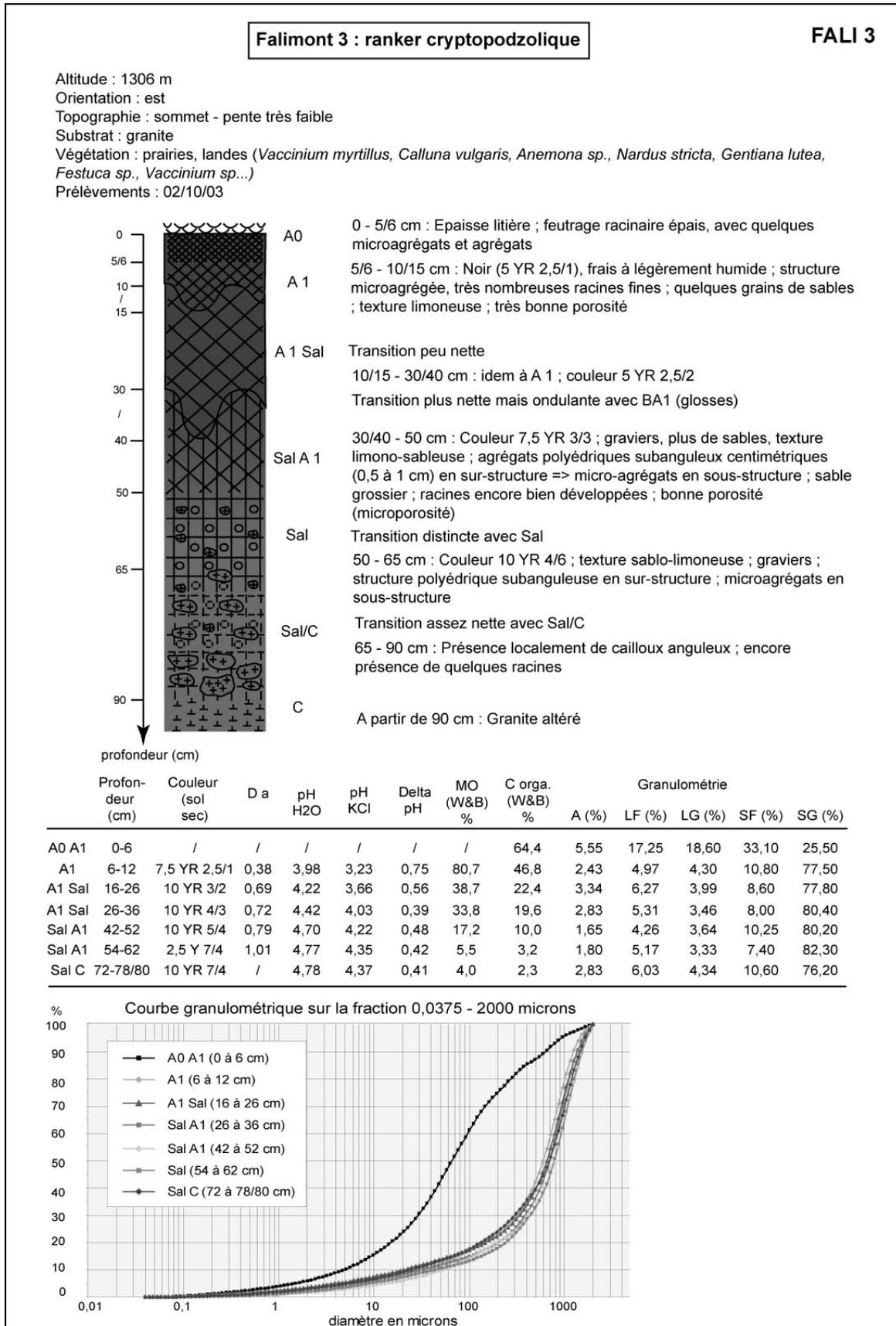
(photo D. Schwartz)

Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Hohneck	Alti. :	1300 m	Formation vég. :	Prairie
Commune :	Metzeral, 68	Pente :	0°	Principales essences :	
Lat. :	48°02'36" N	Exposition :	Sommet	Historique :	Prairie pâturée depuis 500 ans au moins
Long. :	07°00'43" E				Milieu ouvert depuis l'âge du Bronze

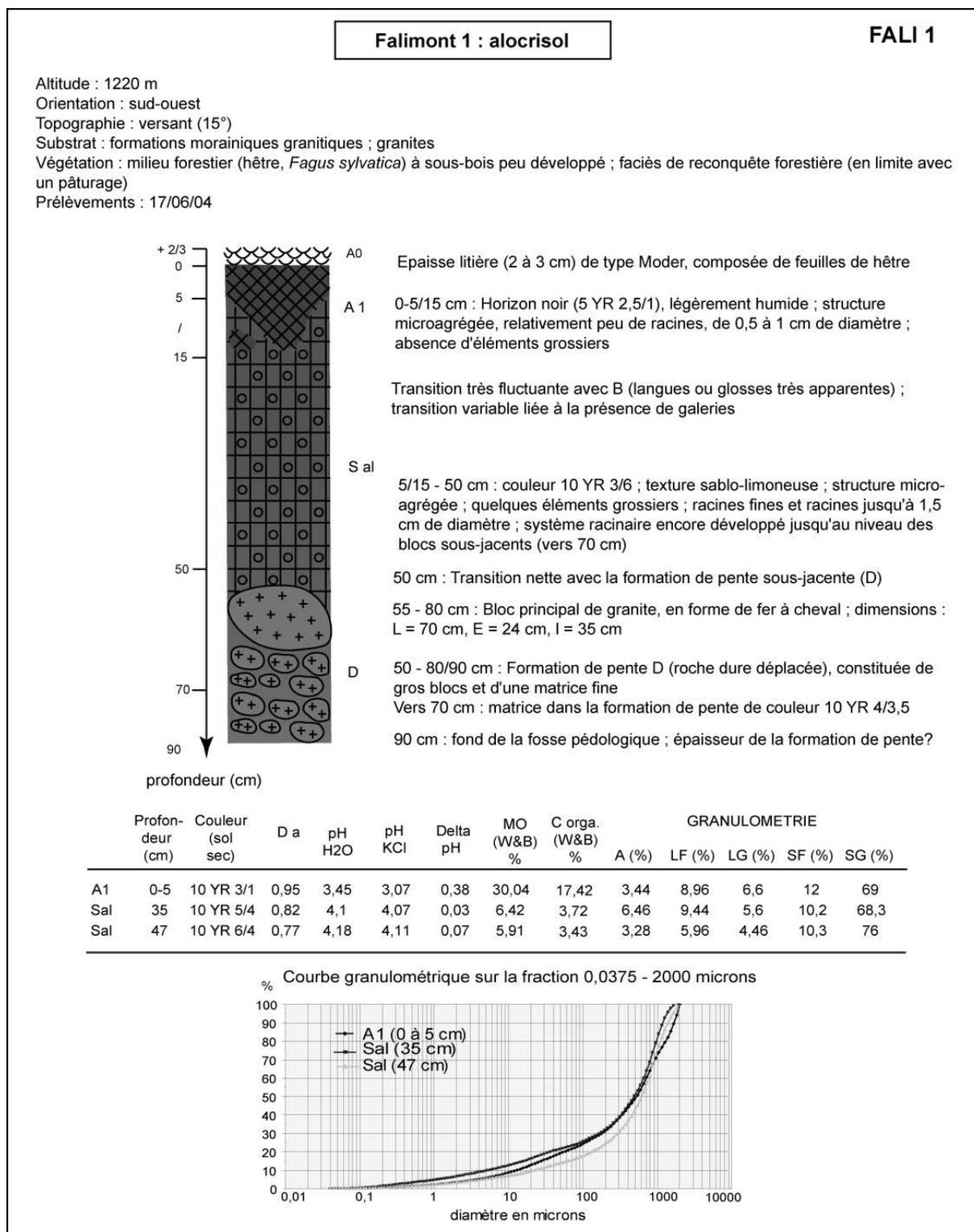
Code	Prof. cm	C org. %	PAF %	TMR	pH	Granulométrie				
						A %	LF %	LG %	SF %	SG %
FAC	0-4	31,26	55,63	-	3,70	5,0	12,8	11,7	18,7	51,8
FAP204	15-20	9,39	18,91	919 ± 27		Les analyses courantes ont été effectuées en 2005 à partir d'échantillons prélevés par Goepf dans la fosse FALI3 situé à quelques mètres (les résultats sont présentés dans cette annexe)				
FAP208	35-40	3,84	8,65	2729 ± 30						
FAP212	55-60	1,57	4,87	4199 ± 32						
FAP216	75-80	0,75	2,95	3667 ± 30						

Type de sol	
	Ranker
<b>CPCS :</b>	cryptopodzolique
<b>RP 2008 :</b>	Rankosol
<b>WRB 2006 :</b>	Umbrisol
<b>Roche mère</b>	Granite

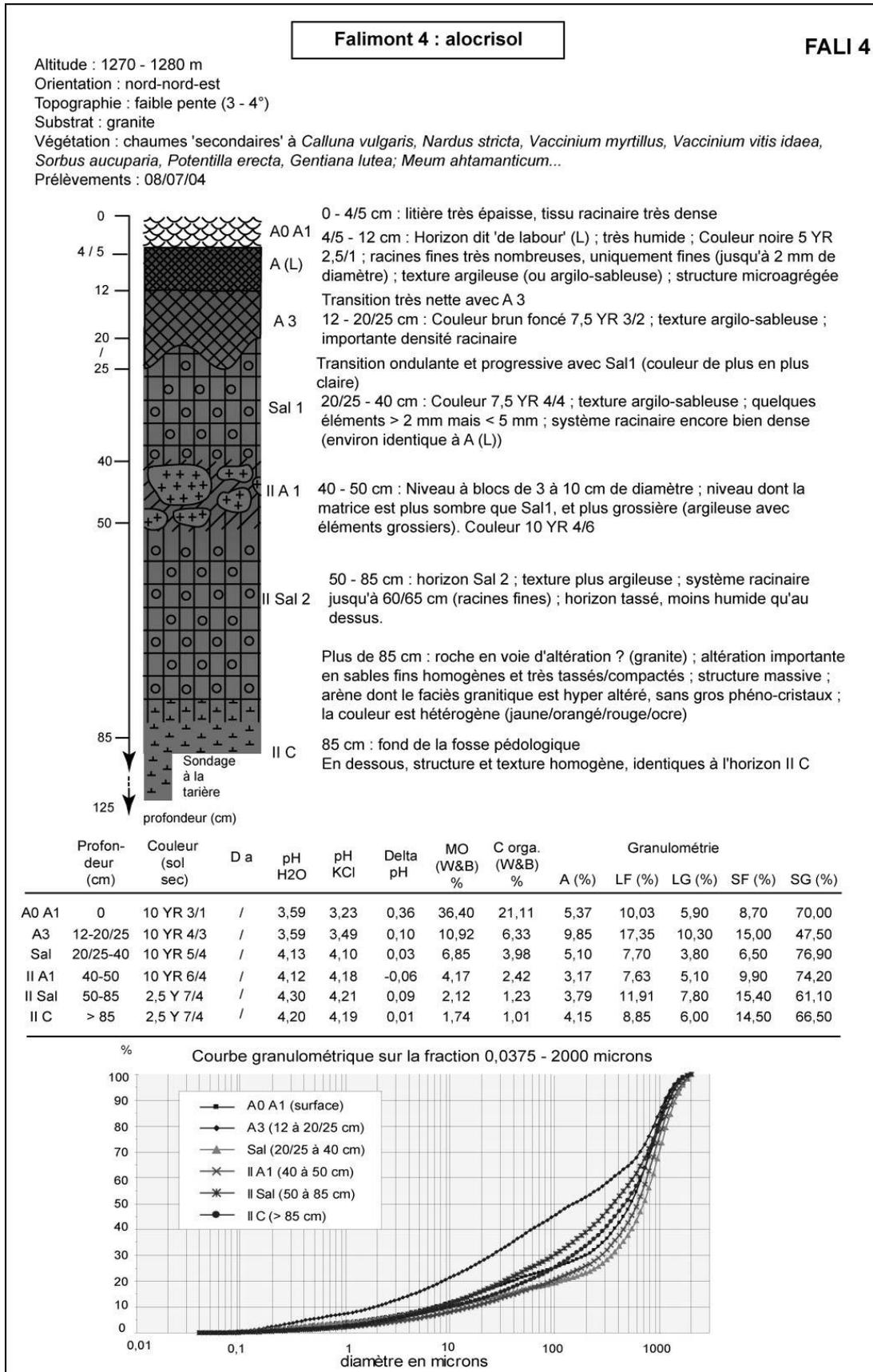
# FAP / FALI3 : ranker cryptopodzolique du Falimont, sommet (Goepf, 2007)



# FAL11 : alocrisol du Falimont sous hêtraie pionnière, versant Sud-Ouest (Goepp 2007)



# FALI4 : alocrisol du Falimont sous prairie, versant Nord-Est (Goepp 2007)

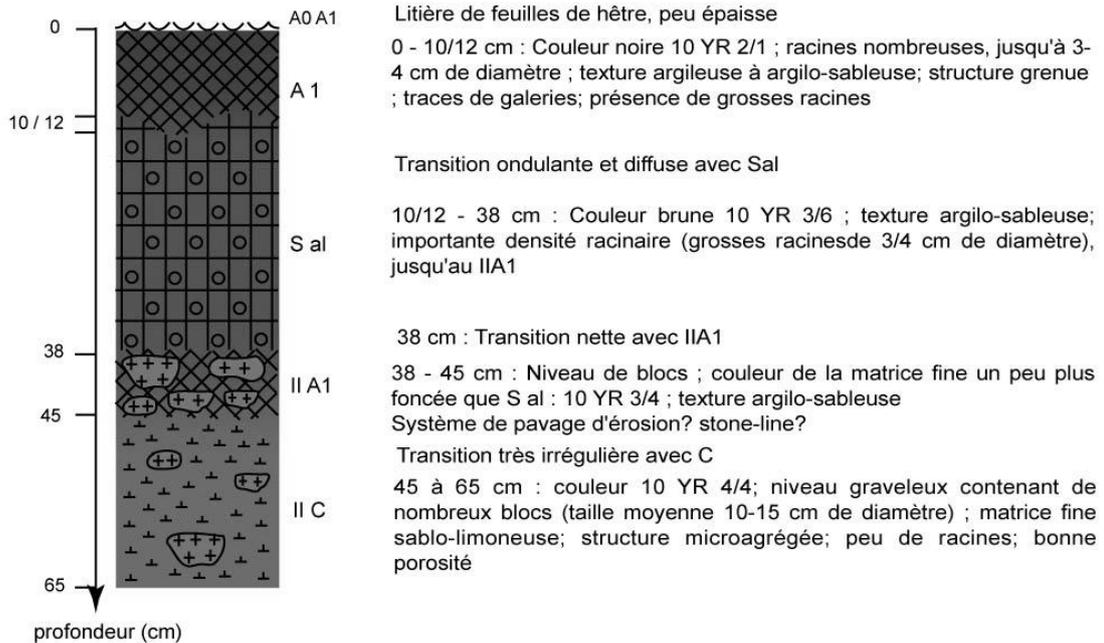


# FAL15 : alocrisol du Falimont sous forêt, versant Nord-Est (Goepp 2007)

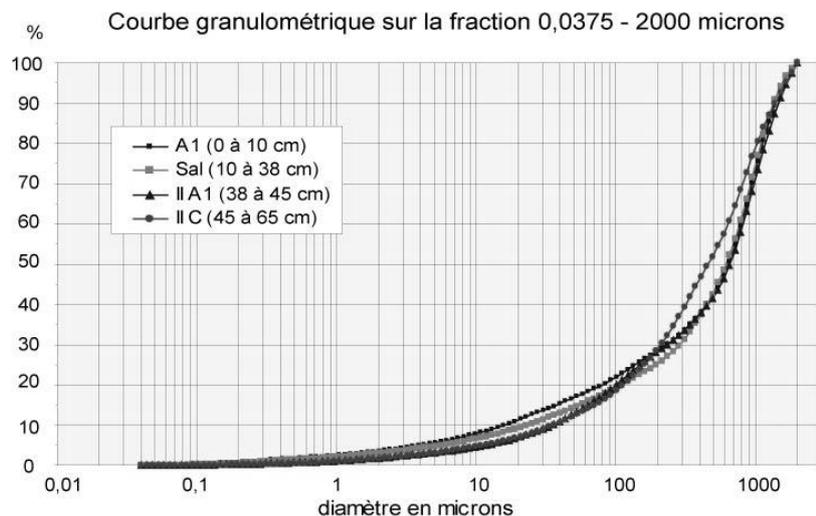
Falimont 5 : alocrisol

FAL1 5

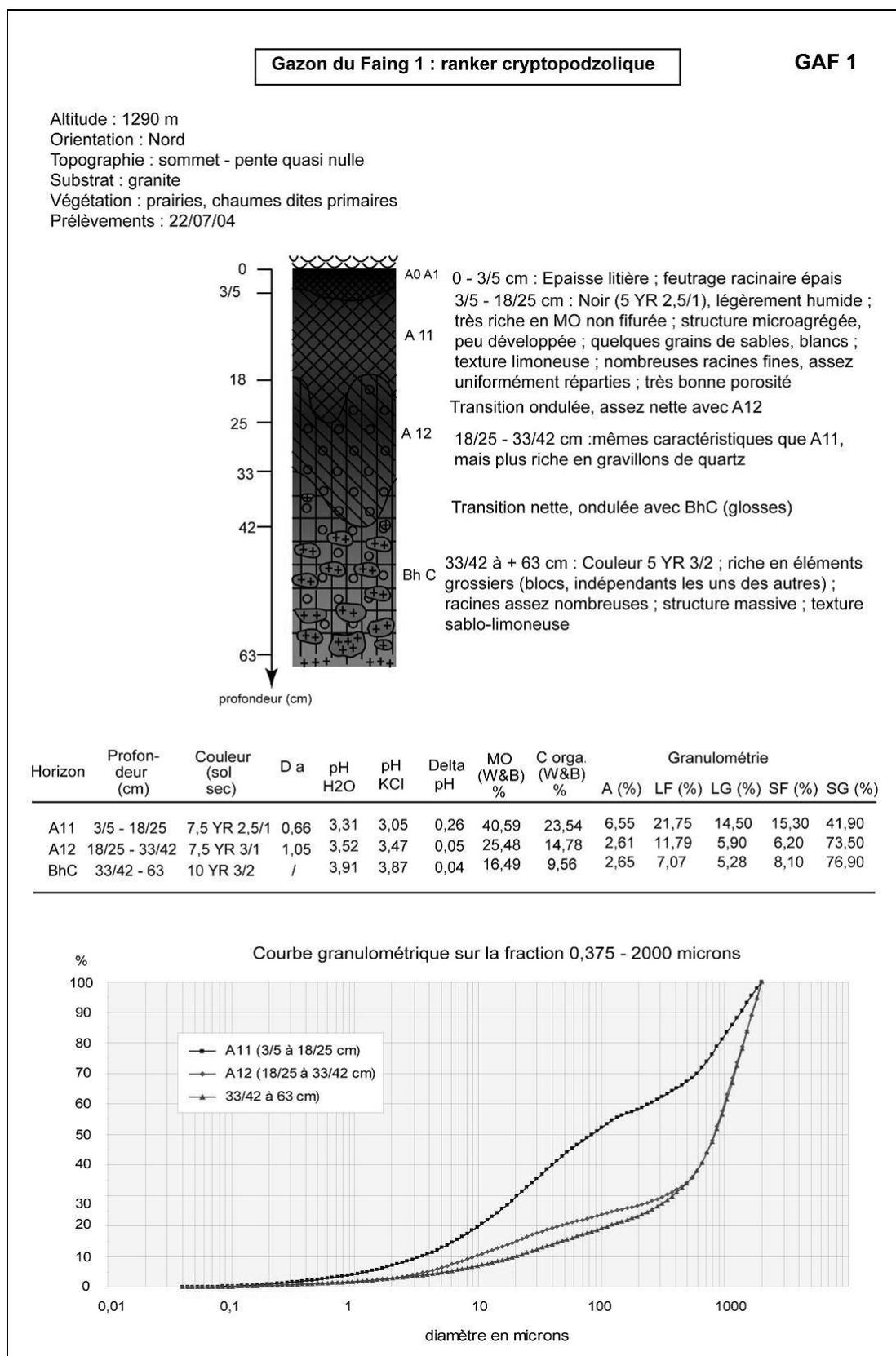
Altitude : 1240 - 1250 m  
 Orientation : nord-nord-est  
 Topographie : faible pente (3 - 4°)  
 Substrat : granite porphyroïde à biotite  
 Végétation : milieu forestier (hêtraie), avec quelques épicéas, Sorbier des Oiseleurs, sous-bois à fougères, semis d'érables...  
 Prélèvements : 09/07/04



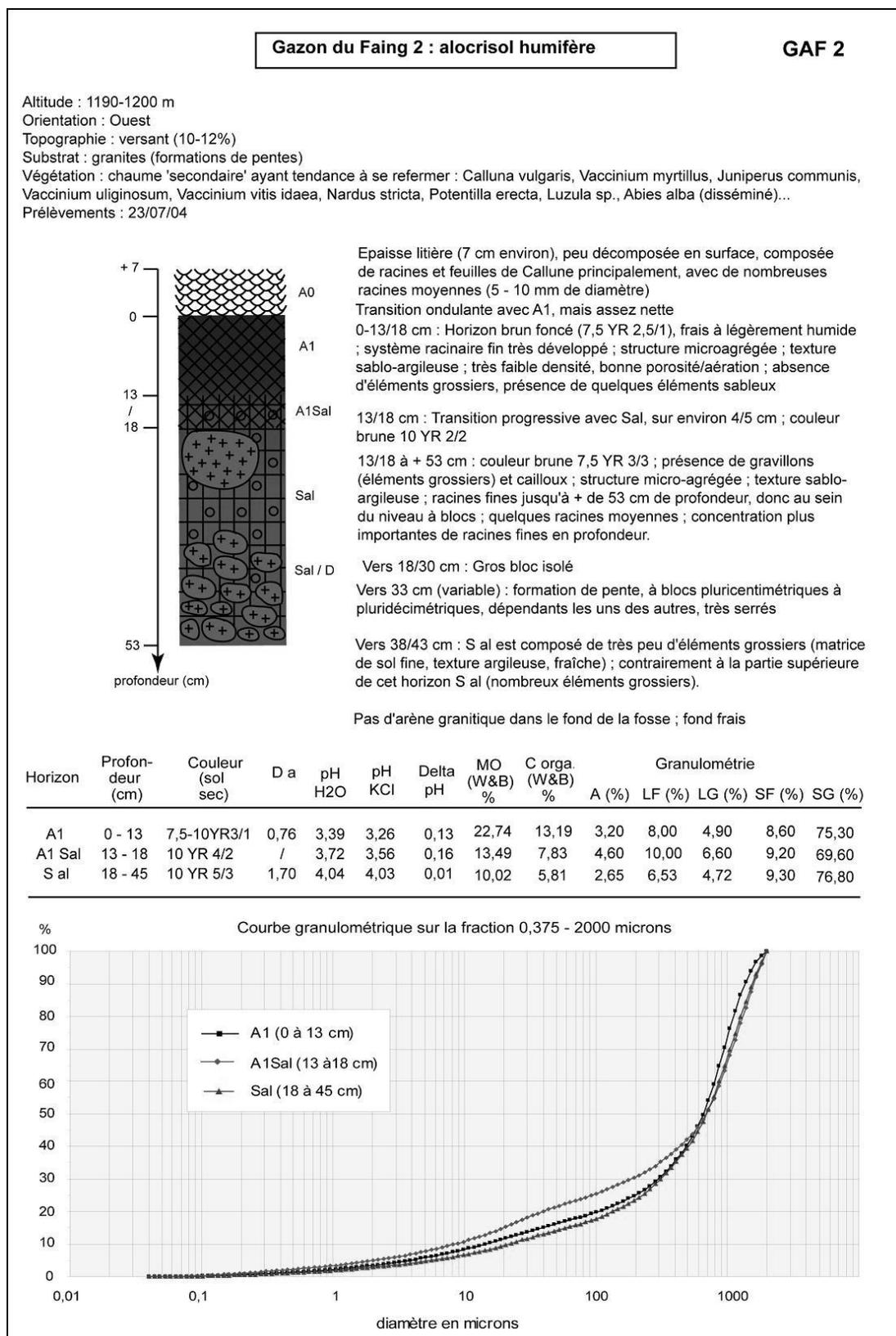
Profondeur (cm)	Couleur (sol sec)	D a	pH H <sub>2</sub> O	pH KCl	Delta pH	MO (W&B) %	C orga. (W&B) %	Granulométrie					
								A (%)	LF (%)	LG (%)	SF (%)	SG (%)	
A1	0-10	10 YR 3/1	/	3,52	3,37	0,15	20,88	12,11	3,39	7,51	5,60	11,70	71,80
Sal	10-38	10 YR 5/4	/	4,07	3,90	0,17	11,30	6,56	2,86	6,18	5,06	10,90	75,00
II A1	38-45	10 YR 5/4	/	4,35	4,15	0,20	5,25	3,04	1,64	4,94	5,82	15,50	72,10
II C	45-65	2,5 Y 7/4	/	4,45	4,22	0,23	2,04	1,18	1,56	5,20	5,24	16,40	71,60



