



HAL
open science

Steppes ou forêts ? : les conditions environnementales de la formation et de l'évolution des chernozems en Europe Centrale

Barbora Vyslouzilova

► **To cite this version:**

Barbora Vyslouzilova. Steppes ou forêts ? : les conditions environnementales de la formation et de l'évolution des chernozems en Europe Centrale. Sciences de la Terre. Université de Strasbourg; Univerzita Karlova (Prague), 2014. Français. NNT : 2014STRAH014 . tel-01154641

HAL Id: tel-01154641

<https://theses.hal.science/tel-01154641v1>

Submitted on 22 May 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Université de Strasbourg, Faculté de Géographie et d'Aménagement, LIVE, UMR 7362
Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, katedra fyzické geografie a geoekologie

Steppes ou forêts ? Les conditions environnementales de la formation et de l'évolution des chernozems en Europe Centrale

Step nebo les? Ekologické podmínky vzniku a vývoje černozemí ve Střední Evropě

Steppe or woodland? Ecological Conditions of Formation and Evolution of Chernozems in Central Europe

Barbora VYSLOUŽILOVÁ

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

Dizertační práce

Discipline : Géographie

Jury : Doc. RNDr. Jakub Langhammer, PhD., président du jury, Université Charles de Prague
Prof. RNDr. Jan Kalvoda, DrSc., rapporteur, Université Charles de Prague
Dr. Elena Havlíček, rapporteur, Université de Neuchâtel
RNDr. Tereza Zádorová, PhD., examinateur, Université de Science de la Vie de Prague
Dr. Damien Ertlen, examinateur, Université de Strasbourg
RNDr. Zbyněk Engel, PhD. Examinateur, Université Charles de Prague
RNDr. Luděk Šefrna, CSc., directeur de thèse, Université Charles de Prague
Prof. Dominique Schwartz, directeur de thèse, Université de Strasbourg

Soutenue publiquement le 26 septembre 2014 à Prague



Faculty of Science
CHARLES UNIVERSITY IN PRAGUE



Déclaration

Je déclare que mon travail de thèse est un travail original et que je cite toutes les références bibliographiques et les sources des renseignements. Aucune partie de ce travail n'a été utilisée pour l'obtention d'un diplôme académique autre.

A Prague, 31 juillet 2014

Barbora Vysloužilová

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 31. července 2014

Barbora Vysloužilová

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier les membres du jury, Elena Havlicek, Tereza Zádorová, Jan Kalvoda, Zbyněk Engel, Jakub Langhammer et Damien Ertlen pour le temps et l'effort qu'ils ont bien voulu consacrer à l'examen de ce manuscrit.

Mes travaux de recherche ont été effectués dans le cadre d'une convention de cotutelle entre l'Université Charles de Prague et l'Université de Strasbourg. Ma reconnaissance va en premier lieu à mes directeurs de thèse : Dominique Schwartz de l'Université de Strasbourg, Faculté de Géographie et d'Aménagement, Laboratoire Image, Ville et Environnement et Luděk Šefrna de l'Université Charles de Prague, Faculté des Sciences, Département de la Géographie physique et géoécologie pour l'intérêt qu'ils ont manifesté à mon égard, leurs encouragements constants et le soutien qu'ils m'ont prodigué. Sans leur appui, je n'aurais jamais réussi à mener à bon terme ce travail, dans lequel s'exprime le résultat de plusieurs années de recherches.

La réalisation de cette thèse a été rendue possible grâce à une bourse du Gouvernement français. Je remercie spécialement le Service culturel de l'Ambassade de France à Prague. Le travail de thèse a aussi été soutenu financièrement tout au long de sa durée par une bourse de l'Université Charles de Prague. J'ai été membre de la promotion Jane Goodall du Collège doctoral européen de l'Université de Strasbourg pendant la préparation de ma thèse de 2010 à 2014, ce qui m'a fait bénéficier des aides spécifiques du CDE pendant mes séjours strasbourgeois. Je voudrais remercier l'AFES pour la bourse Demolon qui m'a permis de participer au *XIIth International symposium and field workshop on palaeopedology* à Kursk en 2013. Je remercie le programme OBRESOC (ANR) qui m'a apporté un soutien important, en particulier pour avoir financé les analyses ¹⁴C.

Je voudrais également remercier Damien Ertlen, Maître de Conférences à l'Université de Strasbourg, qui m'a appris les subtilités de la méthode de la spectroscopie proche-infrarouge. Martine Trautmann (EOST-CNRS) m'a accompagnée lors des travaux de laboratoire et m'a donné des conseils précieux pour pouvoir effectuer des analyses pédologiques.

Je voudrais également remercier les collègues qui m'ont guidé lors de nombreuses opérations de terrain :

- Klára Virágh, botaniste du Jardin botanique de Vácrot, Tibor Josef Novák, pédologue de l'Université de Debrecin et László Horváth, météorologue du Service météorologique hongrois, pour leur aide précieuse lors des campagnes de travail et d'échantillonnage sur leurs sites d'étude en Hongrie ;
- Jaroslava Sobocká et Emil Fulajfar, pédologues de l'Institut de Recherche pour l'Amélioration et la Protection des Sols de Bratislava, pour leur aide dans la recherche de sites de chernozems sous forêt en Slovaquie. Dans le même contexte, je remercie Marie Hajnalová et František Petrovič, archéologues de l'Institut Archéologique de l'Université de Nitra, pour le support cartographique sur les sites slovaques ;
- Dagmar Dreslerová, archéologue de l'Institut d'Archéologie, Académie des Sciences, de Prague, pour ses explications et soutien documentaire ;

- Les géo-archéologues Mathieu Rué (société Paléotime), Arnaud Campaner (ANTEA) et Nathalie Schneider (INRAP) qui m'ont permis de découvrir des paléosols et pour leur accueil sur les chantiers archéologiques ;
- Vojen Ložek et Lucie Juříčková, malacologues, du Département de Biologie de l'Université Charles de Prague pour m'avoir donné la possibilité de travailler sur leurs sites de recherche et m'avoir transmis des documents complémentaires,
- Libor Petr (doctorant de l'Université Charles de Prague) pour son aide lors des prélèvements sur le site de Poplze.
- Milada Křížová (Université Charles de Prague, Service Météorologique Tchèque) pour son aide précieuse lors des enquêtes de terrain et les prélèvements, pour renseignements sur la climatologie et pour son soutien amical.

Je remercie Lenka Danková (Université Charles de Prague) pour sa coopération tout au long des prélèvements, tamisage et interprétations pédoanthracologiques, surtout sur la série de loess de Zeměchy. Je remercie également Jan Novak (Université de Bohême du Sud à České Budějovice, Rép. Tchèque) et Claire Delhon (UMR 7264, CNRS/Univ. Nice) pour leurs identifications botaniques des charbons extraits.

Je tiens à remercier à Anne Gebhardt (INRAP Grand-Est) pour les explications précieuses dans le domaine de la micromorphologie des sols.

Je voudrais également remercier Maria Jelenska (Académie des Sciences de Pologne, Varsovie), Tereza Zádorová (Université des Sciences de la Vie, Prague) et Damien Ertlen (Unistra) pour m'avoir fourni des échantillons de sols supplémentaires et des résultats analytiques sur leurs stations d'étude.

Je remercie Didier Brunet (IRD, UMR Eco&Sols, Montpellier SupAgro) pour m'avoir accueilli au sein de son laboratoire et pour ses explication concernant la spectroscopie proche infrarouge.

Je tiens aussi à remercier Véronique Auzet (Université de Strasbourg, Faculté de Géographie) pour les corrections linguistiques des annexes, Martin Stehlík (Université Charles) pour l'aide avec les SIG, Lucie Froehlicher (doctorante du Laboratoire Image, Ville, Environnement) pour son aide lors de la préparation des figures des coupes stratigraphiques et la cohabitation amicale dans le bureau commun.

La réalisation de la thèse entre les deux laboratoires n'aurait pas été possible sans le soutien des secrétaires des deux laboratoires, Estelle Baehrel, Helena Příbylová et Dagmar Chalupová, qui m'ont toujours aidé dans les problèmes administratifs aigus.

Je tiens également à remercier mes collègues des deux laboratoires strasbourgeois et pragois pour leurs contributions diverses et parce qu'ils m'ont permis passer les quatre ans de la thèse dans une ambiance conviviale.

Enfin je remercie ma famille pour son soutien constant et ses encouragements.

RESUME

Le chernozem est un sol emblématique, car il a participé à la naissance de la pédologie par l'intermédiaire des travaux de Dokuchaev (1883). Depuis, la formation des chernozems a suscité de nombreuses questions parmi les pédologues, botanistes et paléo-environnementalistes. Tandis qu'en Europe de l'Est et en Eurasie les chernozems sont décrits comme des sols zonaux, typiques des milieux steppiques continentaux, les zones où on les rencontre en Europe Centrale sont prédisposées par leur climat à la présence de forêts. L'objectif de notre travail vise à enrichir ce débat en reconstituant les conditions environnementales de la pédogénèse de ces sols en Europe Centrale.

Le chernozem est un sol le plus souvent développé sur loess à horizon de surface organique très épais et sombre qui passe directement à un horizon calcaire. La matière organique a subi une lente évolution sous la dépendance de contrastes climatiques. Néanmoins, en Europe Centrale, les facteurs climatiques liés à la présence de chernozems sont à nuancer. Les chernozems sont censés s'être formés sous les conditions climatiques différentes d'aujourd'hui qui ont dominé en Europe Centrale au Tardiglaciaire et au début de l'Holocène.

Si des nuances climatiques permettent d'expliquer la différence de répartition des chernozems (« plus sec ») et des luvisols (« plus humide ») à l'échelle régionale, ce n'est plus vrai à l'échelle locale où les limites entre ces sols sont très brutales, alors que les conditions de milieu sont identiques. Une théorie pour expliquer leur persistance considère que ce serait l'ouverture artificielle du milieu, continue depuis le Néolithique, qui aurait bloqué leur évolution vers d'autres types de sols. Cette hypothèse expliquerait leur répartition sous forme d'îlots ou de mosaïque, alternant avec des luvisols et des phaeozems.

Nous avons privilégié dans notre questionnement l'étude des archives pédologiques, plus précisément celle des matières organiques, dont certaines ont la capacité de résider dans le sol pendant des milliers d'années. Celles-ci sont d'origine locale et permettent donc de reconstituer l'environnement végétal immédiat lors de la formation du sol. Elles ont été analysées par spectroscopie proche infrarouge qualitative (SPIR-qual). Cet outil représente une approche novatrice dans l'étude des paléo-environnements. Cette approche s'est accompagnée d'une étude pédoanthracologique sur certains paléosols et de l'analyse micromorphologique d'une catena chernozem – luvisol à l'échelle stationnelle.

Nous avons montré que certains chernozems ont évolué constamment sous prairie, tandis que d'autres ont une histoire récente forestière, mais ont connu auparavant une évolution sous végétation de prairie. Les études pédoanthracologiques sur des paléochernozems pléistocènes et holocènes ont chaque fois révélé la présence de charbons de bois d'essence forestière. L'analyse micromorphologique de la catena met en évidence un chernozem qui s'est développé à partir d'un luvisol ce qui contraste avec les modèles habituels de dégradation des chernozems en luvisols.

Ce travail confirme que la couverture végétale des chernozems peut selon le cas être forestière ou prairiale. Il est certain que des chernozems ont évolué pendant un laps de temps long sous forêt. Ce résultat est en contradiction avec l'hypothèse dominante, qui veut que les chernozems se développent et subsistent exclusivement sous steppe.

Mots clef : chernozem, paléosols, paléoenvironnement, spectroscopie proche infrarouge (SPIR), Europe Centrale, archives pédologiques, pédogénèse, luvisol

ABSTRAKT

Černozemě se staly díky Dokučajevově dizertaci z roku 1883 významné pro počátky vědy o půdě. Geneze černozemí ve Střední Evropě se dodnes těší velkému zájmu pedologů, botaniků a paleoenvironmentalistů. Zatímco ve Východní Evropě byly popsány jako zonální půdy, které jsou typické pro kontinentální stepi, existují ve Střední Evropě oblasti, jež jsou svými klimatickými vlastnostmi predestinovány pro přítomnost lesních porostů. Předkládaná dizertační práce si klade za cíl přispět k diskuzi o vzniku černozemí tím, že pojednává o environmentálních podmínkách, které byly určující při formování černozemních půd ve Střední Evropě.

Černozemě se obvykle vyvíjely na spraši, jsou charakteristické svým mocným povrchovým organickým horizontem, který přímo přechází do horizontu vápenatého. Organický materiál prošel díky meziročním klimatickým rozdílům pomalou polymerizací. Ve Střední Evropě jsou ale klimatické vlastnosti černozemních oblastí odlišné. Zdejší černozemě se patrně formovaly v klimatických podmínkách, které převládaly v pozdní době ledové a raném holocénu.

Klimatické nuance sice mohou na regionální úrovni přispět k osvětlení rozdílů v distribuci „suchých“ černozemí a „spíše vlhkých“ hnědozemí, ale rozhodně neřeší problematiku na lokální úrovni, kde při stejných klimatických podmínkách existují ostré přechody mezi černozemí a hnědozemí. Teorie o zachování černozemí praví, že zemědělská činnost v neolitu zabránila jejich přeměnám v další půdy. Tato teorie nabízí uspokojivé vysvětlení k rozmístění černozemních půd ve formě mozaiky, kde černozemě alternují s hnědozeměmi či šedozeměmi.

Práce se zaměřuje na otázku paměti půd a jejich organického materiálu. Některý organický materiál může v půdě existovat po tisíce let, je výhradně lokálního původu, a proto je možné z něj určit vegetaci z doby formování půd. Pro analýzu půdního organického materiálu je užívána metoda infračervené spektroskopie (NIRS). Tato metoda představuje inovativní přínos ke studiu paleoenvironmentálních prvků u černozemí. Mimoto práce obsahuje i paleoantrakologickou studii vybraných pohřbených půd a mikromorfologickou analýzu katény černozem – hnědozem na malém území (300m).

NIRS prokázala, že některé černozemě vznikaly pod travnatým povrchem. Jiné černozemě mají nedávnou lesní historii, ale původně se nacházely pod travnatou vegetací. Nalezeny byly i černozemě s heterogenním organickým materiálem. Výzkum uhlíku z paleočernozemí z období pleistocénu a holocénu prokázal přítomnost dřevin. Mikromorfologická analýza katény mezi černozemí a hnědozemí demonstruje, že jsou i černozemě vzniklé z hnědozemě, což kontrastuje s obvyklými modely degradace černozemí na hnědozemě.

Tato dizertační práce dokazuje, že vegetace pokrývající černozemě může být dřevinné nebo travnaté povahy. Zcela jistě se černozemě vyvíjely také pod lesem. Výsledky dizertace jsou v rozporu s převládající hypotézou o tom, že černozemě vznikají a poté trvale existují výhradně pod stepí.

Klíčová slova: černozem, pohřbené půdy, paleoekologie, blízká infračervená spektroskopie, Střední Evropa, paměť půd, pedogeneze, hnědozem

ABSTRACT

Chernozem became the crucial soil for the beginnings of soil science through the work of Dokuchaev from 1883. Since then the genesis of chernozems in Central Europe has raised many questions among soil scientists, botanists and paleo-environmentalists. While in Eastern Europe chernozems have been described as zonal soils, that are typical for continental steppe and forest-steppe areas, there are areas in Central Europe which are predisposed by their climatic characteristics to the presence of woodlands. The goal of this dissertation is to enrich the discussion about the genesis of chernozems by restoring the environmental conditions that were prevalent during the formation of chernozem soils in Central Europe.

Chernozems are usually developed on loess with a very thick and dark organic surface which passes directly to a calcareous horizon. The organic matter underwent a polymerization in dependence on climate contrasts. However, in Central Europe, the climatic characteristics of the areas of chernozems are a bit different. These chernozems are supposed to have been formed under the climatic conditions that dominated Central Europe during the Late Glacial and the Early Holocene.

The climatic nuances may contribute to the explanation of the differences in distribution of chernozems ("drier") and luvisols ("more humide") at a regional level, but they are no help at a local level with the same environmental conditions where the boundaries between chernozems and luvisols are very sharp. There is a theory about their persistence that considers the agriculture since the Neolithic being the reason for the fact that their progression to other types of soil was blocked. This theory would explain their distribution in the form of mosaic, alternating with luvisols and phaeozems.

This study is focused on questioning of the memory of soils and especially of their organic matter. Some soil organic matter has the ability to persist in soils for thousands of years. Such organic matter has a purely local origin. That is why it is possible to reconstruct the vegetation from the period of time of the formation of soils. There is qualitative near infrared spectroscopy (NIRS) applied for the analysis of the soil organic matter. This method is an innovative approach to the studying of the paleoenvironments of chernozems. This approach is accompanied by a anthracological study of some paleosols and of a micromorphological analysis of a catena chernozem - luvisol on a very local scale (300 m).

The NIRS analysis has proved that some chernozems developed under grassland. Other chernozems have a recent forest history, but they had also existed under grassland vegetation before. There were found some chernozems with a source of heterogeneous organic material. The charcoals studies of paleochernozems of the Pleistocene and of the Holocene have revealed the presence of woods. The micromorphological analysis of a catena between chernozem and luvisol has shown a chernozem which developed from a luvisol. That contrasts with the usual models of the degradation of chernozems into luvisols.

This dissertation confirms that the vegetation cover of chernozems can be both: grassland or woodland. Certainly, chernozems also developed under forest during a period of time. This result is inconsistent with the prevailing hypothesis that claims chernozems develop and preserve exclusively under steppe.

Keywords: chernozem, buried soils, paleoenvironment, near-infrared spectroscopy (NIRS), Central Europe, soil memory, pedogenesis, luvisol

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	5
RESUME	7
ABSTRAKT	8
ABSTRACT	9
TABLE DES MATIERES	11
LISTE DES FIGURES	17
LISTE DES TABLEAUX	25
INTRODUCTION	27
PARTIE I	
Les chernozems : des concepts initiaux aux problématiques actuelles	31
Chapitre 1	
Les chernozems : principaux caractères d'un sol « modèle »	33
1.1. Le concept de chernozem : des premières observations à des définitions plus rigoureuses	33
1.2. Les processus de formation des chernozems	38
1.2.1. Une matière organique très évoluée	38
1.2.2. La grande stabilité des MOS de chernozem : mesures par le ¹⁴ C	41
1.3. De l'observation à la classification : les sous-types de chernozems	45
1.3.1. Des systèmes de classification de plus en plus complexes	45
1.3.2. Description des principaux sous-types	45
1.4. La place des chernozems dans les systèmes de classification de sols	51
1.4.1. Généralités	51
1.4.2. Le chernozem vu comme un « sol de steppe »	56
1.4.3. Le chernozem vu comme « un sol calcique »	56
1.4.4. Le chernozem vu comme « un sol isohumique »	57
1.5. Conclusion	58
Chapitre 2	
La répartition et la formation des chernozems : quel contexte environnemental ?	59
2.1. La répartition des chernozems à l'échelle mondiale	59
2.2. Le contexte climatique	61
2.3. La couverture végétale des chernozems	65
2.3.1. Introduction	65

2.3.2. Les chernozems sous steppe.....	66
2.3.3. Les chernozems sous forêts.....	67
2.3.4. Stabilité des steppes	69
2.4. Les aspects paléoenvironnementaux.....	70
2.4.1. Les conditions générales.....	70
2.4.2. Les données palynologiques	72
2.4.3. Les données paléozoologiques.....	73
2.4.4. Les données pédoanthacologiques.....	74
2.4.5. L'étude des phytolithes et des biomarqueurs moléculaires	75
2.4.6. Les données archéologiques.....	75
2.4.7. Le rôle des feux anthropiques dans la formation des chernozems.....	78
2.5. Conclusion	80
 Chapitre 3	
Les chernozems dans l'aire d'étude et leurs relations avec les autres sols	81
3.1. La répartition des chernozems en Europe	81
3.1.1. République Tchèque	81
3.1.2. Slovaquie	83
3.1.3. Hongrie	84
3.1.4. France.....	85
3.2. La relation chernozem-luvisol en Europe	85
3.3. Le mécanisme de contrôle de la répartition des chernozems et luvisols en Europe Centrale ..	89
3.4. La relation zonale entre les chernozems et les autres sols isohumiques	92
3.5. Conclusion	94
 PARTIE II	
Du choix des terrains à l'analyse des profils : <i>matériels et méthodes</i>	95
 Chapitre 4	
De la démarche générale à la description des sites.....	97
4.1. Reconstituer l'histoire des chernozems : quelle démarche ?.....	97
4.2. L'aire d'étude : répartition spatiale des sites retenus (fig. 4.1).....	99
4.3. Les documents de base : cartes pédologiques et historiques	100
4.3.1. Les cartes pédologiques.....	100
4.3.2. Les cartes historiques.....	101

4.4. Les sites de surface : constitution de la base de référence	103
4.4.1. Introduction	103
4.4.2. Les sites de référence pour les végétations ouvertes (prairies, steppes,...)	104
4.4.3. Les sites de référence pour les forêts	112
4.5. Les profils de sols fonctionnels	115
4.5.1. Introduction	115
4.5.2. Description des profils	115
4.6. Les paléochernozems et les colluvions qui les recouvrent	124
4.6.1. Introduction	124
4.6.2. Description des sites	125
4.7. Analyse d'une catena chernozem-luvisol	134
4.7.1. Conditions de sélection des sites	134
4.7.2. Description de site de Hrušov <i>HRU (50°21'N, 14°50'E, alt. 262 m)</i>	135
4.7.3. Description des profils de la catena de Hrušov	140
4.8. Conclusion	146
 Chapitre 5	
<i>Du terrain au laboratoire : protocoles d'échantillonnage et d'analyse</i>	147
5.1. Les protocoles de prélèvement	147
5.1.1. L'échantillonnage pour l'obtention du référentiel de surface en SPIRqual	147
5.1.2. L'échantillonnage des fosses pédologiques pour la SPIRqual	148
5.1.3. Prélèvements pour l'étude micromorphologique	148
5.1.4. Autres analyses	148
5.2. Les prétraitements au laboratoire.....	149
5.3. Les analyses de caractérisation des sols.....	149
5.3.1. La granulométrie laser	149
5.3.2. Mesures du carbone et de la matière organique.....	150
5.3.3. Teneur en carbonates	151
5.3.4. Le pH _{eau}	151
5.4. La spectroscopie proche-infrarouge qualitative (SPIRqual).....	152
5.4.1. La librairie spectrale de référence construite par Ertlen (2009) et Froehlicher (2013).....	152
5.4.2. Construction de la librairie spectrale de référence de chernozems et sols sur loess.....	155
5.4.3. L'acquisition des spectres	155

5.4.4. Le prétraitement des spectres	159
5.4.5. L'analyse statistique des spectres	162
5.5. Les mesures d'âge radiocarbone ¹⁴ C	164
5.6. L'identification des charbons de bois : étude pédoanthracologique	165
5.7. L'approche micromorphologique	166
5.8. Conclusion	167
PARTIE III	
Des données analytiques à l'évolution des chernozems : <i>Résultats et discussion</i>	169
Chapitre 6	
La construction des bibliothèques spectrales de référence SPIR.....	171
6.1. Caractéristiques physico-chimiques des horizons de surface des sols de référence.....	171
6.1.1. Teneurs en carbone organique	172
6.1.2. Valeurs du pH.....	174
6.1.3. Teneurs en carbonates.....	175
6.1.4. Inter-comparaisons des différentes propriétés physico-chimiques.....	175
6.1.5. Composition granulométrique.....	176
6.2. La bibliothèque spectrale bipartite spécifique aux chernozems : analyse discriminante.....	177
6.3. La bibliothèque spectrale tripartite : discrimination des classes	179
6.4. La bibliothèque spectrale de forêts : distinction entre types de forêts	181
6.5. Les bibliothèques spectrales: discussion et conclusion.....	184
Chapitre 7	
Application de la SPIR qualitative aux chernozems et paléochernozems	187
7.1. Caractéristiques physico-chimiques des chernozems et paléochernozems.....	187
7.1.1. Introduction	187
7.1.2. Les teneurs en carbone organique, total et prédit des sols et paléosols	194
7.1.2.1. La teneur en carbone organique (WB)	194
7.1.2.2. La teneur en carbone total (CHN)	197
7.1.2.3. La modélisation des teneurs en carbone par la SPIR quantitative	197
7.1.3. Les valeurs du pH.....	199
7.1.4. Teneurs en carbonates.....	200
7.1.5. La composition granulométrique	201
7.2. Les mesures de l'âge radiocarbone	201

7.3. Application de la librairie spectrale bipartite de chernozems et sols sur lœss aux horizons profonds des profils étudiés (référentiel spécifique).....	205
7.3.1. Application du modèle bipartite spécifique aux chernozems : généralités.....	205
7.3.2. Application du modèle bipartite spécifique aux chernozems aux profils de sols fonctionnels	207
7.3.3. Application du modèle bipartite spécifique aux chernozems aux paléosols	213
7.4. Application du modèle tripartite (prairie, forêt, culture) : généralités.....	215
7.4.1. Application du modèle tripartite (prairie, forêt, culture) aux profils de sols fonctionnels ...	217
7.4.2. Application du modèle tripartite (prairie, forêt, culture) aux paléosols	219
7.5. Application de la librairie spectrale tripartite (forêts de feuillues de conifères et mixte) aux profils de sols fonctionnels	220
7.6. Interprétations et discussions des résultats de la SPIR	221
7.6.1. Validité des différentes approches	221
7.6.2. Apports de la SPIR aux questions paléo-environnementales	223
7.7. Conclusion	224
 Chapitre 8	
L'analyse pédoanthracologique des paléosols.....	225
8.1. Analyse quantitative : les anthracomasses spécifiques	225
8.2. Identification des taxons végétaux des charbons de bois.....	226
8.2.1. Introduction	226
8.2.2. Les paléosols pléistocènes (Zeměchy)	227
8.2.3. Les paléosols holocènes (Kolín et Poplze)	229
8.3. Discussion	230
8.3.1. Les paléosols pléistocènes.....	230
8.3.2. Les paléosols holocènes	231
8.4. Conclusion	232
 Chapitre 9	
Analyse de la catena chernozem – luvisol de Hrušov.....	233
9.1. Caractéristiques physico-chimiques des sols de la catena chernozem-luvisol.....	234
9.1.1. La prédiction des teneurs en carbone	235
9.1.2. Les valeurs du pH.....	236
9.1.3. Teneurs en carbonates.....	237
9.1.4. Composition granulométrique.....	238

9.2. Les données de la SPIRqual	239
9.2.1. Application de la librairie spectrale bipartite	239
9.2.2. Application de la librairie spectrale tripartite	241
9.2.3. Discussion	244
9.3. Etude micromorphologique.....	245
9.3.1. Les termes extrêmes de la catena (luvisol et chernozem typique)	245
9.3.1.1. Le luvisol HRU 24.....	245
9.3.1.2. Le chernozem typique HRU 21	247
9.3.2. Les termes intermédiaires de la catena (chernozem à BT)	247
9.3.3. Interprétation et discussion.....	248
9.4. Conclusion	249
DISCUSSION GENERALE ET CONCLUSIONS	251
1. Performance de la SPIR qualitative.....	251
2. Apports aux conditions de pédogénèse des chernozems.....	253
3. Le chernozem : un sol zonal ?.....	256
Conclusion	259
BIBLIOGRAPHIE	261
ANNEXES.....	277

LISTE DES FIGURES

- Figure 1.1. Page de garde de la thèse de Dokuchaev (1883) et portrait de l'auteur (repris de European Commission, 2005).
- Figure 1.2. La station de Streletsk. Peu de musées dans le monde sont consacrés aux sols. Le chernozem y est présenté dans sa complexité : le climat, le relief, le loess, la flore et la faune. Photos : B. Vysloužilová.
- Figure 1.3. Un profil de chernozem modal (à gauche) à Gödölö Hills (Hongrie). A droite, une krotovina (flèche), forme caractéristique de chernozem, vestige d'un terrier de rongeur (Bugac Puszta, Hongrie). Photos : D. Schwartz.
- Figure 1.4. Exemples de systèmes racinaires de plantes de prairies et steppes. A gauche, une graminée des prairies nord-américaine : le panic érigé (*Panicum virgatum*). La plante peut dépasser 2 mètres de hauteur. Source : http://en.wikipedia.org/wiki/Panicum_virgatum (23.2.2014) ; sur la photo de droite, plantes des steppes est-européennes : racines de luzerne lupuline (*Medicago lupulina*) à gauche et de stipe pennée (*Stipa pennata*) à droite.
- Figure 1.5. Evolution du temps moyen de résidence de la matière organique de chernozems en fonction de la profondeur. Repris de Vysloužilová *et al.*, 2014.
- Figure 1.6. Comparaison des gradients moyens de TMR (en années/10 cm) des chernozems à ceux d'autres types de sols. Données reprises de différents auteurs (moyenne des chernozems de référence de la figure 1.5. ; Guillet, 1979 ; Scharpenseel et Pietig, 1969, 1971 ; Balescent et Guillet, 1982 ; Eusterhues *et al.*, 2007 ; Pessenda *et al.*, 2001 ; Schwartz, 1991).
- Figure 1.7. Modèle de répartition de carbone stable et de carbone jeune dans un profil du sol brun lessivé (Balesdent et Guillet, 1982). La teneur en carbone stable est homogène dans le profil. Par contre, la teneur en carbone labile est plus importante en surface et décroît avec la profondeur
- Figure 1.8. Chernozem calcique (Kuchyňka, Rép. Tchèque) ; l'horizon chernique Ac est caractérisé par sa teneur élevée en matières organiques (couleur noire) et une densité racinaire élevée. L'horizon calcique est représenté par le niveau brun enrichi en calcaire (flèche). La roche mère est constituée de sédiments loessiques carbonatés. Photo : B. Vysloužilová.
- Figure 1.9. Chernozem vertic de Battonya (sud de la Hongrie). A gauche, physionomie de la végétation ; à droite, le profil. Photo : D. Schwartz
- Figure 1.10. A gauche : chernozem luvique (à BT) de Hrušov (Rép. Tchèque). L'horizon A est entièrement transformé par le labour. A droite : chernozem luvique sous steppe secondaire à Tard (Hongrie). Photos : D. Schwartz.
- Figure 1.11. Chernozem *arénique* formé sur une paléo-dune sableuse à Sarand (Hongrie). A gauche, vue générale de la paléodune ; à droite, le profil. Photos : D. Schwartz.
- Figure 1.12. Chernozem vermique sous steppe «naturelle» dans la réserve V. V. Alekhin (Russie). L'activité de la faune est remarquable : observer les galeries verticales de vers de terre et les krotovinas qui témoignent l'activité de la taupe *Spalax microphthalmus* (photo de droite). Photos : B.