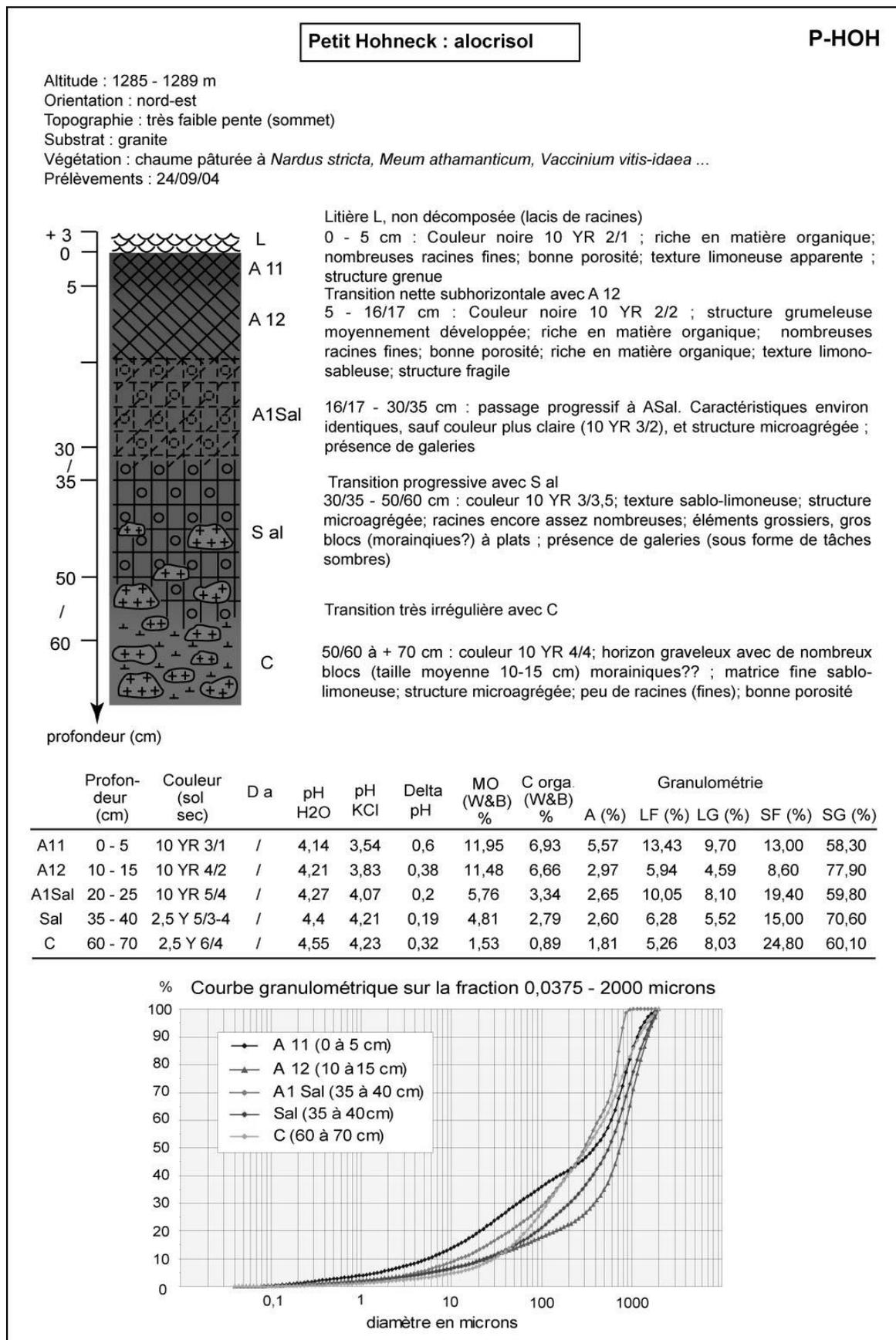
# GAF1 : ranker cryptopodzolique du Gazon du Faing, sous prairie (Goepf, 2007)



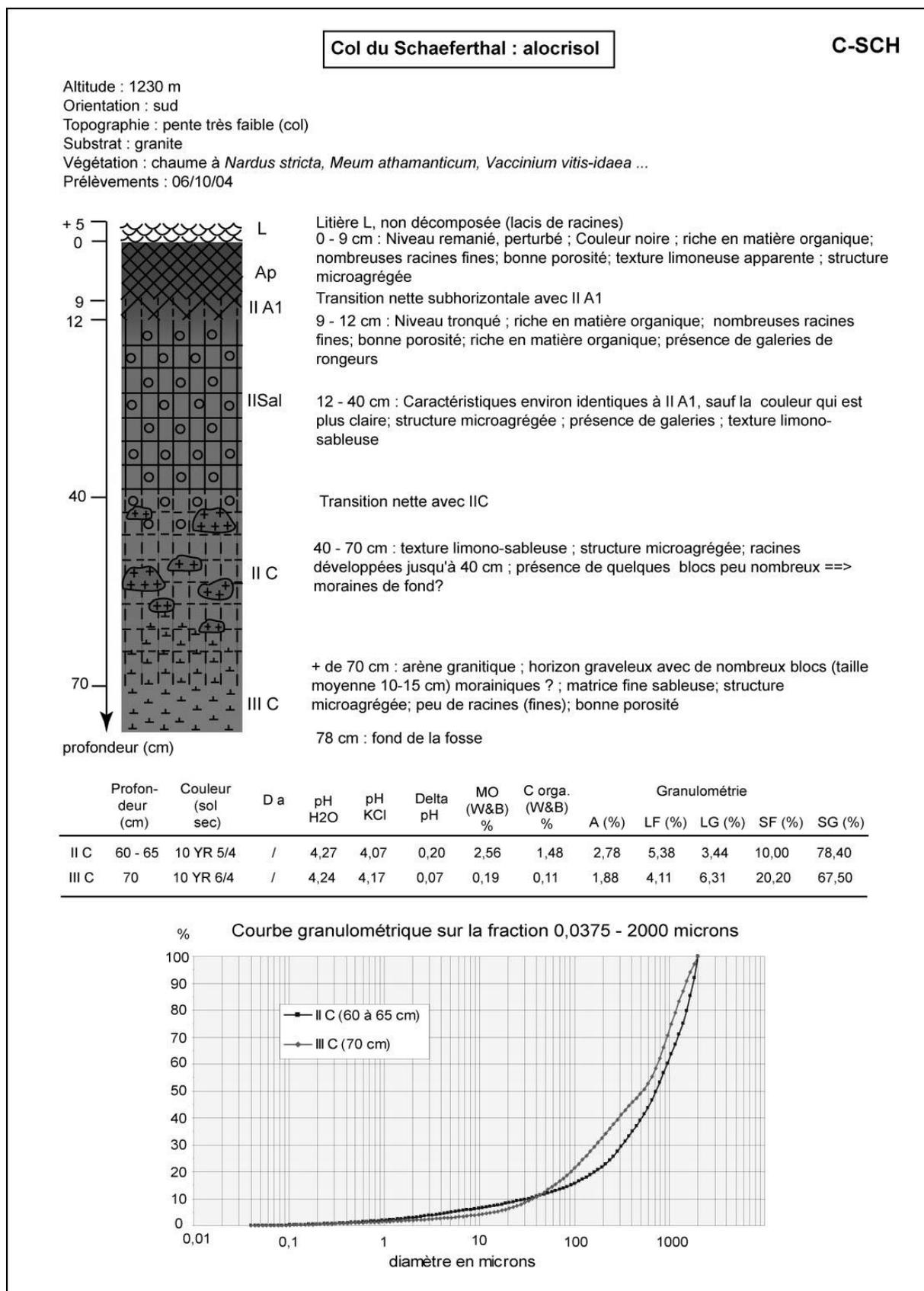
# GAF2 : ranker cryptopodzolique du Gazon du Faing, sous prairie (Goepf, 2007)



# PHOH : alocrisol du Petit Hohneck sous prairie (Goepf 2007)



# CSCH : alocrisol du col du Schaeferthal sous prairie (Goepf 2007)



## MAS : champ bombé sous prairie à Guewenheim



### Type de sol

**CPCS :** Sol brun acide  
**RP 2008 :** Alocrisol  
**WRB 2006 :** Cambisol  
**Roche mère** Alluvions vosgiennes

### Localisation

Lieu dit : Vallée de la Doller  
 Commune : Guewenheim, 68  
 Lat. : 47°45'28" N  
 Long. : 07°05'04" E

### Topographie

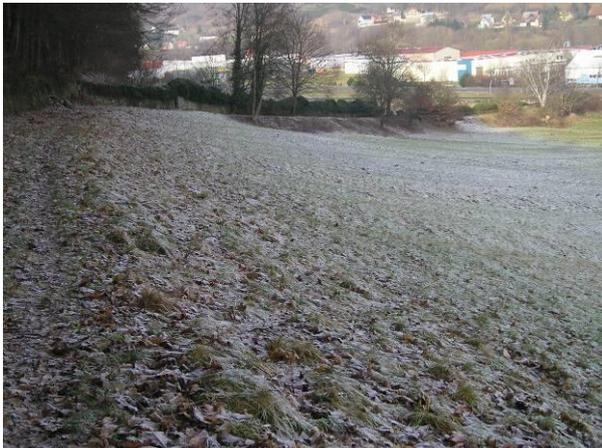
Alti. : 340 m  
 Pente : 0°  
 Exposition : Terrasse alluviale

### Végétation

Formation vég. : Pré de fauche  
 Principales essences :  
 Historique : Cultivé puis sous prairie depuis 50 ans

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4				en cours				

## MUN : champ bombé sous prairie à Griesbach-au-Val



### Type de sol

**CPCS :** Sol brun acide  
**RP 2008 :** Alocrisol  
**WRB 2006 :** Cambisol  
**Roche mère**

### Localisation

Lieu dit : Vallée de la Fecht  
 Commune : Griesbach-au-val, 68  
 Lat. : 48°02'26" N  
 Long. : 07°10'05" E

### Topographie

Alti. : 350 m  
 Pente : 10°  
 Exposition : N-E

### Végétation

Formation vég. : Pré de fauche  
 Principales essences : Graminées  
 Historique : Cultivé puis sous prairie depuis 50 ans

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4				En cours				

## CAR : hêtraie du Stoeffelhag



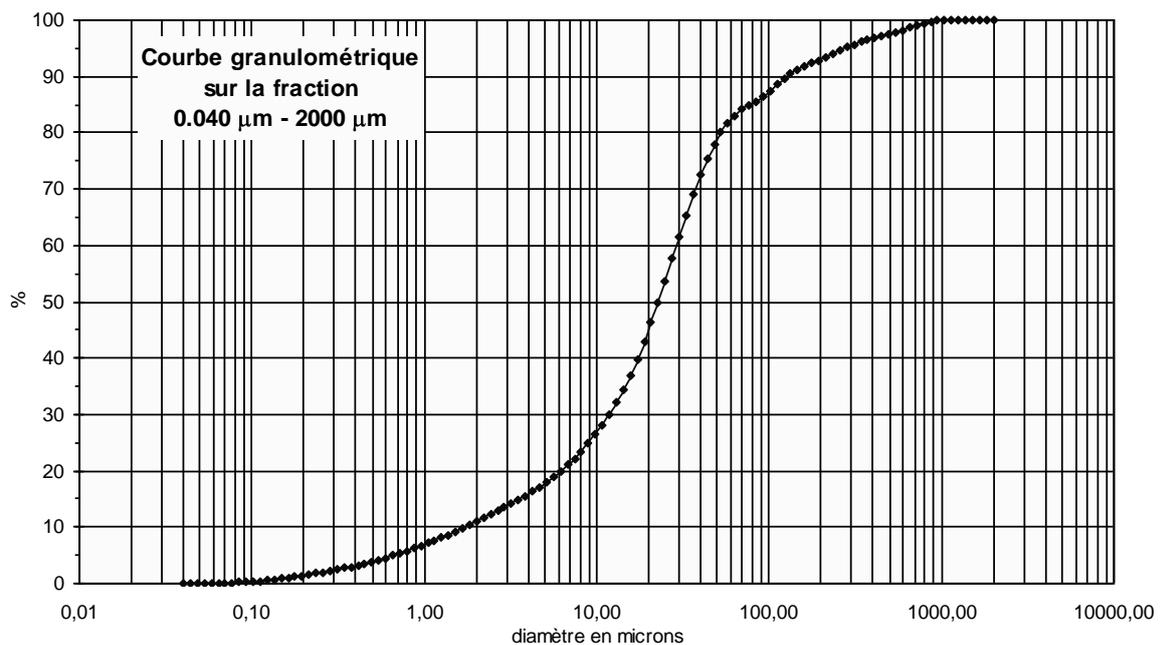
Photo D. Schwartz

Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Stoeffelhag	Alti. :	390 m	Formation vég. :	Hêtraie
Commune :	Carspach, 68	Pente :	0°	Principales essences :	
Lat. :	47°36'00" N	Exposition :	Sommet	Historique :	Sous forêt depuis 1760 au moins
Long. :	07°09'39" E				

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	4,62	12,39	4,10	10,4	32,5	35,1	14,9	7,1

### Type de sol

<b>CPCS :</b>	Sol brun calcaire
<b>RP 2008 :</b>	calcosol
<b>WRB 2006 :</b>	cambisol
<b>Roche mère</b>	Loess



## DID : forêt à forte biodiversité, colline St Gall



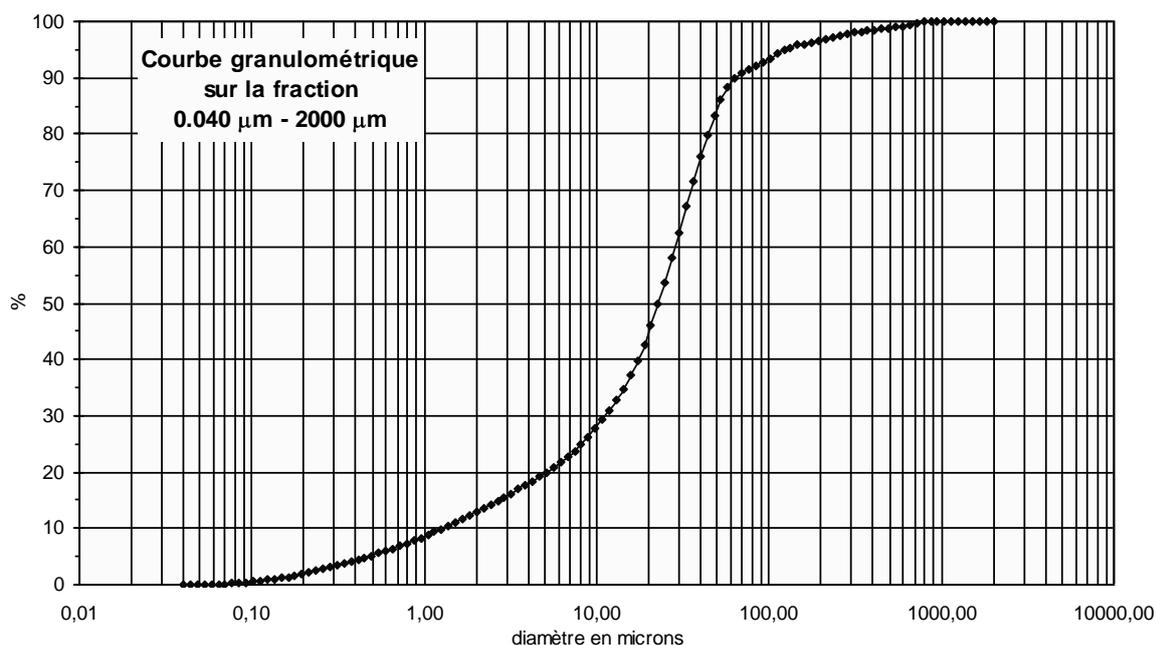
Photo D. Schwartz

Localisation	Topographie	Végétation
Lieu dit : Gallenhölzchen	Alti. : 320 m	Formation vég. : Chênaie
Commune : Didenheim, 68	Pente : 5°	Principales essences : Chêne (sp.), hêtre, charme, merisier, érable plane, noisetier, orme, lierre
Lat. : 47°42'46" N	Exposition : N-W	Historique : Sous forêt depuis 1760 au moins
Long. : 07°17'25" E		

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	3,05	8,16	5,32	12,3	30,4	40,6	13,2	3,5

### Type de sol

<b>CPCS :</b>	Sol brun calcaire
<b>RP 2008 :</b>	calcosol
<b>WRB 2006 :</b>	cambisol
<b>Roche mère</b>	Loess



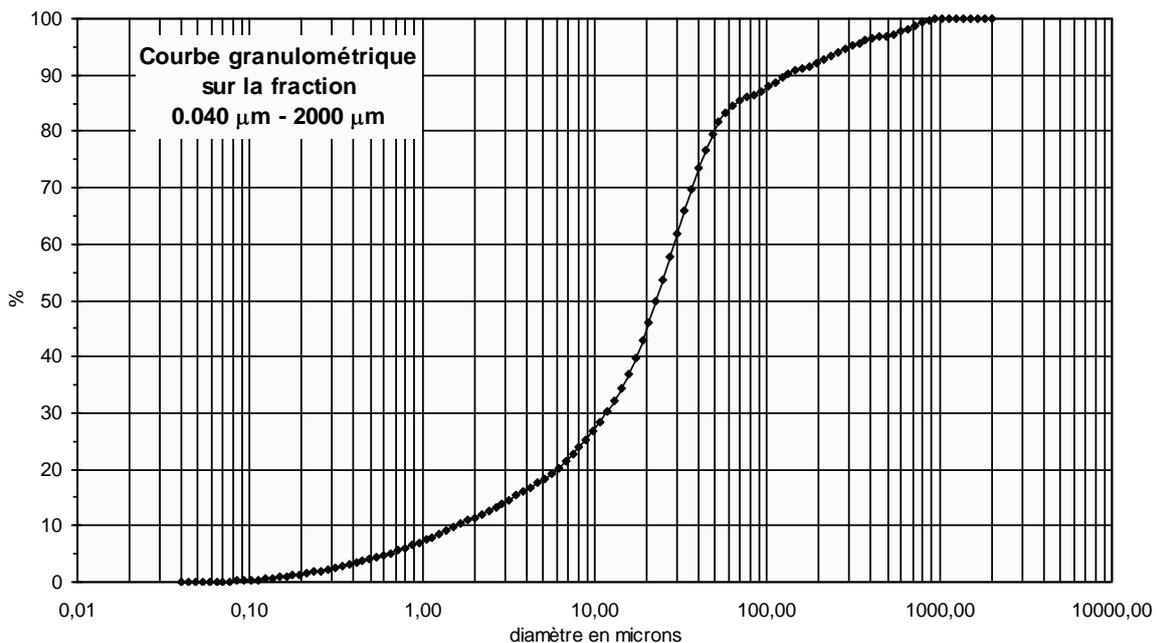
# HIR : hêtraie du Breitholtz



Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Breitholtz	Alti. :	385 m	Formation vég. :	Hêtraie
Commune :	Hirsingue, 68	Pente :	5°	Principales essences :	Hêtre ++, chêne, érable, 1 sapin
Lat. :	47°36'05" N	Exposition :	N-W	Historique :	Sous forêt depuis 1760 au moins
Long. :	07°15'29" E				

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	3,56	9,39	4,42	10,9	31,9	36,6	12,6	8,0

Type de sol			
CPCS	RP 2008	WRB 2006	Roche mère
Sol brun calcaire	calcosol	cambisol	loess



## BIN : forêt alluviale à forte biodiversité, Rohrzembs

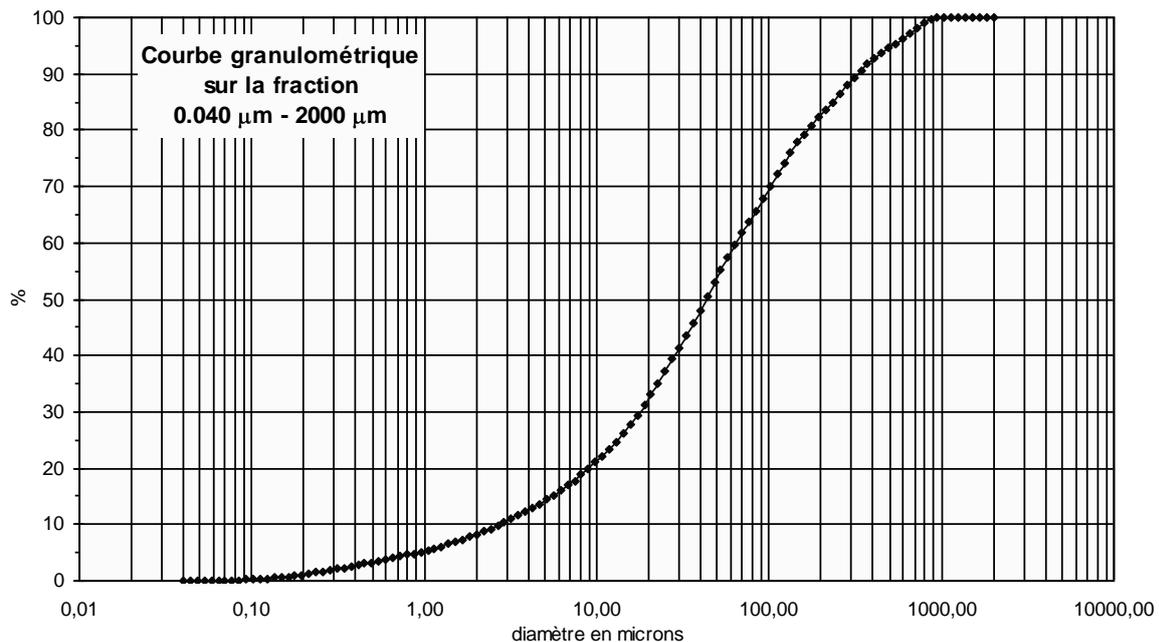


Photo Claudia Marshall

Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Rohrzembs	Alti. :	161 m	Formation vég. :	forêts alluviale
Commune :	Bindernheim, 67	Pente :	0°	Principales essences :	Chêne, orme champêtre, aulne glutineux, érable sycomore, frêne, charme, noisetier, lierre
Lat. :	48°18'04" N	Exposition :	plaine	Historique :	Ancien marécage, sous forêt depuis 130 ans
Long. :	07°36'38" E				

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	42,24	73,43	4,71	7,7	23,4	21,7	29,3	17,8

Type de sol	
<b>CPCS :</b>	Tourbière
<b>RP 2008 :</b>	Histosol
<b>WRB 2006 :</b>	Histosol
<b>Roche mère</b>	Tourbe



## COL : chênaie alluviale à forte biodiversité de Colmar



Localisation		Topographie	Végétation	
Lieu dit :	Forêt communale de Colmar	Alti. : 179 m	Formation vég. :	forêt alluviale
Commune :	Colmar, 68	Pente : 0°	Principales essences :	Chêne, orme champêtre, érable, aulne glutineux, frêne, noisetier
Lat. :	48°10'12" N	Exposition : plaine	Historique :	Sous forêt depuis 1760 au moins
Long. :	07°23'32" E			

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	3,30	8,56	5,31	7,2	15,5	6,2	5,9	65,1

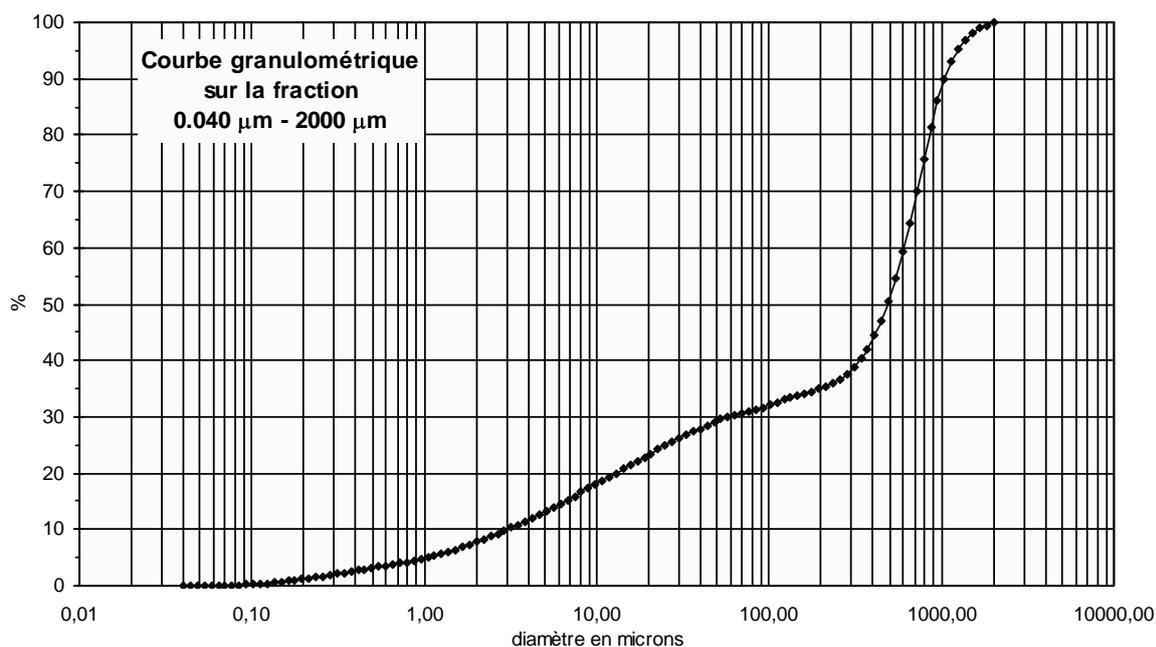
### Type de sol

**CPCS :** Sol hydromorphe

**RP 2008 :** Réductisol

**WRB 2006 :** Gleysol

**Roche mère** Alluvions vosgiennes



## RIB : chênaie alluviale du Ried Brun



Photo Claudia Marshall

Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Illwald	Alti. :	172 m	Formation vég. :	Forêt alluviale
Commune :	Sélestat, 67	Pente :	0°	Principales essences :	Chêne, orme, charme, aulne, érable, frêne, noisetier
Lat. :	48°13'42" N	Exposition :	Plaine	Historique :	Sous forêt depuis 1760 au moins
Long. :	07°26'49" E				

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	7,56	18,23	4,15	25,2	45,0	14,4	10,0	5,4

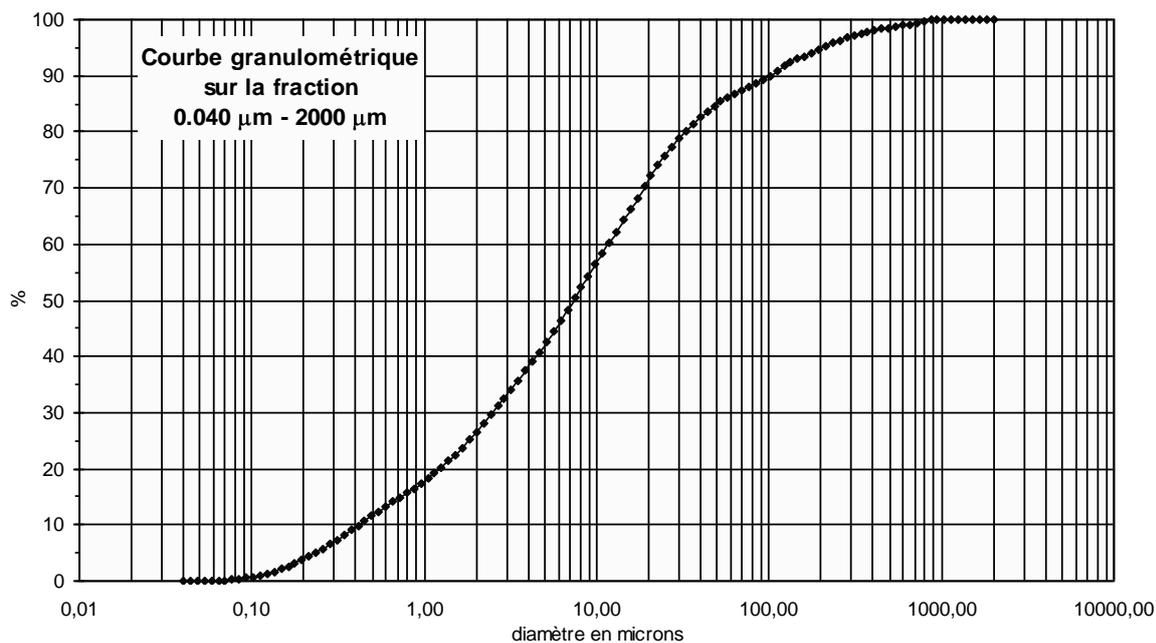
### Type de sol

**CPCS :** Sol hydromorphe

**RP 2008 :** Réductisol

**WRB 2006 :** Gleysol

**Roche mère** Alluvions vosgiennes



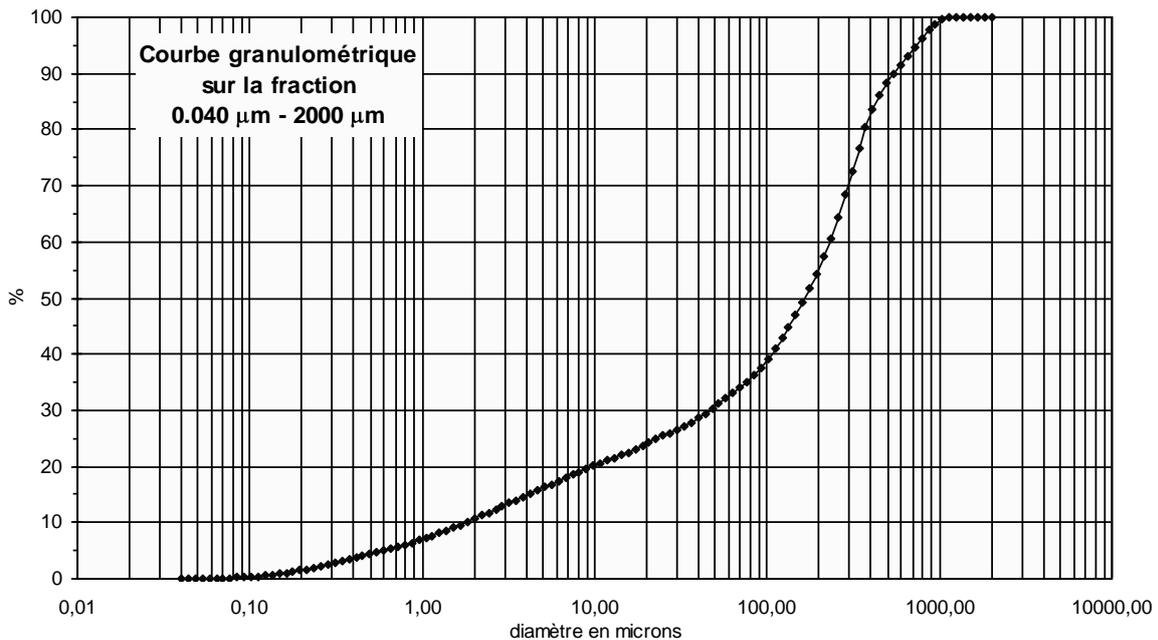
## RIG : forêt alluviale à forte biodiversité du Ried Gris



Localisation		Topographie	Végétation	
Lieu dit :	Illwald	Alti. : 170 m	Formation vég. :	Forêts alluviale
Commune :	Sélestat, 67	Pente : 0°	Principales essences :	Chêne, aulne, érable, frêne, cornouiller, sureau noir, fusain
Lat. :	48°14'15" N	Exposition : Plaine	Historique :	Sous forêt depuis 1760 au moins
Long. :	07°29'18" E			

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	6,80	16,54	5,78	10,1	13,5	6,7	24,0	45,7

Type de sol	
CPCS :	Sol hydromorphe
RP 2008 :	Réductisol
WRB 2006 :	Gleysol
Roche mère	Alluvions vosgiennes

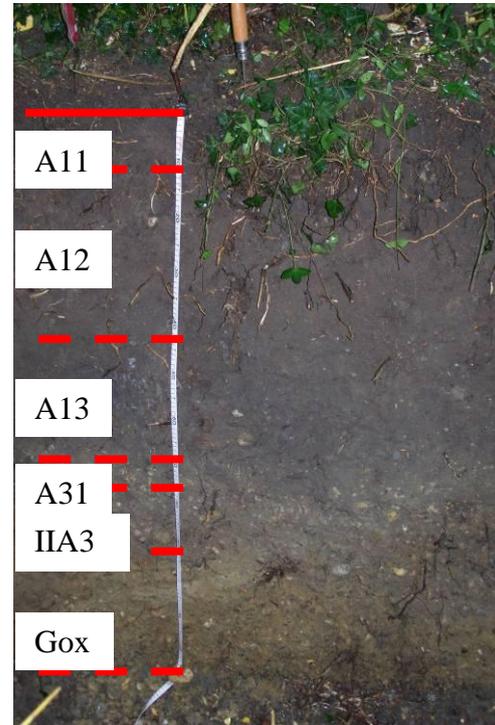


## MUF : forêt à forte biodiversité du Prinzenwald

### MHG : profil sous MUF, gleysol



Photos D. Schwartz



Profil développé dans deux matériaux déposés successivement. A la base les graviers rhénans, puis les limons de débordement sur 78 cm.



Excellente activité biologique : la litière est réduite à une couche L peu épaisse.

A11 : 0-10 cm ; frais ; gris 10YR3/1 ; structure grumeleuse ; quelques graviers ; limoneux ; nombreuses racines (3-4 mm) ; bonne porosité ; activité biologique intense ; non effervescent ; transition distincte, avec :

A12 : 10 - 45 cm ; frais à humide ; 10YR4/2 ; structure polyédrique anguleuse très fine ; quelques graviers ; limoneux ; assez nombreuses racines de taille moyenne (3-4 mm) + quelques grosses ; bonne porosité ; activité biologique intense (très nombreuses galeries de vers) ; effervescent à partir de 35 cm ; transition distincte avec :

A13 : 45 - 70 cm ; humide ; 10YR4/1 ; limono-argileux ; structure polyédrique anguleuse moins développée (aspect plus massif) ; quelques graviers ; peu de racines ; porosité moyenne ; peu de galeries de vers ; effervescent ; transition nette avec :

A31 : 70 - 78 cm ; gris 2,5Y4/2 ; humide ; argileux ; aspect massif, mais structure polyédrique anguleuse fine ; quelques galeries de ver, peu de racines ; effervescent ; transition brutale avec :

IIA32 : 78 - 90 cm ; gris 2,5Y4/2 ; humide ; sablo-argileux ; à nombreux éléments grossiers (galets rhénans) ; peu de racines (fines) ; effervescent ; transition nette avec :

IIGox : 90 - >120 cm ; jaune pâle 2,5Y5/4 ; humide ; sablo-argileux ; à nombreux éléments grossiers (galets rhénans) ; peu de racines (fines) ; effervescent ; taches d'oxydoréduction.

Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit : Prinzenwald		Alti. : 170 m		Formation vég. : Forêt alluviale	
Commune : Mussig, 67		Pente : 0°		Principales essences : Frênes (++) , charmes (+) , quercus sp. , robiniers , érables champêtres , aulnes , noisetiers , sureaux noirs , sceau de salomon (sp.) , <i>paris quadrifolia</i> , lierre (+++), pervenche (+++), ballotte fétide , labiée sp. , ornithogale (?) , <i>arum sp.</i> , <i>ranuncula sp.</i> ,	
Lat. : 48°13'03"N Long. : 07°32'38"E		Exposition : Plaine		Historique : Sous forêt depuis 1760 au moins	

Code	Prof. cm	C org. %	PAF %	TMR	pH	Granulométrie				
						A %	LF %	LG %	SF %	SG %
MUF	0-4	5,62	11,85		6,53	9,8	21,4	10,8	22,7	35,2
MHG101	10-20	2,69	4,83		7,57					
	26			845 ± 30						
MHG103	30-40	1,69	2,78		7,73					
	44			1380 ± 320						
MHG105	50-60	1,14	2,62		7,90					
	60			2165 ± 35						
MHG107	65-70	0,86	1,66		8,04					

#### Type de sol

<b>CPCS :</b>	Sol hydromorphe
<b>RP 2008 :</b>	Réductisol
<b>WRB 2006 :</b>	Gleysol
<b>Roche mère</b>	Alluvions rhénanes

## MRN : sol hydromorphe du Ried Noir



O-20 cm : A : limono-sableux, noir, grumeleux, nombreuses racines, petit lit d'éléments grossiers (1 cm) vers 20 cm. transition diffuse vers :

20- 43 cm : S : Argileux, noir, très compact, quelques racines jusqu'à 30 cm puis aucune racine. Transition nette avec :

>43 cm : C gravier dans une matrice argileuse avec nombreuses traces d'oxydation

### Type de sol

**CPCS** : Sol hydromorphe

**RP 2008** : Réductisol

**WRB 2006** : Gleysol

**Roche mère** Alluvions rhénanes

43 cm

Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Ried Noir	Alti. :	170 m	Formation vég. :	prairie humide
Commune :	Mussig, 67	Pente :	0°	Principales essences :	graminées
Lat. :	48°13' N	Exposition :	Plaine	Historique :	Milieu ouvert depuis 1890 au moins
Long. :	07°32' E				

EFA, chênaie de l'Elmerforst, forêt de l'Œuvre Notre Dame  
EFP, profil sous EFA : alocrisol (cambisol)



(Photo D. Schwartz)

Litière : L, mull sous chêne

0 – 4/7 cm : A1, gris-brun, humide, 7,5YR3/2 sans éléments grossiers, sablo-limoneux ; MO non décelable directement ; structure massive + grumeleux par endroit, mais peu développée ; bonne microporosité ; nombreuses racines fines ; transition irrégulière, nette, avec :

4/7 – 45 cm Sal ; 5YR4/4 ; sablo-limoneux ; structure massive, avec par endroit polyédrique anguleux peu développé ; nombreuses galeries de vers anéciques ; présence d'éléments grossiers, de diamètre allant jusqu'à 10 cm ; racines fines et moyennes (1,5 cm maxi), avec une densité maximale entre 30 et 45 cm ; transition progressive avec :

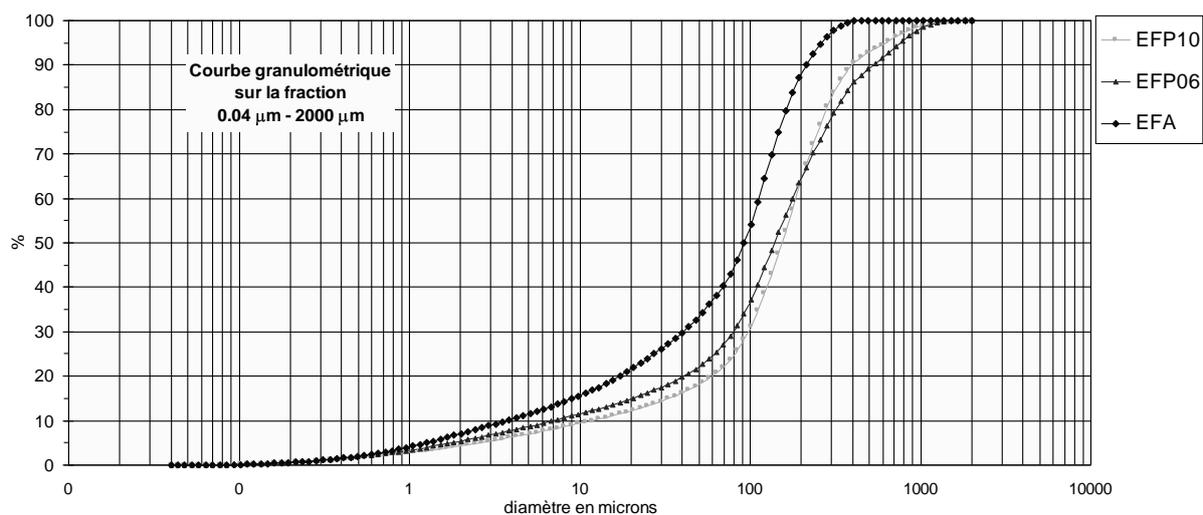
C : > 45 cm ; nombreux éléments grossiers, jusqu'à 20-30 cm de diamètre, racines fines ; structure massive avec un peu de polyédrique anguleux ; couleur rouge 2,5YR4/6

Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Elmerforst	Alti. :	350 m	Formation vég. :	Chênaie
Commune :	Balbronn, 67	Pente :	5°	Principales essences :	Chêne, sous bois peu dense de graminées et mousses plus quelques arbrisseaux (chênes, hêtres)
Lat. :	48°35'43"N	Exposition :	W	Historique :	Sous forêt depuis 700 ans au moins
Long. :	07°23'19"E				

Code	Prof. cm	C org. %	PAF %	TMR	pH	Granulométrie				
						A %	LF %	LG %	SF %	SG %
EFA	0-4	4,30	6,96	moderne	5,01	6,6	14,2	11,8	54,5	12,8
EFP06	25-30	0,68	1,93	300 ± 30	4,18	5,1	9,3	7,1	41,9	36,5
EFP10	60-70	0,41	1,38	1735 ± 35	4,29	4,1	7,7	5,8	45,0	37,3

### Type de sol

<b>CPCS :</b>	Sol brun acide
<b>RP 2008 :</b>	Alocrisol
<b>WRB 2006 :</b>	Cambisol
<b>Roche mère</b>	Grès



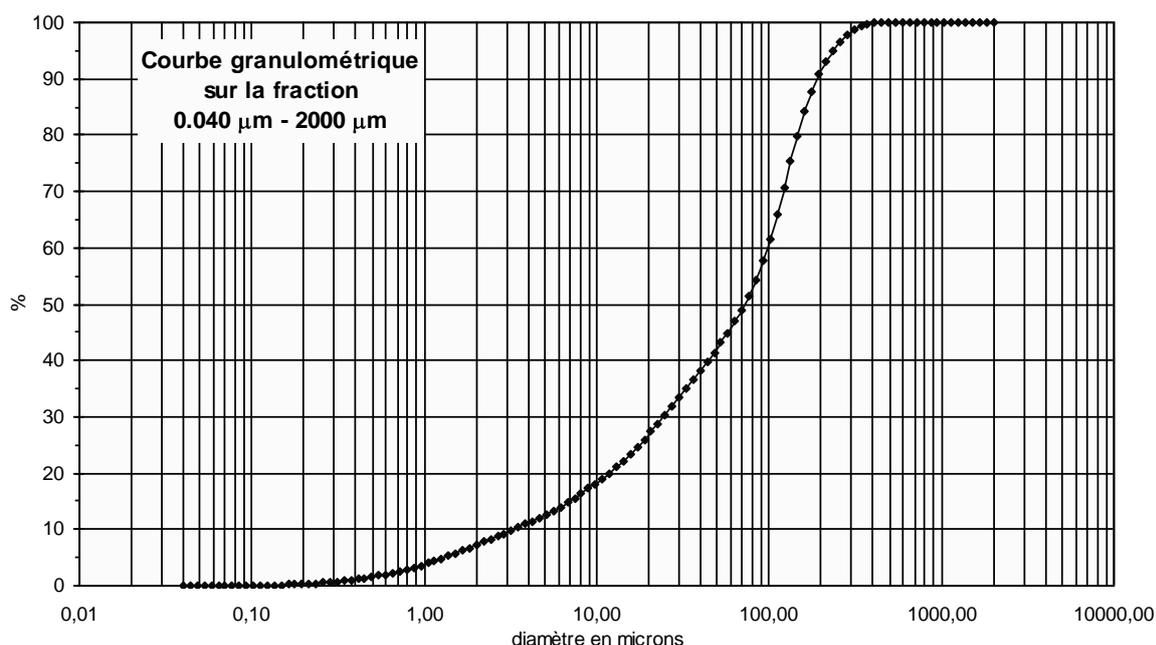
# EFB : hêtraie de l'Elmerforst, forêt de l'Œuvre Notre Dame



Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Elmerforst	Alti. :	350 m	Formation vég. :	Hêtraie
Commune :	Balbronn, 67	Pente :	0°	Principales essences :	Hêtre, sous bois peu dense composé de jeunes hêtres
Lat. :	48°35'18"N	Exposition :	Sommet	Historique :	Sous forêt depuis 700 ans au moins
Long. :	07°23'29"E				

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	3,79	6,25	5,63	6,7	19,2	15,5	49,3	9,3

Type de sol			
CPCS	RP 2008	WRB 2006	Roche mère
Sol brun acide	Alocrisol	Cambisol	Grès



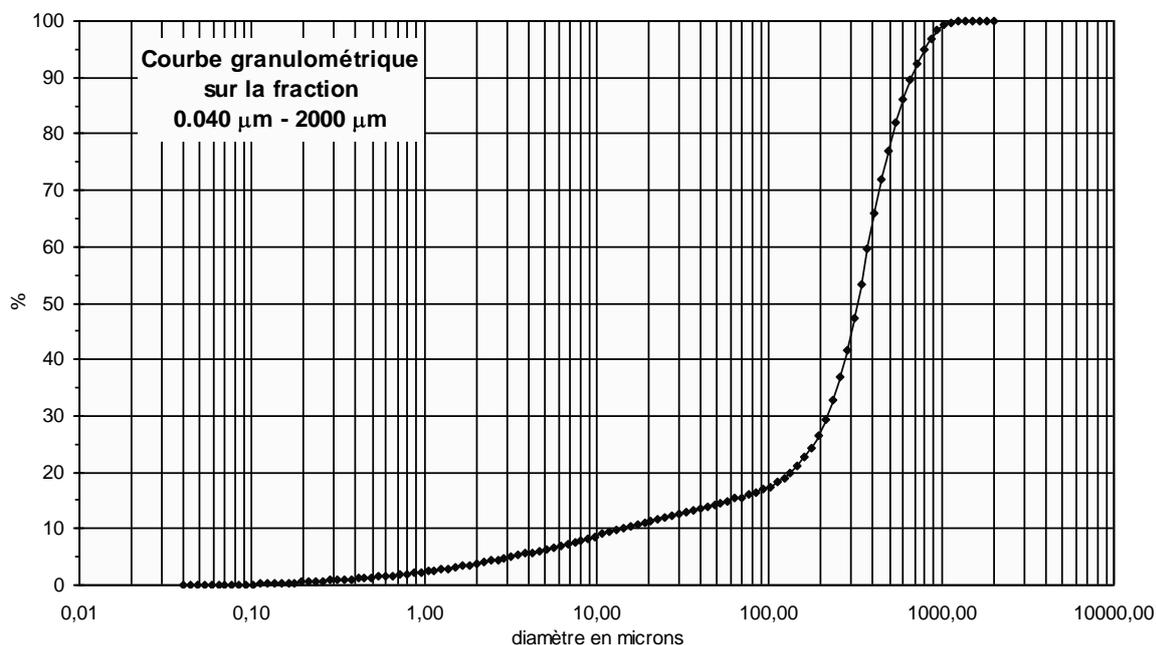
# EFC : sapinière, forêt de l'Oedenwald

Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Elmerforst	Alti. :	600 m	Formation vég. :	Sapinière
Commune :	Cosswiller, 67	Pente :	5°	Principales essences :	Sapin ++, hêtre, épicéa, régénération : sapin ++, épicéa, Sous-bois : mousses (polytric), <i>Pteridium aquilinum</i> (fougère aigle), Myrtille, Canche flexueuse, 3 graminées spp., luzule, <i>Calamagrostis</i> (?), 1 composée, 1 euphorbe, 1 <i>viola sp.</i>
Lat. :	48°35' N	Exposition :	N-E	Historique :	Sous forêt depuis 700 ans au moins
Long. :	07°23' E				

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	4,30	9,84	4,64	3,5	7,4	3,3	12,3	73,4

## Type de sol

**CPCS :** Ocre podzolique  
**RP 2008 :** Podzosol ocrique  
**WRB 2006 :** Entic podzol  
**Roche mère** Grès



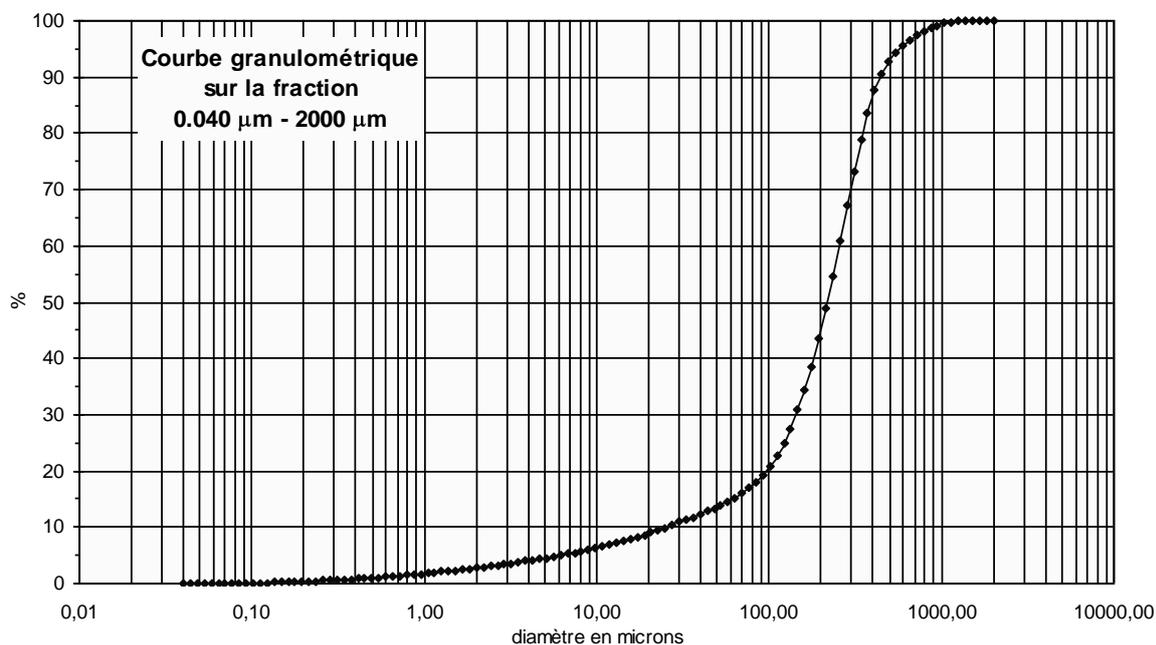
# EFD : sapinière, forêt de l'Oedenwald

Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Elmerforst	Alti. :	600 m	Formation vég. :	Sapinière
Commune :	Cosswiller, 67	Pente :	5°	Principales essences :	Sapin ++, Epicéa, Hêtre, Sorbier des oiseleurs, 1 genêt, sous-bois : mousses (polytric + 2 autres spp) - strate muscinale très développée, fougère mâle, myrtille, Canche flexueuse, luzule
Lat. :	48°35' N	Exposition :	N-E	Historique :	Sous forêt depuis 700 ans au moins
Long. :	07°23' E				

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	4,27	11,66	3,78	2,6	5,9	4,7	30,0	56,6

## Type de sol

**CPCS :** Ocre podzolique  
**RP 2008 :** Podzosol ocrique  
**WRB 2006 :** Entic podzol  
**Roche mère :** Grès



## VST : hêtraie de la réserve V Studenem, CZ

VSP : profil sous VST, alocrisol (cambisol)



Photos D. Schwartz

Litière : mull-moder à couches L-F

A1 : 0 – 6/12 cm ; frais, 10 YR 2/2 ; limoneux ; struct. grenue ; racines fines ; qqques cailloux ; transition nette avec :

AS : 6/12 – 30 cm ; gris ; frais ; 10YR3,5/4 ; limoneux ; racines fines ; cailloux, pierres ; transition distincte avec :

S : 30 à + de 50 cm ; brun jaune 10YR3,5/4 à 4/4 ; limoneux ; cailloux , pierres, blocs abondants ; qqques racines moyennes ; frais ; microagrégé.