Vysloužilová (le chernozem) et <http://synapsida.blogspot.fr> (la taupe).

- Figure 1.13. Chernozems cambiques sous végétation forestière à Bab (à gauche) et Senec (à droite) en Slovaquie. Photos : D. Schwartz.
- Figure 2.1. La répartition des chernozems en Europe (Commission Européenne, 2005).
- Figure 2.2. La répartition des chernozems en Asie (d'après la carte des sols de l'Asie : Panagos *et al.*, 2011 ; Selvaradjou *et al.*, 2005).
- Figure 2.3. La répartition des chernozems et des kastanozems en Amérique du Nord (d'après La carte mondiale des sols, FAO et UNESCO, 1972)
- Figure 2.4. Climatogrammes des zones de chernozems : Magdeburg (Allemagne), Doksany, Brno (Rép. Tchèque), Bratislava (Slovaquie), Craiova (Roumanie) se trouvent dans les zones des chernozems d'Europe Centrale, tandis que Izmail, Donetsk (Doneck) (Ukraine), Saratow, Samara (Russie, partie européenne) sont en Europe de l'Est, et Blagovescens (Russie – partie asiatique) en Sibérie de l'Est. Fargo (USA) et La Ronge (Canada) se trouvent dans la zone d'extension des chernozems en Amérique du Nord. L'ensemble des climatogrammes nous permet d'observer des caractéristiques communes à ces zones : l'amplitude thermique, les températures négatives hivernales, la pluviométrie annuelle entre 450 et 600mm avec le maximum en été (source : www.klimadiagramme.de).
- Figure 2.5. Un exemple d'exploitation agricole de chernozems : champ de maïs en Hongrie. Photo : D. Schwartz.
- Figure 2.6. Les parcelles expérimentales de la réserve V.V. Alekhin en Russie : à gauche la parcelle en dynamique naturelle, à droite la parcelle fauchée régulièrement. Photos : B. Vysloužilová.
- Figure 2.7. La série loessique de Zeměchy (Rép. Tchèque), avec des paléochernozems bien visibles. Photos : D. Ertlen.
- Figure 2.8. La répartition des chernozems (en noir, d'après Toth, 2008,) et des sites LBK (en vert clair, d'après Itan *et al.*, 2009) en Europe.
- Figure 2.9. La répartition des sites LBK (Néolithique inférieur) à gauche et de la culture campaniforme (Enéolithique ancien) en relation avec le sol (données actuelles) en Bohême : 1 : chernozem, 2 : luvisols, 3 : cambisols, 4 : stagnosols, 5 et 6 stations archéologiques. Repris de Dreslerová, 2012.
- Figure 2.10. La répartition des sites LBK au sud de la Basse-Saxe (Allemagne), et leurs relations avec les types de sols (Lorz et Saile, 2011).
- Figure 2.11. L'expérience de Forchtenberg : A gauche, le défrichement de la forêt par brûlis. A droite, la lame mince de la couche supérieure de sol sur le champ brûlé avec présence d'une couche de macrocarbons légèrement altérés. Photos : D. Dreslerová.
- Figure 3.1. La pluviométrie moyenne annuelle (en mm) en République Tchèque (d'après Tolasz *et al.*, 2007).
- Figure 3.2. La répartition des chernozems en République Tchèque. D'après <http://klasifikace.pedologie.czu.cz/>.
- Figure 3.3. Pluviométrie annuelle en Slovaquie. Source : Atlas krajiny SR, 2002.

- Figure 3.4. La répartition des chernozems en Slovaquie. D'après Granec et Šurina, 1999.
- Figure 3.5. La pluviométrie moyenne annuelle et le sens des vents prédominants en Hongrie. Source : Westermann, 1999.
- Figure 3.6. La répartition des chernozems en Hongrie. Source : <http://www.uni-miskolc.hu/~ecodobos/ktmcd1/csernoz/csern.ht>.
- Figure 3.7. La répartition des lœss (en rouge), chernozems, luvisols et phaeozems en Europe (Haase *et al.*, 2007 ; <http://eusoiils.jrc.ec.europa.eu/data.html>, 25.4.2013).
- Figure 3.8. Deux exemples de luvisols sur lœss : un luvisol sous forêt (à gauche) à Forchtenberg (Allemagne) : sous l'horizon Ah forestier se trouve l'horizon appauvri en argile Ev ; l'argile s'accumule dans l'horizon BT ; à droite, luvisol sous culture près de Hrušov (Rép. Tchèque). L'horizon A et E sont entièrement mélangés et transformés par le labour en horizon L. Au-dessous de l'horizon L se trouve l'horizon BT, puis le C carbonaté (3 : galeries de vers anécique ; 4 : poupées de lœss). Photos : B. Vysloužilová (à gauche) et D. Schwartz (à droite).
- Figure 3.9. Développement des chernozems et luvisols selon les conditions climatiques à l'Holocène d'après Lorz et Saile (2011).
- Figure 3.10. Le développement des chernozems en phaeozems, puis en phaeozems pseudogleyiques et le schéma de la décarbonatation d'après Scheffer et Meyer (1963).
- Figure 3.11. Séquence (bio-)climatique des sols lœssiques en Europe de l'Est (adapté d'après WRB Draft, 1994, in Nestroy, 2007 ; Mathieu, 2009).
- Figure 3.12. La répartition de la MO et du carbonate de calcium dans trois types de sols isohumiques : I. chernozem humifère (typique), II chernozem modal (ordinaire), III sol châtain (kastanozem). Repris de Duchaufour (1977).
- Figure 4.1. La répartition de sites de prélèvement
- Figure 4.2. Répartition des sites de prélèvement de surface en République Tchèque. BRO = Brozany ; BUL = Bulhary ; KOR & KOP = Kopeč.
- Figure 4.3. Répartition des sites de prélèvement de surface en Slovaquie et Hongrie : BAB = Babský les ; DUB = Dubník ; HUB = Battonya-Gulya Gyep ; HUC = Csikospuszta ; HUH = Hajdubagos ; HUM = Mezofold - Belsobarand-valley ; HUP = Pocsaj ; HUR = Tard ; HUS = Sarand ; HUT = Tokaj ; HUU & HUUD = Bugac puszta ; SEN = Senec.
- Figure 4.4. Répartition des sites de prélèvement de surface en Ukraine et en Russie : KUR = Kursk ; MIK = Mikhajlovska celina ; STR = Streletsk.
- Figure 4.5. Répartition de sites de prélèvement de surface en France : CAR = Carspach - Stoeffelhag ; DID = Didenheim - Gallenhölzchen ; HIR = Hirsingue – Breiholz.
- Figure 4.6. Répartition des sites de prélèvement de profils de sols en République Tchèque et en Pologne : BRC = Brumovice ; BRO = Brozany ; BUL = Bulhary ; HRU = Hrušov ; KOR & KOC = Kopeč ; KUC = Kuchyňka ; POP = Poplze ; MD = . Mlodzewo.
- Figure 4.7. Répartition des sites de prélèvement de profils complets en Slovaquie et Hongrie : BAB = Babský les ; DUB = Dubník ; HUB = Battonya-Gulya Gyep ; HUG & HUGF = Godolo hills - Szarkaberki valley ; HUM =

Mezofold - Belsobarand-valley ; HUR = Tard ; HUS = Sarand ; HUU & HUUD = Bugac puszta ; SEN = Senec.

- Figure 4.8 Répartition des sites de prélèvement de profils complets en Ukraine et en Russie : A1, A2, A3 = Askania Nova ; MIK & CT = Mikhajlovskaja celina ; H1 = Homutovsky steppe ; KUR = Kursk.
- Figure 4.9. La répartition de sites de prélèvement de paléo-profils en République Tchèque : BRE = Břesnice ; BRK = Brumovice ; BUB = Bubeneč ; KOL = Kolín ; POP = Poplze, ZMK = Zeměchy.
- Figure 4.10a. Coupes stratigraphiques des paléosols tchèques (à l'exception de Zeměchy).
- Figure 4.10b. Coupes stratigraphiques des paléosols tchèques – Zeměchy
- Figure 4.11. La répartition de sites de prélèvement de paléo-profils en France : CPB = Clermont-Ferrand ; MOR = Didenheim-Morschwiller ; GOU = Gougenheim ; SCD = Sainte-Croix-en-Plaine ; WIW = Wiwersheim
- Figure 4.12 Stratigraphie des sites français
- Figure 4.13 Extrait de la carte pédologique 1 : 50.000 : le site Hrušov (AOPK, 2005). Le transect étudié est souligné par le trait rouge.
- Figure 4.14. Extrait de la carte géologique à 1 :50.000 : le site Hrušov (Česká geologická služba, 2013). Le transect étudié est figuré par le trait rouge.
- Figure 4.15 Extrait de la photo aérienne 2013 : le site de Hrušov (www.mapy.cz). Le transect étudié est figuré par le trait rouge.
- Figure 4.16 Extrait de la carte de la Première Enquête Militaire à 1 : 2880 (1842-1852) : le site de Hrušov (<http://mapire.staatsarchiv.at>). Le transect étudié est figuré par le trait rouge.
- Figure 4.17 Localisation des fosses sur le site Hrušov (le fond de carte par GoogleEarth). Le transect étudié est figuré par le trait rouge.
- Figure 4.18 Représentation de la catena de Hrušov, prenant en compte les altitudes des différents profils. Hauteur des profils non exagérée par rapport à l'altitude.
- Figure 4.19. Profil HRU20. Photo : D. Schwartz
- Figure 4.20. Profil HRU 21. 1 : lit de pailles non décomposée ; 3 : galeries de vers de terre ; 4 : poupées de loess. Photo : D. Schwartz.
- Figure 4.21. Profil HRU 22. Photo : D. Schwartz
- Figure 4.22. Profil HRU23.; 3 : galeries de vers de terre ; 4 : poupées de loess. Photo : D. Schwartz
- Figure 4.23. Profil HRU 24. Photo : D. Schwartz
- Figure 4.24. Profil HRU25. Photo : D. Schwartz
- Figure 4.25. Profil HRU26. 3 : galeries de vers de terre ; 4 : poupées de loess. Photo D. Schwartz.
- Figure 5.1. 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 (d'après Ertlen, 2009).
- Figure 5.2. Fonctions canoniques de l'analyse discriminante (AD5) entre les trois

grandes classes de forêts (d'après Ertlen, 2009).

- Figure 5.3. Scores des deux fonctions canoniques discriminantes. 1 sols sous prairie, 2 sols sous forêt, 3 colluvions agricoles.
- Figure 5.4. Placement de l'échantillon de sol sur une coupelle avant la mesure. Photo : B. Vysloužilová.
- Figure 5.5. Le spectromètre FT- IR Frontier Spectrometer (PerkinElmer). Photo : B. Vysloužilová.
- Figure 5.6. Relation entre le nombre d'onde (cm^{-1}) et la longueur d'onde (nm).
- Figure 5.7. Visualisation de données « brutes » de la réflectance mesurée sur un groupe d'échantillons, dans un simple objectif illustratif. Les spectres sont visualisés dans le logiciel PerkinElmer Spectrum.
- Figure 5.8. Visualisation des données « brutes » de l'absorbance du même groupe d'échantillons. Les spectres sont affichés dans le logiciel PerkinElmer Spectrum.
- Figure 5.9. Les spectres de la même population d'échantillons après standardisation : application de la fonction SNV du logiciel Unscrambler 10.3. sur la bande 7003 – 4000 cm^{-1} .
- Figure 5.10. La visualisation de spectres du même groupe d'échantillons après l'application de la fonction detrend dans le logiciel Unscrambler 10.3.
- Figure 5.11. Visualisation de l'effet de l'application de la 1ère dérivée sur la même population d'échantillons dans le logiciel Unscrambler 10.3.
- Figure 5.12. Visualisation de l'effet de l'application de 2nde dérivée sur la même population d'échantillons dans le logiciel Unscrambler 10.3.
- Figure 5.13. Présentation de la construction de la librairie de spectres de référence SPIR (adapté d'après Froehlicher, 2013) bipartite ou tripartite.
- Figure 6.1. Nombre d'échantillons de surface (0-4 cm) de sols sous prairies et sous forêts en fonction des taux de Corg (%)
- Figure 6.2. Exemples de profils de carbone organique des sols de forêts (en jaune) et de prairies (rouge). Voir aussi la fig. 7.1.
- Figure 6.3. Nombre d'échantillons de surface (0-4 cm) de sols sous prairies et sous forêts en fonction du pHeau
- Figure 6.4. Nombre d'échantillons de surface (0-4 cm) de sols sous prairies et sous forêts en fonction de la teneur en CaCO_3
- Figure 6.5. La relation entre le Corg (%) et le pHeau pour les échantillons de surface (0-4 cm) sous prairies et pour les sols sous forêts
- Figure 6.6. Relation entre le Corg (%) et la teneur en CaCO_3 (%) pour les échantillons de surface (0-4 cm) sous prairies et les sols sous forêts
- Figure 6.7. La distribution granulométrique de la fraction minérale pour les 22 placettes de surface (N.B. : les placettes MIK et STR n'ont pas été analysées)
- Figure 6.8. Fonction discriminante du référentiel spécifique aux chernozems et sols sur loess. Les scores de la fonction canonique des prairies varient entre -8,883 et -3,140, avec un barycentre de -5,508 ; pour les forêts, les scores varient entre 9,108 et 14,423, avec un barycentre de 11,954. La distance entre les barycentres des deux groupes de sols est appelée la distance

de Mahalanobis. Pour le traitement choisi, elle vaut 17,462.

- Figure 6.9. Fonctions discriminantes canoniques de l'analyse discriminante entre sols de prairie (classe 1), sols sous forêt (classe 2) et sols cultivés (classe 3). Les points noirs représentent les barycentres de chaque groupe. La classe 1 est limitée par les scores de la fonction 1 de -3,81 et 2,71 et par les scores de la fonction 2 de -0,31 et 5,49. La classe 2 est limitée par les scores de la fonction 1 de -1,08 et 5,03 et par les scores de -6,41 et 0,33 et par les scores de la fonction 2 de -6,41 et 0,33. La classe 3 est limitée par les scores de la fonction 1 de -10,96 et -2,11 et par les scores de la fonction 2 de -3,41 et 0,91.
- Figure 6.10. Fonctions discriminantes canoniques de l'analyse entre les sols sous forêts de feuillues, sous forêts de conifères et sous forêts mixtes. Les points noirs représentent les barycentres.
- Figure 6.11. Les longueurs d'ondes discriminantes dans la librairie spectrale de référence.
- Figure 7.1. Variations des teneurs en carbone organique (WB) avec la profondeur. En rouge : sols actuellement sous prairie ; en jaune: sols sous forêts.
- Figure 7.2. Les teneurs en carbone organique des sols : comparaison des sols sableux (en vert) et des sols limoneux (en bleu). N.B. : n'ont été conservés ici que les sols sous végétation prairiale, les sols forestiers étant tous limoneux.
- Figure 7.3. Modèle prédictif pour le Corg (logiciel Unscrambler) appliqué aux échantillons mesurés par la méthode Walkley et Black. Les valeurs mesurées sont marquées en rouge, les valeurs prédites en bleu.
- Figure 7.4. Modèle prédictif pour le Ctot (logiciel Unscrambler), appliqué aux échantillons mesurés au CHN. Les valeurs mesurées sont en rouge, les valeurs prédites en bleu.
- Figure 7.5. Valeurs du pH dans les sols fonctionnels
- Figure 7.6. Teneurs en carbonates des sols fonctionnels
- Figure 7.7. Les valeurs de scores de la fonction canonique pour la totalité des échantillons « inconnus », superposé avec les scores du référentiel spécifiques aux chernozems et sols sur loess.
- Figure 7.8. Variation des scores pour trois répétitions de prélèvement et leur moyenne : exemple du profil SEN.
- Figure 7.9. Les valeurs de scores de la fonction canonique (modèle bi-partite spécifique aux chernozems) pour les échantillons « inconnus » de profils de sols fonctionnels (catena de Hrušov exceptée.)
- Figure 7.10. Scores moyens de la fonction discriminante (modèle bipartite spécifique aux chernozems) en fonction de la profondeur pour les 26 profils de sols analysés. Entre parenthèse la végétation actuelle observé sur le site : P prairie, C culture, FS forêt-steppe, F forêt.
- Figure 7.11. Valeurs du score moyen de la fonction canonique (modèle bi-partite spécifique aux chernozems) en fonction de la profondeur pour les profils de sols à score relativement constant. Entre parenthèse la végétation actuelle observé sur le site : P prairie, C culture, FS forêt-steppe, F forêt.
- Figure 7.12. Valeurs du score moyen de la fonction canonique (modèle bipartite spécifique aux chernozems) en fonction de profondeur pour les sols dont

le score montre une évolution. Entre parenthèse la végétation actuelle observé sur le site : P prairie, FS forêt-steppe, F forêt.

- Figure 7.13. Valeurs des scores de la fonction canonique (modèle bi-partite spécifique aux chernozems) pour les échantillons de paléosols
- Figure 7.14. Les valeurs de la moyenne de scores de la fonction canonique (modèle bipartite spécifique aux chernozems) en fonction de profondeur pour les 14 profils de paléosols.
- Figure 7.15. Scores des fonctions discriminantes 1 et 2 du modèle tripartite (modèle forêt-prairie-culture) pour la totalité des échantillons.
- Figure 7.16. Scores des fonctions discriminantes 1 et 2 du modèle tripartite (modèle forêt-prairie-culture) sur les échantillons de sols fonctionnels (sans Hrušov)
- Figure 7.17. Scores de la fonction discriminante 1 du modèle tripartite (modèle forêt-prairie-culture) en relation avec la profondeur pour les 26 profils de sols étudiés (sans le site de Hrušov).
- Figure 7.18. Scores des fonctions discriminantes 1 et 2 du modèle tripartite (modèle forêt-prairie-culture) sur les échantillons de paléosols
- Figure 7.19. Schéma récapitulatif de la démarche pour le classement des échantillons dont la matière organique est d'origine forestière.
- Figure 7.20. Scores des fonctions discriminantes 1 et 2 du modèle tripartite (modèle feuillu-conifère-mixte).
- Figure 8.1. La représentation des espèces ligneuses dans les paléosols de la séquence de loess de Zeměchy
- Figure 8.2. La steppe boisée à *Larix (gmelinii ?)* en Mongolie. Photo : D. Schwartz
- Figure 8.3. La représentation des espèces ligneuses dans les paléosols de l'Holocène
- Figure 9.1. La catena de Hrušov
- Figure 9.2. Teneur en carbone organique (prédite par la SPIR quantitative) pour les sols de Hrušov.
- Figure 9.3. Valeurs de pH dans les sols de Hrušov
- Figure 9.4. Teneur en carbonates des sols de la catena de Hrušov
- Figure 9.5. Teneurs en argiles des sols de Hrušov
- Figure 9.6. Les valeurs de scores de la fonction canonique pour la totalité des échantillons « inconnus » de Hrušov, superposés à la librairie spectrale bipartite.
- Figure 9.7. Valeurs de la moyenne des scores de la fonction canonique 1 en fonction de la profondeur pour les profils des sols de Hrušov analysés.
- Figure 9.8. Résultat du classement des échantillons de la catena de Hrušov dans la librairie spectrale tripartite (prairie, forêts, culture).
- Figure 9.9a. Résultat du classement des échantillons du profil HRU21 (chernozem typique) dans librairie spectrale tripartite (prairie, forêts, culture) ; seul le score moyen de chaque horizon est représenté
- Figure 9.9b. Résultat du classement des échantillons des profils HRU20 et HRU 23 (chernozem à BT) dans librairie spectrale tripartite (prairie, forêts, culture)

- et 9.9c. ; seul le score moyen de chaque horizon est représenté.
- Figure 9.9d. Résultat du classement des échantillons du profil HRU24 (luvisol) dans la librairie spectrale tripartite (prairie, forêts, culture), sur le score moyen de chaque horizon.
- Figure 9.10. Observations micromorphologiques à la limite des horizons L (en haut) et BT (en bas) du luvisol HRU24. Les revêtements translucides caractéristiques des BT sont nettement visibles.
- Figure 9.11. Observations micromorphologiques dans l'horizon BT du luvisol HRU24. Noter la présence de revêtements carbonatés (en gris, au centre) sur les argilanes.
- Figure 9.12. Chernozem typique HRU21. Argilanes jaune-orangé, limpides, remaniés, témoignant de l'ancienne existence d'un horizon BT, dans l'horizon L3 (à gauche) et à la limite L/Cca (à droite).
- Figure 9.13. Chernozem à BT (HRU20). Argilanes jaune-orangé, limpides, en partie remaniées, et revêtements poussiéreux (en brun sombre) dans le BT.
- Figure 10.1. Les scores de la fonction canonique bipartite (l'approche prairie et forêt) sur le site de Godollo Hillis : HUG et HUGF.
- Figure 10.2. Scores de la fonction canonique pour le profil KUC en relation avec la profondeur, horizon et TMR.

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau 1.1. La position des chernozems dans les systèmes de classifications de sols dans le monde. Présentation par ordre chronologique.
- Tableau 2.1. Principales caractéristiques climatiques actuelles dans les grandes zones de chernozems.
- Tableau 4.1. Principales caractéristiques des sites de référence de surface qui ont servi pour la construction de la librairie spectrale. F = station forestière ; P = station de prairie.
- Tableau 4.2. Principales caractéristiques des profils analysés.
- Tableau 4.3. Principales caractéristiques des paléosols.
- Tableau 4.4. La liste de fosses effectuées sur le site de Hrušov
- Tableau 5.1. Evolution de la résolution en nanomètres pour une résolution fixée à 8 cm^{-1} .
- Tableau 6.1. Propriétés physico-chimiques des horizons de surfaces (les forêts sont indiquées en gris)
- Tableau 6.2. Qualité de la discrimination entre les sols sous forêts et les sols sous prairies pour les différents prétraitements mathématiques testés. En gras, le traitement qui donne les meilleurs résultats.
- Tableau 6.3. Coordonnées des barycentres (moyennes des groupes) pour les deux fonctions discriminantes canoniques.
- Tableau 6.4. Coordonnées des barycentres des groupes pour les deux fonctions discriminantes canoniques, appliquées aux groupes de forêts de feuillues (classe 1), de conifères (classe 2) et mixtes (classe 3).
- Tableau 7.1. Principales caractéristiques physico-chimiques des sols fonctionnels. N.B. : le carbone total a été mesuré au CHN, le carbone organique a été mesuré par la méthode Walkley et Black, sauf pour les valeurs accompagnées d'un *, qui ont été prédites en SPIR quantitative. Lorsque la valeur est remplacée par les symboles « -* », la prédiction est rejetée car l'erreur-standard est supérieure à 1,5. A = Argiles ; LF = Limons fins ; LG = Limons grossiers ; SF = Sables fins ; SG = Sables grossiers.
- Tableau 7.2. Principales caractéristiques physico-chimiques des paléosols et de leur couverture colluviale. Les chernozems sont accentués en gris, la couverture colluviale est en blanc. N.B. : le carbone total a été mesuré au CHN, le carbone organique a été mesuré par la méthode Walkley et Black, sauf pour les valeurs accompagnées d'un *, qui ont été prédites en SPIR quantitative. . Lorsque la valeur est remplacée par les symboles « -* », la prédiction est rejetée car l'erreur-standard est supérieure à 1,5
- Tableau 7.3. Résultats des mesures d'âge radiocarbone sur la matière organique des chernozems et paléochernozems et sur les charbons de bois
- Tableau 8.1. Le contenu en charbon de bois des sols analysés
- Tableau 8.2. Identification des charbons de bois des différents paléosols
- Tableau 9.1. Principales caractéristiques physico-chimiques de la catena de Hrušov. N.B. : Corg sont des valeurs prédites en SPIR quantitative. Lorsque la valeur est remplacée par les symboles « -* », la prédiction est rejetée car l'erreur-standard est supérieure à 1,5 ; la MO a été mesurée par la méthode de la perte au feu, qui surestime le taux réel.