Localisation	Topographie	Végétation	
Lieu dit : V Studenem	Alti. : 400 m	Formation vég. :	Hêtraie
Commune : Dojetrice, Benesov (CZ)	Pente : 20°	Principales essences :	Hêtre, érable sycomore, qqques sapins, carpinus, frêne, sureau noir en sous-bois ; fougère mâle, impatiens parviflorum, impatiens noli-tangere, dantaria sp., mellitis (?), circea parisiensis (?), aspérule, jeunes érable

Lat. : 49°52'28" N  
 Long. : 14°51'33" E

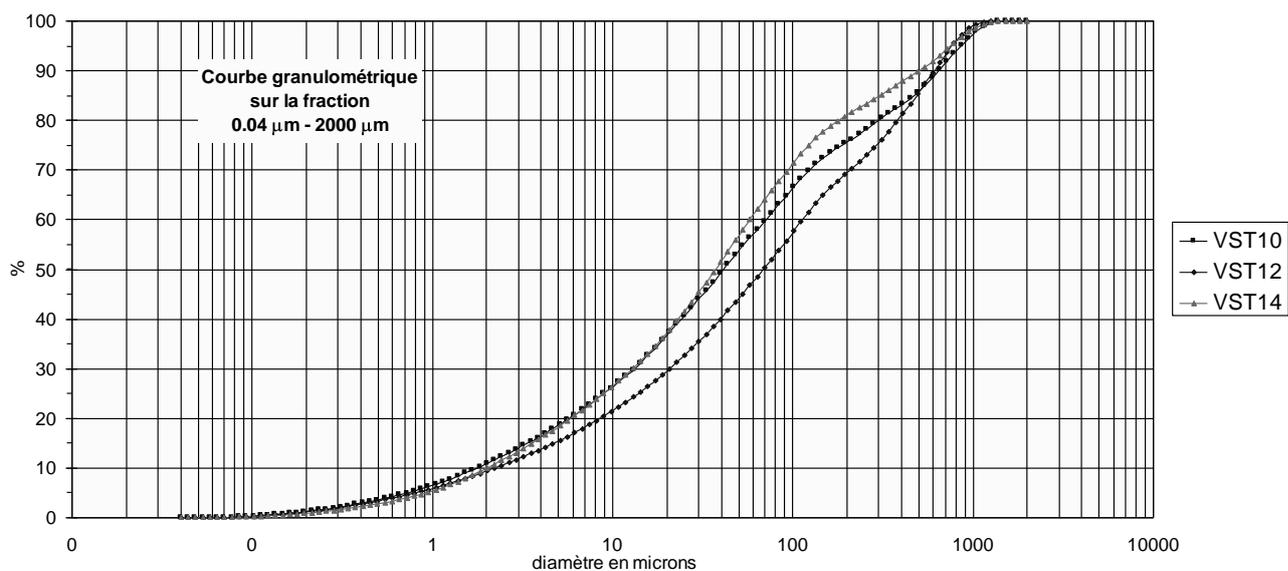
Exposition : N-E

Historique : Sous forêt depuis 200 ans au moins

Code	Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
					A %	LF %	LG %	SF %	SG %
VST10	0-4	4,92	12,77	4,20	10,3	25,4	17,2	22,4	24,7
VST12	20-25	1,79	5,91	4,30	8,8	19,9	14,6	25,7	30,9
VST14	40-50	1,07	4,94	4,70	9,2	26,9	19,7	24,8	19,3

**Type de sol**

CPCS	RP 2008	WRB 2006	Roche mère
Sol brun acide	Alocrisol	Cambisol	Gneiss



# OCC : chênaie-charmaie du Kalkoffen

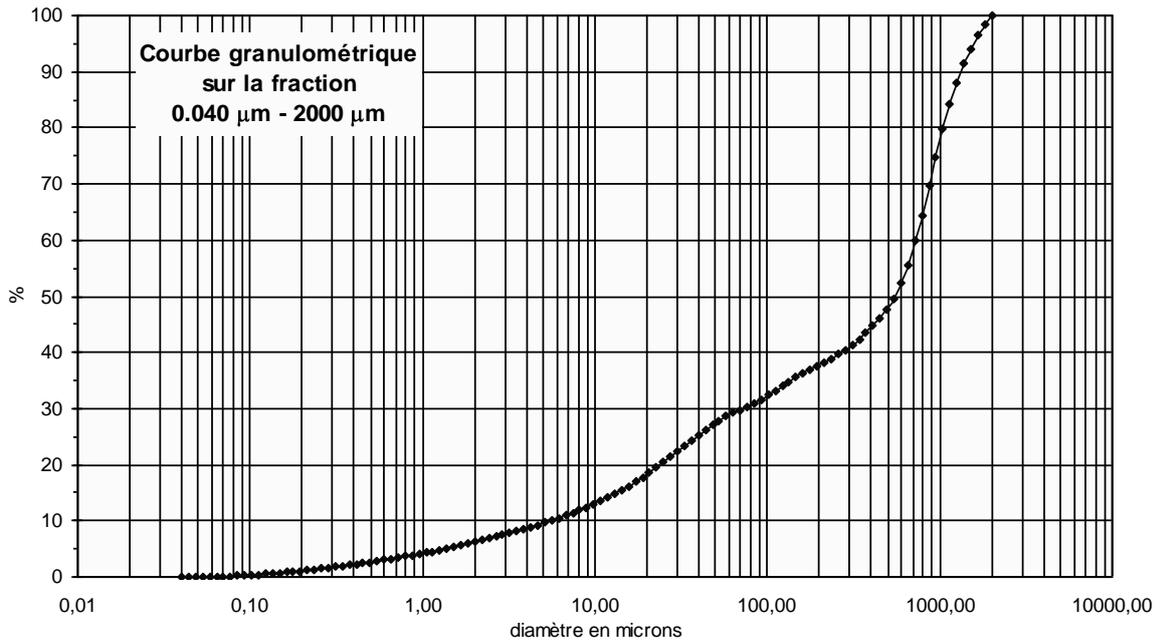


Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Kalkofen	Alti. :	470 m	Formation vég. :	Chênaie-charmaie
Commune :	Osenbach, 68	Pente :	5°	Principales essences :	Chêne ++, charme+
Lat. :	47°59'41"N	Exposition :	S-E	Historique :	Sous forêt depuis 1760 au moins
Long. :	07°12'42"E				

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	5,60	9,52	5,57	5,9	11,7	9,4	10,5	62,4

**Type de sol**

<b>CPCS :</b>	Sol brun calcaire
<b>RP 2008 :</b>	Calcosol
<b>WRB 2006 :</b>	Cambisol
<b>Roche mère</b>	Calcaire



# OCS : chênaie-sapinière du Kalkoffen

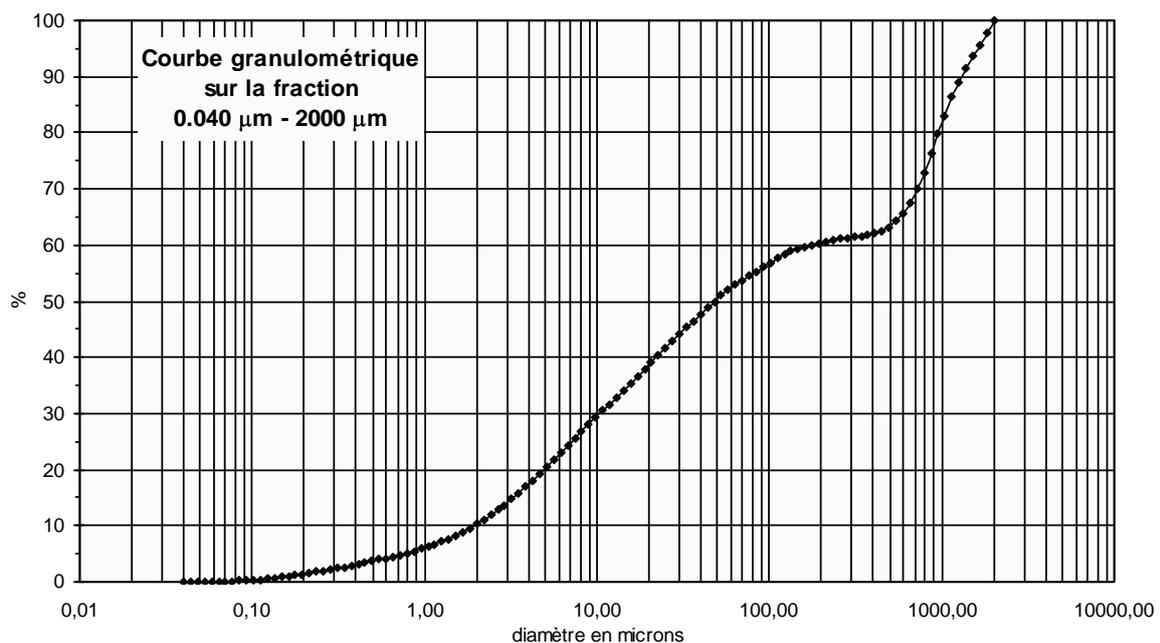


Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Kalkofen	Alti. :	480 m	Formation vég. :	Chênaie-sapinières
Commune :	Osenbach, 68	Pente :	5°	Principales essences :	Chêne ++, sapin +, hêtre, alisier blanc, alisier tormentueux
Lat. :	47°59'47"N	Exposition :	S-E	Historique :	Sous forêt depuis 1760 au moins
Long. :	07°12'45"E				

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	7,88	16,04	6,23	9,5	28,1	12,3	10,3	39,7

## Type de sol

<b>CPCS :</b>	Sol brun calcaire
<b>RP 2008 :</b>	Calcosol
<b>WRB 2006 :</b>	Cambisol
<b>Roche mère</b>	Calcaire



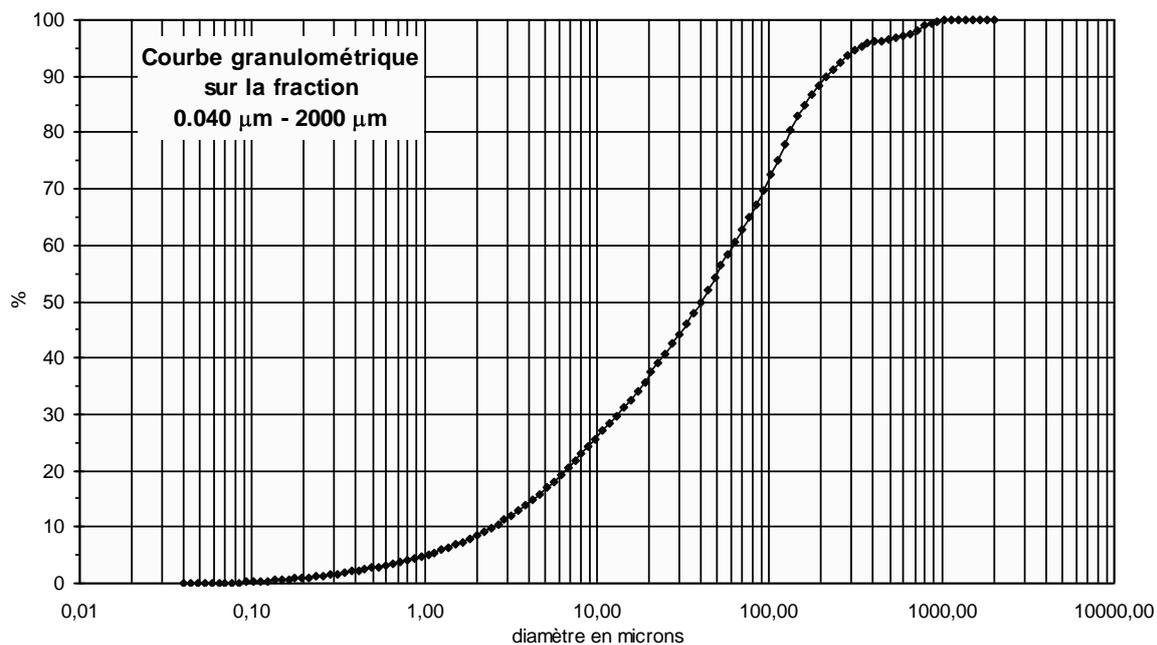
## OSG : chênaie-sapinière du Hohberg



Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Hohberg	Alti. :	550 m	Formation vég. :	Chênaie-sapinière
Commune :	Westhalten, 68	Pente :	5°	Principales essences :	Chênaie++, sapin+
Lat. :	47°59'18"N	Exposition :	W-SW	Historique :	Sous forêt depuis 1760 au moins
Long. :	07°14'17"E				

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	5,44	9,95	5,50	7,9	27,8	18,5	34,1	11,7

Type de sol	
<b>CPCS :</b>	Rendzine
<b>RP 2008 :</b>	Rendosol
<b>WRB 2006 :</b>	Calcic leptosol
<b>Roche mère</b>	Calcaire



# HKC : chênaie du Haut Koenigsbourg

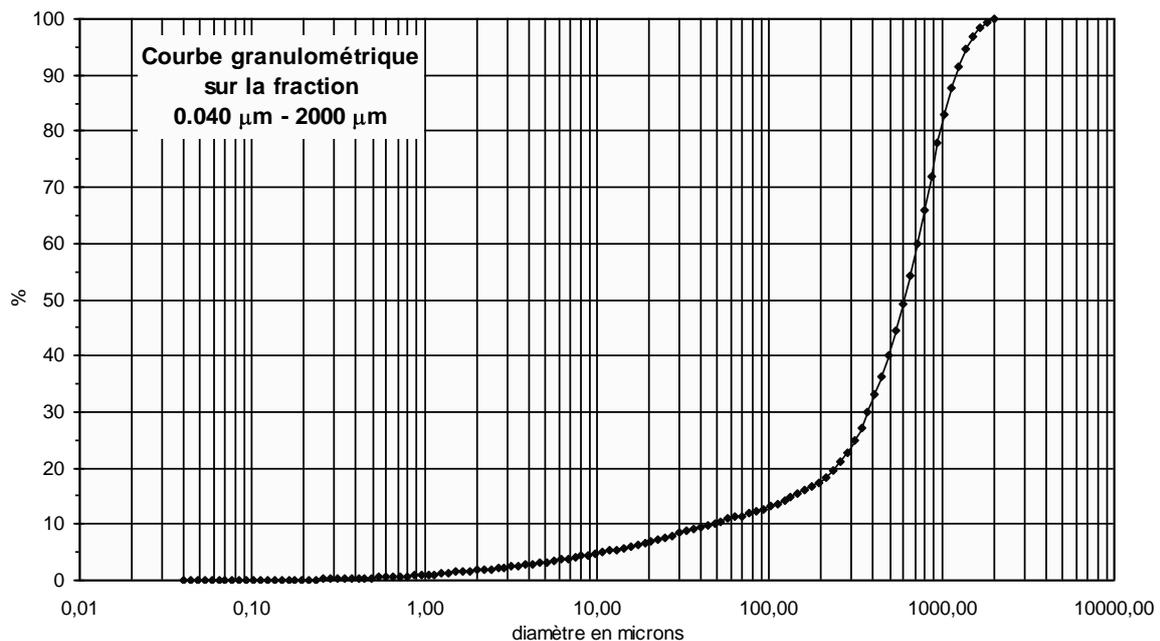


Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Burgerwald	Alti. :	500 m	Formation vég. :	Hêtraie-sapinière
Commune :	Saint-Hippolyte, 67	Pente :	10°	Principales essences :	Chêne ++, hêtre, charme, alisier, sous-bois : sapins (< 1,2 m), canche flexueuse, germandrée scorodoine, luzule des bois
Lat. :	48°14'41"N	Exposition :	S	Historique :	Sous forêt depuis 1760 au moins
Long. :	07°20'51"E				

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	4,46	9,59	5,33	1,6	5,0	3,5	7,3	82,5

## Type de sol

<b>CPCS :</b>	Sol brun acide
<b>RP 2008 :</b>	Alocrisol
<b>WRB 2006 :</b>	Cambisol
<b>Roche mère</b>	Granite/gneiss



## PCS : chênaie-sapinière du petit-Ballon

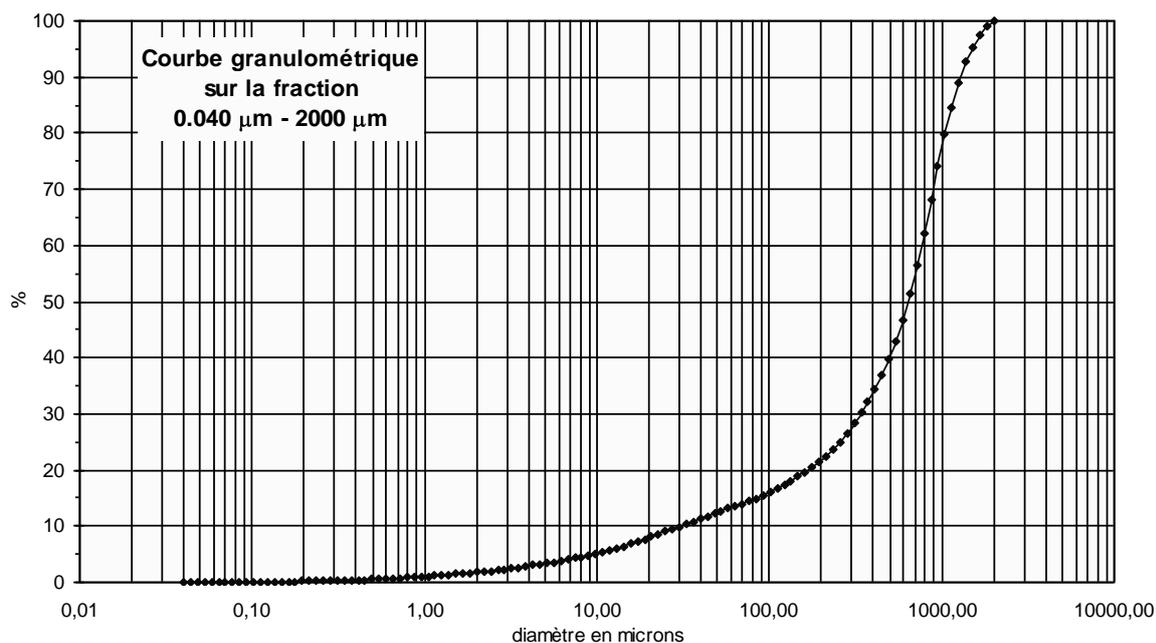


Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Petit Ballon	Alti. :	800 m	Formation vég. :	Chênaie-sapinière
Commune :	Wasserbourg, 68	Pente :	20°	Principales essences :	
Lat. :	48°00'16"N	Exposition :	S	Historique :	Sous forêt depuis 1760 au moins
Long. :	07°08'45"E				

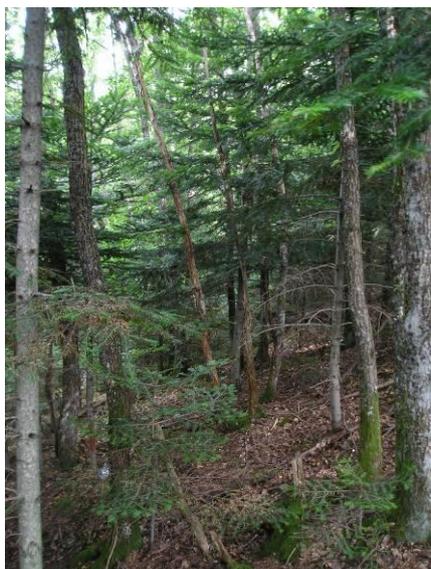
Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	12,36	22,10	4,03	1,6	5,9	4,5	9,2	78,6

### Type de sol

<b>CPCS :</b>	Sol brun acide
<b>RP 2008 :</b>	Alocrisol
<b>WRB 2006 :</b>	Cambisol
<b>Roche mère</b>	Granite



## BLH : chênaie-sapinière, route du Hundsrucken



Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Rosberg	Alti. :	660 m	Formation vég. :	chênaie-sapinière
Commune :	Bourbach-le haut, 68	Pente :	25°	Principales essences :	Chênes ++, sapins ++, hêtres, érable, alisier, chêne
Lat. :	47°48'07"N	Exposition :	W	Historique :	Prairie en 1760, sous forêt depuis 130 ans au moins
Long. :	07°02'12"E				

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	12,14	25,65	4,45	16,2	30,6	19,7	16,5	17,0

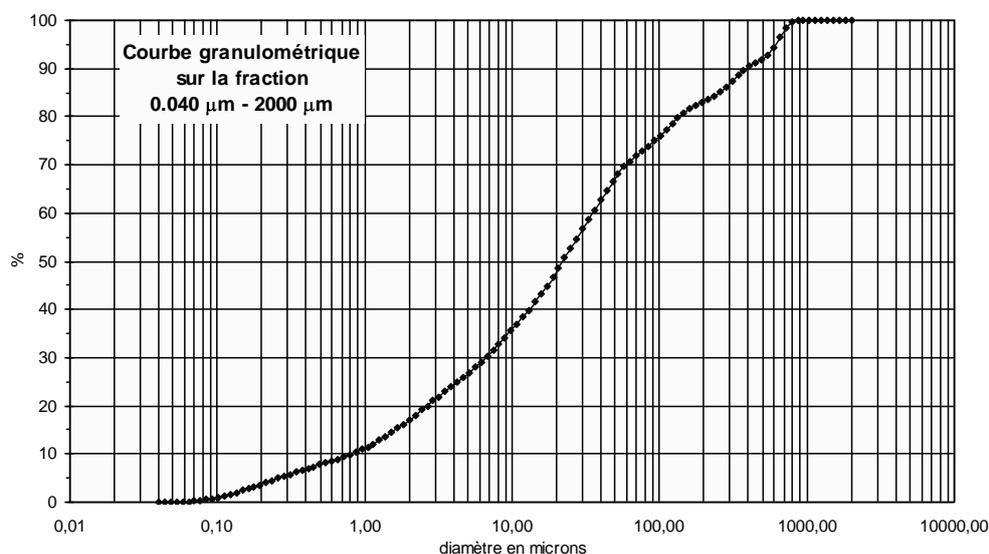
### Type de sol

**CPCS :** Sol brun acide

**RP 2008 :** Alocrisol

**WRB 2006 :** Cambisol

**Roche mère** Volcano sédimentaire



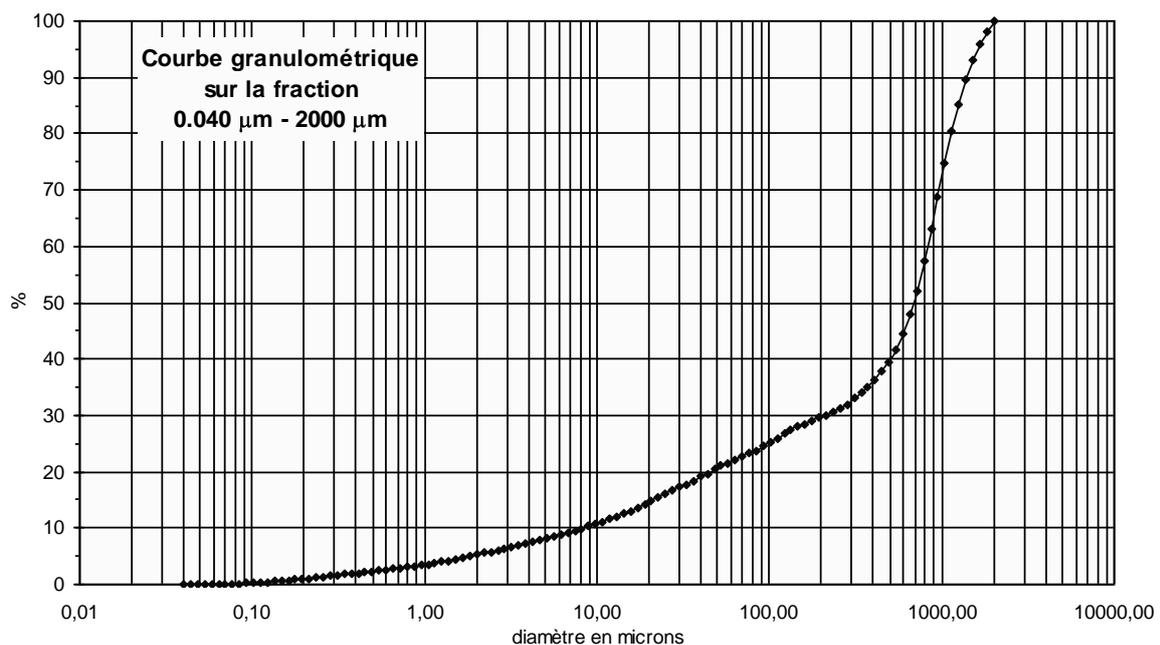
## PDS : Hêtraie du Plan Diebolt Scherrer



Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Plan Diebolt Scherrer	Alti. :	650 m	Formation vég. :	Hêtraie
Commune :	Bittschwiller-les-Thann, 68	Pente :	25°	Principales essences :	Hêtre ++, régénération, hêtre et sapin, sous-bois : luzule
Lat. :	47°48'50"N	Exposition :	N-NE	Historique :	Sous forêt depuis 1760 au moins
Long. :	07°03'26"E				

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	7,80	14,48	4,73	5,0	9,1	6,3	9,1	70,5

Type de sol			
CPCS	RP 2008	WRB 2006	Roche mère
Sol brun acide	Alocrisol	Cambisol	Latite quartzifère



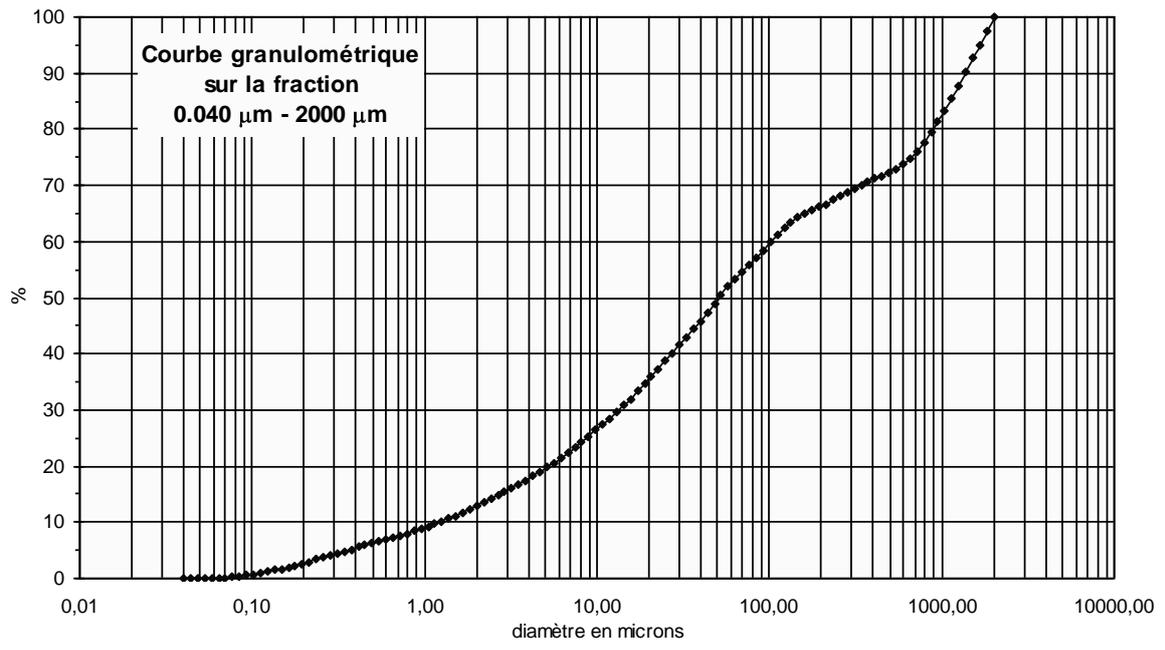
# THA : hêtraie pionnière du Rossberg



Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Rosberg	Alti. :	1100 m	Formation vég. :	Hêtraie
Commune :	Bourbach-le-Haut, 68	Pente :	5°	Principales essences :	Hêtre +++
Lat. :	47°49'08" N	Exposition :	SE	Historique :	Sous forêt depuis 150 ans au moins
Long. :	07°01'40" E				

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	21,45	39,81	3,62	12,3	22,3	14,3	17,2	33,9

Type de sol			
CPCS	RP 2008	WRB 2006	Roche mère
Sol brun acide	Alocrisol	Cambisol	Trachyte inférieur



# THB : hêtraie-sapinière du Rossberg

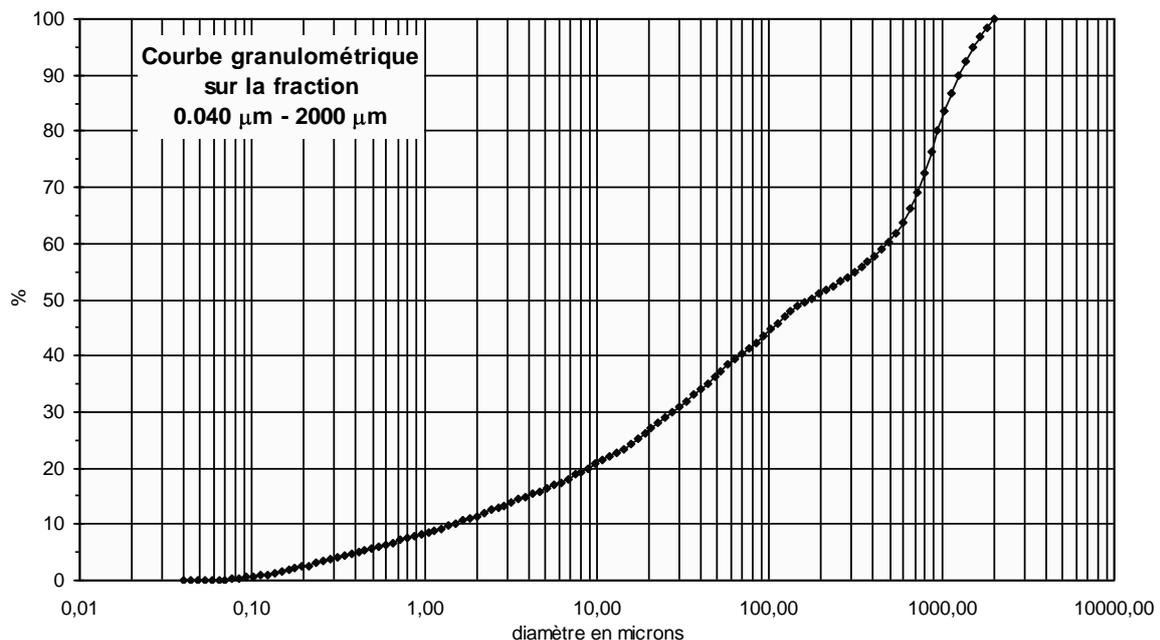


Photo D. Schwartz

Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Rossberg	Alti. :	1060 m	Formation vég. :	Hêtraie-sapinière
Commune :	Bourbach-le-Haut, 68	Pente :	20°	Principales essences :	Hêtre +++, Sapin
Lat. :	47°49'07" N	Exposition :	SE	Historique :	Sous forêt depuis 1760 au moins
Long. :	07°01'40" E				

Prof. cm	C org. %	PAF %	TMR	pH	Granulométrie				
					A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	13,29	27,29	moderne	3,96	11,0	15,1	10,1	14,9	48,9

Type de sol	
<b>CPCS :</b>	Sol brun acide
<b>RP 2008 :</b>	Alocrisol
<b>WRB 2006 :</b>	Cambisol
<b>Roche mère</b>	Trachyte inférieur



## THE : pessière du Rossberg



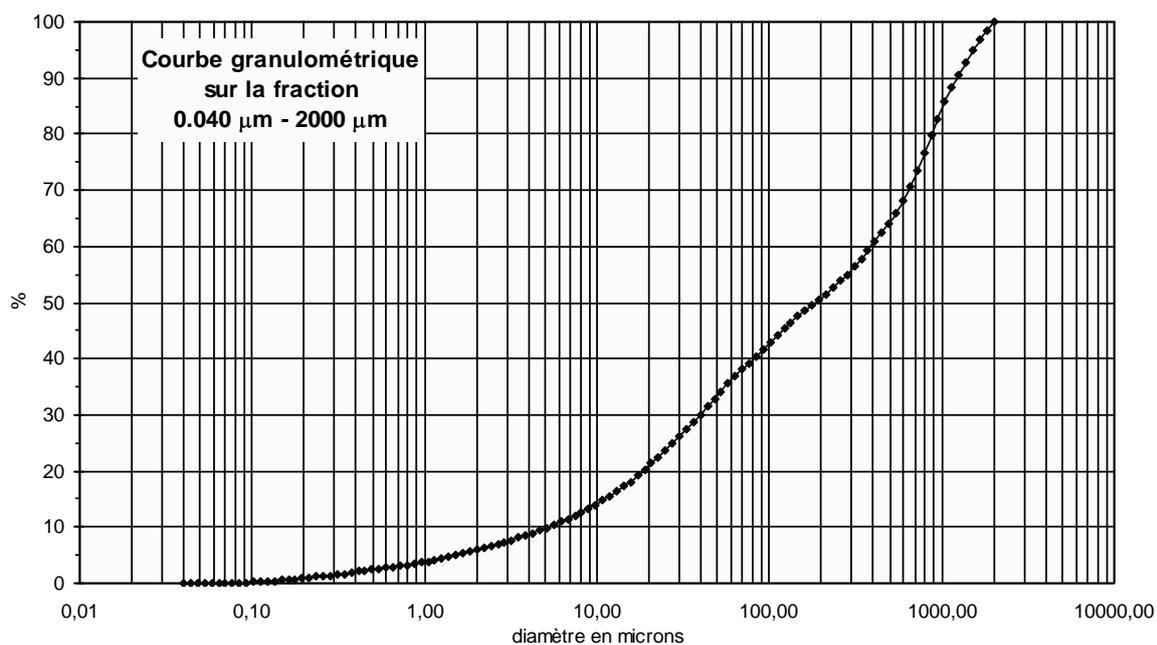
Photo D. Schwartz

Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Rosberg	Alti. :	1040 m	Formation vég. :	Pessière
Commune :	Masevaux, 68	Pente :	20°	Principales essences :	
Lat. :	47°49'07" N	Exposition :	S-W	Historique :	Sous forêt depuis 1760 au moins
Long. :	07°01'27" E				

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	26,56	50,54	3,44	5,5	14,7	12,6	17,7	49,5

### Type de sol

**CPCS :** Sol brun acide  
**RP 2008 :** Alocrisol  
**WRB 2006 :** Cambisol  
**Roche mère** Trachyte inférieur



# ROS3 : alocrisol du Rossberg sous forêt (Goepp 2007)

## Rossberg 3 : Alocrisol

## Ross 3

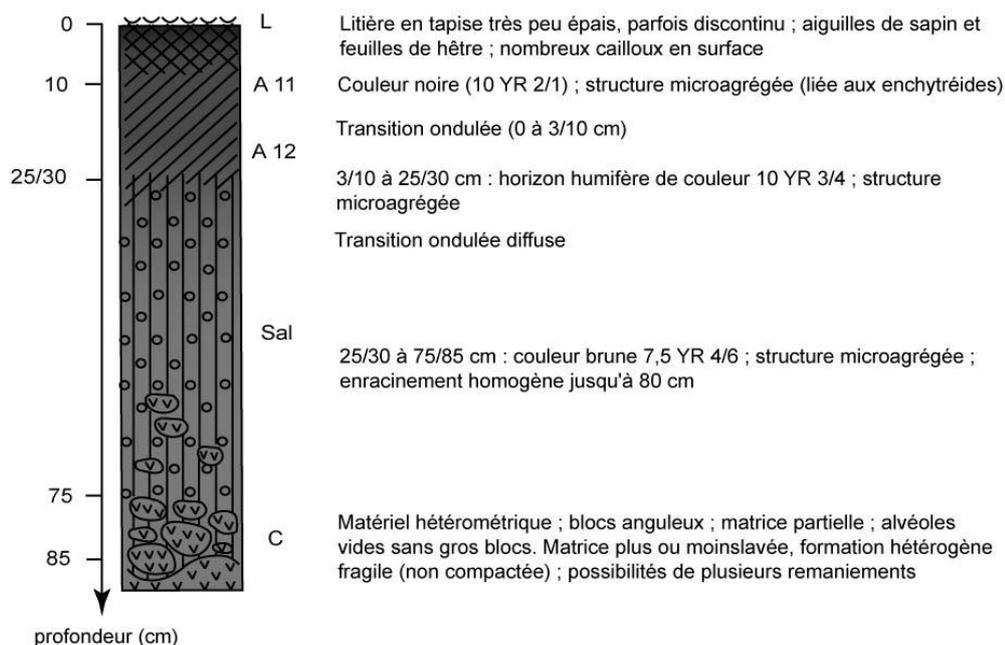
Altitude : 1060 m

Orientation : sud-sud-ouest

Topographie : milieu de versant ; pente forte (20°)

Substrat : roches volcano-sédimentaires ; nombreux cailloux et blocs en surface

Végétation : Hêtraie-sapinière à polytrics, pain de coucou... sous-bois peu dense



	Profondeur (cm)	Couleur (sol sec)	D a	pH H <sub>2</sub> O	pH KCl	Delta pH	MO (PaF) %	% C (C,H,N)	% N (C,H,N)	C/N	
	A11	0-5	/	0,45	3,88	3,28	0,60	18,09	12,62	0,73	17,3
	A11	10-15	10 YR 2/1	0,79	4,41	3,70	0,71	13,39	8,88	0,51	17,4
	A12	20-25	10 YR 3/4	0,72	4,44	3,86	0,58	11,61	7,75	0,37	20,9
	Sal	30-35	/	0,72	4,48	3,90	0,58	11,01	6,98	0,28	24,7
	Sal	40-45	/	0,94	4,57	3,94	0,63	11,70	6,90	0,27	25,1
	Sal	50-55	7,5 YR 4/6	1,08	4,61	4,00	0,61	10,21	/	/	/
	Sal	60-65	/	0,96	4,69	4,10	0,59	8,85	/	/	/

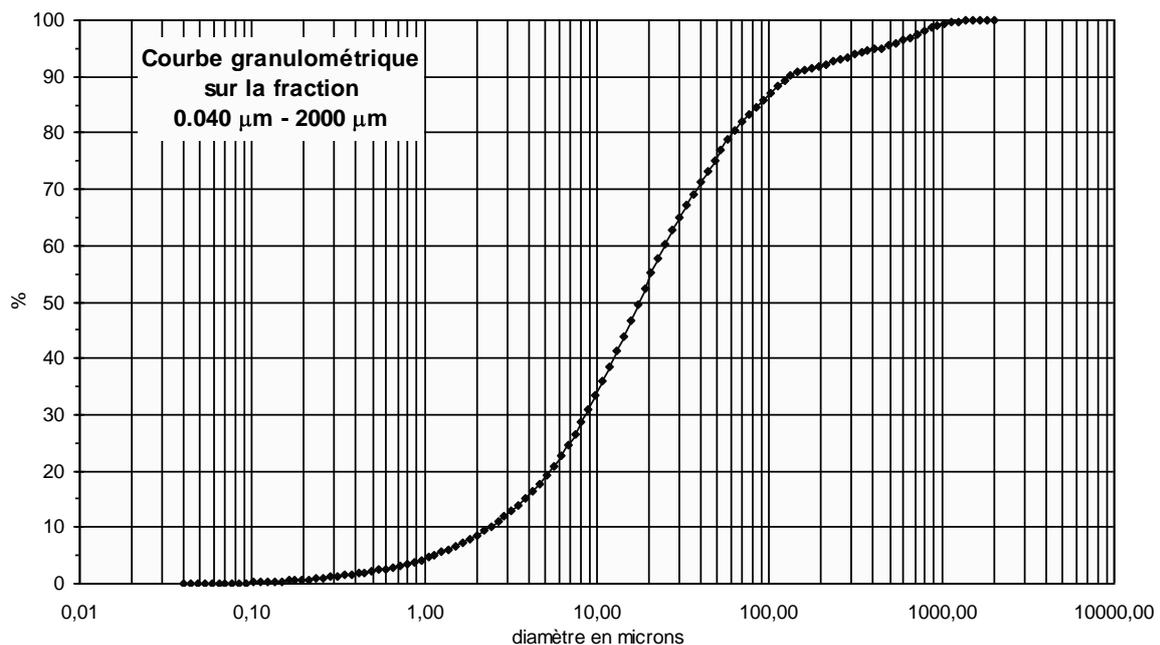
## RTH : forêt mixte du Rothutel



Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Rosberg	Alti. :	1080 m	Formation vég. :	Forêt mixte
Commune :	Bourbach-le-Haut, 68	Pente :	10°	Principales essences :	Hêtre, sapin...
Lat. :	47°49'08" N	Exposition :	S	Historique :	Sous forêt depuis 1760 au moins
Long. :	07°01'50" E				

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	-	86,73	3,68	7,9	44,3	22,9	16,6	8,2

Type de sol			
CPCS	RP 2008	WRB 2006	Roche mère
Ranker d'éboulis	Lithosol	Leptosol	Trachyte inférieure



# FHS: hêtraie-sapinière du Rundkopf, enclave de Rouffach

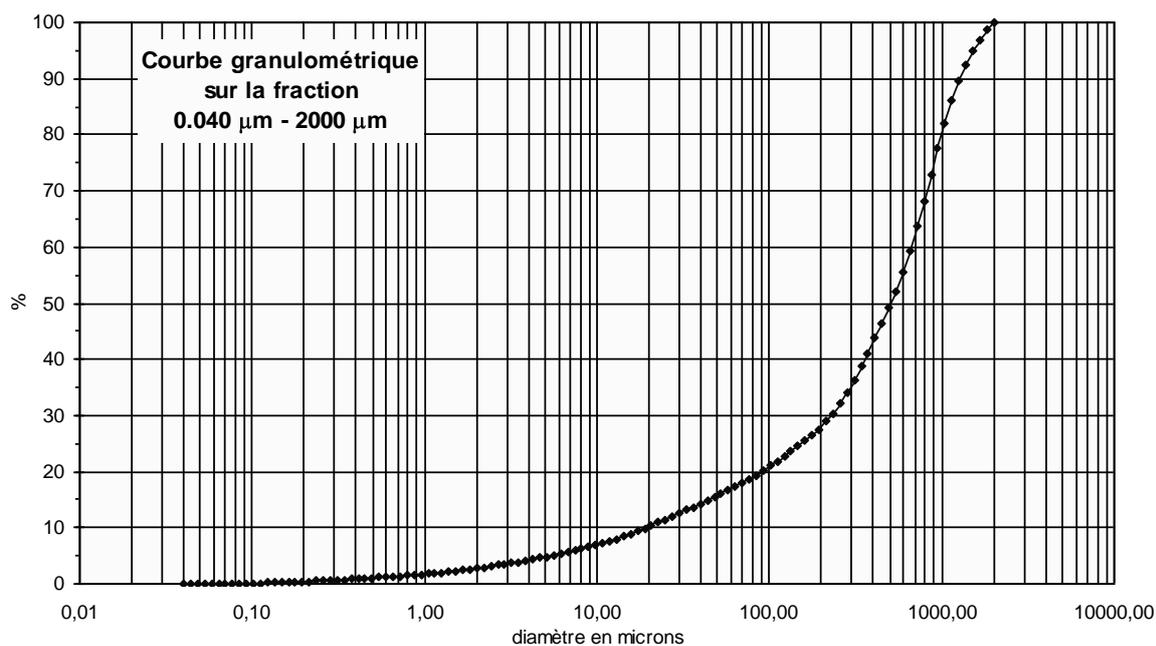


Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Rundkopf	Alti. :	800 m	Formation vég. :	Hêtraie-sapinière
Commune :	Rouffach, 68	Pente :	15°	Principales essences :	Sapin ++, hêtre, quelques jeunes sapins, sous-bois : graminées, mousses
Lat. :	47°59'11"N	Exposition :	N-W	Historique :	Sous forêt depuis 1760 au moins
Long. :	07°09'45"E				

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	8,13	14,99	4,45	2,6	7,2	5,7	12,1	72,4

## Type de sol

<b>CPCS :</b>	Sol brun acide
<b>RP 2008 :</b>	Alocrisol
<b>WRB 2006 :</b>	Cambisol
<b>Roche mère</b>	Granite porphyroïdes à biotite



## DHS : hêtraie-sapinière, forêt domaniale du Donon

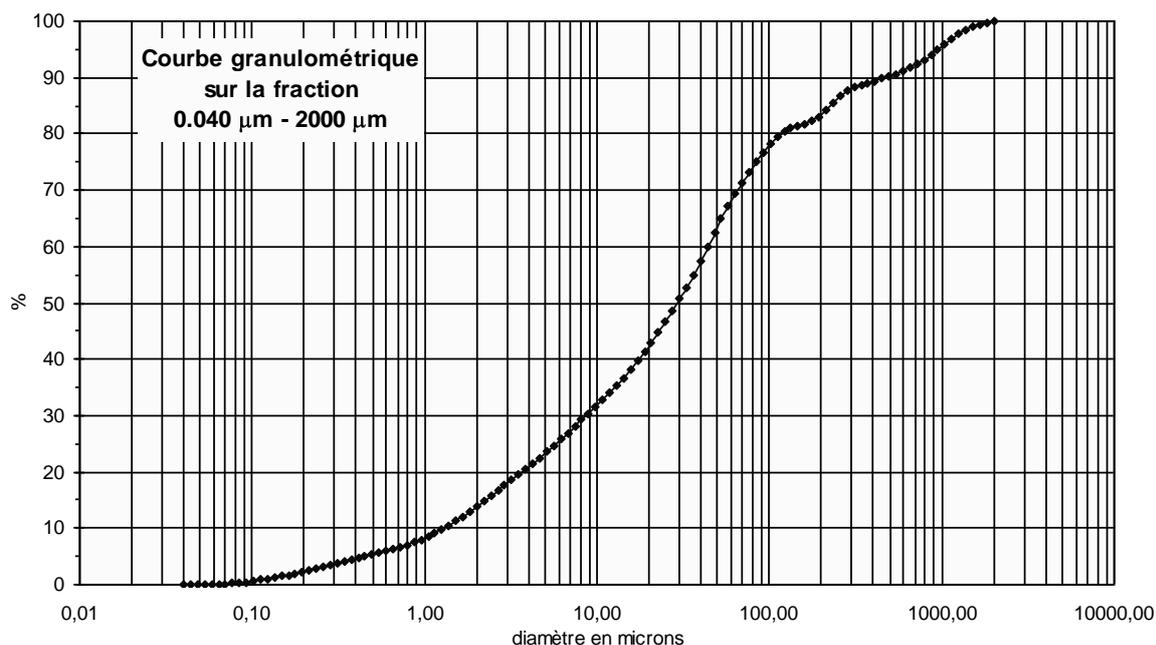


Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Donon	Alti. :	660 m	Formation vég. :	Hêtraie-sapinière
Commune :	Grandfontaine, 67	Pente :	0°	Principales essences :	Sapinière, forte régénération du Hêtre
Lat. :	48° 30' 41" N	Exposition :	Replat sur versant N-NW	Historique :	Sous forêt depuis 180 ans au moins
Long. :	7° 8' 9" E				

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	19,95	47,62	3,54	12,9	28,4	21,1	20,7	16,9

### Type de sol

<b>CPCS :</b>	Sol brun acide
<b>RP 2008 :</b>	Alocrisol
<b>WRB 2006 :</b>	Cambisol
<b>Roche mère</b>	Spilites



## WHS : hêtraie-sapinière du Kohlberg

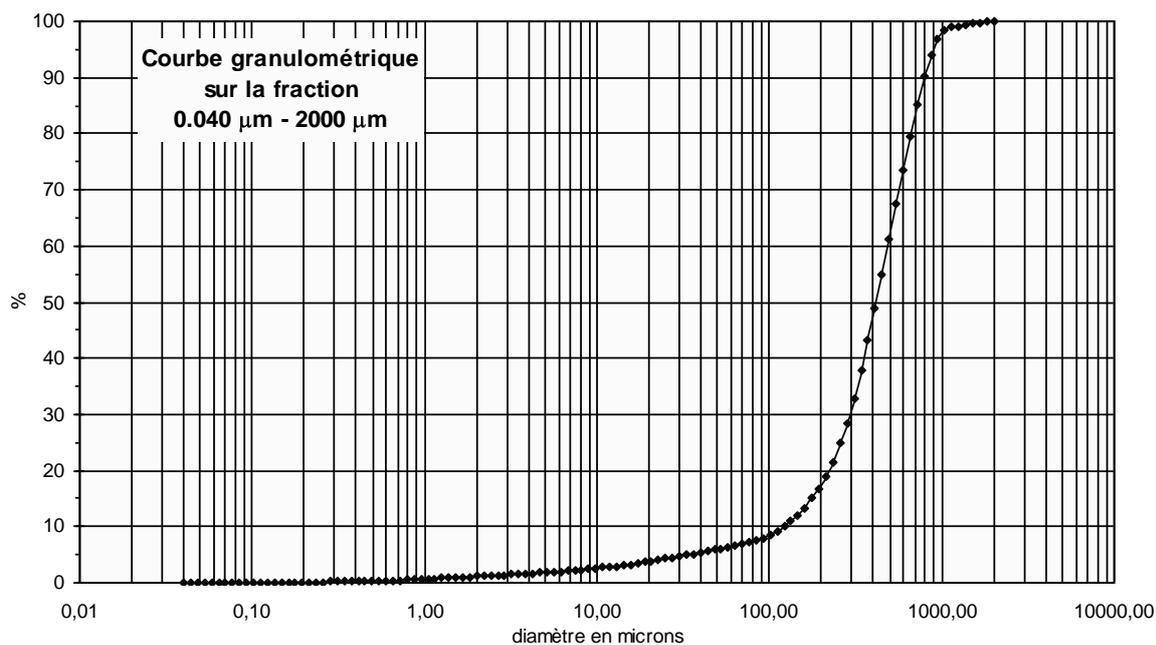


Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Kohlberg	Alti. :	710 m	Formation vég. :	Hêtraie-sapinière
Commune :	Wangenbourg-Engenthal, 67	Pente :	20°	Principales essences :	Hêtre, sapin, érable,
Lat. :	48° 37' 8" N	Exposition :	E S-E	Historique :	Sous forêt depuis 1760 au moins
Long. :	07° 17' 39" E				

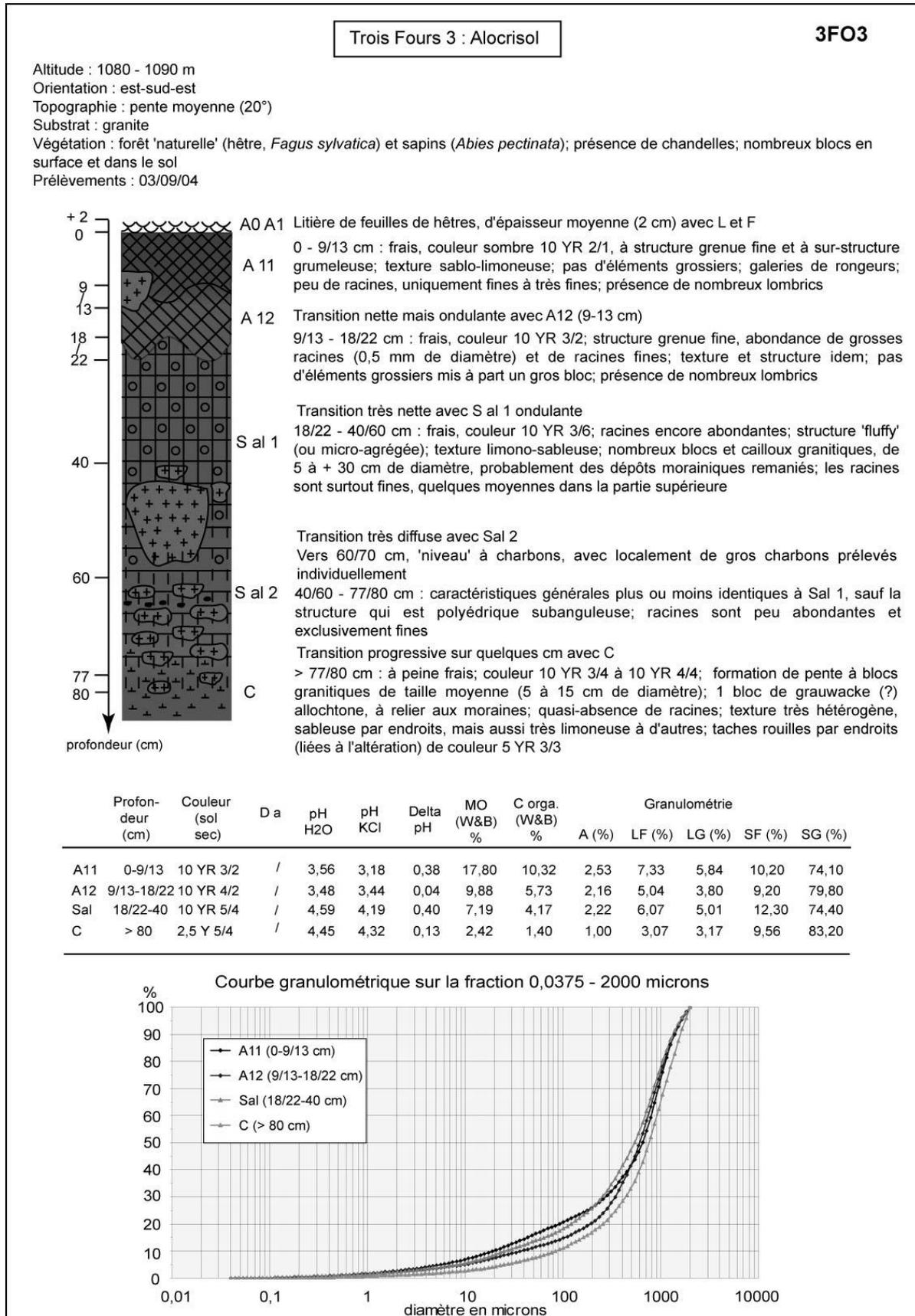
Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	4,51	6,27	3,70	1,1	2,6	2,2	10,9	83,2

### Type de sol

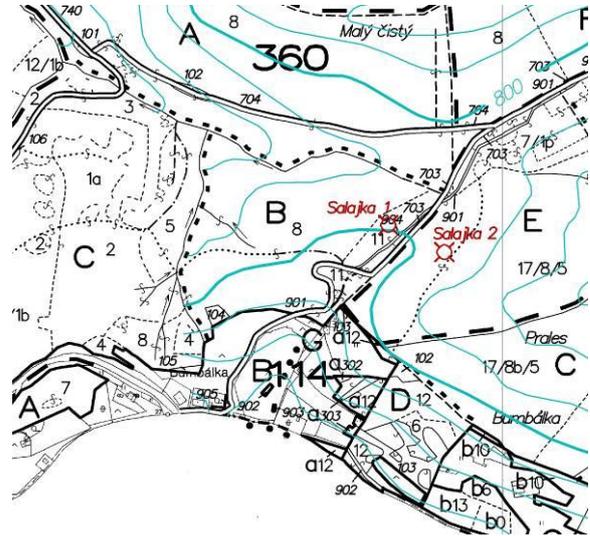
**CPCS :** Ocre podzolique  
**RP 2008 :** Podzosol ocrique  
**WRB 2006 :** Entic podzol  
**Roche mère :** Grès



# TFO3 : alocrisol des Trois Fours, sous hêtraie-sapinière (Goepf, 2007)



SLF : hêtre-sapinière de la réserve de Salajka, CZ  
 SJK : profil sous SLF, alocrisol (cambisol) (Žárník *et al.*, 2006)



Situation map of the both soil units in National Natural Reserve Salajka



Soil profile on the locality Salajka 2.