INTRODUCTION

L'objectif de cette thèse intitulée « *Steppes ou forêts ? Les conditions environnementales de la formation et de l'évolution des chernozems en Europe Centrale* » est de reconstruire les conditions environnementales de la pédogénèse des chernozems en Europe Centrale. Ce travail est une contribution au long débat sur la formation de ces sols emblématiques démarré avec la thèse de Dokuchaev (1883). Il s'agit d'ajouter aux données paléo environnementales déjà disponibles sur les chernozems de nouvelles données acquises aussi bien par des méthodes éprouvées qu'à l'aide d'un nouvel outil qu'est la spectroscopie proche infra-rouge qualitative. Le terrain d'étude, situé en Europe Centrale, et l'utilisation d'un outil innovant développé à Strasbourg justifiaient pleinement de réaliser ce travail en cotutelle entre l'université de Charles de Prague et l'Université de Strasbourg.

Contexte scientifique

Les caractéristiques environnementales influencent le développement des sols. Les facteurs interagissant lors la pédogénèse des sols, sont le climat, les roches, l'activité des agents biologiques, la topographie, le temps et l'homme (Jenny, 1941). De nombreux sols sont connus pour leurs caractéristiques environnementales : les ferralsols sont caractéristiques de la zone climatique intertropicale, les histosols sont caractéristiques des zones saturées en eau, et les podzols se rencontrent sur roches mères acides (Legros, 2007). Néanmoins, il existe des sols où des conditions de la pédogénèse sont mal connues : par exemple les sols dit « méditerranéens » sont caractérisés par une interaction entre les facteurs naturels et anthropiques (Verheye et de la Rosa, 2005).

Les conditions environnementales de la pédogénèse des chernozems posent également problème. Les tentatives de décrire les conditions environnementales de leur pédogénèse remontent à la fin du 19^{ème} siècle, quand Dokuchaev (1883) décrit le chernozem comme le sol typique des milieux steppiques. Cette affirmation a été discutée de nombreuses fois et souvent nuancée (Ložek, 2004 ; Lorz et Saile, 2011 ; Eckmeier *et al.*, 2007 ; Gehrt *et al.*, 2002 ; Gerlach et Eckmeier, 2012).

L'écart entre la définition traditionnelle du chernozem comme un sol zonal, steppique et la présence de chernozem dans les zones climatiques favorables à la présence de la forêt (Ehwald *et al.*, 1999 ; Vysloužilová *et al.*, 2014) remet en cause les rôles du climat et/ ou de la couverture végétale comme facteurs cruciaux de la pédogénèse des chernozems. Par conséquent, nous pouvons nous interroger si la pédogénèse des chernozems peut se dérouler sous forêt et/ou sous un climat plus humide à influence océanique ?

Le chernozem est un type de sol apprécié pour sa fertilité et de haute production agronomique. La zone de distribution des chernozems actuelle en Europe Centrale est fortement corrélée à l'aire de répartition des établissements connus des premiers agriculteurs du Néolithique : culture Rubané connue aussi sous le nom de Linearbandkeramik - LBK) (Kruk, 1980; Demoule *et al.*, 2007). Ce fait suggère l'idée que le potentiel de fertilité a conduit les agriculteurs dès le Néolithique à privilégier les régions

couvertes par des chernozems (Kruk, 1980; Lorz et Saile 2011; Pavlů et Zápotočká 2007; Ložek, 2004). Ainsi, le facteur anthropique par l'intermédiaire des activités agricoles est souvent considéré comme un facteur important de la persistance de chernozems jusqu'à nos jours (Ložek, 2004 ; Schwartz *et al.*, soumis).

Contexte spatial et temporel

Notre travail a pour ambition d'englober la problématique sur une vaste aire géographique et dans un contexte chronologique étendu. Notre aire d'études est ciblée en Europe Centrale, dans la région marginale de la zone d'extension des chernozems en Eurasie. Cette zone se situe en dehors de l'aire des steppes zonales : les sols étudiés proviennent en grande partie de République Tchèque, de Slovaquie et de Hongrie. Dans une moindre mesure, nous avons étudié des chernozems situés en Pologne, d'Ukraine et de Russie.

Dans le passé, l'extension des chernozems a été probablement plus importante qu'aujourd'hui. Ainsi, au Pléistocène, les conditions écologiques favorables à la formation de ce type de sol sur loess se sont produites lors des périodes de réchauffement (Němeček *et al.*, 1990 ; Ložek, 2004) ce dont témoignent les paléosols avec la morphologie de chernozems scellés au cœur de séries de loess pléistocènes. De même, à l'Holocène, des séquences stratigraphiques avec des chernozems enfouis sous des colluvions, et cela parfois dans des zones où aujourd'hui la couverture pédologique actuelle n'est pas formée de chernozems (Ložek, 1974 ; Dreibrodt *et al.*, 2013, Vysloužilová *et al.*, sous presse). Nous avons étudié dans le cadre de ce travail plusieurs paléochernozems en France et en République Tchèque qui ont tantôt été étudié auparavant, et tantôt sont de nouvelles découvertes.

Les chernozems qui composent la couverture pédologique actuelle en Europe Centrale sont le plus souvent considérés comme reliques provenant des périodes plus favorables à l'existence de steppe, c'est-à-dire au climat plus sec et froid qui dominait la région au Tardiglaciaire et au début de Holocène en Préboréal et Boréal (Leser et Maqsud, 1975 ; Lorz et Saile, 2011 ; Scheffer et Meyer, 1963).

Contexte méthodologique

Jusqu'à présent les conditions environnementales de la pédogenèse des chernozems ont été décrites à partir d'indicateurs variés. Des approches sédimentologiques telles que la palynologie (e.g. Havinga, 1972 ; Pokorný, 2005) et la malacologie (e.g. Ložek, 2001, Antoine *et al.*, 2013) ou des approches pédologiques telles que, micromorphologie (e.g. Ložek and Smolíková 1978) ou l'études de phytolithes et bio marqueurs moléculaires (Barczy *et al.*, 2009; Andreeva, 2011), ont été effectuées avec succès.

La spectroscopie proche infrarouge qualitative (SPIRqual) représente une nouvelle piste pour la reconstruction de paléo-environnements à partir d'archives pédologiques. La SPIR est une mesure de l'absorbance d'un matériau dans la bande spectrale 1100-2500nm. L'image spectrale acquise peut être considéré comme « l'empreinte digitale » de la matière organique (Palmborg et Nordgren, 1996). La SPIR représente un outil efficace qui est capable de distinguer l'origine végétale ou écosystémique des matières organiques du sol

(Ertlen, 2009; Ertlen *et al.*, 2010 ; Ertlen *et al.*, soumis). Certaines fractions de la matière organique du sol sont capables de persister dans les chernozems pendant des milliers d'années (Guillet, 1979) et constitue donc une archive pédologique sur le long terme idéale pour des études à l'échelle de l'Holocène. Ce travail de thèse représente la première application paléo environnementale de cette approche depuis sa mise en place par Ertlen (2009). Pour renforcer cette approche des études pédoanthracologiques sur des paléosols et une étude micromorphologique sur un secteur de transition entre chernozem et luvisol ont également été menées dans le cadre de ce travail

Architecture du manuscrit

Le manuscrit est divisé en trois parties et subdivisés en 9 chapitres: la première partie présente l'état de l'art, la deuxième partie présente les terrains choisis et les méthodes de travail. Enfin, la troisième partie présente les résultats.

Dans le premier chapitre, nous présentons le chernozem comme un sol modèle. Nous appréhendons le concept de chernozem sous un angle historique depuis Dokuchaev jusqu'aux études les plus récentes. Nous expliquons les processus de la pédogénèse, recensons les sous-types et les principes de classification des chernozems dans les référentiels internationaux et nationaux. Le deuxième chapitre est consacré aux facteurs qui sont considérés historiquement comme décisifs dans la pédogénèse des chernozems : le climat et la végétation. Nous aborderons ici les approches paléo-écologiques liées aux chernozems. Le troisième chapitre décrit la répartition des chernozems en particulier dans notre aire d'études et leurs relations avec les sols connexes.

Dans la deuxième partie, nous allons présenter la démarche établie pour pouvoir remplir les objectifs de notre travail (chapitre 4). Nous détaillerons les principes de sélection des sites d'études. Nous présenterons chaque site du point de vue écologique et pédologique. Dans le chapitre 5, nous présenterons l'ensemble des méthodes utilisées dans le cadre de notre travail. En-dehors des analyses physico-chimiques, déjà bien connus, nous insisterons sur la SPIR qualitative.

La troisième partie est consacrée aux résultats. Le chapitre 6 présente la première étape de l'analyse SPIR : nous présenterons la construction des libraires spectrales de références. Le chapitre 7 présente les résultats des applications des libraires spectrales aux sols et paléosols (Vysloužilová *et al.*, sous presse). Le chapitre 8 est consacré à l'étude pédoanthracologique de paléo-chernozems (Vysloužilová *et al.*, 2014). Dans le chapitre 9, nous présentons le système de transformation entre chernozem et luvisol sur le site de Hrušov.

Enfin nous discuterons des reconstructions paléo-écologique et de leur implications sur la pédogénèse des chernozems.

PARTIE I

Les chernozems :

des concepts initiaux aux problématiques actuelles

Le chernozem est un sol emblématique : par l'intermédiaire des travaux de Dokuchaev, il est directement à l'origine d'une nouvelle discipline : la pédologie. Si les concepts ont évolué, il demeure un des grands sols zonaux, caractéristique des biomes à climat continental.

L'objectif de la première partie est de présenter le chernozem dans sa globalité. Dans le chapitre 1, nous présenterons successivement les principales caractéristiques des chernozems, leur pédogenèse et les différents concepts utilisés pour les classer. Dans le chapitre 2, nous discuterons des conditions environnementales considérées comme étant à l'origine de la répartition des chernozems : le climat et la végétation. Puis nous mettrons l'accent sur les indices paléoécologiques qui peuvent apporter des éléments quant à la formation de ces sols à l'Holocène et au Pléistocène. Enfin, dans le chapitre 3, nous détaillerons la répartition des chernozems dans la zone d'étude. À la fin de la première partie, nous expliquerons les relations spatiales entre les chernozems et les luvisols et entre les chernozems et les autres types de sols isohumiques.

Chapitre 1

Les chernozems :

principaux caractères d'un sol « modèle »

L'objectif de ce premier chapitre est de donner un aperçu détaillé sur la signification du terme de *chernozem* en pédologie. Nous présenterons l'évolution du concept et des définitions de ce terme. Puis nous examinerons les processus qui interviennent pendant la formation de ce type de sol. Nous donnerons ensuite un récapitulatif des types de chernozem. Enfin, une analyse des classifications de sols nous permettra de voir la place faite aux chernozems dans les différentes écoles de pensées pédologiques.

1.1. Le concept de chernozem : des premières observations à des définitions plus rigoureuses

Le terme de *chernozem* est dérivé du russe *černo* - noir, et *zemlja* - sol. Il signifie donc « sol noir », cette couleur étant liée à la richesse en matière organique. Si on se réfère aux sources historiques, les régions couvertes de sols noirs, organiques, ont toujours été décrites comme très fertiles (Krupenikov *et al.*, 2011). Dans la littérature, le nom de « sol noir » semble avoir été mentionné pour la première fois par Salmon Gubert en 1645 (Reintam, 2001). Pour sa part, le mot « chernozem » était utilisé couramment par les paysans pour désigner les sols noirs de steppes (Boulaine, 1989 ; Akonin 1771, *in* Kubienska 1953). Dans la littérature scientifique, le terme de *chernozem* a été utilisé pour la première fois par le savant russe M. Lomonosov en 1765 (Krupenikov *et al.*, 2011). Lomonosov désigne sous le terme de chernozem aussi bien le sol lui-même que la forme d'humus (Krupenikov *et al.*, 2011). Il estime que les chernozems se forment à la suite de la décomposition des matières végétales et animales. Ultérieurement, des théories variées ont été échaudées pendant les 18^{ème} et 19^{ème} siècles, théories qui n'ont aujourd'hui qu'une valeur historique (Prokhorov, 1969-1978 ; Boulaine ; 1989 ; Krupenikov *et al.*, 2011).

La grande extension de la couverture chernozémique représente depuis longtemps une richesse pour les régions concernées. Les géologues anglais, dans leur compte-rendu à la Société géologique de Londres, après une mission en 1840 en Russie, se réfèrent au chernozem en comparant sa valeur à celle des mines de charbon en Angleterre (Boulaine, 2005).

C'est dans ce contexte que s'ouvre une nouvelle époque pour la recherche, déclenchée par le travail de V. Dokuchaev (1846-1903). En effet, ces travaux approfondis sur les chernozems sont directement à l'origine de la création d'une nouvelle science, la pédologie. Ce travail a pour origine une demande de la Société économique : *il fallait*

préciser le concept de chernozem. Depuis des années le marché des domaines agricoles était faussé par les spéculateurs et des escrocs qui vendaient sous le nom chernozem toute espèce de terre couleur noire : tourbes, rendzines, vertisols pour employer le langage actuel. Un tel acheteur qui pensait acheter une terre fertile et facile à cultiver se retrouvait avec un marécage ou un terrain caillouteux et sec (Boulaine, 1989). Dokuchaev a alors passé plusieurs années en mission au sud de la Russie pour étudier et cartographier les sols (Boulaine, 1989 ; Hartemink *et al.*, 2013). Il en a tiré son travail de thèse « Le chernozem russe », présenté en 1883 à l'Université de Géognosie et Minéralogie de Saint Petersburg (fig. 1.1)

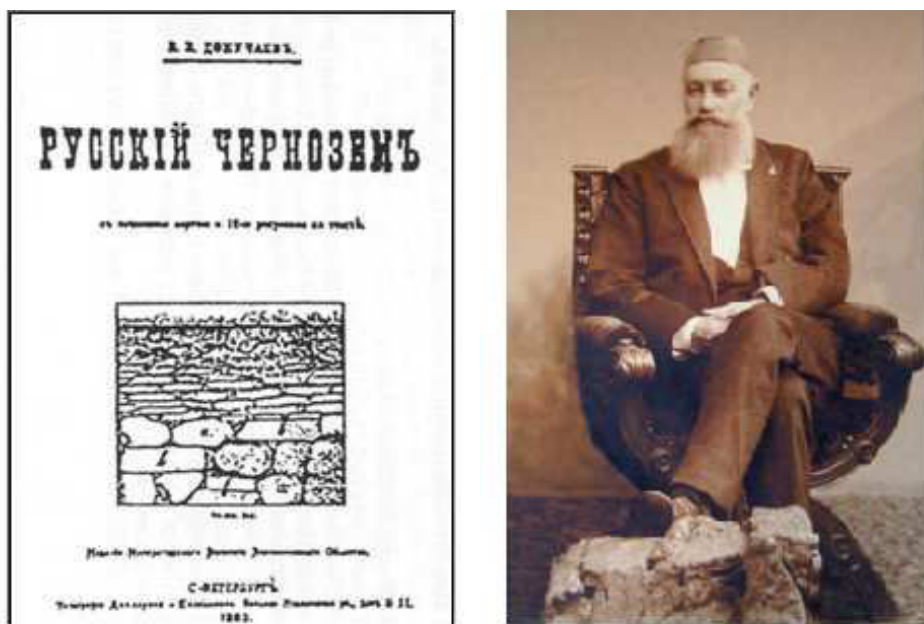


Figure 1.1. Page de garde de la thèse de Dokuchaev (1883) et portrait de l'auteur (repris de European Commission, 2005).

Dans le cadre de son travail, Dokuchaev (1883) a développé en détail le concept holistique de la pédologie (Boulaine, 1984). *Il décrit le sol comme un corps de la nature comme les plantes et les animaux, qui est « indépendant et variant »* (Boulaine, 1989). *Le sol devenait la composante majeure de la biosphère et le meilleur miroir des propriétés et de l'histoire du milieu superficiel* (Pedro, 1984). Dokuchaev (1883) a énoncé le concept de profil de sol et précisé la notion d'horizons génétiques, comme il les a observés sur le terrain. Il a défini cinq facteurs indépendants de la pédogénèse : la roche-mère, le climat, l'action biologique, le relief et le temps (Yaloon, 1997 ; Boulaine, 1984 ; Monnier 1966). Bien que géologue, ou parce qu'il était géologue, il a pu montrer que les horizons ne sont pas des strates. La présence de vastes surfaces vierges, non cultivées lui a permis de regarder le sol dans sa complexité, en détachant son attention de la couche arable, qui focalisait l'attention des agronomes (Monnier, 1966).

Dokuchaev (1883) a développé la théorie comme quoi la matière organique des chernozems tire son origine dans les plantes terrestres (F. I. Ruprekht cité par Prokhorov,

1969-1978). Il a conclu que la formation des chernozems est liée à l'interaction entre la végétation steppique, le climat continental, la topographie, et la roche-mère calcaire. La richesse en matière organique de ces sols est une conséquence de l'interaction entre ces facteurs. Comme ceux-ci sont zonaux, le chernozem lui-même est aussi zonal. Grâce à ses études sur le chernozem, Dokuchaev est le père de la théorie de la répartition zonale des sols à l'échelle planétaire : chaque grande région bioclimatique (qu'on qualifierait actuellement de biome) est caractérisée par un type de sol prépondérant, dont la formation est liée à l'action du climat dominant et de la végétation qui lui est associée. Ce sol est le sol zonal (Boulaine, 1989).

Le chernozem a donc un rôle fondateur dans la pédologie. Il a été le premier sol bien étudié et à bénéficier d'une large publicité. Lors de l'Exposition Universelle de Paris en 1900, Dokuchaev a apporté et exposé un bloc de plusieurs mètres cubes de chernozem, qui a été admiré par les agriculteurs français (Boulaine, 2005). Une partie du monolithe de chernozem de Dokuchaev de 1900 est toujours conservée dans le laboratoire de l'INRA à Grignon et à Orléans (F. Darboux, communication personnelle). En Russie, plusieurs instituts de recherche pédologique portent le nom de Dokuchaev : *V.V. Dokuchaev Research and Development Institute of Agriculture of the Central Chernozem Zone* à Voroněž et *V.V. Dokuchaev Research and Development Institute of Soil Science* à Moscou. Un musée dédié au chernozem et une station de recherche se trouvent à 20 km au sud de Kursk en Russie, dans la réserve de biosphère V.V. Alekhin (figure 1.2).



Figure 1.2. La station de Streletsk. Peu de musées dans le monde sont consacrés aux sols. Le chernozem y est présenté dans sa complexité : le climat, le relief, le loess, la flore et la faune. Photos : B. Vysloužilová.

Pour sa part, E. W. Hilgard (1833-1916), un pédologue américain contemporain de Dokuchaev dont on a redécouvert que depuis de temps les travaux, a publié en 1880 un rapport, « The cotton census of 1880 », qui décrit les régions pédologiques des Etats-Unis (Boulaine, 1989). Il a également fait des observations sur la répartition zonale des sols. En 1892, il publie un rapport sur la relation entre climat et sol. Hilgard y *développe et nuance beaucoup la division de sols calcaires et non calcaires et donne au calcaire le premier rôle dans le stockage de l'humus notamment dans les sols de prairie, qui sera repris par la suite*

et opposé à Dokuchaev par les auteurs européens (Boulaine, 1989). En effet, pour Dokuchaev, c'est le climat et la végétation herbacée et non le calcaire qui expliquent la richesse des chernozems en matière organique.

Depuis les études de Dokuchaev sur les chernozems russes, la définition qu'il en a donnée est considérée comme celle de référence d'un groupe de sols qui présentent un ensemble de caractéristiques précises (Eckmeier *et al.*, 2007). Le chernozem est défini comme un sol brun sombre ou noir à cause de sa richesse en matière organique bien humifiée. Les horizons organiques font au moins 40 cm d'épaisseur. La saturation en bases, notamment Ca^{2+} et Mg^{2+} est élevée, le pH voisin de 7 ; la structure des agrégats est stable et la bioturbation bien exprimée (Altermann *et al.*, 2005 ; Němeček *et al.*, 2001 ; Duchaufour, 1977 ; Legros 2007 ; Ganssen, 1972). Le chernozem se développe sur une roche-mère carbonatée, le plus souvent du loess. Sa formation est conditionnée par les facteurs bioclimatiques : un climat continental froid et sec et une végétation steppique de graminées (Dokuchaev, 1883 ; Duchaufour, 1977, FAO/ ISRIC/ ISSS, 1998). Le chernozem est un sol très fertile et apprécié pour sa production agricole élevée (Commission Européenne, 2005).

Le chernozem modal est représenté sur la figure 1.3. Le profil, de type A/C, est caractérisé par un horizon humifère très épais. La teneur en matière organique décroît faiblement avec la profondeur (Kuntze *et al.*, 1983 ; Duchaufour, 1977). Ce phénomène est défini comme l'isohumisme. *Le processus essentiel de l'évolution de cette matière organique est une longue maturation bioclimatique poussée des composés humiques, appelée mélanisation* (Mathieu, 2009 ; Němeček *et al.*, 1990). L'horizon de transition entre l'horizon humifère et les horizons d'altération est marqué par d'abondantes traces d'activité de la faune, appelées *krotovinas*. De formes circulaires ou linéaires selon le sens de la coupe (Parfenova et Yarilova, 1967 ; Pietch, 2013), les krotovinas sont d'anciens terriers de rongeurs, comblés par du matériau terreux. Une krotovina circulaire est nettement visible dans la photo de droite de la figure 1.3. La grande quantité de krotovinas observable dans les profils résulte du fait que les rongeurs sont très abondants dans les régions steppiques. En bas de l'horizon de transition se trouve l'horizon C carbonaté. Le calcaire est présent sous forme de taches blanches appelées en général *pséudomycelium* (Mathieu, 2009) en raison de leur forme finement fasciculée, qui épouse les contours du tracé d'anciennes radicules dans lequel le carbonate de calcium précipite. Les accumulations peuvent également prendre des formes variées (Khokhlova *et al.*, 2001 ; Becze-Deák *et al.*, 1997) et celles de concrétions durcies et nodules, appelés poupées de loess (Duchaufour, 1977 ; Barta, 2014 ; Baize et Girard, 2008).

Autre constante, *la structure du chernozem est caractérisée par la formation de grumeaux irréguliers, très stables, de la grosseur d'un grain de blé* (structure grumeleuse). *Dans les chernozems cultivés, cette structure est souvent détruite au sein de l'horizon de labour, où elle devient motteuse* (Duchaufour, 1977 ; Gląb et Kulig, 2008). La structure grumeleuse est conservée dans la partie inférieure de l'horizon A non touchée par le labour. Par ailleurs, le chernozem est un sol limoneux (Chlpík *et al.*, 2003 ; Eckmeier *et al.*, 2007, Gorbunov, 1974). La teneur en argile dans les chernozem russes varie entre 15 et 20 %. On notera aussi que *la grande activité biologique et la richesse en azote des débris végétaux donnant naissance à l'humus se matérialisent par un rapport C/N d'environ 10* (Duchaufour, 1977).

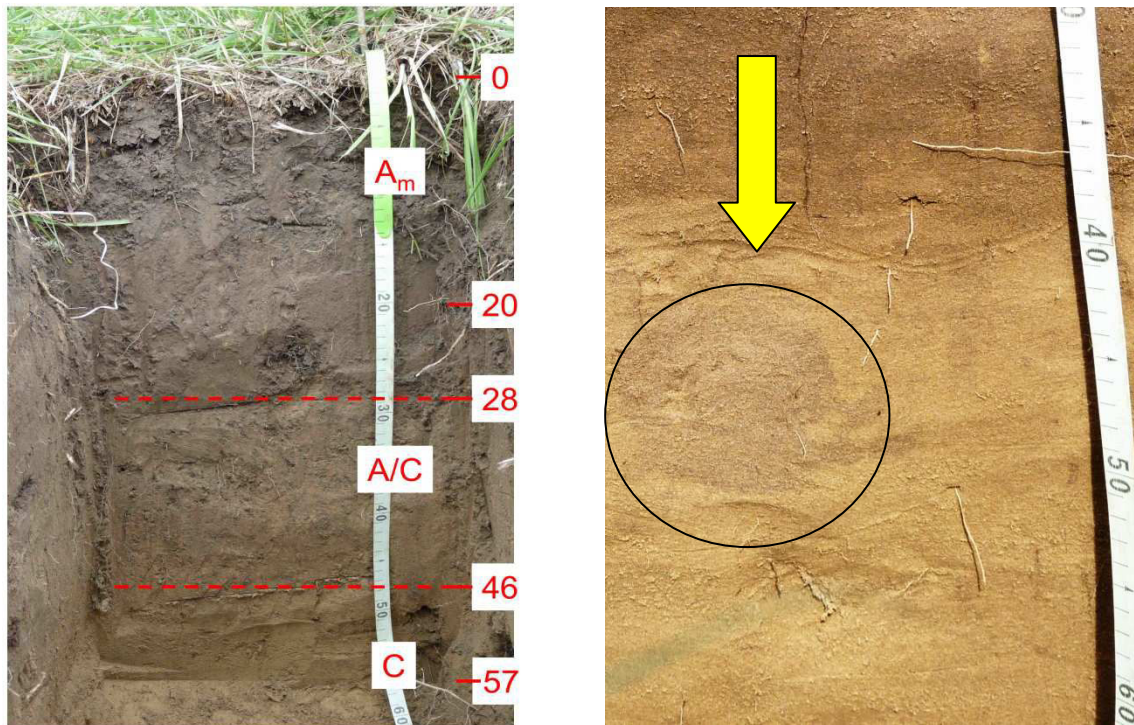


Figure 1.3. Un profil de chernozem modal (à gauche) à Gödölö Hills (Hongrie). A droite, une krotovina (flèche), forme caractéristique de chernozem, vestige d'un terrier de rongeur (Bugac Puszta, Hongrie). Photos : D. Schwartz.

La Base mondiale de référence pour les ressources en sols WRB définit le chernozem comme un sol avec un horizon *mollique* à chroma humide de 2 ou moins jusqu'à une profondeur de 20 cm ou plus, ou ayant ce chroma directement sous le niveau de labour, lequel a une épaisseur de 20 cm ou plus. L'horizon mollique est défini comme un horizon de surface bien structuré, de couleur foncée avec une saturation en bases élevée et une teneur en matière organique modérée à forte (FAO/ ISRIC/ ISSS, 2006). Le chernozem comprend un horizon *calcique* avec des concentrations de carbonates secondaires dans les 50 cm qui suivent la limite inférieure de l'horizon *mollique* et, le cas échéant, au-dessus d'une couche cimentée ou indurée. La saturation en bases est de 50 pour cent ou plus de la surface du sol à l'horizon calcique, ou alors il y a des concentrations de carbonates secondaires tout au long de profil.