A (0 – 5 cm) texture loam; goat structure; consistency loose and crumbly; content of gravel and stones about 20 %; clear color crossover.

Bw1 (5 – 45 cm) texture silty-loam; nog structure; consistency crumble and cohesive; content of gravel and stones about 20 %; indistinct color crossover.

Bw2 (45 – 90 cm) texture silty-loam; nog structure; consistency cohesive; content of gravel and stones about 20 %; indistinct color crossover.

Bw3 (90 – 120 cm) texture silty-loam; nog structure; consistency cohesive; content of gravel and stones about 20 %; indistinct color crossover.

Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Salajka	Alti. :	780 m	Formation vég. :	Hêtraie-sapinière
Commune :	Rožnov, Beskydy (CZ)	Pente :	10°	Principales essences :	Sapin++, hêtre++
Lat. :	49°24'05" N	Exposition :	S-E	Historique :	Sous forêt depuis 500 ans au moins.
Long. :	18°24'56" E				Forêt «primaire» d'après les gestionnaires.

Code	Prof. cm	C org. %	PAF %	TMR	pH	Granulométrie				
						A %	LF %	LG %	SF %	SG %
SLF	0-4	6,39	12,27	-	4,36	8,8	21,7	7,8	9,5	52,2
SJK1	20-30	1,37	3,82	433 ± 26		Les analyses courantes ont été effectuées par les gestionnaires de la réserve (tableaux ci-dessous)				
SJK2	50-60	0,68	2,85	1730 ± 28						
SJK3	80-90	0,73	2,16	3994 ± 38						

#### Type de sol

<b>CPCS :</b>	Sol brun acide
<b>RP 2008 :</b>	Alocrisol
<b>WRB 2006 :</b>	Haplic Cambisol
<b>Roche mère</b>	Flysch

Tab. 3.. Basic analytical data – texture in % from locality Salajka 2.

Depth (cm)	2-0.1 mm	0.1-0.05 mm	0.05-0.01 mm	0.01-0.002 mm	< 0.002 mm
5 – 45	12.5	4.0	36.1	32.7	14.7
45 – 90	14.4	8.2	35.6	25.1	16.7
90 – 120	10.8	2.1	31.0	33.7	22.5

Tab. 4.. Basic analytical data – soil chemical properties from locality Salajka 2.

Depth cm	pH/H <sub>2</sub> O	pH/KCl	Cox %	Nt %	C/N	Exchangeable cations cmol/kg						CEC cmol/kg
						Al <sup>3+</sup>	H <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	
0 – 5	4.26	3.47	10.34	0.61	17	9.86	0.55	3.72	0.87	0.67	0.02	15.68
5 – 45	4.68	3.69	1.59	0.13	12.2	10.62	0.22	2.27	0.38	0.34	<0.02	13.86
45 – 90	4.76	3.75	0.71	0.08	8.9	9.22	<0.10	3.08	0.51	0.31	0.04	13.27
90 – 120	4.77	3.74	0.52	0.07	7.4	9.40	0.16	2.46	0.65	0.36	0.03	13.07

# HER : sapinière, forêt Domaniale du Herrenberg



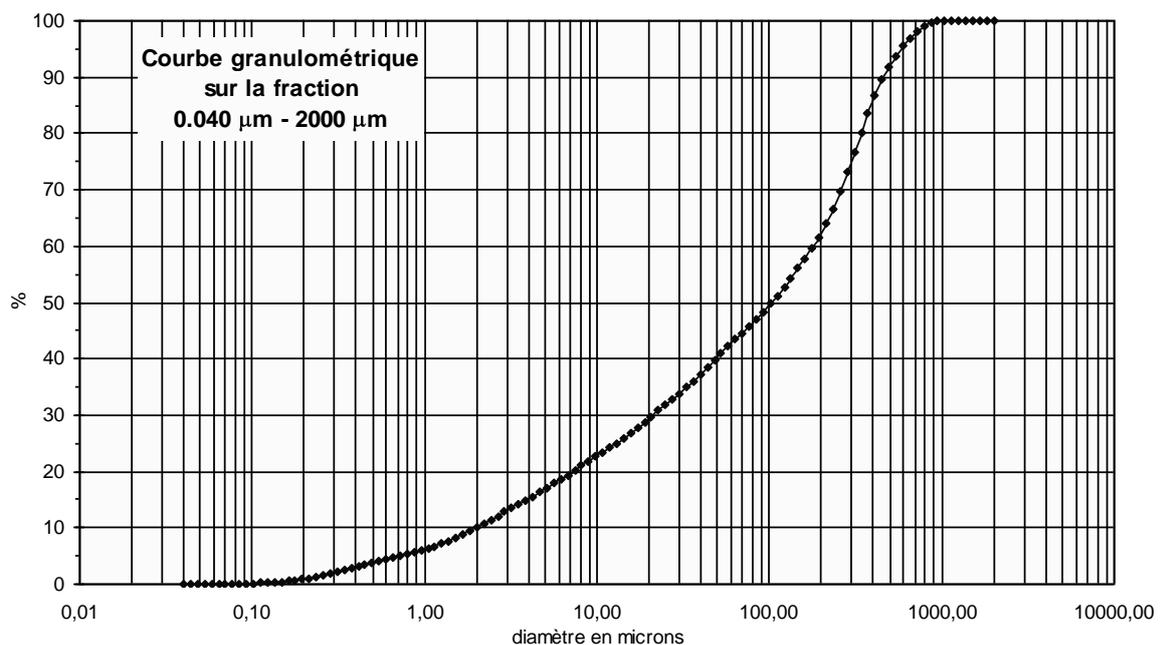
Photo D. Schwartz

Localisation	Topographie	Végétation	
Lieu dit : Herrenberg	Alti. : 860 m	Formation vég. :	Sapinière
Commune : Mittlach, 68	Pente : 15°	Principales essences :	Sapin ++, Hêtre, Erable, sous-bois : Digitalis purpurea, Galium odoratum, Oxalis acetosella, Luzula maxima, 1 astéracée indéterminée, mousses (polytric, hypnée), Fougère mâle, 1 Poacée spp., Juncus sp., 1 Poacée ou Joncée indéterminée.
Lat. : 47°56'30" N Long. : 07°00'23" E	Exposition : N	Historique :	Sous sapinière depuis 1760 au moins

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	13,83	27,59	4,25	9,4	19,3	11,1	21,8	38,4

## Type de sol

CPCS	RP 2008	WRB 2006	Roche mère
Sol brun acide	Alocrisol	Cambisol	Grauwackes



# LAU : sapinière, forêt Domaniale de Guebwiller



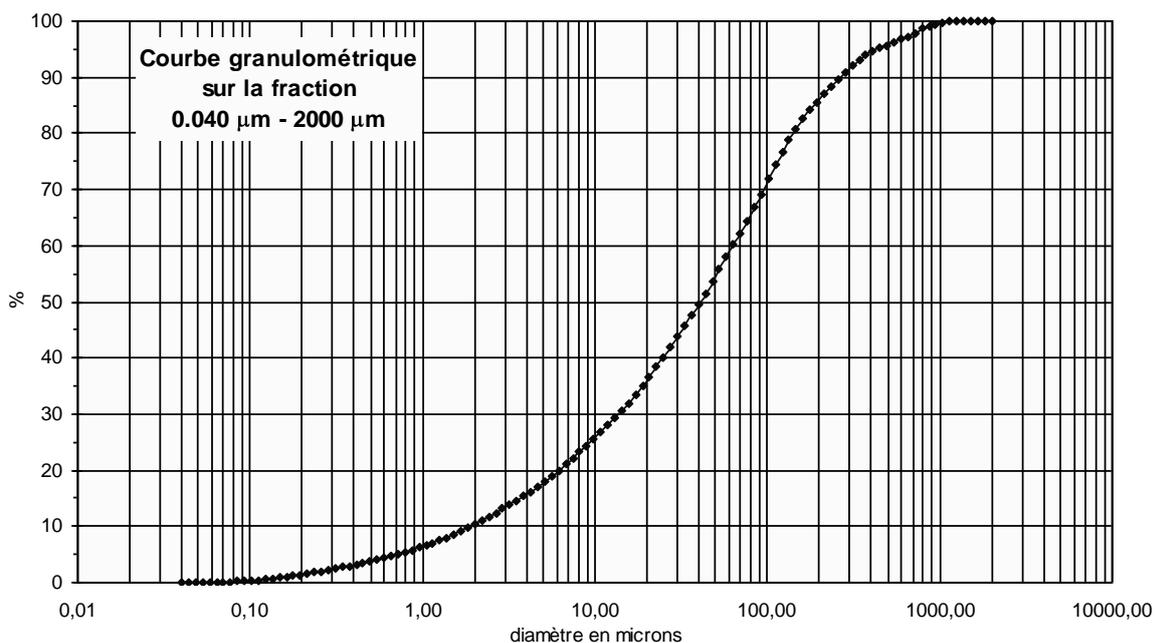
Photo D. Schwartz

Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Klinzrunz	Alti. :	861 m	Formation vég. :	Sapinière
Commune :	Linthal, 68	Pente :	10°	Principales essences :	Sapin ++, Hêtre, Erable, Oxalis acetosella, Galium odoratum, Luzula maxima
Lat. :	47°59'35" N	Exposition :	S-SE	Historique :	Sous forêt depuis 1760 au moins
Long. :	07°04'00" E				

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	18,39	36,50	4,16	9,7	25,4	18,6	31,9	14,4

## Type de sol

<b>CPCS :</b>	Sol brun acide
<b>RP 2008 :</b>	Alocrisol
<b>WRB 2006 :</b>	Cambisol
<b>Roche mère</b>	Grauwackes



# RPA : pineraie du vallon du Rothbach

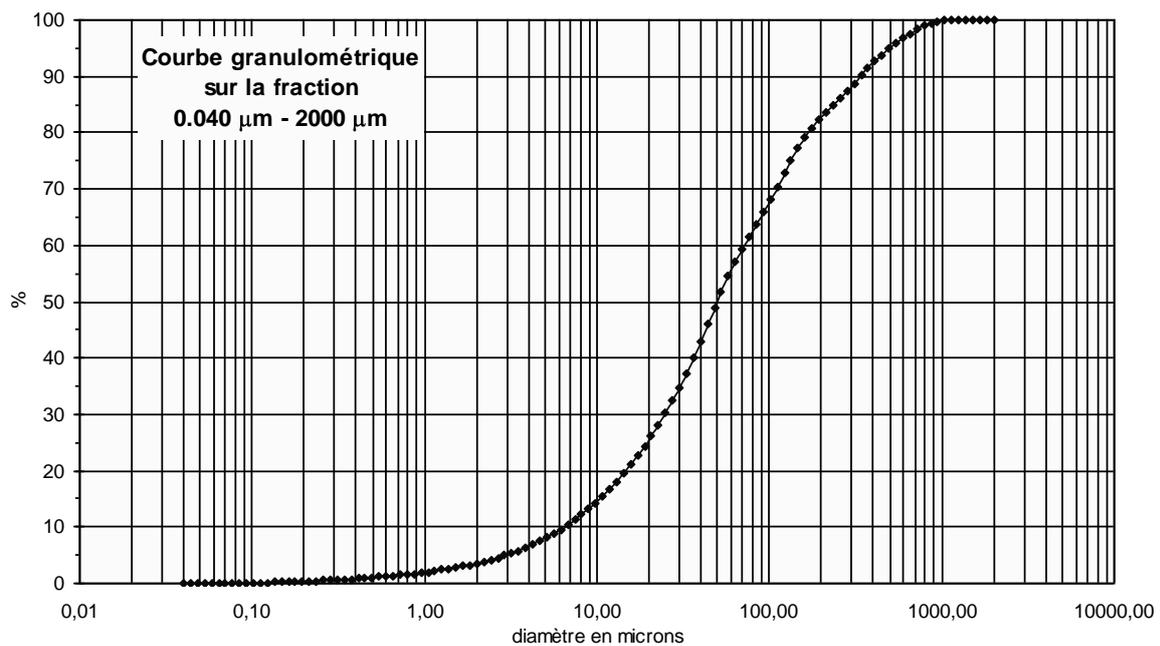


Photo Martine Trautmann

Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit : Vallon du Rothbach		Alti. : 230 m		Formation vég. : Pineraie mêlée d'épicéa	
Commune : Lichtenberg, 67		Pente : 5°		Principales essences : Pin ++, Epicéa, Sous-bois : fougères, mousses	
Lat. : 07°30'09" N		Exposition : W		Historique : Sous forêt depuis 1760 au moins	
Long. : 48°55'59" E					

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	41,60	72,82	3,24	3,3	21,1	24,5	33,4	17,7

Type de sol	
CPCS :	Podzol
RP 2008 :	Podzosol
WRB 2006 :	Podzol
Roche mère	Grès



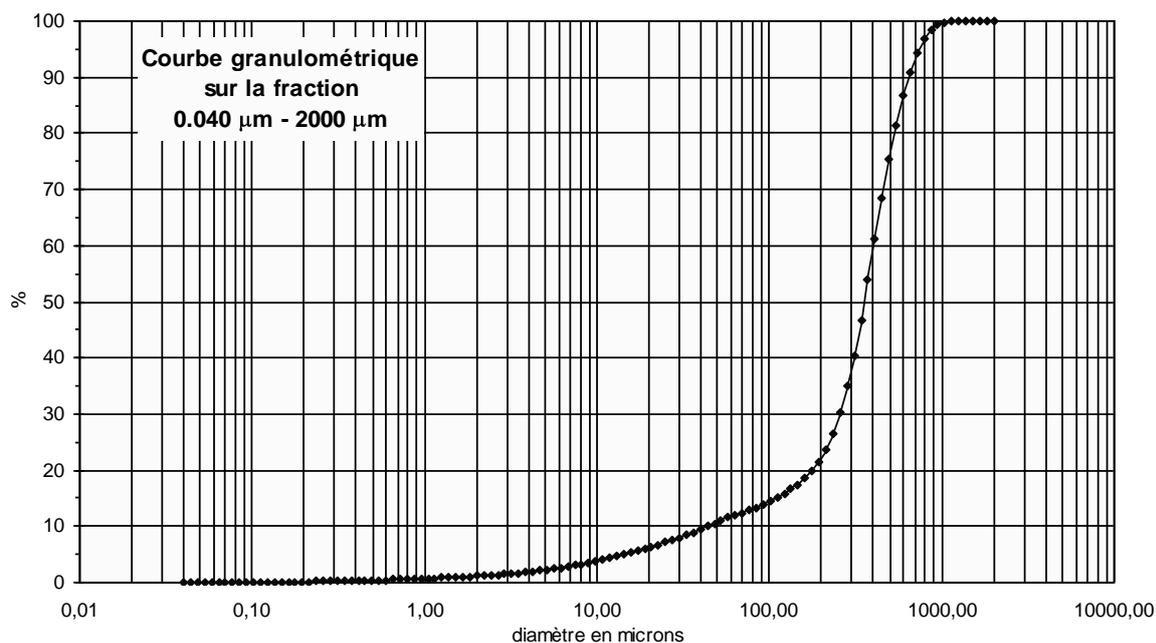
# RPB : pineraie du Bruderthal



Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Bruderthal	Alti. :	250	Formation vég. :	Pineraie
Commune :	Rothbach, 67	Pente :	10°	Principales essences :	Pin++, Sous-bois : callune, myrtille, fougères, mousses
Lat. :	48°54'46"N	Exposition :	S	Historique :	Sous forêt depuis 1760 au moins
Long. :	07°29'29"E				

Prof. cm	C org. %	PAF %	pH	Granulométrie				
				A %	LF %	LG %	SF %	SG %
0-4	27,52	41,14	3,37	1,0	4,9	4,6	11,1	78,4

Type de sol			
CPCS	RP 2008	WRB 2006	Roche mère
Podzol	Podzosol	Podzol	Grès



## GOP : luvisol sur le chantier archéologique de Gottesheim

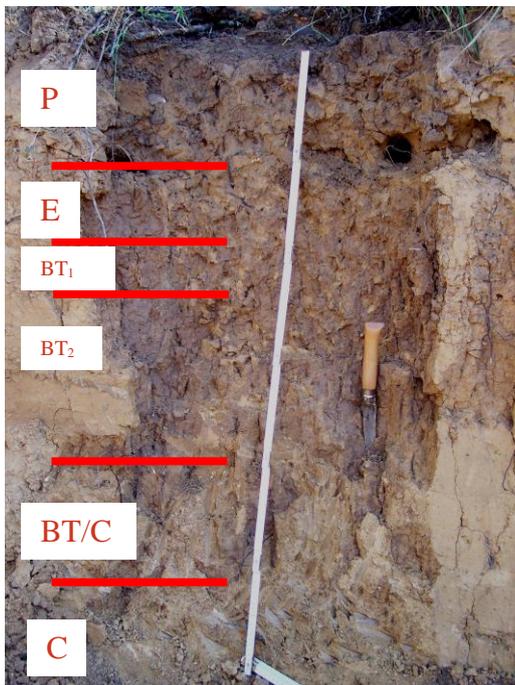


Photo D. Schwartz

P : 0-23 cm ; 10YR 4,5/4. Frais ; limoneux (+ 1 peu de sable) ; compact ; qqes élts grossiers allochtones ; struct. polyédr. angul. ; nbreuses galeries de vers ; racines fines abondantes ; à la base, galeries de taupes ; non effervescent ; transition nette, horizontale, avec :

E : 23-34/35 m ; 10YR4/4 ; frais ; limoneux (+ 1 peu de sable) ; compact ; pas d'élts grossiers ; struct. polyédr. Angul. ; nbreuses galeries de vers ; racines assez abondantes ; transition progressive avec :

BT1 : 34/35 - 40 cm ; struct. polyédr. (non décrit).

BT2 : 40-83 cm ; frais ; couleur de surface 7,5YR4/4, au cœur 10YR5/6 ; limono-argileux ; struct. prismatique nette, développée, à sous-struct. polyédr. angul. nette, développée ; forte porosité interprismatique et aussi intra-agrégat ( $\varnothing > 0,1$  mm) ; qqes racines de  $\varnothing 0,5$  cm, et qqes fines ; galeries de vers anéciques, verticales ; revêtements de M.O. sur les prismes ; non effervescent ; transition nette, ondulée, avec :

BT/C : 83-110 cm ; couleur ? Limoneux ; effervescent ; nombreuses accumulations de carbonates diffus, blanc, en pseudomycélium ; qqes racines  $\varnothing 2-3$  mm ; structure prismatique ; revêt. de M.O. sur les prismes, mais moins épais ; à partir de 103, gravillons ; quelques poupées de loess vers 83-85 cm ;

C : > 110 cm ; loess plus ou moins remanié, à pseudomycélium ; limoneux ; effervescent ; microporosité développée ; 110 à 120 : niveau à plaquettes argileuses ferruginisées et qqes galets de quartz ; en dessous deux niveaux horizontaux de poupées, surplombant les labours.

# STK : paléosol sous un murger médiéval à Osenbach



Murger

Horizon A du paléosol (STK06), pollué par des MO récentes d'après la datation.

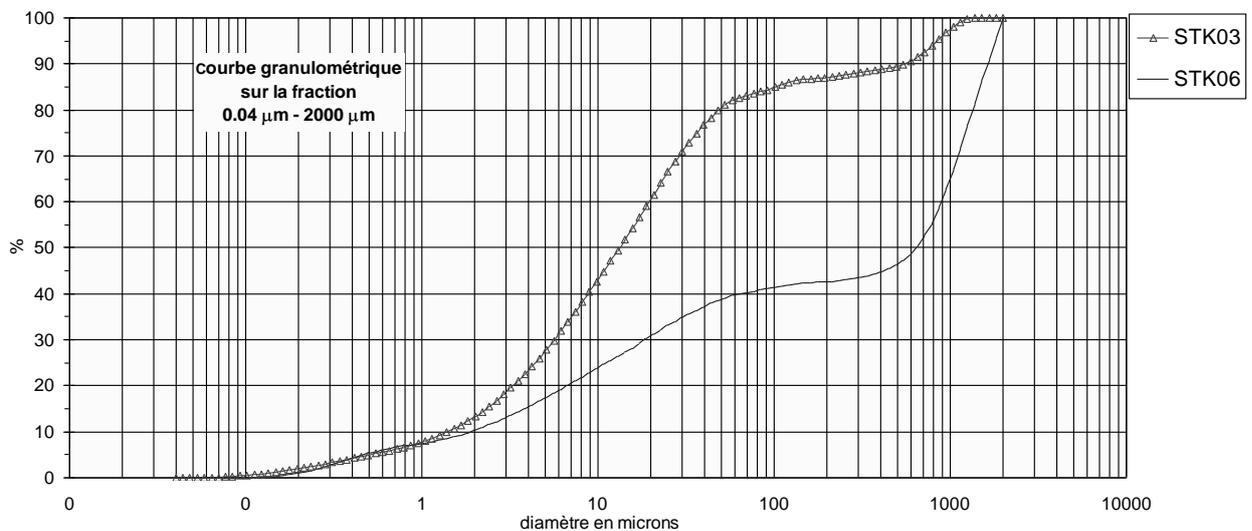
Horizon S du paléosol (STK03), la datation confirme un enfouissement médiéval

Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Kalkofen	Alti. :	470	Formation vég. :	?
Commune :	Osenbach, 68	Pente :	5°	Principales essences :	?
Lat. :	47°59'41"N	Exposition :	S-E	Historique :	Sous forêt depuis 1760 au moins. Mise en valeur au Moyen Age
Long. :	07°12'42"E				

Code	Prof. cm	C org. %	PAF %	TMR	pH	Granulométrie				
						A %	LF %	LG %	SF %	SG %
STK06	10	5,16	13,9	moderne	7,74	9,8	20,4	8,3	4,1	57,4
STK03	20	5,83	15,73	800 ± 30 BP	7,65	12,3	48,8	20,7	7,2	13,0

## Type de sol

<b>CPCS :</b>	Sol brun calcaire
<b>RP 2008 :</b>	Calcosol
<b>WRB 2006 :</b>	Cambisol
<b>Roche mère</b>	Calcaire



## DIN : paléosol sous un murger médiéval à Dinsheim

Cf. figure chapitre 10

A11? Ou plutôt pollution par le  
ranker lors de l'approfondissement de  
la fosse (non prélevé)

Horizon A1 (DIN01)

Horizon Sca (DIN20)



Photo D. Schwartz

Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Schiebenberg	Alti. :	300 m	Formation vég. :	?
Commune :	Dinsheim	Pente :	5°	Principales essences :	?
Lat. :	48° 32' 53"N	Exposition :	S-E	Historique :	Le murger qui scelle le paléosol est médiéval
Long.:	07° 26' 04"E				

Code	Prof. cm	C org. %	PAF %	TMR	pH	Granulométrie				
						A %	LF %	LG %	SF %	SG %
DIN01	0-5	2,30	6,66	450 ± 30	8,12	23,1	59,9	15,3	1,7	0,0
DIN20	30-35	1,15	7,73		8,13	34,4	52,7	12,1	0,8	0,0
Charbon de bois				1290 ± 30 BP						

Type de sol : paléosol			
CPCS	RP 2008	WRB 2006	Roche mère
Rendzine	Rendosol	Calcic leptosol	Calcaire

## ENA : paléosol hydromorphe au centre ville de Strasbourg

Description et photo dans le chapitre 10

# HOP1 et HOP2 : paléosols hydromorphes du cône de la Fecht

Photo et description dans le chapitre 10

Localisation	Topographie	Végétation
Lieu dit : Château d'eau	Alti. : 184 m	Formation vég. : ?
Commune : Houssen (68)	Pente : 0°	Principales essences : ?
Lat. : 48° 07' 15" N	Exposition : -	Historique : ?
Long. : 07° 22' 15" E		

Code	Prof. cm	C org. %	PAF %	Age	pH	Granulométrie				
						A %	LF %	LG %	SF %	SG %
HOU1	0-10	1,06	3,10		4,76	1,9	3,5	2,6	8,4	83,6
HOU2	30-36	1,30	4,12		5,90	5,4	9,4	4,7	7,1	73,4
HOU3	55-60	1,15	5,11		6,50	13,6	39,9	20,7	22,6	3,2
HOU4	77	0,86	6,63	4800 ± 40 BP	6,95	27,4	48,9	18,7	5,0	0,0
HOU5	100	0,24	5,86	7240 ± 35 BP	7,64	25,5	43,9	19,1	5,0	6,5
HOU6	120	0,87	6,95		7,15	29,9	57,3	10,3	2,5	0,0

## Type de sol (paléosol)

<b>CPCS :</b>	Sol hydromorphe
<b>RP 2008 :</b>	Gleysol
<b>WRB 2006 :</b>	Gleysol
<b>Roche mère</b>	Alluvions

## HOR, HOW, GRH, SCD : paléosol gallo-romain scellé sous des alluvions

Cf. chapitre 10 pour une description du paléosol à Horbourg (HOR et HOW)



Photo D. Schwartz

Paléosol gallo-romain à la gravière de Houssen (GRH)

### Coupe stratigraphique générale (hors formes énigmatiques)

1 : paléosol hydromorphe, dont la surface est la surface d'occupation de La Tène finale, avec IIA1, horizon de surface humifère du paléosol et IIGo, horizon de gley oxydé ; 2 : niveau de recouvrement graveleux ; 3 : niveau de recouvrement supérieur, sablo-limoneux

# ZEN : paléosol hydromorphe, chantier du Zenith

Cf. chapitre 10 pour la synthèse stratigraphique

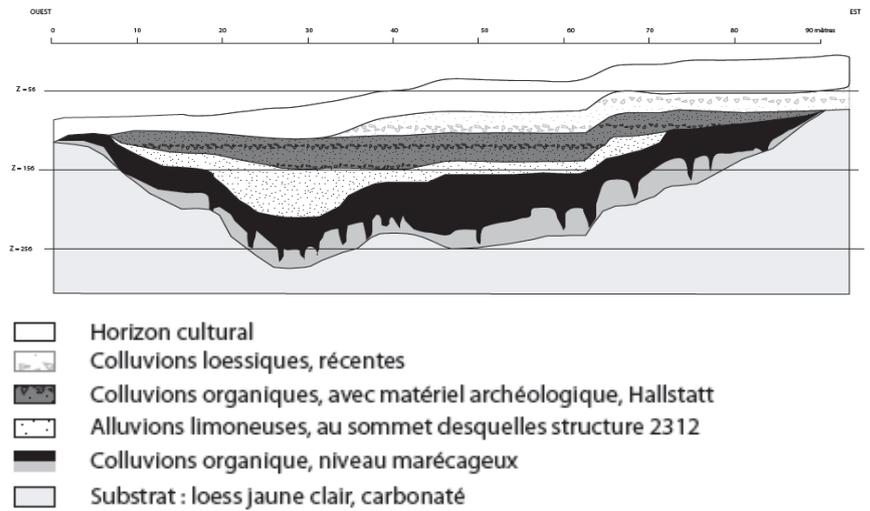


Photo et croquis N. Schneider (INRAP)

Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Zenith	Alti. :	145 m	Formation vég. :	?
Commune :	Eckbolsheim	Pente :	1°	Principales essences :	?
Lat. :	48° 35' 34" N	Exposition :	S-E	Historique :	?
Long. :	07°41'03" E				

# ZMC, ZMK1-2 : paléosols de la stratigraphie Pleistocène de Zemechy

Stratigraphie et description dans le chapitre 10



ZMK1, photo D. Schwartz

Localisation		Topographie		Végétation	
Lieu dit :	Zemechy	Alti. :		Formation vég. :	?
Commune :	Zemechy, CZ	Pente :		Principales essences :	Des charbons de mélèzes et de pins prélevés dans ZMK1
Lat. :		Exposition :		Historique :	L'ensemble de la série est datée du Pleistocène
Long. :					

Code	Prof. cm	C org. %	PAF %	TMR	pH	Granulométrie				
						A %	LF %	LG %	SF %	SG %
ZMC	0-10			30000 ± 400 BP						
ZMK1	0-10	En cours		39000 ± 1000 BP						En cours
ZMK2	0-10			37000 ± 1000 BP						

### Type de sol (paléosol)

<b>CPCS :</b>	Chernozem
<b>RP 2008 :</b>	Chernosol
<b>WRB 2006 :</b>	Chernozem
<b>Roche mère</b>	Loess

## S7 SD21 : paléosol contenant des artefacts gallo-romains

Ligne à grande vitesse (TGV Est) secteur 7, sondage H21



0-20 : Horizon cultural

20-55 cm : Limon sableux brun, décarbonaté, matière organique, activité biologique, peu structuré, colluvions + remblais gallo romain, tessons et tuiles de 40 à 60 cm.

55-80 cm : Limon sableux brun foncé, décarbonaté, matière organique, activité biologique, peu structuré, paléosol partiellement scellé sous le niveau d'occupation gallo romain ; quelques petits charbons.

Transition progressive vers :

80-120 cm : Limon sableux brun ocre, décarbonaté, homogène, non structuré, horizon inférieur du paléosol

Le niveau d'occupation romain apparaissant sous 40 cm de colluvions (débris d'un bâtiment) a partiellement scellé un sol développé sur les colluvions sous-jacent. Ce paléosol d'une épaisseur totale de 60 cm n'a pas subi de processus d'érosion et peut témoigner de l'environnement ayant précédé la construction du bâtiment. Cependant sa faible profondeur d'enfouissement ne permet pas d'exclure des perturbations postérieures (ex : bioturbation).

## S7 SD297 : paléosol scellé sous les vestiges d'une villa romaine

Ligne à grande vitesse (TGV Est) secteur 7, sondage H297  
Cf. fig. chapitre 10

## S7 SD341 : paléosol à proximité de la villa romaine

(cf. ci-dessus)

Ligne à grande vitesse (TGV Est) secteur 7 sondage H341

Le sondage 341 révèle le même paléosol sans la protection des vestiges de la villa. Les traits pédologiques sont moins bien conservés malgré une épaisse couche de colluvions.

0-20 cm : Horizon de labour

20-50 cm : Limon argileux brun clair, bien structuré

50-120 cm : Limon argileux devenant plus argileux à la base brun puis grisâtre, matière organique, charbons, légèrement structuré, surface de circulation gallo romain sur un paléosol semblable au sondage 297. Ici le paléosol n'est pas perturbé par la construction ou remblai que l'on trouve en 297, quelques petits débris gallo romain

>120 cm : Argilo limoneux avec manganèse et taches de rouille, substrat marneux

## S8SD294 : paléosol isohumique scellé sous des colluvions loessiques

Ligne à grande vitesse (TGV Est) secteur 8 sondage 294

20-50 cm : Limon légèrement argileux brun ocre, légèrement carbonaté, pseudomycelium, petites poupées de loess, quelques racines, compact et pulvérulent, loess peu remanié

50-150 cm : Limon légèrement argileux brun ocre, légèrement carbonaté, pseudomycelium, petites poupées de loess, quelques racines, loess peu remanié

Transition diffuse vers :

150-220 cm : Limon plus argileux brun foncé avec taches circulaires jaunes (galeries de rongeurs, crotovinas), nodules millimétriques de manganèse, petites poupées de loess, niveau très organique, devenant moins carbonaté à partir de 170, paléosol isohumique typique des milieux steppiques

Datation à 160 cm : **19290 ± 90 BP**

Datation à 200 cm : **20110 ± 100 BP**

220-250 : Limon légèrement argileux jaune carbonaté avec de grosses poupées de loess pouvant atteindre 10 cm, traces de galeries brun foncé connectées avec le niveau supérieur ; loess

## S8SD347 : paléosol isohumique scellé sous des colluvions loessiques

Ligne à grande vitesse (TGV Est) secteur 8 sondage 347



Sans doute le même lambeau de sol que S8SD294

0-20 cm : Horizon de labour

20-60 cm : Limon légèrement argileux brun, décarbonaté, structure prismatique avec matière organique sur les parois : sol brun lessivé (non visible sur la photo)

60-140 cm : Limon argileux jaune carbonaté : loess peu remanié

Transition progressive vers :

140-205 cm : Limon légèrement argileux brun, matière organique dans la matrice, carbonaté, traces de galeries : paléosol

Transition nette vers :

205-290 cm : Limon légèrement argileux brun foncé, décarbonaté avec galeries comblées par un limon légèrement argileux jaune carbonaté : paléosol isohumique

Transition progressive vers :

290-300 cm : Limon légèrement argileux brun ocre décarbonaté : horizon inférieur du paléosol isohumique



## S8SD305 paléosol (luvisol) scellé sous des colluvions loessiques

Ligne à grande vitesse (TGV Est) secteur 8, sondage 305



0-30 cm : Horizon de labour

30-70 cm : Limon légèrement argileux brun ocre grumeleux, microagrégats, peu structuré, quelques racines, pseudomycélium à la base : colluvions

Transition rapide vers :

70-110 cm : Limon légèrement argileux brun, racines, forte coloration par la matière organique, structure prismatique bien développée, légère reprécipitation. Paléosol : sol brun lessivé, horizon structural, la matière organique est peut être héritée d'une pédogenèse plus ancienne

Transition nette concernant la couleur et progressive concernant la structure :

70 cm

110 cm

110-165 cm : Limon légèrement argileux jaune, homogène, meuble, petite plaquettes, charbons, un peu de pseudomycélium : loess remaniés

## S9 SD 255 : paléosol entaillé par des traces de labours à l'araire

Ligne à grande vitesse (TGV Est) secteur 9, sondage 255

0-20 cm : Horizon de labour

20-70 cm : Limon argileux brun clair, carbonaté, activité biologique, microagrégats, légèrement structuré avec matière organique sur les parois de polyèdres mais pas dans la matrice, petite plaquettes ferrugineuses. Quelques taches jaunes vers 70. Aucune trace de sous-solage.

Transition horizontale rapide vers :

70-100 cm : A la surface de cette US apparaissent en plan des lignes parallèles jaunes clair, carbonaté (au minimum 6) séparées par le niveau brun foncé de l'US. Leur écartement varie entre 70 cm et 1 m. La ligne la plus longue est suivie en plan sur 5 m. En coupe ces lignes apparaissent mal et se limitent à une fine croûte plus dure que la matrice. Limon plus argileux brun foncé, compact, décarbonaté, matière organique dans la matrice, microcharbons de bois, manganèse.

Transition progressive vers :

100-120 cm : Limon plus argileux jaune, plus meuble, carbonaté, pas de reprécipitation, taches rosées.

Ce paléosol est bien scellé sous 70 cm de colluvions loessiques et contient des charbons de bois de taille suffisante pour une identification et datation. De couleur sombre, bien imprégné de matière organique (3,16%), il présente la particularité d'avoir une surface entaillée par des sillons de faible profondeur qui se repèrent à leur couleur jaunâtre. L'absence de marques de sous-solage dans la partie supérieure des sédiments confirme que ces traces sont contemporaines du paléosol. Ces sillons sont probablement formés par un travail du sol à l'araire. La conservation de tels vestiges indique que le paléosol n'a pas été tronqué et que le recouvrement par des colluvions a été rapide. Les conditions de conservation de ce paléosol sont donc idéales. Seul bémol, la surface couverte par ce paléosol semble limitée, puisque seul un sondage permet de l'observer.

## S9 SD 268 : paléosol hydromorphe scellé sous des colluvions loessiques (Thomas et al. 2008)

Ligne à grande vitesse (TGV Est) secteur 9, sondage D268

0-20 cm : Horizon de labour

20-70 : Limon argileux brun légèrement carbonaté, structuré, activité biologique, matières organique.

Transition rapide vers :

70-130 cm : Limon argileux brun, décarbonaté, légèrement plus foncé, légèrement mieux structuré, racines, manganèse, compact. La décarbonatation est le seul argument solide pour interpréter ce niveau comme un paléosol, présences de tessons rubanés à partir de 90, dont un vase qui est en place

Transition rapide vers :

130-150 cm : Limon très argileux jaune grisâtre avec taches de rouille, carbonaté, niveau de circulation d'eau, niveau hydromorphe, apparition d'un silo à 130 avec poupées de loess à sa base

## S10 SD 278 : paléosol scellé sous un bâtiment gallo-romain (Jodry et al. 2008)

Ligne à grande vitesse (TGV Est) secteur 10, sondage E278

A l'amont du site 10-8 (Seebot), vers le Sud, l'on retrouve un court versant légèrement plus abrupt. Les vestiges gallo-romains au pied de ce versant sont recouverts d'une épaisse couche de colluvions très irrégulière. Sous les débris du bâtiment gallo-romain (relevé 2) un paléosol a été scellé suite à la phase de construction. A coté de ce bâtiment, le paléosol est également observable mais les indices sont nettement plus ténus. La teneur en matière organique (>3 %) est cependant élevée (relevés 1 et 2) et quasiment identique pour les deux stratigraphies. Le bâtiment a tout de même contribué à une meilleure conservation des traits pédologique. L'emprise du bâtiment, bien que non totalement définie, et sa position par rapport aux sédiments semblent indiquer que des travaux de terrassement, relativement importants, ont précédé la construction. La synthèse stratigraphique permet de distinguer deux phases de colluvionnement. Une première phase, qui contribue uniquement au comblement du fond de vallon, est peut-être contemporaine de l'occupation romaine. Une seconde phase, postérieure à la dernière occupation gallo-romaine, recouvre l'ensemble du vallon et s'épaissit vers l'aval. Une partie au moins de cette seconde série est sub-actuelle. Le développement relativement important d'un paléosol indique qu'une période de relative stabilité a précédé l'occupation du site. Par stabilité, nous entendons l'absence de processus d'érosion intensif qui dans ces terrains sensibles sont synonymes de couvert végétal dense et d'absence de mise en culture.





Code du site	Lieu-dit	Prof. du profil /cm	Formation végétale actuelle	Type de sol (WRB)	Synthèse des données historiques et paléoécologiques
FALI 1	Hohneck	90	hêtraie	cambisol	Sous forêt pionnière de hêtre
FAP	Hohneck	90	prairie	umbrisol	Sous prairie depuis 750 ans au moins, défrichement à l'Age du Bronze
FALI 4	Hohneck	85	prairie	cambisol	Sous prairie ancienne
FALI 5	Hohneck	65	hêtraie	cambisol	Sous forêt ancienne
3 FO 3	Hohneck	85	hêtraie-sapinière	cambisol	Sous forêt ancienne, phase de défrichement à l'Age du Bronze
C-SCH	Hohneck	80	prairie	cambisol	Sous prairie ancienne
P-HOH	Hohneck	70	prairie	umbrisol	Sous prairie ancienne
GAF 1	Gazon du Faing	63	prairie	cambisol	Sous prairie depuis le Moyen Age au moins
GAF 2	Gazon du Faing	53	prairie	cambisol	Idem GAF1
ROS01	Rossberg	105	prairie	cambisol	Sous prairie depuis 1760 au moins, défrichement au Néolithique et à l'Antiquité -
ROS02	Rossberg	105	prairie	cambisol	Idem ROS1
ROS03	Rossberg	90	hêtraie-sapinière	cambisol	Sous forêt depuis 1760 au moins
ROS04	Rossberg	100	prairie	cambisol	Sous prairie depuis 1760 au moins, défrichements à l'Age du Bronze et au Moyen Age
CFP	Champ du Feu	75	prairie	cambisol	Sous prairie depuis 1760 au moins
EFP	Elmerforst	70	chênaie	cambisol	Sous forêt depuis 700 ans au moins
MHG	Hardt grise	120	chênaie	gleysol	Sous forêt depuis 1760 au moins
MRN	Ried noir	45	prairie	gleysol	Sous prairie depuis 1890 au moins, sous forêt sur la carte de Cassini
SJK	Salajka	90	hêtraie-sapinière	cambisol	Forêt très ancienne, 500 ans au minimum attestés par les traces de chablis
GOT	village	120	Cultures	luvisol	Occupation médiévale
VST	Ve studenem	50	hêtraie	cambisol	Forêt très ancienne d'après les gestionnaires tchèques de la réserve

Tableau récapitulatif des profils de sols étudiés

A déplier.

Code du paléosol	Commune	Type de sol (hypothèse)	Age estimé de l'enfouissement	Hypothèses paléoenvironnementales
S7 SD22	Ingenheim	cambisol	gallo-romain	Défrichement puis mise en culture
S7 SD341	Duntzenheim	cambisol	gallo-romain	Défrichement puis mise en culture
S7 SD298	"	cambisol	gallo-romain	Défrichement puis mise en culture
S8 SD347	Gougenheim	chernozem	19 300 BP	Milieu steppique
S8 SD294	"	chernozem	Idem S8 SD347	Milieu steppique
S8 SD305	"	luvisol	protohistorique	Mise en culture ?
S9 SD255	Mittelhausen	cambisol	protohistorique	Mise en culture
S9 SD268	"	gleysol	protohistoire	Milieu humide
S10 SD278	Mittelhausen	cambisol	gallo-romain	Défrichement puis mise en culture
HOP1	Houssen	gleysol	4800 BP	Milieu alluvial humide
HOP2	Houssen	gleysol	7240 BP	Milieu alluvial humide
GRH	Houssen	gleysol	Antiquité ou ultérieur	Milieu alluvial humide peut être cultivé à l'Antiquité
HOR	Horbourg-Wihr	gleysol	Idem GRH	Idem GRH
HOW	Horbourg-Wihr	gleysol	Idem GRH	Idem GRH
SCD	Sainte-Croix-en-plaine	gleysol	Idem GRH	Idem GRH
ENA	Strasbourg	gleysol	1620 BP	Milieu alluvial humide
STK	Osenbach	cambisol	800-1300 BP	Cultivé ou paturé
DIN	Dinsheim	leptosol	600-1300 BP	Cultivé ou paturé
ZMK1	Zemechy (CZ)	chernozem	30 000 BP	Milieu steppique
ZMK2	Zemechy (CZ)	chernozem	39 000 BP	Milieu steppique
ZMC	Zemechy (CZ)	chernozem	37 000 BP	Milieu steppique
ZEN	Eckbolsheim	gleysol	9800 BP	Milieu alluvial humide

Tableau récapitulatif des profils de sols étudiés

A déplier.

## ANNEXE 2A

Tableau des longueurs d'onde du proche infrarouge et groupes fonctionnels associés suggérés dans la littérature (compilation auteur)

Longueur d'onde	Type de vibration	Groupe fonctionnel suggérer	Référence
865	CH	aromatic	Y.Roggo et al. 2004
890	C-H stretch third overtone		Ali et al. 2000
925		starch, cellulose	Y.Roggo et al. 2004
1054	=CH		Y.Roggo et al. 2004
1133	CH <sub>2</sub> , CH <sub>3</sub>		Y.Roggo et al. 2004
1143	C-H second overtone	aromatic	Shenk et al. 2001
1154	OH in water		Y.Roggo et al. 2004
1160	C=O stretch 4th overtone	C=O	Shenk et al. 2001
1170	C-H second overtone	HC=CH	Shenk et al. 2001
1195	C-H second overtone	CH <sub>3</sub>	Shenk et al. 2001
1201		oil	E.Ben-Dor et al. 1997
1215	C-H second overtone	CH <sub>2</sub>	Shenk et al. 2001
1220	C-H stretch second overtone	cellulose	Ali et al. 2000
1225	C-H second overtone	CH	Shenk et al. 2001
1227		starch, cellulose	Y.Roggo et al. 2004
1310	CH	aromatic	Y.Roggo et al. 2004
1360	C-H combination	CH <sub>3</sub>	Shenk et al. 2001
1366	2 x C-H str. + C-H	deformation, cellulose	Ali et al. 2000
1367	OH in water	celulose lignin starch	E.Ben-Dor et al. 1997
1370		starch cellulose	Y.Roggo et al. 2004
1387	isolated O-H stretch first overtone		Ali et al. 2000
1395	C-H combination	C-H <sub>2</sub>	Shenk et al. 2001
1410	O-H first overtone	ROH, oil	Shenk et al. 2001
1410	OH in water		Y.Roggo et al. 2004
1415	C-H combination	CH <sub>2</sub>	Shenk et al. 2001
1417	C-H combination	aromatic	Shenk et al. 2001
1420	O-H first overtone	ArOH	Shenk et al. 2001
1440	C-H combination	CH <sub>2</sub>	Shenk et al. 2001
1440	O-H stretch first overtone	cellulose	Ali et al. 2000
1446	C-H combination	aromatic	Shenk et al. 2001
1450	O-H stretch first overtone	starch, H <sub>2</sub> O	Shenk et al. 2001
1450	C=O stretch 3rd overtone	C=O	Shenk et al. 2001
1450	O-H str., C-H str.	starch, sugar, lignin, water	Fourty et al. 1996
1450	OH str., CH str.	starch, sugar, lignin, water	Fourty et al. 1996
1450	CH, OH str.	starch, sugar, lignin, water	in Fourty et al. 1996
1460	sym N-H stretch 1st overtone	urea	Shenk et al. 2001
1463	N-H stretch first overtone	CONH <sub>2</sub>	Shenk et al. 2001
1468	OH in water (ν <sub>2</sub> + ν <sub>3</sub> )	celulose lignin starch pectin	E.Ben-Dor et al. 1997
1470	O-H str.	cellulose, sugar	Fourty et al. 1996
1470	CH, OH str.	starch, sugar, lignin, water	Fourty et al. 1996
1471	N-H stretch first overtone	CONHR	Shenk et al. 2001
1483	N-H stretch first overtone	CONH <sub>2</sub>	Shenk et al. 2001
1489	O-H stretch first overtone (intramolecular H-bond)	cellulose	Ali et al. 2000
1490	N-H stretch first overtone	CONHR	Shenk et al. 2001

1490	O-H stretch first overtone	cellulose	Shenk et al. 2001
1490	sym N-H stretch 1st overtone	urea	Shenk et al. 2001
1490	O-H str.	cellulose, sugar	in Fourty et al. 1996
1490	OH str.	cellulose	in Fourty et al. 1996
1492	N-H stretch first overtone	ArNH <sub>2</sub>	Shenk et al. 2001
1500	N-H stretch first overtone	NH	Shenk et al. 2001
1500	OH str.	cellulose	Fourty et al. 1996
1510	N-H stretch first overtone	protein	Shenk et al. 2001
1510	N-H str.	protein, nitrogen	in Fourty et al. 1996
1520	N-H stretch first overtone	urea	Shenk et al. 2001
1520	N-H str.	protein, nitrogen	Fourty et al. 1996
1530	N-H stretch first overtone	RNH <sub>2</sub>	Shenk et al. 2001
1540	O-H stretch first overtone	starch	Shenk et al. 2001
1540	O-H str.	starch, cellulose	in Fourty et al. 1996
1540	OH str.	starch, cellulose	Fourty et al. 1996
1545	O-H stretch first overtone (intramolecular H-bond)	cellulose	Ali et al. 2000
1550	O-H str.	starch, cellulose	Fourty et al. 1996
1554	=CH		Y.Roggo et al. 2004
1560	O-H str.	starch, sugar	Fourty et al. 1996
1570	N-H stretch first overtone	CONH	Shenk et al. 2001
1580	O-H str.	starch, sugar	in Fourty et al. 1996
1580	OH str.	starch, sugar	Fourty et al. 1996
1583	O-H stretch first overtone (intramolecular H-bond)	cellulose	Ali et al. 2000
1583	OH in water (2v1); H-bonded OH group	pectin starch cellulose	E.Ben-Dor et al. 1997
1620	C-H stretch first overtone	.=CH <sub>2</sub>	Shenk et al. 2001
1637	CH	aromatic	Y.Roggo et al. 2004
1670	O-H str.	lignin, starch, protein	Fourty et al. 1996
1670	CH str.	lignin, starch, protein, nitrogen	Fourty et al. 1996
1685	C-H stretch first overtone	aromatic	Shenk et al. 2001
1690	O-H str.	lignin, starch, protein	in Fourty et al. 1996
1690	CH str.	lignin, starch, protein, nitrogen	in Fourty et al. 1996
1695	C-H stretch first overtone	CH <sub>3</sub>	Shenk et al. 2001
1702		N total	Dalal et Henry 1986
1703	C-H stretch first overtone	cellulose	Ali et al. 2000
1705	C-H stretch first overtone	CH <sub>3</sub>	Shenk et al. 2001
1725	C-H stretch first overtone	CH <sub>2</sub>	Shenk et al. 2001
1726	2v of aliphatic C-H stretch		E.Ben-Dor et al. 1997
1730	C-H str. + C-H def.; C-H def. Second overtone	protein	Fourty et al. 1996
1730	O-H str.	cellulose	Fourty et al. 1996
1736	O-H str.	cellulose	in Fourty et al. 1996
1740	S-H stretch first overtone	.-SH	Shenk et al. 2001
1744		C organique	Dalal et Henry 1986
1750	C-H str., O-H str., HOH def.	cellulose sugar starch	Fourty et al. 1996
1754		lignin	in Fourty et al. 1996
1760		lignin	Fourty et al. 1996
1765	C-H stretch first overtone	CH <sub>2</sub>	Shenk et al. 2001
1769	2v of aliphatic C-H stretch	cellulose lignin starch	E.Ben-Dor et al. 1997
1770	C-H str., O-H, HOH def.	cellulose, sugar, starch	Fourty et al. 1996
1780	C-H str., O-H, HOH def.	cellulose, sugar, starch	in Fourty et al. 1996
1780	C-H str., O-H str., HOH def.	cellulose sugar starch	in Fourty et al. 1996
1780	OH str., CH, HON def.	cellulose, starch, sugar	Fourty et al. 1996