Cette définition dérive de la description des chernozems zonaux qui ont servi de référence mondiale pour l'ensemble des chernozems. Les chernozems qui se retrouvent en Europe Centrale sont classés différemment du point de vue de la teneur de carbonates et de la matière organique (Nestroy, 2007). Le système de la classification taxonomique des sols de la République Tchèque (Němeček *et al.*, 2011) décrit le chernozem comme un sol avec un horizon *chernic* (Ac) épais (30 à 60 cm), à complexe adsorbant saturé et à teneur en matière organique comprise entre 2 et 4,5 %. La texture est variable entre le pôle sableux vers le pôle argileux. La roche mère peut être un loess, un loess sableux ou des marnes calcaires. La principale différence entre la définition du chernozem donnée par le système de référence WRB (FAO/ ISRIC/ ISSS, 2006) et le système de classification taxonomique des

sols de la République Tchèque (Němeček *et al.*, 2011) est, dans ce dernier système, l'absence de critères sur la position de l'horizon calcique dans le profil et sur la concentration des carbonates secondaires dans les 50 cm qui suivent la limite inférieure de l'horizon mollic (Zádorová et Penížek, 2011). Zádorová et Penížek (2011) ont confronté une population de sols classés comme chernozems dans le système tchèque avec le système WRB : 91 % des chernozems dans la classification tchèque sont aussi classés comme chernozems dans le système WRB.

Dans son sens général, l'horizon chernique Ac est caractérisé par (a) une épaisseur ≥ 30 cm, une couleur sombre (valeur et chroma $\leq 3,5$ à l'état humide), (b) un complexe adsorbant saturé ou subsaturé, principalement par le calcium, (c) un taux de saturation en bases ≥ 60 %, (d) un pH variant entre 6 - 8,3 et (e) la forte polymérisation des acides humiques. Les acides humiques prévalent sur les acides fulviques ($AH/AF \geq 1,5$), et sont très bien stabilisés (Němeček *et al.*, 2001 ; Baize et Girard, 2008).

Toujours selon Němeček *et al.* (2001), le chernozem typique est caractérisé par des horizons Ac - A/Ck - K - Ck sous une végétation naturelle de steppe et Ap - Ac - Ck sous les cultures. L'horizon A/Ck est l'horizon de transition entre l'horizon chernique Ac et les horizons d'altération. L'horizon K est caractérisé par l'accumulation pédogénétique de $CaCO_3$ sur une épaisseur d'au moins 15 cm. La teneur en $CaCO_3$ est ≥ 15 %. La différence entre la teneur en $CaCO_3$ de l'horizon K et de l'horizon situé juste au-dessus est d'au moins 5 %. Les accumulations de $CaCO_3$ sont de la taille des argiles ou limons fins, sous forme de calcite fine (lublinité). A l'inverse, dans le loess, le $CaCO_3$ est présent sous forme de cristaux grossiers (Němeček *et al.*, 2001). L'horizon Ck est l'horizon d'altération carbonaté. On y observe des traits d'accumulation de calcite secondaire (sous la forme de veinules, de nodules ou, de pseudo-mycéliums), mais cette accumulation est jugée insuffisante pour considérer cet horizon comme un véritable horizon K (Baize et Girard, 2008). L'horizon Ap correspond à l'horizon de labour L.

1.2. Les processus de formation des chernozems

Les principales caractéristiques de la pédogénèse des chernozems sont la maturation de la matière organique et la formation du complexe d'altération (Duchaufour, 1977).

1.2.1. Une matière organique très évoluée

La MO est un constituant fonctionnel essentiel du sol (Kögel-Knabner, 2002). Elle provient presque totalement de la décomposition des végétaux et de la production de substances organiques exsudées par les racines, mais elle est en partie également composée par la masse microbienne (Guggenberger, 2005). La MO entre dans le sol par l'intermédiaire de la litière ou du réseau racinaire. La décomposition des substances organiques se déroule en trois phases (Kuntze *et al.*, 1983) :

- *la phase biochimique* : pendant l'hydrolyse et l'oxydation, des liaisons polymères des molécules végétales sont cassées. La dégradation des macromolécules (des amidons en sucres, des protéines en aminoacides, de la chlorophylle en substances aromatiques) n'est pas observable sur le terrain ;
- *la phase de décomposition mécanique* : les débris végétaux sont fragmentés, décomposés et brassés avec le sol par la faune (par exemple des vers de terres, des rongeurs, des arthropodes,...) ;
- *la transformation microbienne* : les débris végétaux fragmentés sont minéralisés (oxydation des liaisons organiques, dégagement de CO₂, H₂O, libération de substances minérales et de constituants organiques simples) puis humifiés (par recombinaison et polymérisation) par les microorganismes du sol (bactéries et champignons).

Les processus d'humification et minéralisation sont contrôlés par le climat de type continental (Duchaufour, 1977 ; Němeček *et al.*, 1990; Kuntze *et al.*, 1983; Phokhrov *et al.*, 1969-1978 ; Fischer-Zujkov, 2000). Les fluctuations climatiques saisonnières mènent au développement d'un pédoclimat spécifique. Les meilleures conditions pour l'humification se produisent au printemps et au début de l'été quand l'humidité du sol augmente de façon importante suite à la fonte de la neige. L'imprégnation de l'eau dans le sol partiellement gelé provoque une aérobiose temporaire qui est favorable à l'accumulation et à la conservation des composés hydrosolubles produits en grande quantité par les racines des graminées de steppe. Pendant l'été, la saison sèche, les processus d'humification s'affaiblissent. En effet, en saison sèche, tout comme pendant la saison froide, l'activité des microorganismes est ralentie (Bridges, 1970). Les alternances saisonnières aboutissent à la formation de molécules de poids moléculaire élevé, caractérisées par une forte polymérisation (par condensation des noyaux aromatiques) et une grande stabilité, révélée par les temps moyen de résidence élevée de la matière organique (*cf. infra*).

La végétation steppique, qui caractérise les chernozems, propose également des conditions particulières pour la dégradation biochimique (Khitrov *et al.*, 2013 ; Phokhrov *et al.*, 1969-1978 ; FAO/ ISRIC/ ISSS, 1998 ; Fuller, 2010). Soixante-dix à 80 % de la biomasse végétale est souterraine, sous forme de racines. La figure 1.4 illustre ce point. Elle représente l'appareil végétatif de différentes plantes de prairies et steppes, dont les racines ont été dégagées de leur gangue de terre. La partie aérienne des plantes ne fournit pas beaucoup de matière organique, parce qu'elle dépérit, ou qu'elle est pâturée, fauchée ou brûlée. L'essentiel de la matière organique provient soit de la décomposition des racines, soit des exsudats racinaires. Le développement du système racinaire sur une grande profondeur explique l'épaisse imprégnation organique des chernozems. Ce développement du système racinaire est en grande partie liée aux conditions climatiques, les sécheresses saisonnières nécessitant l'exploration par la plante d'un grand volume de sol.



Figure 1.4. Exemples de systèmes racinaires de plantes de prairies et steppes. A gauche, une graminée des prairies nord-américaine : le panic érigé (*Panicum virgatum*). La plante peut dépasser 2 mètres de hauteur. Source : http://en.wikipedia.org/wiki/Panicum_virgatum (23.2.2014) ; sur la photo de droite, plantes des steppes est-européennes : racines de luzerne lupuline (*Medicago lupulina*) à gauche et de stipe pennée (*Stipa pennata*) à droite. Source : <http://www.uni-goettingen.de/de/soil-museum/431502.html>.

La prédominance des Graminées joue un rôle déterminant dans l'évolution des chernozems. Les graminées produisent une quantité importante de MO, par effet rhizosphérique. Il s'agit des excréations radiculaires, sous forme de composés hydrosolubles, mais aussi de la décomposition régulière sur place des éléments du système racinaire très puissant qui les caractérise (Duchaufour, 1977), comme le montre la figure 1.4. Ceci explique en grande partie l'épaisseur de l'horizon cherniue. *La transformation rapide de ces composés riches en azote est à l'origine d'un cycle biochimique particulier des éléments nutritifs et d'une humification intense qui intervient en grande partie souterrainement : une partie de cet humus évolue par maturation lente qui aboutit à la formation lente des composés humique à noyaux poly-condensé qui lui donne la couleur noir. Ces noyaux sont très résistants à la biodégradation microbienne : elle s'accompagne d'une diminution d'efficacité des effectifs d'extraction. La stabilité de la matière organique du chernozem est due à une abondance de molécules de poids moléculaire élevé (acides humiques)* (Francioso *et al*, 2009; Duchaufour, 1998).

L'activité de la faune permet aussi l'approfondissement de l'horizon chernique (Altermann *et al.*, 2005). La faune travaille et aère le sol, son activité de brassage vertical permet d'incorporer la matière organique en profondeur dans le sol. Grâce à son activité structurante et à la richesse des chernozems en calcium, la migration des argiles est très faible (Duchaufour, 1977). Les vers de terres, notamment, sont des régulateurs importants de la dynamique de la MO dans le sol (Hong *et al.*, 2011). Certaines espèces creusent leurs galeries très profondément pour se protéger contre la sécheresse et les hivers froids (Baize et Girard, 2008) et participent de cette façon à la redistribution du calcium dans le sol (Lambkin *et al.*, 2011).

La décarbonatation du matériau intervient dans les milieux à forte activité biologique, en raison de la très forte production de CO₂. Le calcaire est solubilisé sous forme de bicarbonate à cause de la pression partielle élevée de CO₂. En conséquence, il précipite à la base du profil, là où la pression de CO₂ s'abaisse. Il forme alors un horizon Cca (C carbonaté) (Duchaufour, 1977).

1.2.2. La grande stabilité des MOS de chernozem : mesures par le ¹⁴C

La stabilité des acides humiques de chernozems est mise en évidence par les datations ¹⁴C qui donnent « l'âge » apparent de la MO. De façon très générale, la MO est très hétérochrone ; elle est composée de fractions dont l'âge varie de quelques jours à plusieurs millénaires (Scharpenseel et Pietig, 1970 ; Gregorich *et al.*, 1994). En fait, la mesure d'âge par le ¹⁴C donne une espérance de vie des MOS dans le sol : leur durée de vie moyenne entre l'entrée par décomposition des MO fraîches et la sortie du sol par minéralisation. Cette donnée, appelée Temps Moyen de Résidence (TMR) est une moyenne non-arithmétique des âges des fractions de la MOS (Von Lützow *et al.*, 2007). Dans les chernozems, il y a un très fort gradient de TMR avec la profondeur (fig. 1.5). : à 10 cm de profondeur, le TMR peut déjà atteindre 1000 ans ; à 25 cm de profondeur, il varie entre 1000 et 3000 ans, à 60 cm de profondeur, il est compris entre 1000 et 4000 ans ; à 90 cm, il est compris entre 2000 et 6000 ans. Il est rare d'observer des âges plus anciens (Scharpenseel, 1968 ; Scharpenseel et Pietig, 1971 ; Scharpenseel et Pietig, 1973). Si l'on prend une valeur moyenne tirée des données présentées sur la figure 1.5, le gradient est de 486,2 années/10 cm. Němeček (1981) a évalué cette valeur pour les chernozems à 473 années/ 10 cm. Lorsqu'on compare cette valeur avec les données de la littérature (Guillet, 1979 ; Schwartz, 1991 ; Scharpenseel et Pietig, 1971, Ertlen, 2009,...), on note que le gradient des chernozems figure parmi les valeurs hautes, avec les andosols (figure 1.6).

L'augmentation du TMR de la MO avec la profondeur est très générale dans les sols (Guillet, 1979 ; Schwartz, 1991). Il s'explique par un modèle bi-compartimental de répartition des matières organiques (Balesdent et Guillet, 1982), schématisé par le graphique de la figure 1.7. Un premier compartiment est composé de matières organiques stables, résistantes à la minéralisation. Ces matières organiques ont un âge moyen élevé. Leur répartition est relativement uniforme dans le profil, car en raison de leur grande espérance de vie, elles sont mélangées par brassage biologique sur tout le profil. Le deuxième compartiment est constitué de matières organiques labiles, facilement minéralisables, telles

que les polysaccharides. Leur espérance de vie est très faible, quelques années parfois, et elles sont en général minéralisées avant d'avoir été pu être réparties uniformément par la bioturbation. Ces matières organiques, produites par les racines, par la décomposition des litières et des racines mortes, sont surtout abondantes dans la partie superficielle du sol. On voit très bien sur la figure 1.7 que le rapport entre ces deux compartiments varie avec la profondeur. En surface prédominent les matières organiques labiles, et le TMR de la MOS totale est donc faible. En profondeur, les MOS récalcitrantes à la minéralisation sont majoritaires, et le TMR est très élevé. Dans les parties médianes du sol, on a un mélange, et le TMR augmente avec la profondeur, au fur et à mesure que diminue la proportion de MOS du compartiment labile. Selon Gregorich *et al.* (1994), plus de 75 % de la MOS est constituée de composés qui ne sont que lentement minéralisables.

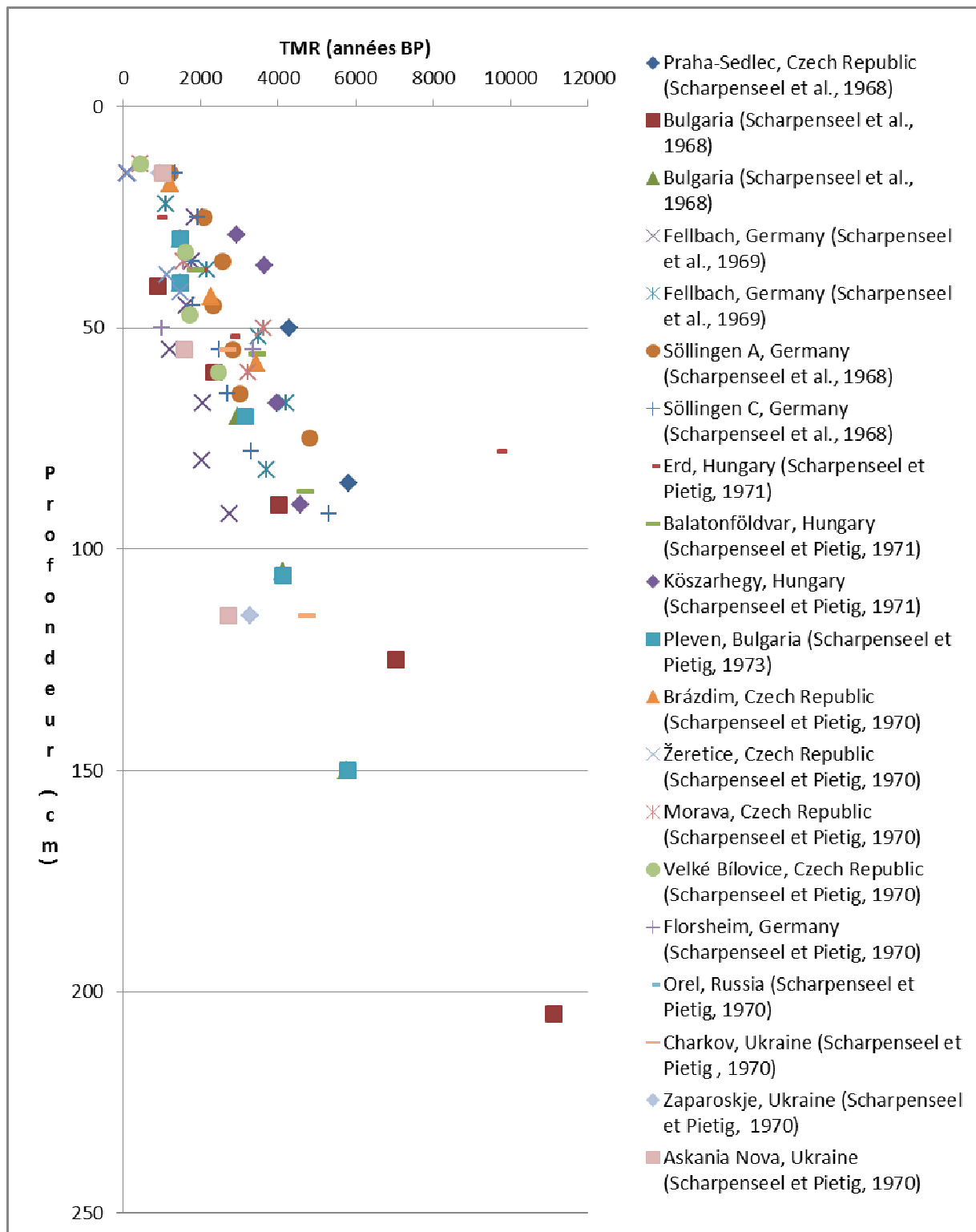


Figure 1.5. Evolution du temps moyen de résidence de la matière organique de chernozems en fonction de la profondeur. Repris de Vysloužilová *et al.*, 2014.

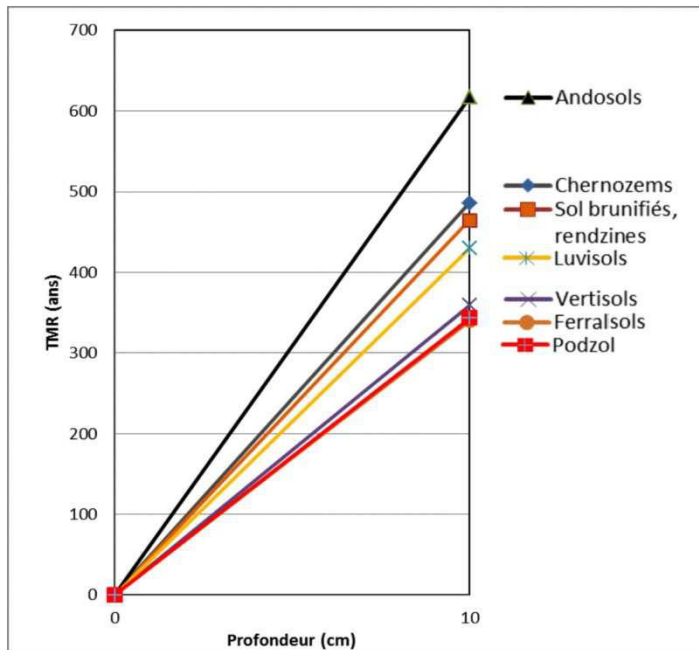


Figure 1.6. Comparaison des gradients moyens de TMR (en années/10 cm) des chernozems à ceux d'autres types de sols. Données reprises de différents auteurs (moyenne des chernozems de référence de la figure 1.5. ; Guillet, 1979 ; Scharpenseel et Pietig, 1969, 1971 ; Balescent et Guillet, 1982 ; Eusterhues *et al.*, 2007 ; Pessenda *et al.*, 2001 ; Schwartz, 1991).

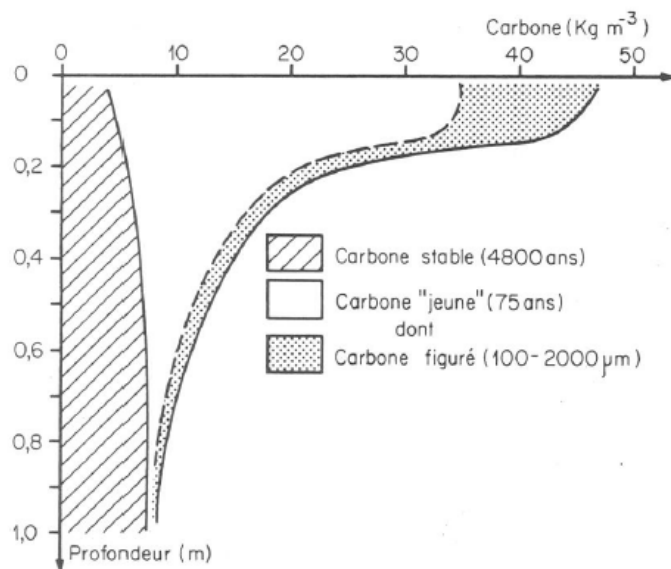


Figure 1.7. Modèle de répartition de carbone stable et de carbone jeune dans un profil du sol brun lessivé (Balesdent et Guillet, 1982). La teneur en carbone stable est homogène dans le profil. Par contre, la teneur en carbone labile est plus importante en surface et décroît avec la profondeur.

1.3. De l'observation à la classification : les sous-types de chernozems

Il existe de nombreux sous-types de chernozems, qui sont désignés par des qualificatifs variés. *Le caractère fondamental isohumique est conservé, mais certains caractères secondaires apparaissent qui traduisent l'interférence du processus de base avec un processus physico-chimique caractéristique d'un autre type [de sol]* (Duchaufour, 1977). Ici, nous en décrivons les plus remarquables. Nous comparerons dans certains cas leur place dans les différentes classifications.

1.3.1. Des systèmes de classification de plus en plus complexes

Le nombre de sous-types définis varie selon les auteurs. Ainsi, Duchaufour (1977) ne distingue que trois sous-unités : le chernozem *calcaire*, le *chernozem-solonetz* et le *chernozem vertique*. Le système de la classification taxonomique des sols de la République Tchèque (Němeček *et al.*, 2001) distingue six sous-types : *modal*, *luvique*, *hydromorphe*, *arenique*, *pelique* et *vertique*. Dans la version la plus récente de la classification tchèque (Němeček *et al.*, 2011), deux sous-types supplémentaires apparaissent : *carbonaté* et *anthropique*. Le Soil Atlas of Europe (European Commission, 2005) définit neuf sous-types qualifiés de : *vertique*, *gleyique*, *luvique*, *glossique*, *calcique*, *silteux*, *vermique* et *haplique*. Un an plus tard, la Base de référence mondiale pour les ressources en sols (WRB) (FAO/ISRIC/ISSS, 2006) distingue de nombreux qualificatifs. Certains sont des préfixes : *voronic*, *vermic*, *technic*, *leptic*, *vertic*, *endofluvic*, *endosalic*, *gleyic*, *vitric*, *andic*, *stagnic*, *petrogypsic*, *gypsic*, *petroduric*, *duric*, *petrocalcic*, *calcic*, *luvic*, *haplic*, *anthric*, *glossic*, *tephric*, *sodic*, *pachic*, *oxyaquic*, *greyic*, *skeletalic*, *arenic*, *siltic*, *clayic*, *novic*. Ceux-ci sont utilisés au niveau de hiérarchisation supérieur. D'autres sont des suffixes et sont utilisés à un niveau inférieur : *anthric*, *glossic*, *tephric*, *sodic*, *pachic*, *oxyaquic*, *greyic*, *skeletalic*, *arenic*, *siltic*, *clayic*, *novic*. Les trois sous-types suivants sont les plus fréquents : *calcic*, *cambic* et *argic*. Ces trois sous-types sont d'ailleurs les seuls qui avaient été distingués dans la version 1998 de la WRB. Ainsi, la diversité des chernozems est prise en compte de manière plus forte dans les classifications les plus récentes.

1.3.2. Description des principaux sous-types

Le chernozem *calcique* (FAO/ISRIC/ISSS, 1998 ; Commission Européenne, 2005) répond par ses caractéristiques au chernozem *modal* (Němeček *et al.*, 2001) défini plus haut. Il s'agit de chernozems ayant entre 50 et 100 cm de profondeur, et un horizon à concentration de carbonates secondaires (horizon K). Les accumulations de CaCO₃ sont de la taille des argiles ou limons fins. C'est le chernozem typique de l'Europe Centrale (Němeček *et al.*, 1990 ; Mathieu, 2009). Un exemple de ce type est présenté sur la figure 1.8.



Figure 1.8. Chernozem calcique (Kuchyňka, Rép. Tchèque) ; l'horizon chernique Ac est caractérisé par sa teneur élevée en matières organiques (couleur noire) et une densité racinaire élevée. L'horizon calcique est représenté par le niveau brun enrichi en calcaire (flèche). La roche mère est constituée de sédiments lœssiques carbonatés. Photo : B. Vysloužilová.

Le chernozem *vertic* ou *vertique* (FAO/ISRIC/ISSS, 2006 ; Němeček *et al.*, 2001 ; Duchaufour, 1977, Commission Européenne, 2005) est caractérisé par sa teneur élevée en argiles gonflantes, qui provoque la formation de fentes de retrait dans les périodes de sécheresse. Il se trouve dans les plaines basses où des argiles fines ont été déposées par les eaux lors de séquences d'alluvionnement (Duchaufour, 1977). Nous avons pu observer ce type de chernozem dans la situation décrite par Duchaufour, dans le bassin de la rivière Maros, à Battonya au sud de la Hongrie (fig. 1.9). Notons que dans la légende de la carte des sols de la Hongrie, ce sol est qualifié de « lowland chernozem ». Pour leur part, Němeček *et al.* (2001) affirment que ce sous-type est très difficile à distinguer du chernozem *pelic*.



Figure 1.9. Chernozem *vertic* de Battonya (sud de la Hongrie). A gauche, physionomie de la végétation ; à droite, le profil. Photos : D. Schwartz.

Le chernozem *argic* (FAO/ISRIC/ISSS, 1998) est défini comme un chernozem à horizon Bt (enrichi en argile), avec des revêtements argilo-humifères sur les faces d'agrégats et sur les parois de la macro-porosité (Baize et Girard, 2008). Dans ce sol, le processus de lessivage s'exprime nettement, mais l'horizon Ac chernique est toujours présent comme le montre la figure 1.10. Il s'agit d'un sol intermédiaire entre le chernozem et le luvisol (ou albeluvisol). Le chernozem *argic* semble correspondre au chernozem *luvic* (Němeček *et al.*, 2001 ; Commission Européenne, 2005). Le chernozem *glossic* est une variante caractérisée par la transition « en langues » entre l'horizon Ac chernique et l'horizon Bt (FAO/ISRIC/ISSS, 2006 ; European Commission, 2005).

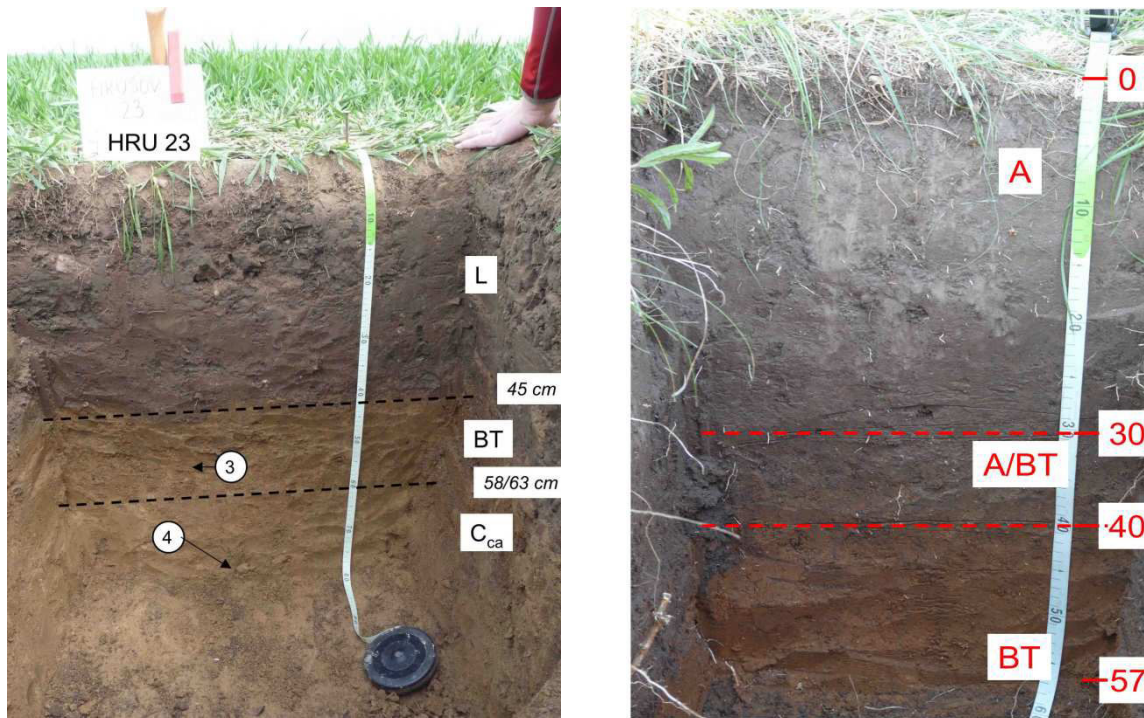


Figure 1.10. A gauche : chernozem *luvique* (à BT) de Hrušov (Rép. Tchèque). L'horizon A est entièrement transformé par le labour. A droite : chernozem *luvique* sous steppe secondaire à Tard (Hongrie). Photos : D. Schwartz



Figure 1.11. Chernozem *arénique* formé sur une paléo-dune sableuse à Sarand (Hongrie). A gauche, vue générale de la paléodune ; à droite, le profil. Photos : D. Schwartz.

Le chernozem *arénique* (Němeček *et al.*, 2001) est un sol à caractère isohumique développé dans une roche-mère sablo-limoneuse (fig. 1.11). La teneur en sables est supérieure à 50 % et la teneur en argiles est inférieure à 20 %.

Le chernozem *vermique* est caractérisé par sa très forte activité biologique (Commission Européenne, 2005 ; Khitrov *et al.*, 2013), un brassage intense de la MO et de la composante minérale, une bonne aération et une bonne infiltrabilité de l'eau. Le chernozem *vermique* est riche en galeries verticales de vers de terre et en krotovinas, comme illustré sur la figure 1.12. La taupe *Spalax microphthalmus* abondante dans les steppes russes (fig. 1.12) représente un exemple type d'animal à l'origine des krotovinas.



Figure 1.12. Chernozem *vermique* sous steppe «naturelle» dans la réserve V. V. Alekhin (Russie). L'activité de la faune est remarquable : observer les galeries verticales de vers de terre et les krotovinas qui témoignent l'activité de la taupe *Spalax microphthalmus* (photo de droite). Photos : B. Vysloužilová (le chernozem) et <http://synapsida.blogspot.fr> (la taupe).

Le chernozem à horizon *cambique* (Bv), est caractérisé par un horizon structural entre l'horizon chernique Ac et les horizons C (FAO/ISRIC/ISSS, 2006). Selon Altermann (2005), le chernozem à horizon Bv est aussi nommé *décarbonaté*. Dans l'horizon Bv se trouvent des revêtements argileux, mais moins bien exprimés que dans un horizon Bt. Il correspond au chernozem à horizon structural de Baize et Girard (2008). Deux exemples de chernozems de ce type sont présentés sur la figure 1.13.

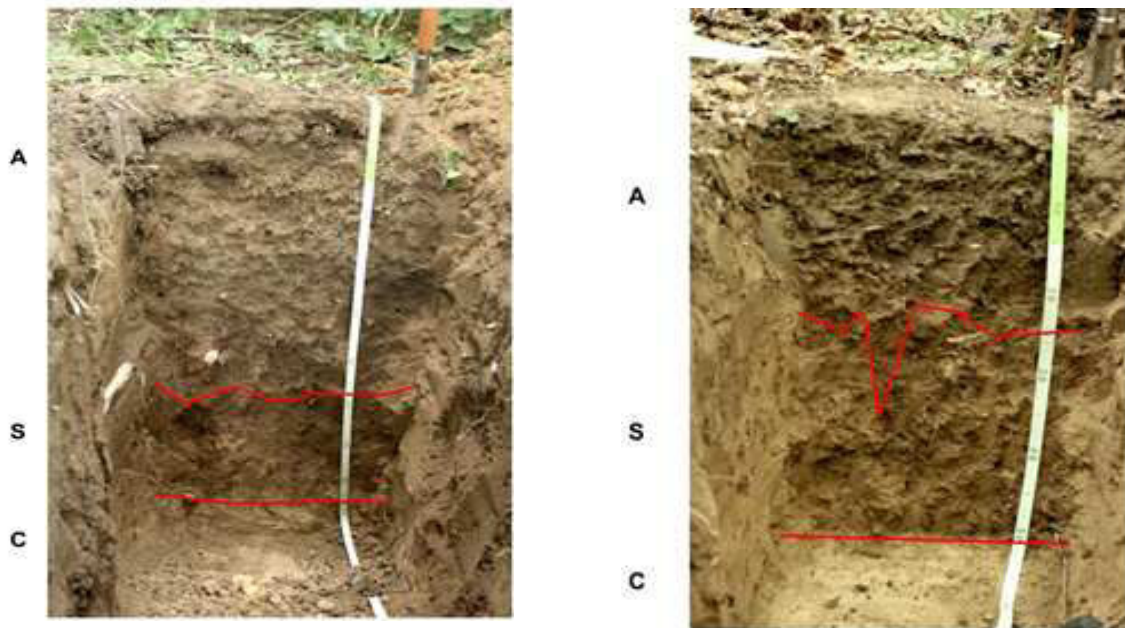


Figure 1.13. Chernozems *cambiques* sous végétation forestière à Bab (à gauche) et Senec (à droite) en Slovaquie. Photos : D. Schwartz.

Le chernozem *černická* (*hydromorphe*) montre des traits redoxiques dans les 60 premiers cm du profil (Němeček *et al.*, 2001). Le chernozem *gleyic* (European Commission, 2005) porte des signes de gleyfication dans le premier mètre du profil. Les chernozems de ces deux types se forment dans les endroits influencés par la présence d'une nappe d'eau.

Le chernozem-solonetz est le chernozem à complexe partiellement saturé en Mg^{2+} et Na^{2+} (Duchaufour, 1977). Il semble être l'équivalent du chernozem sodic de la WRB (FAO/ISRIC/ISSS, 2006).

Enfin, d'après le *Soil Atlas of Europe* (European Commission, 2005) le qualificatif *haplique* est employé dans le cas où aucun des autres qualificatifs (*chernic*, *vertic*, *gleyic*, *vermic*, *glossic*, *calcic*, *siltic*, *vermic*) ne convient. En clair, cela signifie que le chernozem répond au concept central du groupe de référence du sol et il n'a pas de caractéristiques particulières qui mériteraient d'être mentionnées séparément (FAO/ISRIC/ISSS, 1998).

Par ailleurs, le concept de chernozem *anthropique* (Němeček *et al.*, 2011) ou *anthric* (FAO/ISRIC/ISSS, 2006) est intéressant, car les caractéristiques de nombreux chernozems ont été modifiés par l'agriculture. La définition qui en est donnée est toutefois très vague : chernozem à profil montrant une grande influence de l'homme. Pour Němeček *et al.* (2011) il doit y avoir persistance des horizons diagnostiques qui permettent le rattachement au type « chernozem ».

1.4. La place des chernozems dans les systèmes de classification de sols

Le chernozem est un type de sol majeur. Si sa dénomination est restée stable depuis les premiers travaux scientifiques, sa place dans les classifications mondiales et nationales varie selon les critères de classification retenus ; elle a aussi pu changer au cours du temps.

1.4.1. Généralités

Němeček *et al.* (1990) estiment que trois classifications nationales ont eu une influence primordiale sur la classification mondiale des sols : la classification russe basée sur des principes génético-géographiques, la classification française qui englobe tous les sols du monde et se base sur les principes morpho-génétiques, et la classification américaine fondée sur un diagnostic complexe. La classification de référence universelle de FAO/UNESCO qui servi de base pour la carte mondiale de sols (FAO et UNESCO, 1972) est la seule classification reconnue au niveau mondial. Dans chacune de ces classifications, le chernozem trouve une place selon des critères variés (développés ci-dessous) mais pas entièrement déconnectés les uns des autres. L'évolution des classifications et la place qui y est accordée au chernozem est listée dans le tableau 1.1.

Nom de la classification	Principe de la classification	Principales subdivisions	Classement du chernozem et son nom dans la classification	Autres sols au même niveau hiérarchique	Référence
Auteur, année Pays d'origine Classification des sols Dokuchaev, 1900 Russie	Géographique et génétique	A - sols normaux (zonaux, végétaux) B - sols transitoires (intrazonaux) C - sols anormaux (azonaux)	Classe A catégorie IV : zone de steppe – Chernozem	-	Pedro, 1984
Classification des sols Vilenskyi, 1927 URSS	Géographique : zonalité climatique (hydrique et thermique)	11 Classes de températures (6 de sols zonaux ; 4 de sols intrazonaux ; 1 sol de zones verticales)	Sol zonal Zone tempérée Phytogénic Faiblement aride Chernozem (terre noire)		Segalen, 1978
Classification des sols - 6 ^e Congrès International de Science du Sol Ivanova, 1956 URSS	Principe bioclimatique (climat, végétation)	12 classes définies selon les biomes et le climat	Classe 5 – sols subboréaux et steppiques. Groupe de pédogénèse : steppique. Type de sol, rang automorphe : sols	Sols châtaîns des prairies	Segalen, 1978

			chernozemiques des prairies		
Schéma général de classification des sols Gerasimov et Ivanova, 1958 URSS	Principe bioclimatique (climat, végétation)	12 classes	Classe V – Sol subboréaux de steppe. Groupe de formation de sols : 1. Steppe. Groupe des sols automorphes chernozem	Sols châtaîns	Segalen, 1978
Classification des sols d'U.R.S.S. Tiurin, 1965 URSS	Principe bioclimatique (longueur de la période végétale, régime thermique, type d'altération)	12 classes	Classe VIII : Chernozems – sol de steppe. Sub-classe 1 : sols biogéniques, type de la formation : automorphe. type 1 – chernozem	Type 2 : Sols châtaîns	Segalen, 1978
Liste systématique des sols d'U.R.S.S. Rozov et Ivanova, 1967 URSS	Écologique – génétique (bioclimatique)	9 classes bioclimatiques, divisées en ordres génétiques et biophysicochimiques	Groupe écologico-génétique : Sol de steppe des régions subboréales $\Sigma T > 10C - 1800-3400$; Préc. 220-640mm, coefficient d'humidité 0.3-1 Altération : sialitique carbonate Cycle biologique : silicium, azote et calcium intensive Ordre génétique : sol automorphe Ordre biophysicochimique : Calcium prédominant Chernozem	Sol châtaîns	Segalen, 1978
Classification historico-génétique des sols pour une carte mondiale à l'échelle 1 : 5.000.000 Kovda <i>et al.</i> , 1967 URSS	Histoire tertiaire et quaternaire de sols	8 grands modes de formations auxquels sont associés les types de climat et contenu minéralogique	I. Sol des séries subboréales arides-humides : ordre 4. paleohydromorphique Chernozem typique	Brunizems Chernozem lessivé Chernozem mycélium-calcaire Chernozem superficiel mycélium	Segalen, 1978

				calcaire 0 Chernozem méridional solonetz	
Classification des sols Volobuyev, 1964 URSS	Principe organominéral	2 divisions 29 classes	Classe de sol : saturé en calcium Type de formation de sols : steppe Chernozem	Sierozem Sol châtain	Segalen, 1978
Catégories des sols Marbut, 1927 USA	Principe organo- minéral	Pedalfer et pedocals	Pedocals de zones tempérées de latitude moyenne Chernozem	Sol châtain Sols bruns Sols gris	Segalen, 1978
Classification des Sols des USA sur la base de leurs caractéristiques Baldwin <i>et al.</i> , 1938 USA	Caractéristiques morphologiques et analytiques de sols	4 ordres	Ordre : sol zonal – pedocals. Subordre : sol des couleurs foncés, qui sont semi- arides, des prairies subhumides et humides Chernozem	Sol châtain Sols châtains rougeâtres Sols de prairies Sols de prairies rougeâtres	Segalen, 1978
Catégories supérieures de la classification des Sols Thorp <i>et al.</i> , 1949 USA	Principe climatique pour les sols zonaux Hydromorphie et composition minérale pour les sols interzonaux	3 ordres	Ordre : sol zonal. Subordre des sols de couleur foncée, qui sont semi- arides, et des prairies subhumides et humides Chernozems	Sols châtains Sols châtains rougeâtres Sols de prairies Sols de prairies rougeâtres	Segalen, 1978
Projet de classification des Sols Aubert <i>et al.</i> , 1956 France	Pédogénétique et morphologique	10 classes	Classe : III. Sol calcimorphes à profil AC Sous-classe : Sols de steppe Chernozems	Sols châtains et châtains rouge Sols bruns et bruns rouge Sols à croûte	Segalen, 1978
Classification Aubert, 1965 France	Pédogénétique et morphologique	10 classes	Sols isohumiques - Chernozem	Brunizems Sols châtains Sols bruns isohumiques Sols bruns et châtain subtropicaux Les	Segalen, 1978

				sierozems Les sols isohumiques des pseudo- steppes	
Classification CPCS 1967 France	Pédogénétique et morphologique	12 classes	Classe des sols isohumiques Sous-Classe des sols isohumiques à pédoclimat très froid : Chernozem	Sols châtains Sols bruns isohumiques	Segalen, 1978 CPCS 1967
Classification des Sols (proposition) Duchaufour, 1970 France	Principe écologique	11 classes	Classe V. Sol isohumique Sous-classe des sols isohumiques à complexe saturé - Chernozem	Sol châtain Sol brun isohumique	Segalen, 1978
Soil Taxonomy, 1975 USA	Classification objective (critères analytiques ou quantifiés)	10 classes	Ordre : Mollisols Un sol qui répond aux caractéristique de chernozem se retrouve dans plusieurs sous- ordres de Mollisols : surtout Ustolls , mais aussi Albolls, Aquolls, Borolls, Rendolls, Udolls Xerolls		Segalen, 1978, FAO <i>et al.</i> , 2006 Kuntze <i>et al.</i> , 1983 Němeček <i>et al.</i> , 1990
Référentiel pédologique Baize et Girard, 2008 France	Pédogénétique et morphologique	34 grands ensembles de référence	Chernosol	-	Baize et Girard, 2008
Die Systematik der Böden Mitteleuropas Kubiena et Mückenhausen, 1980 Allemagne	Influence des eaux Etat de développement de sol	4 catégories divisées en classes	Catégorie : Sols terrestres Classe : sols de steppes Tschernozem	Brauner Steppenbod en	Kuntze <i>et al.</i> , 1983
Taxonomický klasifikační systém půd ČR Němeček <i>et al.</i> ,	Propriétés et morphologie de sols	15 classes de référence	Classe de référence : Černosoly. Type: černozem (chernozem)	Černice (<i>Gleyic Chernozems WRB, 2006</i>)	Němeček <i>et al.</i> , 2011 Zádorov

2011					á et Penížek, 2011
République Tchèque					
World reference base for soil resources FAO/ ISRIC/ ISSS, 2006 Classification internationale	Propriété de sols et processus morphogénétique	32 WRB Reference soil groups (RSG)	RSG: Chernozem	-	FAO, 2006
Systematik der Böden Österreichs O. Nestroy, 2000 Autriche	Influence des eaux Etat de développement de sol	2 ordres (sols terrestres et sols hydromorphes) divisé en 13 classes	Ordre : sol terrestres Classe : sol à humus brut et sol à A-C développés Ts Chernozem	Rumpf – Tschernozem (Chernozem tronqués)	Nestroy, 2007
Morfogenetický klasifikačný systém pôd Slovenska Sobocká, 2000 Slovaquie	Les processus morphogénétiques	10 groupes des sols	Groupe : sols molliques Černozem	Smonica (Vertisols) Čiernica (gleyic chernozem)	Sobocká, 2000
Hungarian Soil Classification System Szabolcs <i>et al.</i> (1966) Hongrie	Climatique, géographique, génétique	9 types principaux	Groupe : IV. Chernozem soils (types définis : 17. chernozem soils with forest ; 18. Leached chernozem soil; 19. Calcareous chernozem; 20. Meadow chernozem soil, 21. Terrace chernozem soil)		Szabolcs <i>et al.</i> , 1966 ; Michéli <i>et al.</i> , 2006

Tableau 1.1. La position des chernozems dans les systèmes de classifications de sols dans le monde. Présentation par ordre chronologique.

1.4.2. Le chernozem vu comme un « sol de steppe »

La classification de sols faite par Dokuchaev et présentée en 1900 à l'exposition universelle de Paris (*in* Pedro, 1984), témoigne d'une tendance universaliste et s'appuie sur des principes géographiques et génétiques. Elle se décline en trois classes de sols : la classe A est celle des sols *normaux* (végétaux, zonaux) ; la classe B, celle des sols *transitoires* (intrazonaux) ; la classe C, celle des sols *anormaux* (azonaux). Les chernozems font partie de la classe A, celle où les phénomènes externes (climatiques et biologiques) interviennent dans la pédogénèse. Les chernozems y représentent la catégorie IV, c'est-à-dire la catégorie des sols de steppes. Le classement des chernozems comme sols steppiques a perduré dans les classifications russes ultérieures. Le climat est pris en compte en tant que facteur de zonalité, via les régimes thermiques et hydriques (Vilenskiy, 1927 ; Ivanova 1956 ; Gerasimov et Ivanova, 1958 ; Tiurin, 1965 ; Rozov et Ivanova, 1967 ; Kovda *et al.*, 1967 ; tous cités *in* Segalen, 1978). Le principe de zonalité apparaît aussi dans la classification américaine proposée par Thorp *et al.* (1949), lesquels empruntent à Dokuchaev (1900) la division en sols zonaux, intrazonaux et azonaux. En tant que « sols de steppe », les chernozems sont souvent classés avec des sols châtaîns (Ivanova, 1956 ; Gerasimov et Ivanova, 1958 ; Tiurin, 1965 ; Rozov et Ivanova, 1967). La classification de Kovda *et al.* (1967) regroupe les chernozems avec d'autres sols des séries subboréales arides à humides : sols alluviaux humifiés, brunizems, sols gris forestiers clairs, sols gris forestiers, sols gris forestiers sombres. Thorp *et al.* (1949) regroupent les chernozems avec les autres sols de couleur foncée semi-arides, de prairies subhumides et humides : sols châtaîns et sols châtaîns rougeâtres, sols de prairies et sols de prairies rougeâtres.

1.4.3. Le chernozem vu comme « un sol calcique »

Un autre point de vue est à l'origine de classifications basées sur les caractéristiques organo-minérales. Ainsi, dans certaines classifications, le chernozem est classé selon sa teneur élevée en calcium. La teneur en calcium comme un critère de classification a été employée pour la première fois par le pédologue américain Marbut en 1927. Dans sa classification, le chernozem fait partie du groupe de sols appelés *pedocals* (sols riches en calcium) qui se retrouvent dans les latitudes moyennes. Ce groupe englobe également les sols bruns et les sols gris. Dans sa classification des *Sols des USA sur la base de leurs caractéristiques*, Baldwin (1938) garde le concept de *pedocals* et place les chernozems avec les sols châtaîns, les sols châtaîns rougeâtres, les sols de prairie et les sols de prairie rougeâtres dans la classe des sols zonaux foncés des zones semi-arides, des prairies subhumides et humides. La teneur en calcaire est employée dans la classification de Volobuyev (1964) où le chernozem forme avec les *sierozems* et les sols châtaîns le groupe de sols de steppe saturés en calcium. Aubert *et al.* (1956) introduisent dans leur classification le concept du degré d'évolution du profil de sol et de la nature physico-chimique de son évolution. Le chernozem est rangé dans la classe des sols calcimorphes à profil AC ; il fait partie de la sous-classe des sols de steppe avec les sols châtaîns et châtaîns rouge, sols bruns et bruns rouge et sols à croûte.

1.4.4. Le chernozem vu comme « un sol isohumique »

Les chernozems sont remarquables du point de vue de leur teneur élevée en matière organique. Aubert (1965) introduit dans sa classification de sols le terme de *sols isohumiques* pour décrire les sols à teneur en matière organique relativement constante sur une grande épaisseur (Segalen, 1978). Le chernozem partage la classe des sols isohumiques avec les brunizems, sols châtaîns, sols bruns isohumiques, sols bruns et châtaîns subtropicaux, sierozems et sols isohumiques de pseudo-steppes. Le concept de sol isohumique persiste dans la classification française établie par la Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols (CPCS, 1967) qui prend en compte les propriétés physico-chimiques et morphogénétiques des sols de manière complexe. La CPCS place les chernozems dans les *sols isohumiques* de pédoclimat très froid avec les sols châtaîns et sols bruns isohumiques. Duchaufour (1970, *in* Segalen 1978) adapte la classification et les trois types de sols forment le groupe de sols isohumique à complexe saturé. Pour sa part, la classification américaine de 1975 (Soil Taxonomy) est basée sur le principe de la description détaillée des horizons diagnostics en termes de propriétés et non de processus environnementaux. Elle crée un vocabulaire totalement nouveau. La Soil Taxonomy introduit ainsi le terme de *mollisol* qui englobe les sols avec un horizon de surface épais, très riche en matière organique, et fertile. Les Mollisols sont un des groupes majeurs de la Soil Taxonomy, et les chernozems y sont intégrés. Ils y perdent leur nom classique. Les sols à caractères de chernozems sont répartis dans différents groupes, répondant aux termes d'Albolls, Aquolls, Borolls, Rendolls, Udolls ou Xerolls. Le suffixe *_oll* renvoie au groupe taxonomique majeur des Mollisols. Le Référentiel Pédologique RP2008 (Baize et Girard, 2008) est également fondé sur un nouveau vocabulaire, mais plus simple que celui de la Soil Taxonomy. Les sols à caractéristiques de chernozem y sont appelés *chernosols*.

La classification mondiale des sols par la *World reference base for soil resources*, (FAO/ISRIC/ISSS, 2006) construite sur la base des propriétés de sols et des processus morphogénétiques fait des chernozems un des 32 groupes de référence. A l'inverse d'autres classifications, ils sont nettement séparés des kastanozems (sols châtaîns) et des phaeozems (sols gris), qui sont des groupes de référence placés au même niveau hiérarchique.

De façon tout à fait normale, le chernozem apparaît également dans les classifications nationales des pays de l'Europe Centrale, notamment dans les pays où ce sol est très représenté. La classification allemande de Kubiena et Mückenhausen (1980 *in* Kuntze *et al.*, 1983) *Die Systematik der Böden Mitteleuropas* définit au sein de la classe des sols terrestres (= les sols bien drainés), une sous-classe des sols de steppe dans laquelle le chernozem (Tschernozem) se place avec les sols bruns de steppe. La classification tchèque *Taxonomický klasifikační systém půd ČR* (Němeček *et al.*, 2001) contient la classe de référence de Černosol qui englobe deux types de sols : – černozem (chernozem) et černice (černice (=gleyic chernozem : WRB, 2006, Zádorová et Penížek, 2011). La classification slovaque (Sobocká, 2000) *Morfogenetický klasifikačný systém pôd Slovenska* définit 10 groupes de sol. Le chernozem (černozem) forme avec les *smonica* (vertisols) et les *černice* (chernozem gleyic) le groupe de sols molliques. En Autriche, la classification *Systematik der Böden Österreichs* définit au sein de l'ordre des sols terrestres la classe des sol à humus brut et A-C développé, dans laquelle le chernozem (*Tschernozem*) se place avec les

chernozems tronqués (*Rampf-Tschernozem*) (Nestroy, 2007). La classification hongroise *Hungarian Soil Classification System* (Szabolcs *et al.*, 1966) définit un type principal de chernozems qui comprend cinq types. La corrélation entre le chernozem défini par Szabolcs *et al.* (1966) avec la WRB (FAO/ISRIC/ISSS, 2006 ; Michéli *et al.*, 2006) n'est pas évidente : les *leached chernozems* ne répondent pas au critère du couleur et correspondent plutôt aux kastanozems ; les *Meadow chernozems* correspondent aux gleyic chernozem ; les *terrace chernozems* répondent aux *mollic fluvisols*. La classification hongroise définit aussi au sein du type principal des chernozems le type de *chernozem soils with forest* (le chernozem sous forêt).

1.5. Conclusion

Grâce à sa fertilité et ses propriétés agronomiques favorables, le chernozem est un type de sol qui a été l'un des premiers bien décrits. L'étude menée pour caractériser le chernozem a mené à poser les concepts des processus de la pédogénèse. La définition du chernozem élaborée par Dokuchaev (1883) a été utilisée avec des précisions et nuances jusqu'aujourd'hui. Le chernozem se présente avec un horizon de surface épais, très foncé qui passe directement à un horizon calcaire, souvent loessiques. Il a une gamme large de variantes, mais le sol est toutefois le résultat d'un processus de pédogénèse principal : l'humification et la maturation lente de la matière organique sous des conditions climatiques spécifiques, continentales. Systématiquement, le chernozem trouve sa place dans les classifications de sols mondiales et nationales. Le critère de classification donné rappelle chaque fois une propriété de base du chernozem : sol de steppe, sol isohumique ou sol calcaire.

Chapitre 2

La répartition et la formation des chernozems :

quel contexte environnemental ?

Le chapitre 2 est consacré à l'analyse de l'extension spatiale des chernozems dans le monde et des règles générales de leur répartition. Ensuite, nous examinerons les caractéristiques écologiques de l'environnement des chernozems en Europe dans le présent et dans le passé grâce aux indices paléoenvironnementalistes. Une partie est dédiée à aux études qui examinent l'influence supposée du facteur anthropique sur l'évolution de ce type de sol.

2.1. La répartition des chernozems à l'échelle mondiale

Les chernozems couvrent une surface estimée à 230 millions d'hectares dans le monde (Prokhorov *et al.*, 1969-1978 ; FAO/ISRIC/ISSS., 1998). Les grandes régions de chernozems sont situées aux latitudes moyennes dans les zones plates continentales en Europe (figure 2.1), en Asie (figure 2.2) et en Amérique du Nord (figure 2.3).

La zone eurasiatique (fig. 2.1 & 2.2) représente la zone de chernozems la plus vaste dans le monde. Elle englobe des zones de basses altitudes de l'Europe Centrale et de l'Europe du sud-est (Allemagne, République Tchèque, Slovaquie, Autriche, Hongrie, Roumanie, Moldavie, Serbie, Bulgarie), une grande partie de l'Ukraine, de la Russie (Caucase du Nord, la région de Volga et Sibérie de l'Ouest) et se prolonge jusqu'en Mongolie et Chine. Alors que la répartition des chernozems en Europe Centrale a plutôt un caractère d'îlots séparés les uns des autres, elle est bien plus continue en Europe de Est et en Asie, où les chernozems forment une bande continue et typiquement zonale.

En Amérique du Nord (fig. 2.3), les chernozems couvrent la partie Nord des Grandes Prairies (Fuller, 2010 ; FAO et UNESCO, 1972 ; Dudas et Pawluk, 1969). Ils occupent des surfaces importantes au Canada (Manitoba, Saskatchewan, Alberta) et aux Etats-Unis (Dakota du Nord, Dakota du Sud, Minnesota). L'extension des chernozems dans cette région n'est pas typiquement zonale parce que les conditions environnementales sont influencées par la présence de barrières climatiques comme les Montagnes Rocheuses. Le caractère de la répartition des chernozems et des autres types de sols répond à une zonalité en partie longitudinale. D'après Field (1968) les chernozems s'étendent du Nord au Sud depuis les Grandes Prairies jusqu'au Golfe du Mexique. En raison des températures moyennes hivernales (cf. point 2.2), la formation des chernozems n'est pas possible au Sud des Grandes Prairies, région dont les sols sont classés comme des kastanozems (FAO et UNESCO, 1972).