1780	C-H stretch first overtone	cellulose	Shenk et al. 2001
1780	C-H stretch / HOH deformation combination	cellulose	Shenk et al. 2001
1790	O-H combination	H <sub>2</sub> O	Shenk et al. 2001
1793	C-H stretch first overtone	cellulose	Ali et al. 2000
1811	O-H stretch + 2 x C-O stretch	cellulose	Ali et al. 2000
1820	O-H str., C-O str.	cellulose	Fourty et al. 1996
1820	OH str., CO	cellulose	in Fourty et al. 1996
1820	O-H stretch/ C-O stretch 2nd overtone combination	cellulose	Shenk et al. 2001
1830	OH str., CO	cellulose	Fourty et al. 1996
1860	C-Cl stretch 6th overtone	C-Cl	Shenk et al. 2001
1870		C organique	Dalal et Henry 1986
1870		N total	Dalal et Henry 1986
1900	C=O stretch 2nd overtone	.-CO <sub>2</sub> H	Shenk et al. 2001
1908	O-H stretch first overtone	P-OH	Shenk et al. 2001
1920	O-H str., O-H def.	cellulose	Fourty et al. 1996
1920	C=O stretch 2nd overtone	CONH	Shenk et al. 2001
1924	O-H str., O-H def.	cellulose	in Fourty et al. 1996
1925	OH in water		Y.Roggo et al. 2004
1926		H <sub>2</sub> O	Dalal et Henry 1986
1930	O-H stretch / HOH deformation combination	starch, cellulose	Shenk et al. 2001
1932	H <sub>2</sub> O (ν <sub>1</sub> +ν <sub>3</sub> ); 3ν of -C=O et COOH,C=O of ketonic carbonyl, CONH <sub>2</sub>	cellulose lignin glucan starch pectin humic acid	E.Ben-Dor et al. 1997
1933	O-H stretch + O-H def.		Ali et al. 2000
1940		moisture	Shenk et al. 2001
1940	O-H str. O-H def.	water, lignin, protein nitrogen starch cellulose	Fourty et al. 1996
1940	O-H str., HOH def.	water, lignin, protein starch cellulose	in Fourty et al. 1996
1940	OH str. OH def.	water, lignin, protein, nitrogen, starch, cellulose	in Fourty et al. 1996
1940	O-H bend 2nd overtone	H <sub>2</sub> O	Shenk et al. 2001
1950	O-H str., O-H def.	water, lignin, protein nitrogen starch cellulose	Fourty et al. 1996
1950	O-H str., O-H bond	sugar, starch	Fourty et al. 1996
1950	O-H str., HOH def.	water, lignin, protein starch cellulose	Fourty et al. 1996
1950	OH str. OH def.	water, lignin, protein, nitrogen, starch, cellulose	Fourty et al. 1996
1950	C=O stretch 2nd overtone	.-CO <sub>2</sub> R	Shenk et al. 2001
1954		H <sub>2</sub> O	Dalal et Henry 1986
1960	N-H asym.	protein	Fourty et al. 1996
1960	O-H str., O-H bond	sugar, starch	in Fourty et al. 1996
1960	OH str., OH bond	sugar, starch	Fourty et al. 1996
1960	O-H stretch/ O-H bend combination	starch	Shenk et al. 2001
1967	N-H asym. str. + amide II C=O str. Second overtone		Ali et al. 2000
1980	N-H asym.	protein	in Fourty et al. 1996
1980	Asym N-H stretch/ amid II combination	CONH <sub>2</sub>	Shenk et al. 2001
1990	N-H stretch/ N-H bend	Urea	Shenk et al. 2001

	combination		
2000	2 x O-H def. + C-O def. N-H sym. str. + amide II		Ali et al. 2000
2000	OH def., CO	starch	Fourty et al. 1996
2030	C=O stretch 2nd overtone	Urea	Shenk et al. 2001
2050	N-H / amid II or N-H / amid III or combination	CONH2	Shenk et al. 2001
2052		N total	Dalal et Henry 1986
2055	Sym N-H stretch / amid I combination	protein	Shenk et al. 2001
2057	N-H sym. str. + amid II N=H asym str. + amide III isolated O-H str. + O-H def.		Ali et al. 2000
2060	N=H rotation, N-H str.	protein nitrogen	Fourty et al. 1996
2060	N-H bend 2nd overtone or N-h bend/N-H stretch combination	protein	Shenk et al. 2001
2070	N-H deformation overtone	urea	Shenk et al. 2001
2070	O-H combination	oil	Shenk et al. 2001
2090	O-H rot., O-H def., COC str., C-H	starch cellulose	Fourty et al. 1996
2090	O-H combination	OH	Shenk et al. 2001
2100		carbohydrate	Shenk et al. 2001
2100	O-H rot., O-H def., COC str., C-H	starch cellulose	in Fourty et al. 1996
2100	O=H rot., CO str., C=O	starch, cellulose	in Fourty et al. 1996
2100	O-h bend/C-O stretch combination	starch	Shenk et al. 2001
2100	Asym C-O-O stretch 3rd overtone	starch, cellulose	Shenk et al. 2001
2108	O-H str. + O-H def. 2 x O-H def. + 2 x C-O str.		Ali et al. 2000
2120	O=H rot., CO str., C=O	starch, cellulose	Fourty et al. 1996
2140	C-h stretch/C=O stretch combination or sym C-H deformation	oil, NC=CH	Shenk et al. 2001
2142	3v of C=C of aromatic rings	starch lignin wax tannins	E.Ben-Dor et al. 1997
2150		H2O	Dalal et Henry 1986
2153	CH	aromatic	Y.Roggo et al. 2004
2170	Asym C-H stretch/C-H deformation combination	HC=CH	Shenk et al. 2001
2180		protein	Shenk et al. 2001
2180	NN-H rotation, C-H str., C-O, C=O, N-H	protein nitrogen	in Fourty et al. 1996
2180	N-H bend 2nd overtone	protein	Shenk et al. 2001
2193	Amid II	protein	E.Ben-Dor et al. 1997
2200	NN-H rotation, C-H str., C-O, C=O, N-H	protein nitrogen	Fourty et al. 1996
2200	C-H stretch/ C=O stretch combination	.-CHO	Shenk et al. 2001
2215	isolated O-H stretch + O-H def.		Ali et al. 2000
2240	C-H str.	protein	in Fourty et al. 1996
2260	C-H rot., CH2, O-H str.	starch cellulose	Fourty et al. 1996
2262	C-H str., C=C	lignin	in Fourty et al. 1996
2270		lignin	Shenk et al. 2001
2270	C-H str.	protein	Fourty et al. 1996

2270	C-H str., C=C	lignin	Fourty et al. 1996
2270	C-H rot., CH2, O-H str.	starch cellulose	in Fourty et al. 1996
2270	C-H rot.,CH2, O-H str. O-H stretch/C-O stretch combination	cellulose, sugar, starch	in Fourty et al. 1996
2270	O-H str. +C-C str. C-H str. + CH def.	cellulose	Shenk et al. 2001
2277	3v oCH2,CH3		Ali et al. 2000
2279	C-H rot.,CH2, O-H str.	cellulose, sugar, starch	E.Ben-Dor et al. 1997
2280	C-H str., CH2 def.	starch cellulose	Fourty et al. 1996
2280	OH str., CH2 def.	starch, cellulose	in Fourty et al. 1996
2280	C-H stretch/ CH2 deformation	starch	Fourty et al. 1996
2290	N-H str., C=O, C-H rotation	protein nitrogen	Shenk et al. 2001
2300	C-H str., CH2 def.	starch cellulose	Fourty et al. 1996
2300	N-H str., C=O, C-H rotation	protein nitrogen	in Fourty et al. 1996
2300	C-H bend 2nd overtone	protein	Shenk et al. 2001
2308		starch cellulose	Y.Roggo et al. 2004
2310	C-H bend 2nd overtone	oil	Shenk et al. 2001
2322	C-H stretch/ CH2 deformation combination	starch	Shenk et al. 2001
2330	CH, OH str., OH, CH def. C-H stretch/ CH2 deformation combination	cellulose	Fourty et al. 1996
2330	3v of CH2,COO-	starch	Shenk et al. 2001
2335	C-H stretch/ C-H deformation	cellulose lignin glucan	E.Ben-Dor et al. 1997
2336		cellulose	Shenk et al. 2001
2337	3v of COO-, CH3	pectin protein	Shenk et al. 2001
2340	O-H str., CH, C-H def. O-H	cellulose	E.Ben-Dor et al. 1997
2340	CH, OH str., OH, CH def. C-H str. + C-H def.; C-H def.	cellulose	Fourty et al. 1996
2343	Second overtone	cellulose	in Fourty et al. 1996
2350	C_H2 rotation, C-H def.	cellulose, protein, nitrogen	Ali et al. 2000
2350	C str.		Fourty et al. 1996
2350	CH2 rot., CH def.	cellulose, protein, nitrogen	in Fourty et al. 1996
2352	CH2 bend 2nd overtone	cellulose, protein	Shenk et al. 2001
2360		cellulose, protein, nitrogen	Fourty et al. 1996
2380	O-H str., aromatic def. C-H stretch/C-C stretch combination	lignin	Fourty et al. 1996
2380	C-H combination	oil	Shenk et al. 2001
2470	sym C-N-C stretch first overtone	CH2	Shenk et al. 2001
2470	C-H stretch/ C-C stretch combination	protein	Shenk et al. 2001
2488	C-H stretch/ C-C and C-O-C stretch	cellulose	Shenk et al. 2001
2500	asym C-N-C stretch 1st overtone	starch	Shenk et al. 2001
2530		protein	Shenk et al. 2001

## ANNEXE 2 B

B Tableau des propriétés chimiques, physiques et biologiques du sol et qualité de la prédiction par spectroscopie proche infrarouge (Cécillon *et al.* 2009a)

**Table 1a** Predictive efficiency of NIRS for MDS regarding soil chemical variables and associated soil functions, ecosystem services or threats.

MDS variable <sup>1</sup>	Soil functions <sup>2</sup>	Soil ecosystem services <sup>3</sup>	Soil threats studied in SMN <sup>4</sup>	NIRS predictive efficiency <sup>5</sup>	Associated NIR wavelengths and references
Organic C	Nutr. Cycling <sup>6</sup> ; filter-buffer; biodiv-habitat <sup>7</sup>	Nutr. Cycling <sup>6</sup> ; climate regul <sup>8</sup> ; detox <sup>9</sup>	SOM <sup>10</sup> decline	Good	1744, 1870, 2052 nm (Dalal & Henry, 1986); 1955-1965, 2215, 2265, 2285-2295, 2315-2495 nm (Henderson <i>et al.</i> , 1992); 2218, 2350 nm (Salgó <i>et al.</i> , 1998); 2200 nm (Confalonieri <i>et al.</i> , 2001); 1109, 1232, 1414, 1522 nm (Mouazen <i>et al.</i> , 2007); 1420, 1900-1950, 2040-2260, 2440-2460 nm (Rinnan & Rinnan, 2007); 1130, 2410 nm (Terhoeven-Urselmans <i>et al.</i> , 2008)
Total and organic N	Nutr. Cycling <sup>6</sup> ; filter-buffer; biodiv-habitat <sup>7</sup>	Nutr. Cycling <sup>6</sup> ; climate regul <sup>8</sup> ; detox <sup>9</sup>	SOM <sup>10</sup> decline	Good	For total N: 1702, 1870, 2052 nm (Dalal & Henry, 1986); 1726, 1826, 2038 nm (Morra <i>et al.</i> , 1991)
PH	Nutr. Cycling <sup>6</sup> ; filter-buffer; biodiv-habitat <sup>7</sup>	Nutr. Cycling <sup>6</sup>	Contamination	Mid	
Electrical conductivity	Nutr. Cycling <sup>6</sup>	Nutr. Cycling <sup>6</sup>	Desertification; salinisation	Mid	
Mineral N, P, K	Nutr. Cycling <sup>6</sup>	Nutr. Cycling <sup>6</sup>	Contamination	Mid	For NH <sub>4</sub> : 1510-1650 nm (Murray & Williams, 1990); for total P: 2021-2025, 2081-2084 nm (Bogrekci & Lee, 2005); 2240-2400 nm (Velasquez <i>et al.</i> , 2005)
Heavy metal content	Nutr. Cycling <sup>6</sup> ; resilience; filter-buffer	Nutr. Cycling <sup>6</sup> ; detox <sup>9</sup>	Contamination	Mid	For Cu: ca. 900, 1300, 1500 nm (Gaffey & Reed, 1987); for Cd and Zn: 1050, 1400, 1850, 2150, 2280, 2400, 2470 nm (Kooistra <i>et al.</i> , 2001)
Salt content	Nutr. Cycling <sup>6</sup>		Desertification; salinisation	Mid	For NaCl: 1930 nm; for KCl: 1430 nm; for MgSO <sub>4</sub> : 1480 nm; for Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> : 1825 nm; for MgCl <sub>2</sub> : 1925 nm (Farifteh <i>et al.</i> , 2008)

<sup>1</sup> modified from Doran & Parkin, 1994; <sup>2</sup> after Andrews *et al.*, 2004; <sup>3</sup> after Lavelle *et al.*, 2006; <sup>4</sup> after Morvan *et al.*, 2008; <sup>5</sup> based on validation statistics (R<sup>2</sup>, standard error of prediction); <sup>6</sup> nutrient cycling; <sup>7</sup> biodiversity and habitat; <sup>8</sup> climate regulation; <sup>9</sup> detoxification; <sup>10</sup> soil organic matter.

**Table 1b** Predictive efficiency of NIRS for MDS regarding soil physical properties and associated soil functions, ecosystem services or threats.

MDS variable <sup>1</sup>	Soil functions <sup>2</sup>	Soil ecosystem services <sup>3</sup>	Soil threats studied in SMN <sup>4</sup>	NIRS predictive efficiency <sup>5</sup>	Associated NIR wavelengths and references
Soil loss	Physical support; water relations	Erosion control	Soil erosion	Poor	For infiltration of crusted soils: ca. 1400, 1450, 1900, 2200 nm (Goldshleger <i>et al.</i> , 2001, 2002)
WSA <sup>6</sup>	Physical support; water relations	Erosion control; climate regul <sup>7</sup>	Soil erosion; SOM <sup>8</sup> decline	Mid	
Soil texture	Physical support; biodiv-habitat <sup>9</sup> ; filter-buffer	Erosion control; detox <sup>10</sup>	Compaction; soil formation	Mid	For clay: 2200 nm (Ben-Dor & Banin, 1995a); 1700 nm (Viscarra Rossel & McBratney, 1998); 1901, 1912 nm (Islam <i>et al.</i> , 2003); 2206 nm (Lagacherie <i>et al.</i> , 2008); for particle size: 1323, 2021, 2081 nm (Bogrekci & Lee, 2005)
Soil structure	Physical support; biodiv-habitat <sup>9</sup> ; filter-buffer	Erosion control; climate regul <sup>7</sup> ; water supply; detox <sup>10</sup>	Compaction; soil formation	Poor	For aggregate fractions: 1940, 2250 nm (Mutuo <i>et al.</i> , 2006)
Depth of soil and rooting	Physical support; water relations; biodiv-habitat <sup>9</sup>	Erosion control; soil formation; detox <sup>10</sup>	Soil formation	Poor	
Bulk density	Physical support; water relations	Water supply; soil formation	Compaction; SOM <sup>8</sup> decline; soil formation	Poor	
WHC <sup>11</sup>	Physical support; water relations	Water supply		Mid	
Water content	Physical support; water relations	Water supply		Good	1400, 1900, 2200 nm (Bowers & Hanks, 1965; Ben-Dor & Banin, 1995a; Demattê <i>et al.</i> , 2002); 1926, 1954, 2150 nm (Dalal & Henry, 1986); 1450, 1920 nm (Salgó <i>et al.</i> , 1998); 1450, 1950, 2500 nm (Viscarra Rossel & McBratney, 1998); 1420, 1920 nm (Confalonieri <i>et al.</i> , 2001)
Soil temperature	Water relations; nutr. Cycling <sup>12</sup> ; biodiv-habitat <sup>9</sup>	Nutr. Cycling <sup>12</sup> ; climate regul <sup>7</sup> ; soil formation		Poor	

<sup>1</sup> modified from Doran & Parkin, 1994; <sup>2</sup> after Andrews *et al.*, 2004; <sup>3</sup> after Lavelle *et al.*, 2006; <sup>4</sup> after Morvan *et al.*, 2008; <sup>5</sup> based on validation statistics (R<sup>2</sup>, standard error of prediction); <sup>6</sup> water stable aggregates; <sup>7</sup> climate regulation; <sup>8</sup> soil organic matter; <sup>9</sup> biodiversity and habitat; <sup>10</sup> detoxification; <sup>11</sup> water holding capacity; <sup>12</sup> nutrient cycling.

**Table 1c** Predictive efficiency of NIRS for MDS regarding soil biological properties and associated soil functions, ecosystem services or threats.

<b>MDS variable<sup>1</sup></b>	<b>Soil functions<sup>2</sup></b>	<b>Soil ecosystem services<sup>3</sup></b>	<b>Soil threats studied in SMN<sup>4</sup></b>	<b>NIRS predictive efficiency<sup>5</sup></b>	<b>Associated NIR wavelengths and references</b>
Microbial biomass	Nutr. Cycling <sup>6</sup> ; resilience; filter-buffer; biodiv-habitat <sup>7</sup>	Nutr. Cycling <sup>6</sup> ; climate regul <sup>8</sup> ; soil formation; plant production and protection	Biodiversity decline	Good	1408, 1842, 2414 nm (Terhoeven-Urselmans <i>et al.</i> , 2008); wavelength interval 1750-2500 nm (Cécillon <i>et al.</i> , 2008)
Soil respiration	Nutr. Cycling <sup>6</sup> ; resilience; filter-buffer; biodiv-habitat <sup>7</sup>	Nutr. Cycling <sup>6</sup> ; climate regul <sup>8</sup>	Biodiversity decline	Good	800 (Fe oxide effect), 2030, 2180, 2200 (clay mineralogy effect), 2250, 2440, 2460 nm (Mutuo <i>et al.</i> , 2006); for basal respiration: 1836, 2274 nm (alkyl groups), 1510 nm (amino groups) (Terhoeven-Urselmans <i>et al.</i> , 2008)
Potentially mineralizable N	Nutr. Cycling <sup>6</sup> ; resilience; filter-buffer	Climate regul <sup>8</sup>		Mid	
Cmic / Corg ratio	Nutr. Cycling <sup>6</sup> ; resilience; filter-buffer; biodiv-habitat <sup>7</sup>			Good	Wavelength interval 1750-2500 nm (Cécillon <i>et al.</i> , 2008)
Respiration/ biomass ratio	Nutr. Cycling <sup>6</sup> ; resilience; filter-buffer; biodiv-habitat <sup>7</sup>			ND	
Biodiversity	Resilience; biodiv-habitat <sup>7</sup>	Soil formation; plant production and protection	Biodiversity decline	Poor	

<sup>1</sup> modified from Doran & Parkin, 1994; <sup>2</sup> after Andrews *et al.*, 2004; <sup>3</sup> after Lavelle *et al.*, 2006; <sup>4</sup> after Morvan *et al.*, 2008; <sup>5</sup> based on validation statistics (R<sup>2</sup>, standard error of prediction); <sup>6</sup> nutrient cycling; <sup>7</sup> biodiversity and habitat; <sup>8</sup> climate regulation; ND: not determined.

Nomenclature CORINE Land Cover simplifiée d'après Commissariat général au développement durable (2009)

## **1 Territoires artificialisés**

### **11 Zones urbanisées**

111 Tissu urbain continu, 112 Tissu urbain discontinu

### **12 Zones industrielles ou commerciales et réseaux de communication**

121 Zones industrielles ou commerciales, 122 Réseaux routier et ferroviaire et espaces associés, 123 Zones portuaires, 124 Aéroports

### **13 Mines, décharges et chantiers**

131 Extraction de matériaux, 132 Décharges, 133 Chantiers

### **14 Espaces verts artificialisés, non agricoles**

141 Espaces verts urbains, 142 Equipements sportifs et de loisirs

## **2 Territoires agricoles**

### **21 Terres arables**

211 Terres arables hors périmètres d'irrigation, 212 Périmètres irrigués en permanence, 213 Rizières

### **22 Cultures permanentes**

#### **221 Vignobles**

Surfaces plantées de vignes.

#### **222 Vergers et petits fruits**

Parcelles plantées d'arbres fruitiers ou d'arbustes fruitiers : cultures pures ou mélange d'espèces fruitières, arbres fruitiers en association avec des surfaces toujours en herbe. Y compris les châtaigneraies et les noiseraies.

#### **223 Oliveraies**

Surfaces plantées d'oliviers, y compris oliviers et vignes sur la même parcelle.

### **23 Prairies**

#### **231 Prairies**

Surfaces enherbées denses de composition floristique composées principalement de graminacées, non incluses dans un assolement.

Principalement pâturées, mais dont le fourrage peut être récolté mécaniquement. Y compris des zones avec haies (bocages).

### **24 Zones agricoles hétérogènes**

#### **241 Cultures annuelles associées aux cultures permanentes**

Cultures temporaires (terres arables ou prairies) en association avec des cultures permanentes sur les mêmes parcelles.

#### **242 Systèmes culturaux et parcellaires complexes**

Juxtaposition de petites parcelles de cultures annuelles diversifiées, de prairies et / ou de cultures permanentes complexes.

#### **243 Surfaces essentiellement agricoles, interrompues par des espaces naturels importants**

Surfaces essentiellement agricoles, interrompues par de la végétation naturelle.

#### **244 Territoires agroforestiers**

Cultures annuelles ou pâturages sous couvert arboré composé d'espèces forestières.

## **3 Forêts et milieux semi-naturels**

### **31 Forêts**

#### **311 Forêts de feuillus**

Formations végétales principalement constituées par des arbres, mais aussi par des buissons et arbustes, où dominant les espèces forestières feuillues.

### **312 Forêts de conifères**

Formations végétales principalement constituées par des arbres, mais aussi par des buissons et arbustes, où dominent les espèces forestières de conifères.

### **313 Forêts mélangées**

Formations végétales principalement constituées par des arbres, mais aussi par des buissons et arbustes, où ni les feuillus ni les conifères ne dominent.

## **32 Milieux à végétation arbustive et/ou herbacée**

### **321 Pelouses et pâturages naturels**

Herbages de faible productivité. Souvent situés dans des zones accidentées.

Peuvent comporter des surfaces rocheuses, des ronces et des broussailles.

### **322 Landes et broussailles**

Formations végétales basses et fermées, composées principalement de buissons, d'arbustes et de plantes herbacées (bruyères, ronces, genêts, ajoncs, cytises, etc.)

CORINE Land Cover France - Guide d'utilisation

CGDD, SOeS – Février 2009 17/22

### **323 Végétation sclérophylle**

Végétation arbustive persistante, aux feuilles relativement petites, coriaces et épaisses. Y compris maquis et garrigues. Maquis: associations végétales denses composées de nombreux arbrisseaux qui couvrent les terrains siliceux acides en milieu méditerranéen. Garrigues : associations buissonnantes discontinues des plateaux calcaires méditerranéens. Elles sont souvent composées de chênes kermès, d'arbousiers, de lavande, de thym et de cistes blancs. Quelques arbres isolés peuvent être présents.

### **324 Forêts et végétation arbustive en mutation**

Végétation arbustive ou herbacée avec arbres épars. Formations pouvant résulter de la dégradation de la forêt ou d'une re-colonisation / régénération par la forêt.

## **33 Espaces ouverts, sans ou avec peu de végétation**

### **331 Plages, dunes et sables**

Les plages, les dunes et les étendues de sable ou de galets du milieu littoral et continental, y compris les lits mineurs des rivières à régime torrentiel.

### **332 Roches nues**

Éboulis, falaises, rochers, affleurements.

### **333 Végétation clairsemée**

Comprend les steppes, toundras et "bad lands" (zones sèches avec peu de végétation et présence de roches nues). Végétation éparse de haute altitude.

### **334 Zones incendiées**

### **335 Glaciers et neiges éternelles**

## **4 Zones Humides**

### **41 Zones humides intérieures**

#### **411 Marais intérieurs**

#### **412 Tourbières**

Terrains spongieux humides dont le sol est constitué principalement de mousses et de matières végétales décomposées. Tourbières exploitées ou non.

### **42 Zones humides maritimes**

421 Marais maritimes, 422 Marais salants, 423 Zones intertidales

## **5 Surfaces en eau**

### **51 Eaux continentales**

511 Cours et voies d'eau, 512 Plans d'eau

### **52 Eaux maritimes**

521 Lagunes littorales, 522 Estuaires, 523 Mers et océans