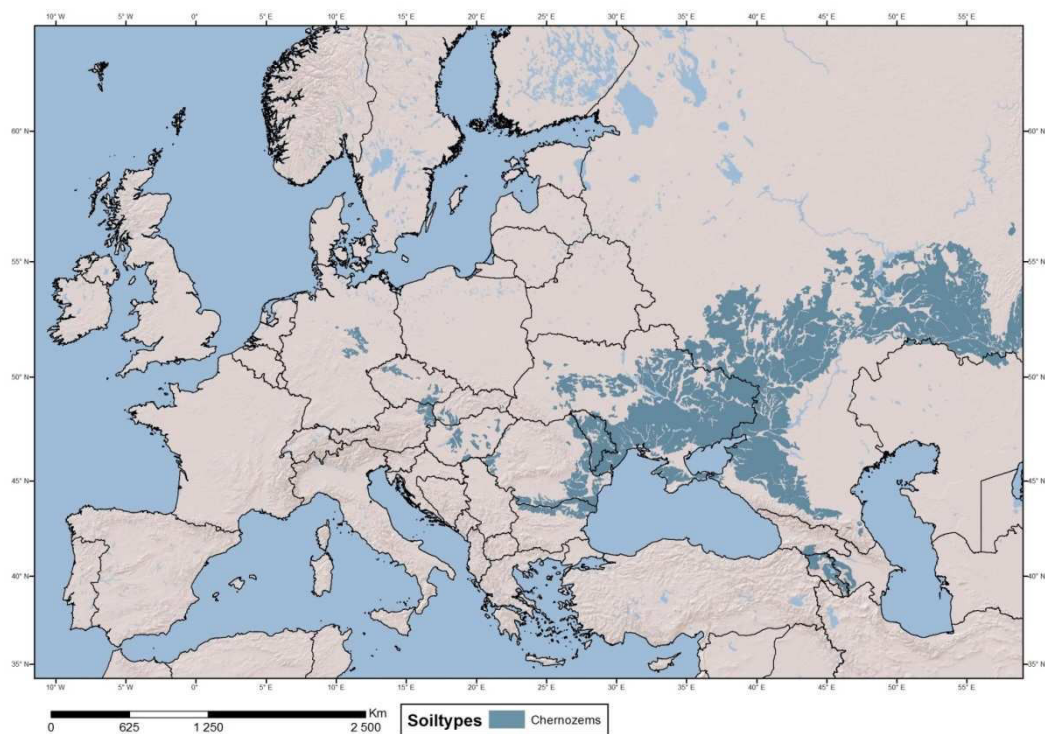


Figure 2.1. La répartition des chernozems en Europe (Commission Européenne, 2005).

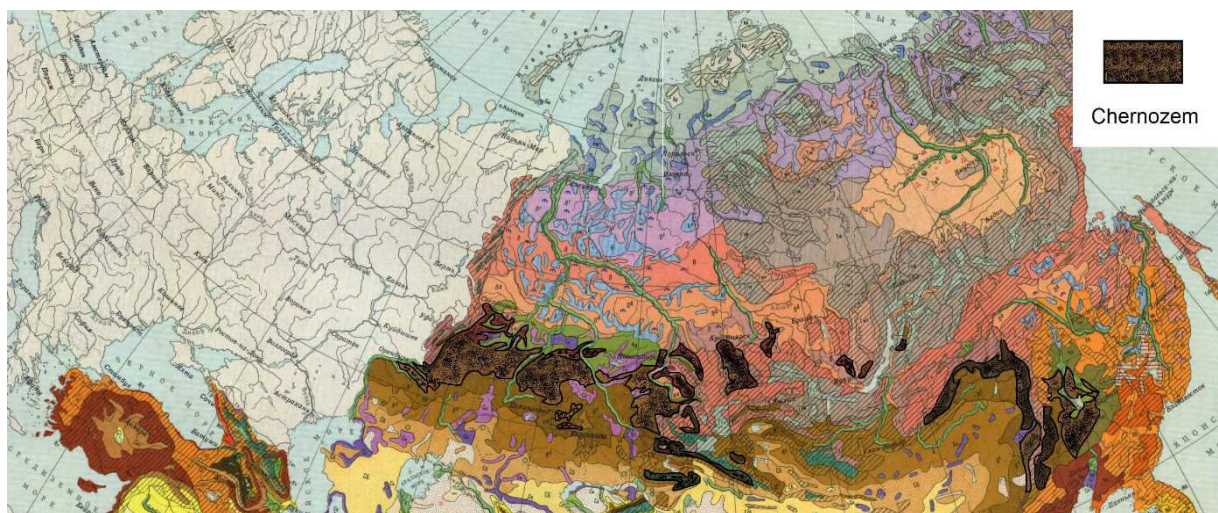


Figure 2.2. La répartition des chernozems en Asie (d'après la carte des sols de l'Asie : Panagos *et al.*, 2011 ; Selvaradjou *et al.*, 2005).

Selon certains auteurs (Garbulsky et Derebigus, 2006 ; Němeček *et al.*, 1990), des chernozems se trouvent également en Amérique du Sud dans les pampas de l'Argentine et de l'Uruguay. Néanmoins, les conditions climatiques (Garbulsky et Derebigus, 2006) ne

correspondent pas aux conditions observées en Eurasie et Amérique du Nord. En particulier, la température moyenne en hiver ne descend pas sous 0°C (Favrot, 1971). Favrot (1971) classe le sol de la « pampa ondulée » à l'ouest de la Plata comme un sol isohumique : brunizem à horizon Bt développé. Selon la Carte mondiale de Sols (FAO et UNESCO, 1972) la couverture des sols dans les pampas sud-américaines est formée surtout par des phaeozems, kastanozems et solonetz.

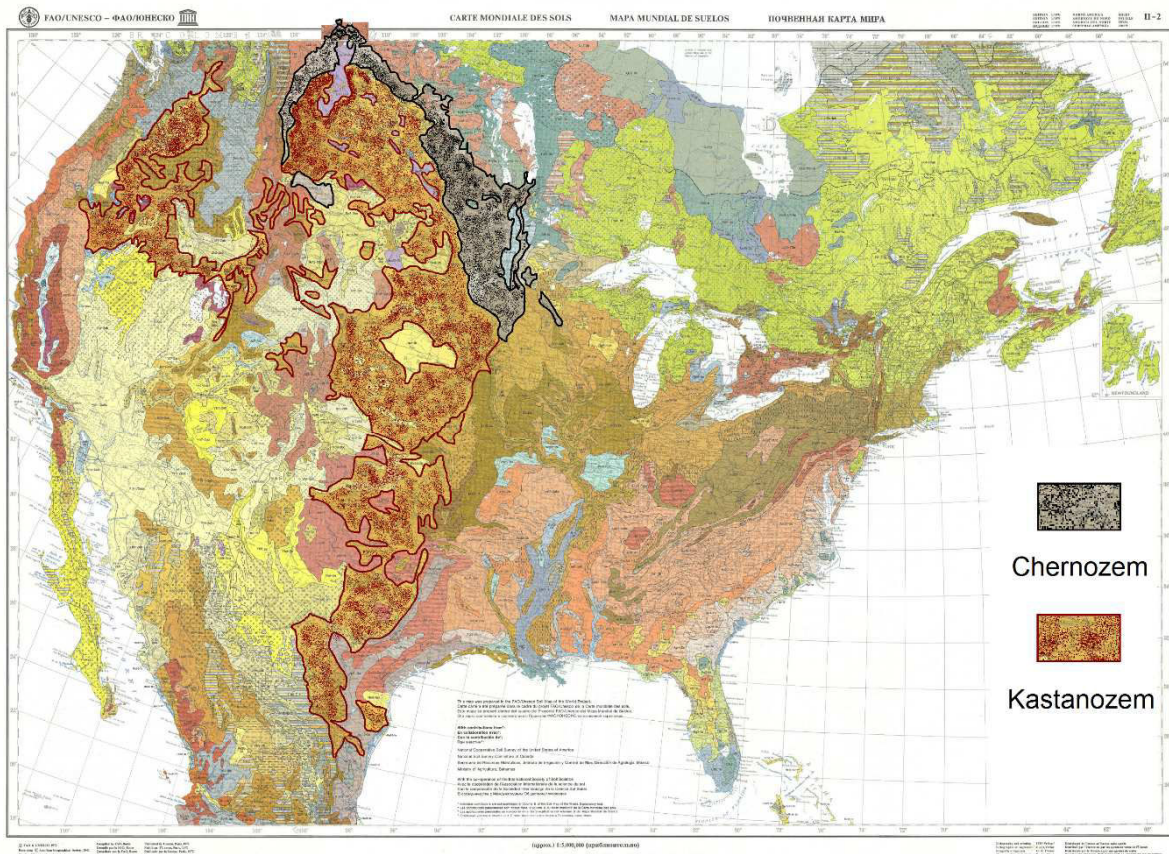


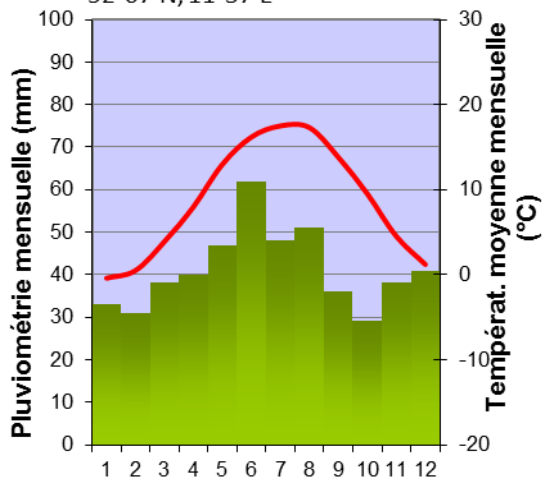
Figure 2.3. La répartition des chernozems et des kastanozems en Amérique du Nord (d'après La carte mondiale des sols, FAO et UNESCO, 1972).

2.2. Le contexte climatique

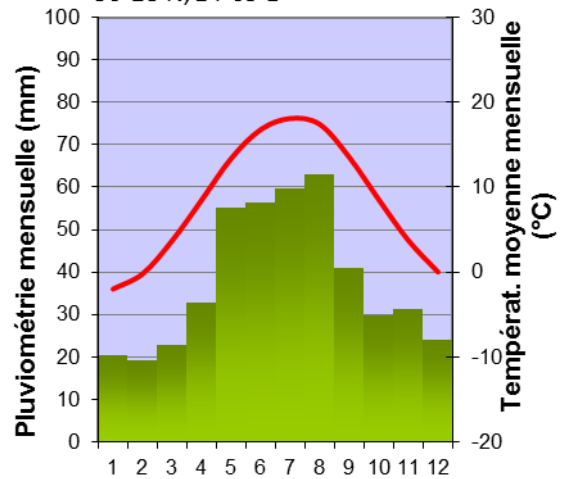
Nous avons indiqué dans le point 1.2 que la formation de ce type de sol exige des conditions climatiques spécifiques qui tirent leur origine dans la position géographique, mais aussi dans le relief. Les zones d'extension des chernozems sont caractérisées par un climat continental sec avec une amplitude thermique importante. Un climat sec est défini par une pluviométrie annuelle égale ou inférieure à l'évaporation potentielle (Sobíšek *et al.*, 1993). L'évaporation forte est favorisée par l'importance de la durée d'insolation.

Les régions d'extension des chernozems reçoivent une pluviométrie annuelle entre 250 et 600 mm. La distribution des précipitations pendant l'année est caractérisée par la prépondérance des pluies d'été. Nous pouvons observer sur les climatogrammes des zones concernées (fig. 2.4) que le maximum est normalement observé en juin et juillet. L'origine des précipitations estivales est convective. Ceci implique qu'il s'agit de précipitations de type averses ou orages intenses, en général très locaux et courts, qui ne sont donc pas efficaces pour la végétation. En revanche, l'hiver est une saison de précipitations faibles, qui tombent sous forme neigeuse. La faiblesse des précipitations implique que l'épaisseur de la couverture neigeuse est réduite. En conséquence de l'ensemble de ces caractéristiques, ces régions sont souvent affectées par des sécheresses intenses et persistantes.

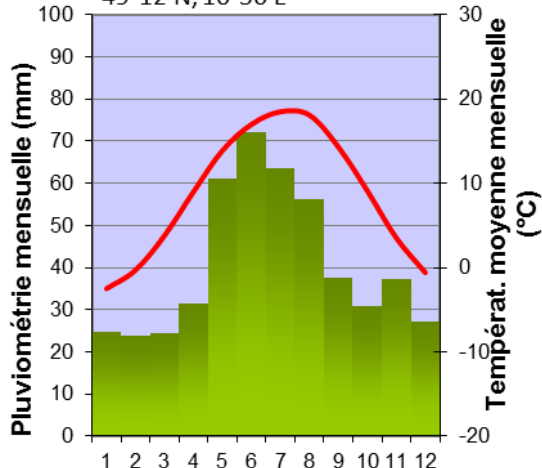
Magdeburg (alt. 76 m) Températ. an. 8,7 °C
 52°07'N, 11°37'E Pluviom. an. 494



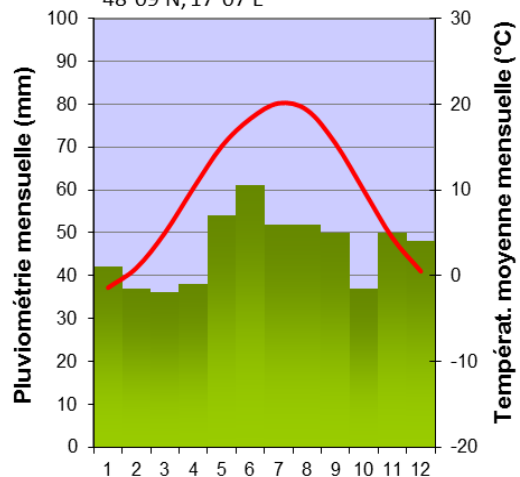
Doksany (alt. 158 m) Températ. an. 8,5 °C
 50°28'N, 14°09'E Pluviom. an. 456



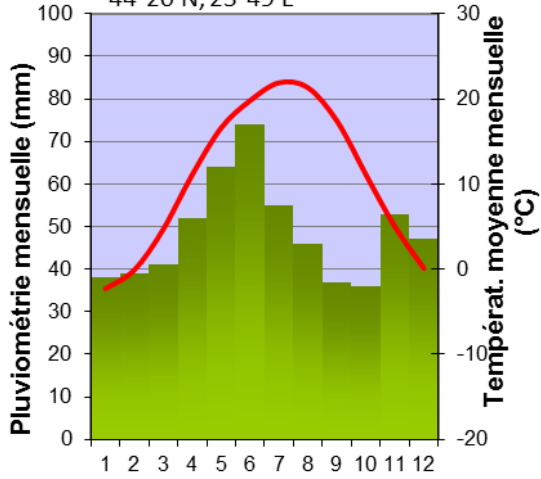
Brno (alt. 241 m) Températ. an. 8,7 °C
 49°12'N, 16°36'E Pluviom. an. 490,3



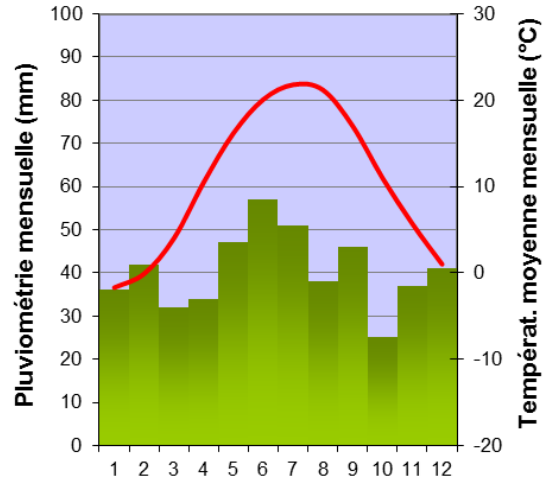
Bratislava (alt. 131 m) Températ. an. 9,8 °C
 48°09'N, 17°07'E Pluviom. an. 557 mm



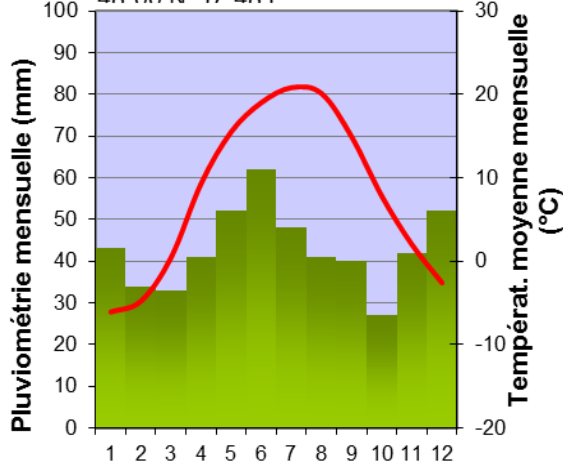
Craiova (alt. 192 m) Températ. an. 10,6 °C
44°20'N, 23°49'E



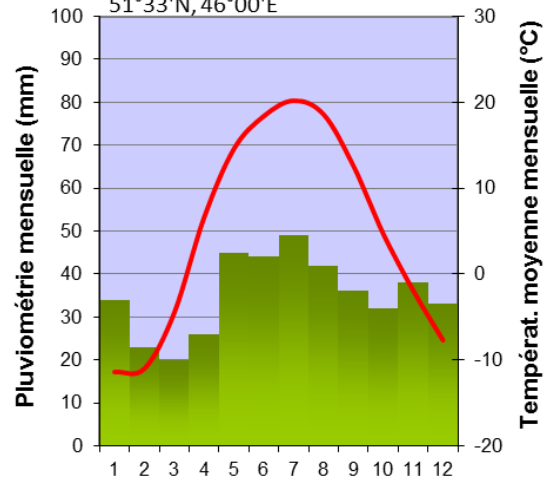
Izmail (alt. 30 m) Températ. an. 10,6 °C
45°20'N, Pluviom. an. 486 mm



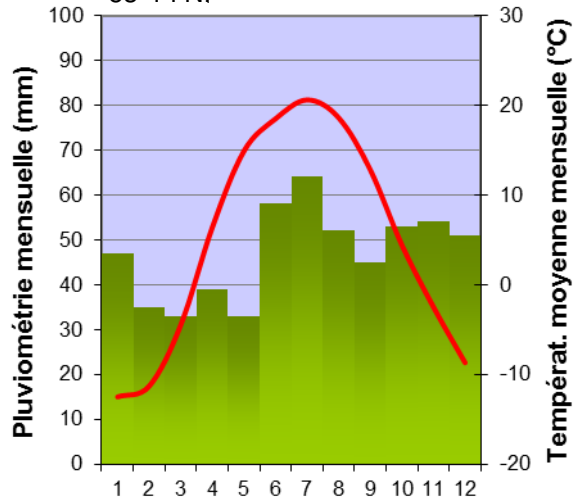
Doneck (alt. 225 m) Températ. an. 8,0 °C
48°00'N 37°48'E Pluviom. an. 515 mm



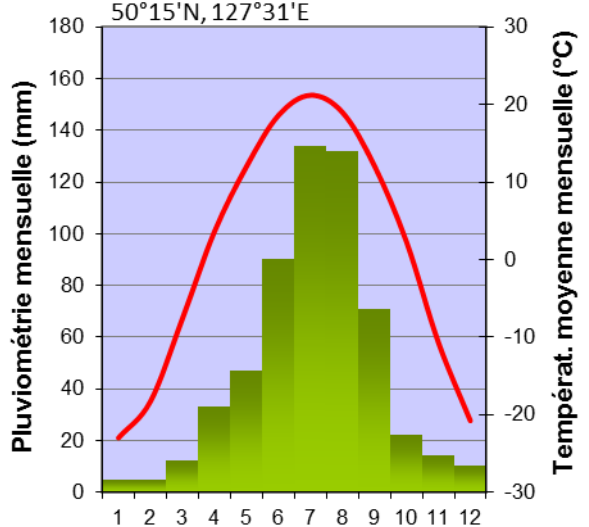
Saratow (alt. 156 m) Températ. an. 4,9 °C
51°33'N, 46°00'E Pluviom. an. 422 mm



Samara (alt. 40 m) Températ. an. 4,7 °C
53°14'N, Pluviom. an. 563 mm



Blagovescens (alt. 132 m) Températ. an. 0,7 °C
50°15'N, 127°31'E Pluviom. an. 573 mm



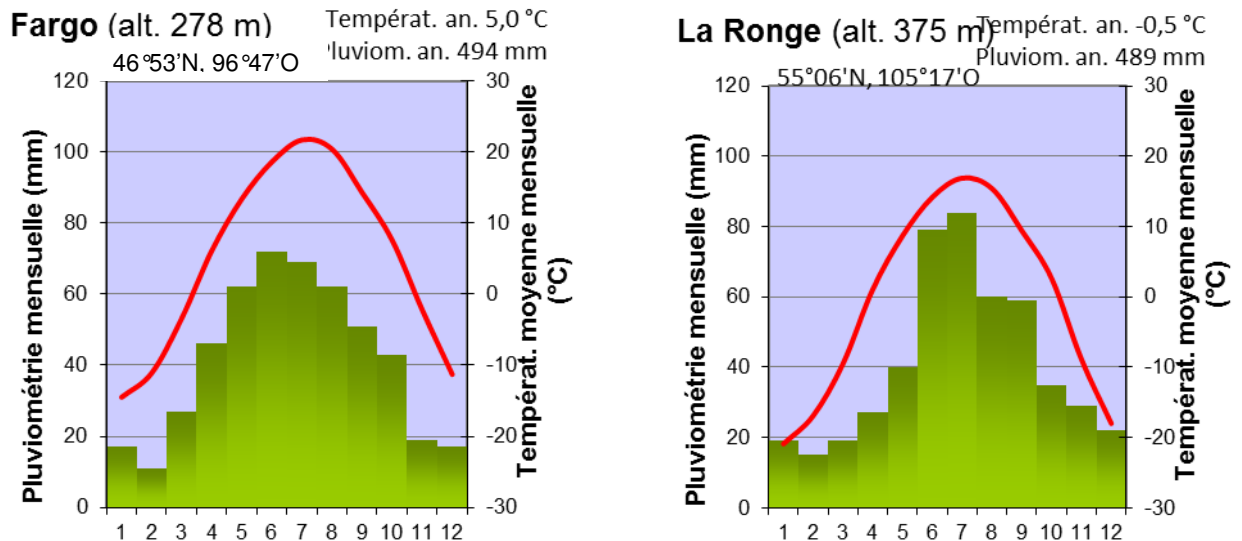


Figure 2.4. Climatogrammes des zones de chernozems : Magdeburg (Allemagne), Doksany, Brno (Rép. Tchèque), Bratislava (Slovaquie), Craiova (Roumanie) se trouvent dans les zones des chernozems d'Europe Centrale, tandis que Izmail, Donetsk (Doneck) (Ukraine), Saratow, Samara (Russie, partie européenne) sont en Europe de l'Est, et Blagovescens (Russie – partie asiatique) en Sibérie de l'Est. Fargo (USA) et La Ronge (Canada) se trouvent dans la zone d'extension des chernozems en Amérique du Nord. L'ensemble des climatogrammes nous permet d'observer des caractéristiques communes à ces zones : l'amplitude thermique, les températures négatives hivernales, la pluviométrie annuelle entre 450 et 600mm avec le maximum en été (source : www.klimadiagramme.de).

La distribution annuelle des températures permet d'affirmer que les chernozems se trouvent dans les régions de continentalité thermique (Sobicek *et al.*, 1993). Les températures atmosphériques des zones d'extension des chernozems à l'intérieur des grandes zones continentales de l'Eurasie et l'Amérique du Nord sont caractérisées par des moyennes hivernales négatives (Bridges, 1970). Dans ces régions, les températures du mois le plus froid peuvent descendre jusqu'à -28°C (Aderichin *et al.*, 1964 in Němeček *et al.*, 1990) ; en revanche, en Europe Centrale, les températures moyennes de janvier, mois le plus froid, ne descendent pas sous -4°C (tabl. 2.1). En Europe Centrale, nous pouvons observer que l'amplitude thermique des moyennes mensuelles n'atteint que $17,9^{\circ}\text{C}$ à Magdeburg en Allemagne, 21°C à Brno en République Tchèque ou $21,1^{\circ}\text{C}$ en Hongrie. En revanche, dans les grandes zones continentales, les amplitudes sont bien mieux exprimées : à Donetsk en Ukraine, l'amplitude monte à 26°C ; elle est de $31,6^{\circ}\text{C}$ à Saratow en Russie, et de $36,2^{\circ}\text{C}$ à Fargo aux Etats-Unis. Les températures en été atteignent 19 à 20°C .

Le nombre de jours de gel est moins important : en Europe Centrale. Par exemple, dans les régions d'extensions des chernozems en République Tchèque, il varie entre 120 et 140 jours (Tolasz *et al.*, 2007). L'hiver est caractérisé par des périodes courtes de gel fort qui font que le sol peut geler jusqu'à une profondeur d'au moins 40 à 60 cm. La plus grande épaisseur de gel en République Tchèque a été enregistrée en 1963 à Doksany, où le chernozem a gelé jusqu'à la profondeur d'un mètre (Tolasz *et al.*, 2007). Le gel massif du sol est amplifié par l'absence de couverture neigeuse et la végétation, qui normalement protège le sol contre l'air froid.

Régions de chernozems en :	Température moyenne annuelle (°C)	Température moyenne du mois le plus froid (°C)	Pluviométrie annuelle (mm)	Références
Autriche (nord-est)	9,5 à 10°C	-2 à 0°C	400-600	Harlfinger et Knees, 1999 in Nestroy, 2007
République Tchèque	8 à 10°C	-2 à 0°C	400-600	Tolasz <i>et al.</i> , 2007
Slovaquie	9 à 11°C	-3 à 0°C	450-600	Atlas krajiny SR, 2002
Hongrie	9 à 12°C	-4 à 0°C	500-600	Westermann, 1999
Allemagne	8 à 10°C	-2 à 0°C	250-650	Deutscher Wetterdienst, 2014
Ukraine	8 à 10°C	-4 à -2°C	400-600	Aderichin <i>et al.</i> , 1964 in Němeček <i>et al.</i> 1990
Russie - sud-ouest	4 à 10°C	-9 à -7°C	350-570	Aderichin <i>et al.</i> , 1964 in Němeček <i>et al.</i> 1990
Russie - Sibérie du Sud	-2 à 0°C	-20 à -18°C	250-450	Aderichin <i>et al.</i> , 1964 in Němeček <i>et al.</i> 1990
Russie - Sibérie de l'Est	-3 à -2°C	-28 à -25°C	250-350	Aderichin <i>et al.</i> , 1964 in Němeček <i>et al.</i> 1990
Grandes Prairies (Nord) USA	7 à 11°C	-17 à 0°C	250-650	NOAA National Weather Service, 2014

Tableau 2.1. Principales caractéristiques climatiques actuelles dans les grandes zones de chernozems.

2.3. La couverture végétale des chernozems

2.3.1. Introduction

Le chernozem est un sol très apprécié pour sa grande fertilité (FAO/ISRIC/ISSS, 1998). Il est utilisé pour la production de plantes exigeantes comme le blé, le maïs (figure 2.5), le houblon, la betterave à sucre, le tournesol, le chanvre, le lin, le sarrasin, les haricots, des fruits et divers légumes. La viticulture est également développée dans la zone de chernozems, notamment en Moravie du Sud (Tchéquie). Pareillement, de nombreux chernozems sont exploités comme pâturage en Ukraine ou en Russie. En fait, les zones de chernozems encore occupées par une végétation entièrement naturelle (i.e. la dynamique de la végétation est purement naturelle) ou semi-naturelle (la dynamique de la végétation est gérée par l'homme) sont très rares (Ložek, 2011). Le biotope de steppes sur chernozems est menacé soit par l'extension des terres agricoles, soit par celle de végétations arbustives, qui témoignent alors du caractère secondaire des steppes (Ložek, 2011 ; Virágh *et al.*, pas daté). Nous détaillerons ci-dessous les aspects concernant des types de végétations naturels ou semi-naturels.



Figure 2.5. Un exemple d'exploitation agricole de chernozems : champ de maïs en Hongrie. Photo : D. Schwartz.

2.3.2. Les chernozems sous steppe

La végétation de steppe n'existe quasiment plus en Europe Centrale sous sa forme naturelle (Ložek, 2011). En effet, depuis le Néolithique, les régions de chernozems ont été transformées en terres agricoles ou en pâturages. Des biotopes steppiques résiduels existent toutefois sous forme d'îlots dans les paysages (Dúbravková *et al.*, 2010), et sont souvent protégés par la loi. L'isolement diminue leur diversité floristique (Viragh, non daté). En République tchèque, les chernozems sous steppes sont en fait situés des faciès à roche sub-affleurante, ce qui rend le labour difficile (Ložek, 2011). Dans ce pays et en Allemagne, mais aussi en Hongrie et Slovaquie, il s'agit de steppes secondaires (Chytrý *et al.*, 2001 ; Fekete *et al.*, 2000 ; Stanová et Valachovič, 2002 ; Viragh *et al.*, 2008). Dans la zone transylvaine, à l'intérieur du bassin des Carpates (Hongrie et Roumanie), se trouvent également des steppes à caractère naturel (Illyés *et al.*, 2007 ; Zolyomi et Fekete, 1994 ; Horváth, 2010 ; Fekete *et al.*, 2000 ; Molnár et Biró, 1996). Sur quelques sites, la végétation steppique s'établit sur un chernozem érodé (Grulich *et al.*, 2006).

La végétation naturelle potentielle (climax) des steppes secondaires sur chernozem est représentée par des chênaies ou chênaies-frênaies thermophiles, plus rarement par des hêtraies (Grulich *et al.*, 2006 ; Chytrý *et al.*, 2010). La forêt primaire a été défrichée ou brûlée (Stanová et Valachovič, 2002).

Qu'elles soient naturelles ou secondaires, les steppes sur chernozems se présentent sous la forme de pelouses thermophiles ou xérophiles (Chytrý *et al.*, 2010). Selon la disponibilité en eau, on trouve dans les milieux secs des herbes qui poussent en touffe

(*Stipa* spp., *Festuca* spp.), et dans les milieux plus humides des espèces à feuilles larges comme *Brachypodium pinnatum*. La végétation de steppe est riche en espèces herbacées et en arbustes bas. La présence d'espèces continentales et méditerranéennes est caractéristique. Selon la carte des biotopes de la République Tchèque (Buček et Lacina, 2006 ; Chytrý *et al.*, 2010) et de Slovaquie (Stanová et Valachovic, 2002), les steppes développées sur les chernozems sur loess se classent dans les catégories T3.3 des *pelouses sèches* à [graminées à] *feuilles étroites* caractérisées par l'abondance de *Stipa* spp. et T3.3.B des *pelouses steppiques pannoniques sur loess* caractérisées par *Stipa capillata* ou *S. pulcherrima*. Ces catégories répondent à la classe 6210 Semi-natural dry grasslands and scrubland facies on calcareous substrates Festuco – Brometalia de la nomenclature Natura 2000. Ces biotopes sont riches en espèces de Poacées, carex, joncs avec des fleurs éphémères au printemps. La liste des espèces les plus communes dans les steppes sur chernozems est précisée dans le tableau en Annexe 1.

Les chernozems de la zone pannonique, région phytogéographique centrée sur la Hongrie, se trouvent dans des conditions climatiques légèrement différentes de celles des chernozems tchèques et slovaques. Le climat est sub-continental, au carrefour de la zone d'influence des climats atlantique, continental et subméditerranéen (Wiesbauer *et al.*, sans date). La flore de steppe de Hongrie se divise dans trois catégories (Magyari *et al.*, 2010 ; Wiesbauer, sans date) : végétation méditerranéenne et subméditerranéenne au sud (en été sec et chaud, précipitations maximales au printemps et à l'automne, hiver tempéré) et végétation continentale (précipitations maximales en début été, et hivers froids) à l'est, similaire à la végétation de steppe de l'Europe de l'Est. En conséquence, la richesse en espèces dans les steppes hongroises est importante. Le tableau en Annexe 1 présente les espèces floristiques caractéristiques des chernozems sous steppes de Hongrie.

Il n'existe que six réserves naturelles où la steppe de l'Europe de l'Est est protégée (dont les réserves V.V. Alekhin à Kursk en Russie et Mikhajovska Celina en Ukraine). D'après S. Sedov (communication personnelle), la question de la naturalité de la steppe se pose dans les steppes de l'Europe de l'Est, en Ukraine et au sud-ouest de la Russie alors que ces formations sont généralement considérées comme zonales. La steppe en Europe de l'Est est principalement composée du pâturin bulbeux *Poa bulbosa*, de la féтуque *Festuca sulcata* (syn. *Festuca rupicola*), des stipes *Stipa capillata*, *S. lessingiana*, de la Koelerie grêle *Koeleria gracilis*, des chiendents *Agropyron repens* et *A. racemosum*, du brome inerme *Bromus inermis* (Suttie *et al.*, 2005). Les steppes sont influencées par leur utilisation qui consiste en pâturage, fourrage, brûlis et conversion en terrain labouré. La composition des espèces dépend du degré d'intensité de ces différents facteurs.

2.3.3. Les chernozems sous forêts

Malgré la perception générale que le chernozem est un sol de steppe, il y a des endroits où l'on trouve de la végétation forestière sur ces sols ; ainsi, en Russie (Ehwald *et al.*, 1999 ; Gorbunov, 1974), en République Tchèque (Chytrý *et al.*, 2010 ; Vysloužilová *et al.*, 2014), Slovaquie (Hrabovský *et al.*, 2010 ; Stanová et Valachovič, 2002), Autriche (Franz ; 1955) et Hongrie (Fekete *et al.*, 2000 ; T. Novak, communication personnelle).

Selon le Catalogue des biotopes de la République Tchèque (Chytrý *et al.*, 2010) et selon le Catalogue des biotopes de la Slovaquie (Stanová et Valachovič, 2002), les forêts se classent comme des chênaies thermophiles (L6 – de la classification tchèque, Ls3.2. de la classification slovaque, qui répondent à la classe 9110 de Natura 2000 : Euro-Siberian steppic woods with *Quercus* spp.). En République Tchèque, les forêts sur chernozems se trouvent au sud de la Moravie. Elles sont situées dans une zone de chernozems exploités depuis le Néolithique (Pavlů, 2007). L'âge des forêts est difficile à estimer, mais pour certaines, il y a des preuves qu'elles sont en place depuis au moins 700 ans (Szabó, 2010 ; Szabo, communication personnelle). La végétation potentielle consiste en une chênaie sur loess composée de *Quercus petraea*, *Q. pubescens*, *Q. robur* (Chytrý *et al.*, 2010). Mais la végétation est fortement influencée par les activités humaines qui modifient la composition floristique. La strate arbustive se compose d'*Acer campestre*, *Cornus sanguinea*, *Ligustrum vulgare*. La strate herbacée est bien représentée. Dans la plupart des peuplements se trouvent des espèces comme *Brachypodium pinnatum*, *Poa nemoralis*, *Melica picta* (Poacées), *Carex michelii*, *C. montana* (Cypéracées), *Dictamnus albus*, *Mellitis melissophyllum*, *Galium sylvaticum*, *Polygonatum multiflorum*, *Betonica officinalis*, *Convallaria variegata*. La strate de mousse n'est développée que sporadiquement. La présence d'une strate herbacée développée est liée à une utilisation traditionnelle, qui consistait en un pâturage forestier, accompagné d'un renouvellement des arbres à partir des souches et de l'enlèvement des feuilles mortes. L'arrêt de ce système menace cet équilibre d'origine anthropique. Le biotope de chênaie sur loess est souvent dénaturé par l'expansion de charmes, tilleuls, frênes qui ombragent plus que les chênes. Par conséquent, les espèces herbacées héliophiles sont fragilisées et remplacées par des espèces plus adaptables comme *Impatiens parviflora* (Chytrý *et al.*, 2010). Par ailleurs, les forêts sur loess sont aussi menacées par la transformation en forêts artificialisées avec des espèces introduites, surtout *Pinus* spp. et *Robinia pseudoaccacia* (Szabó, 2010 ; Chytrý *et al.*, 2010)

En Moravie et Slovaquie, les chênaies loessiques sont en limite nord-occidentale de leur aire de répartition. Les forêts de ce type se trouvent en Moravie du Sud autour de Hustopeče, Klobouky u Brna, Milovice, sur des fragments de terrasses de Svatka et en aval de Jihlava (Chytrý *et al.*, 2010). En Slovaquie, les fragments de ces chênaies apparaissent dans la réserve naturelle de Dubník (Hrabovský *et al.*, 2010), dans la forêt de Babsky les (Vysloužilová *et al.*, 2014) et celle de Martinský les près de Senec. La zone d'extension naturelle de ces chênaies est considérée comme plus large (Stanová et Valachovič, 2002).

En Europe de l'Est, entre la zone de forêts feuillues et la zone de steppe, se trouve une zone étroite de forêt-steppe (Suttie *et al.*, 2005). Cette zone a une pluviométrie plus élevée (460-560 mm) que la steppe située au sud. Le caractère de la zone de forêt -steppe ressemble à celui des îles de forêt isolées dans des paysages agricoles. En général les forêts-steppe se trouvent dans des dépressions des régions vallonnées. Les forêts sont composées d'espèces feuillues variées, avec dominance de chênes *Quercus* spp. Les autres espèces présentes sont le bouleau *Betula* sp., et le peuplier tremble *Populus tremula* ; dans les clairières se trouvent des fruitiers sauvages comme le prunellier *Prunus spinosa*, le pommier sauvage *Malus sylvestris*, le poirier *Pyrus communis* et le cerisier à grappes *Padus racemosa*.

2.3.4. Stabilité des steppes

La présence de végétations aussi variées que la steppe ou la forêt, et le fait que certaines steppes sont indubitablement d'origine secondaire amène à se poser la question de la stabilité de la végétation steppique sur chernozem. Suttie *et al.* (2005) affirment que toutes les prairies, steppes y comprises, sont le résultat d'interaction entre climat, sol et conditions créées par les animaux et l'homme. La physiognomie et la composition en espèces font l'objet de fluctuations entre végétation steppique et forestière.

Dans le cadre de recherches sur la naturalité des steppes, la station de réserve biosphérique V.V. Alekhin de Kursk a lancé une expérience : la réserve est divisée en quatre ensembles expérimentaux, avec quatre situations testées : chernozem en dynamique naturelle depuis les années 1960, chernozem avec une végétation fauchée régulièrement (fig. 2.6), chernozem pâturé et chernozem labouré deux fois par an sans culture (sol nu). L'expérience montre que la steppe qui suit une dynamique naturelle est en cours de boisement (fig. 2.6). On constate également que le pâturage même n'est pas suffisant pour tenir le caractère de la steppe : les arbustes arrivent à pousser aussi sur le chernozem pâturé. La tendance au boisement peut également être observée dans les réserves steppiques qui ne sont pas aménagées.



Figure 2.6. Les parcelles expérimentales de la réserve V.V. Alekhin en Russie : à gauche la parcelle en dynamique naturelle, à droite la parcelle fauchée régulièrement. Photos : B. Vysloužilová.

Clairement, les steppes semblent n'être que des végétations semi-naturelles, même dans les conditions climatiques où elles sont considérées comme les biomes (climat continental). L'influence du pâturage est primordiale pour maintenir un couvert herbacé dense et empêcher l'envahissement par les ligneux.

Après avoir étudié les caractères de la végétation qui couvre les chernozems actuellement, il faut se poser la question de savoir quel est réellement le contexte paléoécologique de la formation de ces sols, ce que nous ferons en analysant les données paléoenvironnementales de la littérature.

2.4. Les aspects paléoenvironnementaux

2.4.1. Les conditions générales

L'aire d'extension des chernozems en Europe au Quaternaire a été différente de celle d'aujourd'hui. Ainsi, au Pléistocène, les conditions écologiques favorables à la formation de ce type de sol se sont produites lors des périodes de réchauffement, à savoir les interstades ou à la transition des glaciaires et interglaciaires, sur loess, dans des zones particulières (Němeček *et al.*, 1990 ; Ložek, 2004). De même, on connaît à l'Holocène, des séquences stratigraphiques avec des chernozems enfouis sous des colluvions, et cela parfois dans des zones où aujourd'hui la couverture pédologique actuelle n'est pas formée de chernozems (Ložek, 1974 ; Dreibrodt *et al.*, 2013 ; Vysloužilová *et al.*, soumis).

La formation des chernozems au Pléistocène est liée à l'existence d'une vaste couverture loessique en marge périglaciaire des glaciers continentaux (Ložek, 2004). La couverture loessique s'étendait à cette époque de la Normandie, sur la côte atlantique française, jusqu'au bassin de la Volga en Russie. Dans les interstades, Ložek (2004) suppose que la répartition des chernozems de Bohême et de Moravie correspond approximativement à leur répartition actuelle. La preuve de cette large répartition des chernozems au Pléistocène est la conservation de chernozems dans des séries de loess avec des sols fossilisés. Ces séries sont appelées pédocomplexes, PK. (Němeček *et al.*, 1990 ; Haesaerts, 1985 ; Rutter *et al.*, 2003 ; Frechen, 1997 ; Pésczi, 1982 ; Klíma *et al.*, 1961). Les chernozems ont été identifiés dans de nombreux PK dans les pays d'Europe de l'Ouest et d'Europe Centrale et Orientale. On citera par exemple la Belgique (Haesaerts, 1985), l'Allemagne (Boenigk et Frechen, 2001), la République Tchèque et la Slovaquie (Frechen, 1997 ; Klíma *et al.*, 1961 ; Němeček, 1990), le bassin du Danube en Autriche (Sprafke *et al.*, 2014), la Hongrie (Pésczi, 1982), la Roumanie et la Bulgarie (Haesaerts, 1985) ou encore la Plaine de l'Europe Orientale en Ukraine (Gerasimenko, 2006 ; Fedorowicz, 2013). L'exemple du PK de Zeměchy en République Tchèque, étudié dans ce travail, est présenté dans la figure 2.7. En France, un paléosol identifié comme un ranker à Eguisheim dans le Haut-Rhin (Blanck *et al.*, 1971), semble en fait être un chernozem. Plusieurs paléosols de ce type ont aussi été identifiés lors des travaux de construction de la ligne TGV dans le Bas-Rhin (Schneider et Ertlen, 2010).

Les chernozems se forment dans les périodes de transition entre les périodes glaciaires et interglaciaires, au début de l'interglaciaire, dans les conditions climatiques favorables au développement de la végétation steppique. Le chernozem présente un des premiers stades d'une chronoséquence de développement des sols sur loess (Němeček *et al.*, 1990 ; Ložek, 2004). Lors du réchauffement, le sol peu évolué loessique prend de l'épaisseur, se développe vers une rendzine/ regosol puis vers un chernozem épais. Le cycle climatique continue par un climat plus chaud et humide, responsable de la mise en place d'une couverture forestière. Le sol commence à se décarbonater et s'acidifier, ce qui initie le lessivage des argiles et la formation d'un luvisol. Le degré de la dégradation est déterminé par la durée et l'intensité du climat chaud. Ainsi, dans les pédocomplexes, on peut trouver

des paléo-chernozems et des paléo-luvisols, comme c'est le cas à Zeměchy (Rép. Tchèque). Dans cette localité, le luvisol représente le stade atteint par la pédogenèse à l'interglaciaire Riss-Würm, tandis que les trois chernozems superposés au-dessus de ce paléosol se sont formés pendant des interstades, plus courts que l'interglaciaire (Němeček *et al.*, 1990 ; Frechen *et al.*, 1999 ; Cílek, 1996).



Figure 2.7. La série loessique de Zeměchy (Rép. Tchèque), avec des paléochernozems bien visibles. Photos : D. Ertlen.

A l'Holocène, qui correspond d'un point de vue géologique à un interglaciaire, la pédogénèse et la dégradation des chernozems se produisent de façon similaire à celles des interglaciaires du Pléistocène (Němeček *et al.*, 1990). En fonction des conditions climatiques de l'Holocène, les chernozems d'Europe Centrale devraient se dégrader en luvisol (Lorz et Saile, 2011) ou en phaeozem/phaeozem gleyic (Scheffer et Meyer, 1963). La répartition de ces types de sols et leurs relations avec les chernozems sont discutées dans le chapitre 3 (voir en particulier fig. 3.2). Néanmoins, les chernozems fonctionnels sont encore très répandus en Europe Centrale de nos jours. Le mécanisme qui a favorisé leur préservation, malgré l'existence de conditions climatiques a priori plus favorables à leur dégradation en luvisols, n'est pas clair. Plusieurs auteurs attribuent ce fait à l'action des premiers agriculteurs qui sont arrivés en Europe Centrale il y a environ 7 000 ans (Eckmeier *et al.*, 2007 ; Lorz et Saile, 2011 ; Fischer-Zujkov, 2000 ; Ložek, 1974, 2004 ; Scheffer et Meyer, 1963). Ceux-ci auraient interrompu l'évolution naturelle. La persistance des chernozems serait due au fait que l'agriculture, la culture de céréales en particulier, a simulé les conditions de la steppe. La mise en place de cultures anciennes aurait bloqué l'avancée de

la forêt sur les chernozems au cours de l'Holocène, et donc leur dégradation. D'après Němeček *et al.* (1990), l'évolution de chernozem devient rétrograde à la mi- Holocène, tout comme l'évolution de la végétation en Europe Centrale : après le début de l'évolution des chernozems vers des luvisols, les conditions artificielles de végétation « steppique », recréées dès le début de l'agriculture (à savoir la culture, celle des céréales en particulier) conditionne le maintien des caractères chernozémiques des sols, voire provoque une évolution rétrograde vers la formation des chernozems.

Pour toutes ces raisons, les chernozems fonctionnels d'Europe Centrale sont définis comme des sols reliques qui se sont formés dans un climat continental sous une végétation de steppe (Leser et Maqsuid, 1975 ; Ložek, 1973 ; Němeček *et al.*, 1990 ; Lorz et Saile, 2011). Cependant, dans cette zone, le climat continental s'est établi dès le Tardiglaciaire. Il n'existe toutefois aucune preuve de la présence de chernozems en Europe centrale à cette époque (Eckmeier *et al.*, 2007). Les autres auteurs datent la formation des chernozems au Préboréal et au Boréal (Ložek, 2007 ; Lorz et Saile, 2011). La première preuve de l'existence de chernozems bien développés à l'Holocène date de l'Holocène inférieur, période où régnait déjà en Europe Centrale un climat plus chaud et plus humide (Eckmeier *et al.*, 2007). Pour sa part Laatch (1934, *in* Eckmeier, 2007) suppose que les chernozems se sont encore formés entre le Boréal et le Sub-Boréal, surtout à l'Atlantique. Son argument principal était que les conditions climatiques plus clémentes auraient donné suffisamment de biomasse végétale pour former les horizons molliques profonds pendant les printemps chauds et humides alternant avec des étés chauds et secs et des hivers froids, peu favorables à la décomposition des litières.

Les conditions de la pédogenèse ont changé en Europe Centrale à l'Holocène moyen, et depuis, la formation de chernozems ne serait plus possible (Ložek, 2007). Plusieurs types d'archives naturalistes ont permis de reconstituer les conditions qui ont prévalu à l'Holocène dans les régions concernées par la présence de chernozems. Ce sont ces données qui vont être détaillées maintenant.

2.4.2. Les données palynologiques

Les reconstitutions palynologiques considèrent que le début de la reforestation de l'Europe Centrale est survenu à la fin du Tardiglaciaire. Les données paléobotaniques prouvent que des forêts mixtes étaient présentes à l'Atlantique à basses altitudes (Svobodová, 1997; Jankovská, 1994, Havinga, 1972). La synthèse des données palynologiques généralisée pour la République Tchèque montre la dominance des arbres sur la végétation ouverte dès 6000 cal BC (Gaillard *et al.*, 2010).

Notons que dans les régions de chernozems les données palynologiques sont collectées à partir de sédiments alluviaux, de lacs ou des tourbières qui se trouvent à proximité (Havinga, 1972 ; Svobodová, 1997). Il n'y a pas de données directes à partir du sol lui-même, parce que les sols biologiquement actifs n'ont pas la capacité de conserver les pollens. Il faut aussi souligner que la distribution des chernozems en Europe Centrale a un caractère de mosaïques de quelques km² à quelques centaines de km² (Eckmeier, 2007a). Les chernozems sont présents sous forme d'îlots dans la couverture pédologique. Il n'est

donc pas possible de distinguer la couverture végétale des chernozems de celle des autres sols sur la base de l'analyse palynologique. Celle-ci reflète la végétation d'une zone bien plus large que ces seuls sols.

L'analyse de pollen publiée sur le site de Zahájí en Bohême Centrale (Pokorný , 2005) provient des dépôts d'un petit cours d'eau situé entre des plateaux loessiques. Cet enregistrement montre que la végétation environnante a subi un impact anthropique très intense depuis le Néolithique ancien (civilisation dite Rubanée, ou LBK). Cette influence se reflète de façon permanente par une grande proportion de Poacées, et par la présence constante de pollens indicateurs de l'activité humaine, comme ceux de *Plantago lanceolata* et *P. media* (plantains) ou *Calluna vulgaris* (callune). En Allemagne Centrale, les zones occupées par les chernozems sont couvertes de forêts à partir du Préboréal (ca. 9500 BP). La présence de steppes à l'Atlantique est peu probable (Litt, 1992). De même, la plaine pannonique d'Autriche et de Moravie du sud était couverte par des forêts claires dès le Boréal (Havinga, 1972 ; Svobodová, 1997). La Grande Plaine de Hongrie a été couverte par la steppe boisée à feuilles caduques pendant tout l'Holocène. Ce n'est qu'après 3100 BC que les steppes pures se seraient étendues suite aux activités humaines (Magyari *et al.*, 2010).

Selon ces résultats, on voit que des chernozems étaient présents dans des zones forestières. Toutefois, comme nous l'avons déjà signalé, les chernozems sont des îlots dans la couverture pédologique, et les diagrammes palynologiques intègrent l'ensemble de l'espace, sans pouvoir discriminer le signal paléobotanique des chernozems de ceux des autres sols.

2.4.3. Les données paléozoologiques

Les mollusques se conservent bien dans les chernozems, sols carbonatés. De plus, ils se déplacent peu au cours de leur vie, quelques dizaines de mètres au maximum. La malacofaune est donc un paléo-indicateur local qui peut compléter l'approche palynologique en donnant des indications sur l'évolution de la végétation stationnelle (Eckmeier *et al.*, 2007). La malacofaune est une donnée paléoenvironnementale bien documentée en République Tchèque et en Slovaquie. Les données malacologiques montrent que les chernozems ont été couverts par une végétation de steppe en continu jusqu'à l'arrivée des premiers agriculteurs (Eckmeier *et al.*, 2007 ; Ložek, 2004), et cela dès le début de l'Holocène (Ložek, 2011). Des résultats du même type sont obtenus par Ehwald *et al.* (1999) en Allemagne centrale.

Par ailleurs, les krotovinas, caractéristiques des chernozems, sont considérées comme étant un témoignage d'environnement steppique (Pietch, 2013). En effet, les rongeurs sont très abondants dans les milieux ouverts, où ils creusent des galeries très profondément dans le sol. On citera par exemple le hamster d'Europe *Cricetus cricetus*, le souslik d'Europe *Spermophilus citellus*, le lemming de steppe *Lagurus lagurus*. Néanmoins ces espèces peuvent également habiter des milieux ouverts par l'activité humaine comme les champs ou des pâturages (Ehwald *et al.*, 1999).

Il faut également citer ici le point de vue proposé par Vera (2000), qui se pose la question de la persistance de steppes en Europe à l'Holocène. Il suppose que des steppes ont été maintenues par le pâturage des grands herbivores, formant un paysage ouvert au sein des forêts vierges de l'Holocène. Vera a proposé un modèle dynamique de paysage composé d'une mosaïque de bosquets, forêts fermées et parcs ouverts. Les grands herbivores auraient régressé lentement avec la progression de la forêt comme, par exemple, le cheval sauvage entre 9100 et 7500 BP (Sommer *et al.*, 2011). Plus tard, lors des défrichements néolithiques, l'agriculture a créé de nouveaux espaces ouverts qui auraient stoppé leur déclin liée à la perte d'habitat. Selon toute vraisemblance, la raréfaction des gros herbivores est liée à la chasse.

2.4.4. Les données pédoanthracologiques

Des informations sur l'histoire de la végétation peuvent aussi être obtenues à partir de l'analyse de charbons de bois conservés dans les sols (Figueiral et Mosbrugger, 2000). Par rapport à l'analyse palynologique, les données anthracologiques représentent un signal local de la végétation car les charbons ne sont pas, ou peu, transportés. En revanche, ils sont dus à des événements très discontinus dans le temps et ont donc une capacité limitée à enregistrer la dynamique de la végétation.

Les analyses anthracologiques de chernozems sont assez rares et proviennent de la recherche archéologique sur des stations du Néolithique (Beneš, 2008 ; Kreuz, 2008 ; Moskal del Hoyo, 2013). Elles peuvent déterminer la composition de la végétation à proximité des sites et le rôle de l'homme dans le processus de déforestation sur le paysage environnant. Pour le territoire de la République tchèque, l'analyse de charbons de bois la plus complète a été réalisée à proximité de la station Néolithique (LBK) de Bylany (Beneš, 2008). Tous les charbons datés sont à rapporter au Néolithique. Le résultat de l'identification donne une indication relative de la couverture forestière à l'Atlantique, période chaude et relativement humide : le chêne (*Quercus*; 78,3%) est largement dominant devant l'orme (*Ulmus*, 2,5%), le frêne *Fraxinus*, le noisetier *Corylus* et la tilleul *Tilia*, saule *Salix*, le pin *Pinus* et de genévriers *Juniperus* (Beneš, 2008). On ne peut toutefois faire un lien direct entre l'abondance des charbons et la proportion d'espèces dans le couvert végétal, en raison de possibles biais taphonomiques (conservation préférentielle des charbons ; fragmentation différentielle selon les espèces...).

De la forêt feuillue a aussi été relevée dans d'autres régions à couverture pédologique de chernozems, autour de sites d'habitat des premiers agriculteurs. Des sites LBK analysés en Allemagne (Kreuz, 2007), montrent que les espèces feuillues prédominent : les chênes *Quercus* sp. (très majoritaires), le frêne commun *Fraxinus excelsior*, des Maloideae non identifiables, le noisetier *Corylus avellana*, le pin *Pinus* cf. *sylvestris*, un prunier *Prunus* cf. *insititia/spinosa*, un cerisier *Prunus* cf. *avium/padus*, un prunier non identifiable *Prunus* sp., un érable *Acer* sp., l'aulne *Alnus* cf. *glutinosa*, le bouleau *Betula pendula/pubescens*, le cornouiller *Cornus* cf. *sanguinea*, le fusain d'Europe *Euonymus europaeus*, le hêtre *Fagus sylvatica*, le lierre *Hedera helix*, un peuplier *Populus* sp., un peuplier ou saule *Populus/Salix*, le nerprun purgatif *Rhamnus cathartica*, un rosier sp. *Rosa* sp., un orme *Ulmus* sp., le genévrier *Juniperus communis*, l'épicéa *Picea abies*. De même, en Hongrie, les assemblages de charbons de bois provenant de cinq sites Néolithiques de l'est du pays,

dans le bassin des Carpates ont révélé que, dans le voisinage des sites, il y avait principalement des forêts feuillues composées de chênes *Quercus*, orme *Ulmus*, cornouiller *Cornus* et frêne *Fraxinus* (Moskal del Hoyo, 2013).

Les incendies naturels sont rares dans les conditions bioclimatiques de l'Europe Centrale. Les estimations sur la fréquence des incendies naturels dans le passé dans les forêts tempérées varient entre 250-1500 ans (Dreslerová, 2012). En revanche, les recherches archéologiques montrent que le défrichement des forêts par le feu a été pratiqué dès le mésolithique (Dreslerová, 2012).

2.4.5. L'étude des phytolithes et des biomarqueurs moléculaires

En Europe Centrale, le nombre d'études sur les phytolithes conservées dans les chernozems est très faible. Les chernozems fonctionnels étudiés par Pető (2013) en Hongrie démontrent la prédominance de la végétation herbacée. Les études de phytolithes sur des paléochernozems holocènes de Russie ont montré l'occurrence de steppes anciennes suivies par de la forêt-steppe au Sub-boréal et au Sub-atlantique (Khokhlova *et al.*, 2001). Barczy *et al.* (2009) ont utilisé l'analyse de phytolithes et de restes végétaux dans un paléochernozem scellé sous un tumulus en Hongrie. La population de phytolithes a été interprétée comme témoignant d'un sol sous steppe avec présence discrète d'espèces arbustives. Il faut cependant noter que les herbacées sont toujours sur-représentées dans les diagrammes phytolitaires parce que les Poacées, qui sont dominantes dans la végétation de steppe, produisent un nombre très élevé de phytolithes (Piperno, 1988). L'inconvénient des phytolithes est leur faible persistance dans les sols en conséquence de la translocation par la faune (Alexandre *et al.*, 1997; Fishkis *et al.*, 2010) et leur sensibilité élevée à la dissolution (Bartoli et Wilding, 1980).

Les études de biomarqueurs moléculaires pour les reconstructions paléoenvironnementales de chernozems sont très rares aussi. On citera celle d'Andreeva *et al.* (2013) qui affirment, sur la base de nombreux indicateurs dont les n-alcanes que les chernozems à l'Est de lac Baïkal présentent un mélange de matière organique issues d'herbacées mais aussi d'arbres et arbustes.

2.4.6. Les données archéologiques

Le problème principal, qui n'a pas encore trouvé de réponse claire, est la morphologie du couvert végétal au moment de l'arrivée des agriculteurs (Beneš, 2008) et de savoir s'ils ont encore rencontré des paysages ouverts (Ložek, 2004) ou si les espaces étaient caractérisés par la présence de la forêt (Kreuz, 2008). Les premiers agriculteurs du Néolithique ancien (LBK) sont arrivés en Europe Centrale vers 7500 BP. Pour l'essentiel, l'aire occupée par ces populations correspond aux zones loessiques, souvent aux chernozems (Pavlů et Zápotočká, 2000 ; Ložek, 2007 ; Beneš, 2008 ; Demoule *et al.*, 2007). La superposition de la zone d'extension des chernozems et de l'aire d'expansion des cultures LBK en Europe est présentée sur la figure 2.8.

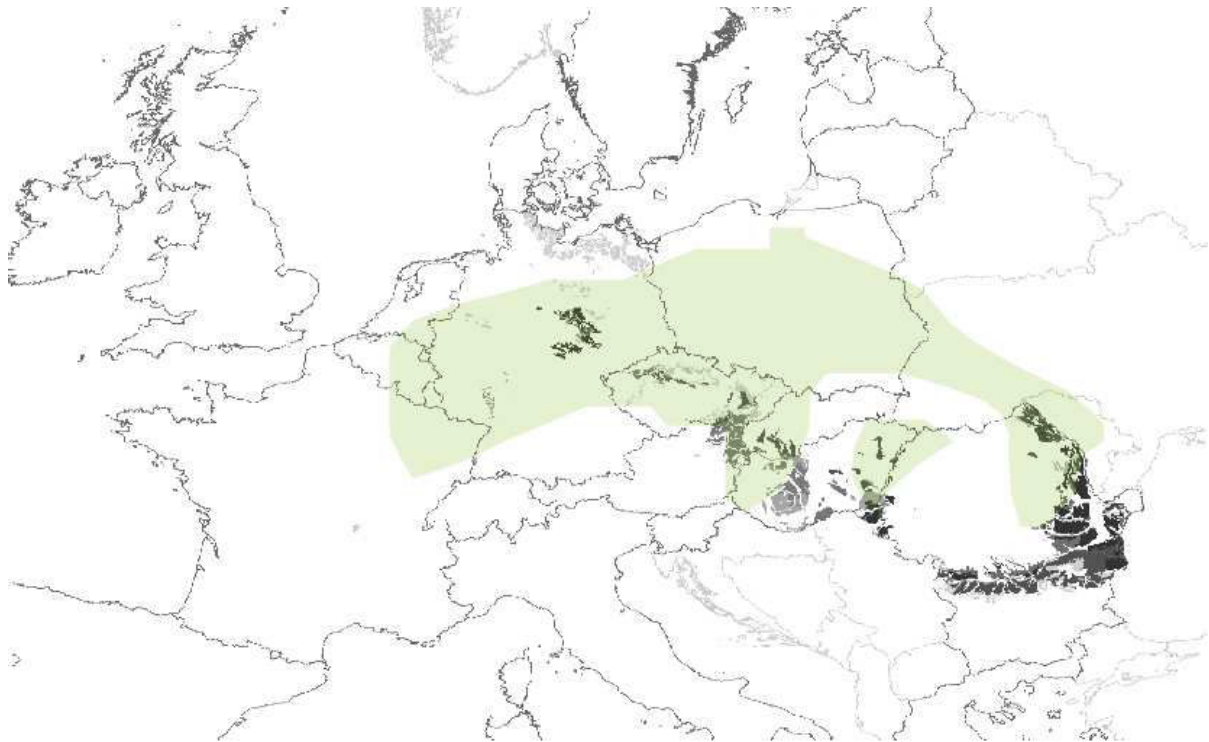


Figure 2.8. La répartition des chernozems (en noir, d'après Toth, 2008,) et des sites LBK (en vert clair, d'après Itan *et al.*, 2009) en Europe.

Le lien privilégié des premiers agriculteurs avec les chernozems est bien connu, mais peut-être trop simpliste. En effet, la figure 2.9, tirée de Dreslerová (2012) montre que les stations LBK sont situées au bord des aires d'extension des chernozems, mais souvent sur les luvisols qui sont plus faciles à travailler, et aussi sur des stagnosols et des cambisols. En Bohême, Rulf (1983) constate que la localisation des sites LBK est liée à la présence de sols plus faciles à cultiver que les chernozems. Rulf (1983) suppose que le lien entre les chernozems et les agriculteurs est devenu plus fort à la fin du Néolithique. Dreslerová (2012) observe également que la concentration des vestiges de peuplement dans les zones de chernozems augmente à l'Enéolithique. D'après Dreslerová (2012) cette tendance est liée au changement climatique vers 4000-3500 BC, période où le climat est devenu plus froid et humide. La population se serait donc concentrée dans les régions les plus chaudes et sèches qui étaient plus facilement habitables. Ces zones correspondent à l'extension actuelle des chernozems en République tchèque (voir chapitre 3.1). Lorz et Saile (2011) signalent que la correspondance entre zones de chernozems et zones d'occupation LBK peut poser question. Un exemple d'étude régionale sur le lien entre populations LBK et sols formées sur loess est présenté sur figure 2.10. Dans cette région au sud de la Basse-Saxe (Allemagne), les LBK ont choisi de préférence des luvisols : seules 5 % des stations LBK sont situées sur chernozems. Ceci dit, la connaissance des types de sols présents à l'époque est très insuffisante (Lorz et Saile, 2011 ; Schwartz *et al.*, soumis).

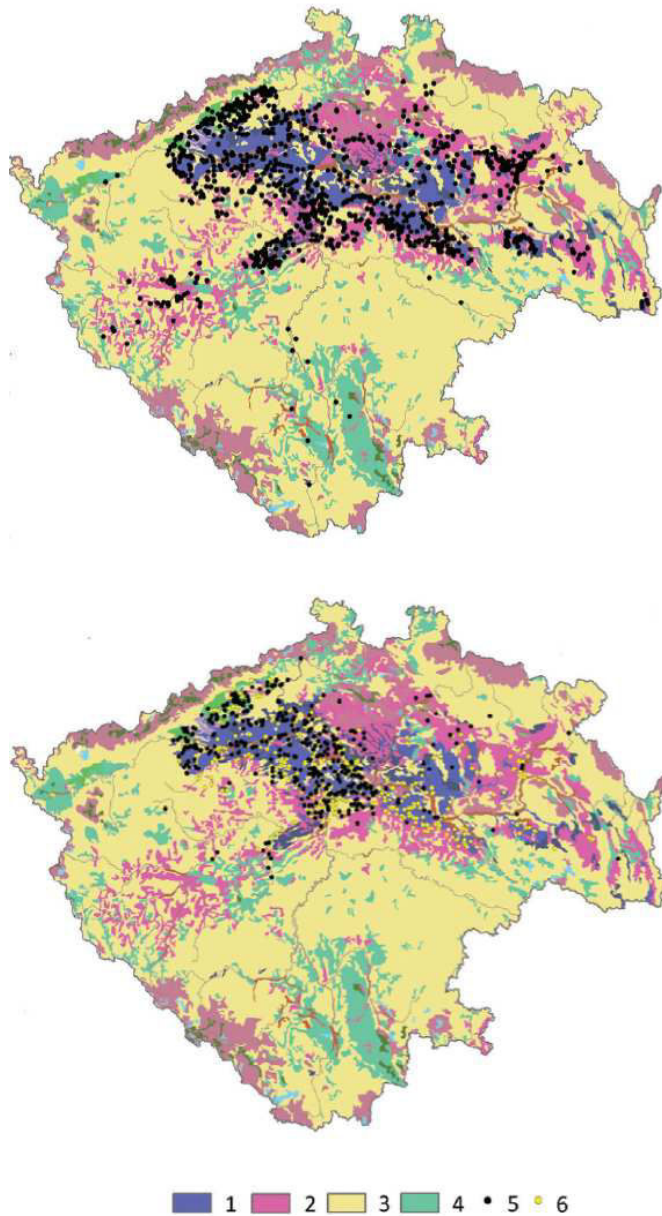


Figure 2.9. La répartition des sites LBK (Néolithique inférieur) à gauche et de la culture campaniforme (Enéolithique ancien) en relation avec le sol (données actuelles) en Bohême : 1 : chernozem, 2 : luvisols, 3 : cambisols, 4 : stagnosols, 5 et 6 stations archéologiques. Repris de Dreslerová, 2012.

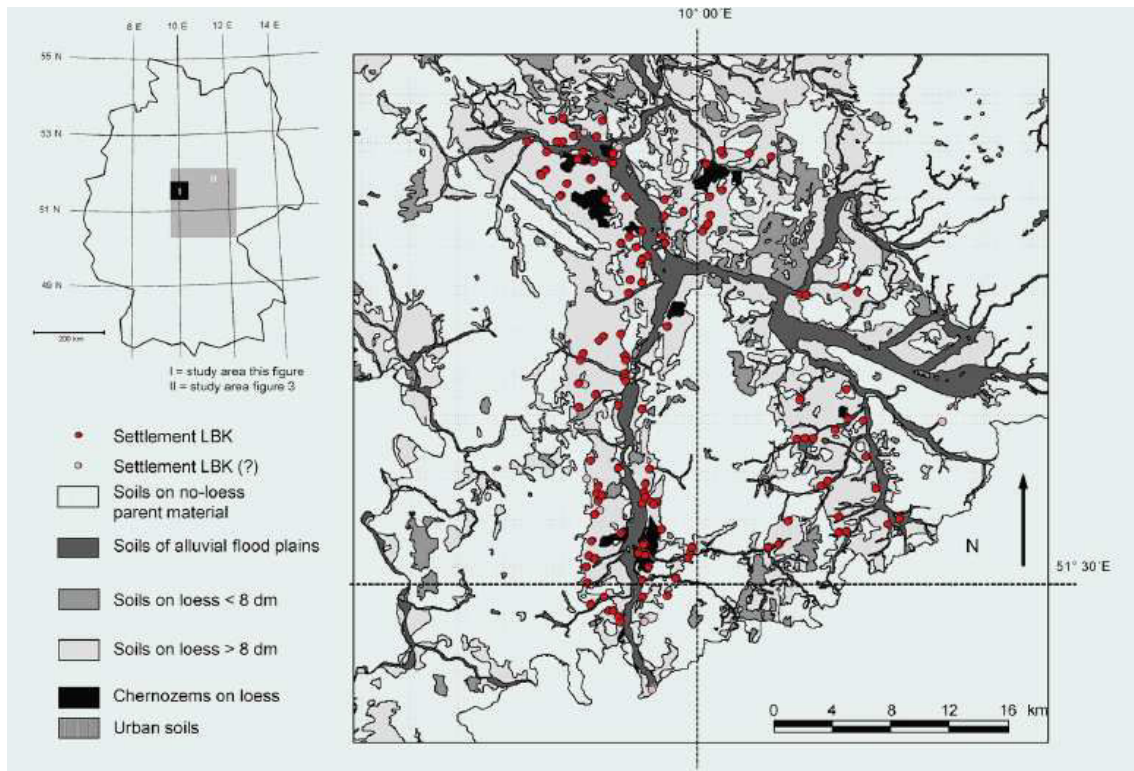


Figure 2.10. La répartition des sites LBK au sud de la Basse-Saxe (Allemagne), et leurs relations avec les types de sols (Lorz et Saile, 2011).

2.4.7. Le rôle des feux anthropiques dans la formation des chernozems

Les études géochimiques récentes ont révélé la présence de structures aromatiques dans la MO de chernozems (Rodionov, 2006). Il semble qu'une partie de cette MO est d'origine pyrogénique : le *black carbon* (Skjemskad *et al.*, 2002, Schmidt *et al.*, 1999, 2002). À la suite de ces études, la couleur noire est attribuée à la présence de résidus de matériel brûlé dans le sol. Les études de *black carbon* suggèrent que le rôle du feu dans la formation des chernozems (Schmidt *et al.*, 2002; Gerlach *et al.*, 2006) et de l'ouverture du paysage a été sous-estimé (Gerlach et Eckmeier, 2012). L'origine des incendies, naturelle ou anthropique, à l'origine de la présence de *black carbon* n'est pas toujours clairement expliquée (Schmidt *et al.*, 2002).

L'agriculture préhistorique basée sur l'utilisation du feu peut être une des causes des grandes quantités de la matière organique carbonisée et de *black carbon* trouvés dans les chernozems. Le brûlis de la végétation pourrait donc être considéré comme un facteur de la pédogénèse impliqué (Eckmeier *et al.*, 2007b). On citera ici les résultats d'un travail d'archéologie expérimentale. Pendant la création expérimentale de terres brûlées dans les bois de feuillus de la zone tempérée à Forchtenberg en Allemagne qui est présentée sur figure 2.11, il a été constaté que 4,8 % de la biomasse forestière est convertie en charbon de bois > 2 mm (Herrmann *et al.*, 2007). Le taux de conversion diffère d'un écosystème à un autre, mais aussi en fonction des caractéristiques du feu. Après l'incendie, la distribution spatiale des charbons est très variable. Le feu, bien que contrôlé, ne brûle pas de façon

homogène. Les particules de charbons de bois produites ont surtout une taille supérieure à 2 mm, ce qui suggère que les macrocharbons devraient être assez abondants dans les sols (Eckmeier *et al.*, 2007b).



Figure 2.11. L'expérience de Forchtenberg : A gauche, le défrichage de la forêt par brûlis. A droite, la lame mince de la couche supérieure de sol sur le champ brûlé avec présence d'une couche de macrocharbons légèrement altérés. Photos : D. Dreslerová.

Dans la vallée du Rhin inférieur, des particules de *black carbon* ont été trouvées dans des *luvic phaeozems* sur les sites préhistoriques. Le *Black carbon* représenterait 45 % du carbone organique total (Gerlach *et al.*, 2006). Selon les datations ^{14}C , des incendies se sont produits du Mésolithique (9500-5500 BC) au Moyen Age (500-1500 AD), mais les plus fréquents ont eu lieu au cours de la fin du Néolithique (4400-2200 BC). L'étude de la présence de *black carbon* en République tchèque a été réalisée sur une petite population d'échantillons de chernozems de Bohême Centrale par Danková (2012). Elle conclut à la présence peu importante de *black carbon*, ce qui ne permet pas de confirmer l'impact du feu sur la pédogénèse de ces sols, et donc de conclure à l'impact de l'activité humaine sur le développement des chernozems. A l'inverse, les études réalisées par exemple en Australie et en Amérique du Sud ont montré que le brûlis de la forêt pourrait créer un sol noir (Gerlach *et al.*, 2006). En Amazonie, ces sols sont d'ailleurs appelés *Terres noires d'Indiens* (Glaser et Birk, 2012 ; Rostain, 2008 ; Arnaldo Carneiro, 2002). Dans les chernozems de l'Amérique du Nord, le *black carbon* a contribué à hauteur de 35 % au carbone organique total (Skjemstad *et al.*, 2002).

Néanmoins, l'hypothèse de l'influence prépondérante du brûlis comme facteur favorisant la pédogénèse des chernozems en Europe Centrale est rejetée par Lorz et Saile (2001). Pour leur part, Lüning et Kalis (1992) ont estimé que seulement 5 à 6 % des zones de forêts sur loess ont été défrichées par les LBK. Il n'est même pas sûr que les LBK pratiquaient l'agriculture sur brûlis (Bogaard, 2002). Celle-ci pourrait ne s'être développée que par la suite.

2.5. Conclusion

Les chernozems occupent des surfaces énormes dans le monde. Leur répartition est conditionnée par un climat spécifique : le climat continental, avec une pluviométrie annuelle comprise entre 450 et 600 mm, un maximum de précipitations en été, des amplitudes thermiques importantes, et des hivers froids qui permettent le gel du sol. Par définition, le chernozem est un sol de zones steppiques. Après avoir étudié la végétation actuelle nous observons, que cette affirmation doit être nuancée car nous retrouvons ce type de sol dans des zones favorable à l'existence de forêts.

En Europe Centrale, les conditions environnementales favorables pour la formation des chernozems ont eu lieu lors de réchauffements courts au Pléistocène et à l'interface entre les glaciaires et les interglaciaires. Les chernozems fonctionnels sont considérés comme des sols ayant évolué sous des conditions différentes de celles d'aujourd'hui. La reconstitution des paléoenvironnement repose principalement sur les données palynologiques, malacologiques et pédoanthracologiques. Selon la majorité des travaux, les chernozems peuvent évoluer sous des forêts ouvertes et des steppes ; selon quelques autres, ils peuvent aussi rester sous un couvert forestier stable. En règle générale, il est dit que les activités humaines (défriche, pâturage, agriculture) sont censée être la condition nécessaire pour la conservation des chernozems jusqu'à nos jours.

Chapitre 3

Les chernozems dans l'aire d'étude et leurs relations avec les autres sols

L'objectif du chapitre trois est donner une description détaillée de la répartition des chernozems en Europe, surtout dans les pays qui représentent l'aire principale de notre étude : République Tchèque, Slovaquie, Hongrie et France. Nous ne détaillerons pas leur répartition dans les zones bioclimatiques d'où proviennent quelques échantillons complémentaires (Pologne, Ukraine, Russie). Ensuite, nous étudierons les relations spatiales des chernozems avec les types de sols voisins, à des échelles spatiales allant du niveau continental au niveau local.

3.1. La répartition des chernozems en Europe

Comme nous avons déjà eu l'occasion de le signaler, les chernozems, présents comme sol zonal dans les grandes régions continentales de l'Eurasie qui s'étendent de la Plaine d'Europe Orientale vers l'Est, sont aussi bien représentés en Europe Centrale (voir fig. 2.1.). On les trouve en Allemagne Centrale, en Bohême Centrale, en Moravie du Sud (République tchèque), en Pannonie (nord-est de l'Autriche, sud-ouest de la Slovaquie, Grande Plaine de Hongrie), dans la région transfrontalière de Banat entre la Hongrie et la Roumanie, dans le Bassin Danubien de Roumanie et de Bulgarie, en Vojvodina (Serbie) et à l'Est de Poznań en Pologne (Eckmeier, 2007; European Commission, 2005). En France, les chernozems se trouvent dans une région nommée « Terres noires de Limagne ». Ils y forment une zone de chernozems complètement isolée, bien à l'Ouest de la zone de chernozems de l'Europe Centrale et Orientale (Legros, 1997 ; Bornard *et al.*, 1968).

3.1.1. République Tchèque

La République tchèque se trouve dans la zone de climat tempéré, avec un climat modérément humide. Les chernozems couvrent 14 % de la surface du pays. Leur distribution (AOPK, 2005 ; Němeček *et al.*, 2001, Hauptman *et al.*, 2009 ; Tomášek, 2007) est étroitement corrélée au climat (fig. 3.1 et 3.2). On les trouve dans les régions les plus chaudes et les plus sèches, où l'altitude ne dépasse pas 300 m. Ils sont situés dans les zones couvertes de loess ou de dépôts alluviaux : bassins de l'Elbe et de l'Ohře en Bohême (N.O du pays) et bassins des rivières Morava et Dyje en Moravie du Sud (S.E.). La température moyenne annuelle dans les régions de chernozems varie entre 8°C et 10°C. Dans le bassin de l'Ohře qui se trouve dans l'ombre pluviométrique de Monts Métallifères (en tchèque *Krušné hory*), les gammes de précipitations annuelles des zones de chernozem

varient entre 400 et 550 mm. Le climatogramme correspondant à cette zone est celui de Doksany sur la figure 2.4. Les chernozems des bassins de l'Elbe, de la Morava et de la Dyje sont soumis à une pluviométrie comprise entre 450 et 600mm (climatogramme de Brno sur la figure 2.4). Dans ces régions, le climat devient plus continental. En été, on observe les températures les plus chaudes du pays ; en hiver les températures descendent plus bas que dans les régions de même altitude situées en Bohême Centrale. La végétation climacique serait la chênaie, composée de chêne sessile (*Quercus petraea*), cornouiller mâle (*Cornus mas*) et troène (*Ligustrum vulgare*), dans la partie basse de la région de chernozems (150-300 m) et la chênaie-charmaie mélangée à des espèces forestières comme le hêtre dans les parties les plus élevées de la région (200 à 400 m) (Neuhäuselová, 1998 ; Culek *et al.*, 1996.). Ce type de végétation est fondamentalement différent des steppes qui caractériseraient d'une façon générale les chernozems.

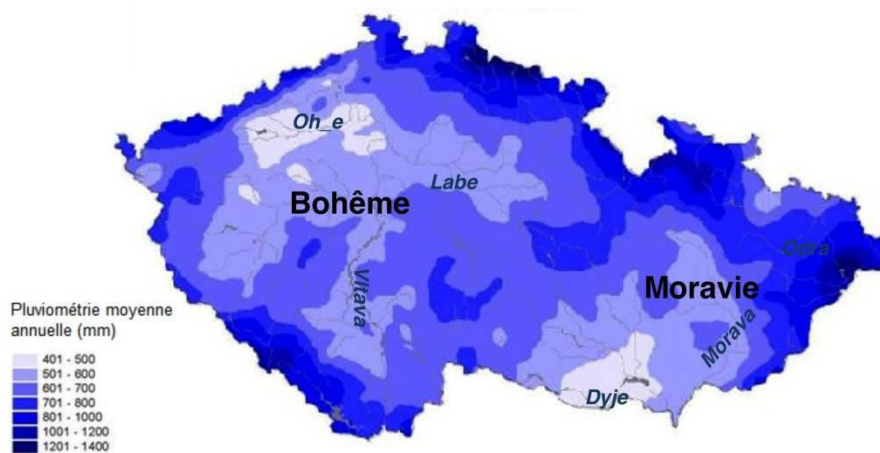


Figure 3.1. La pluviométrie moyenne annuelle (en mm) en République Tchèque (d'après Tolasz *et al.*, 2007).

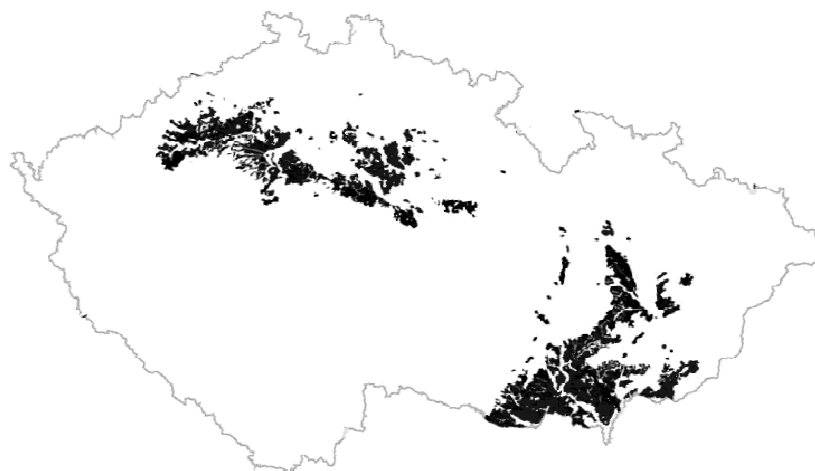


Figure 3.2. La répartition des chernozems en République Tchèque. D'après <http://klasifikace.pedologie.czu.cz/>.

3.1.2. Slovaquie

En Slovaquie (fig. 3.3 et 3.4), les chernozems couvrent environ 9 % de la surface du pays. L'essentiel de la Slovaquie est régi par un climat tempéré relativement humide (> 700 mm/an), à l'exception du sud-ouest du pays, caractérisé par un climat chaud et sec. C'est essentiellement dans cette région d'altitude basse (moins de 300 m), la plaine du Danube (Podunajská nížina), que se trouvent les chernozems. On trouve également quelques zones d'extension moindre dans la Plaine Slovaque de l'Est (Východoslovenská nížina), et sur les collines de Chvojnica (Chvojnická pahorkatina) situées au sud des bassins de Košice et Rimava (Hraško *et al.*, 1993 ; Granec et Šurina, 1999). La température moyenne des zones où ils sont présents varie entre 9 et 11 °C avec des précipitations annuelles moyennes entre 450 et 600 mm (Atlas krajiny SR ; 2002). La végétation climacique est la chênaie (Atlas krajiny SR, 2002).

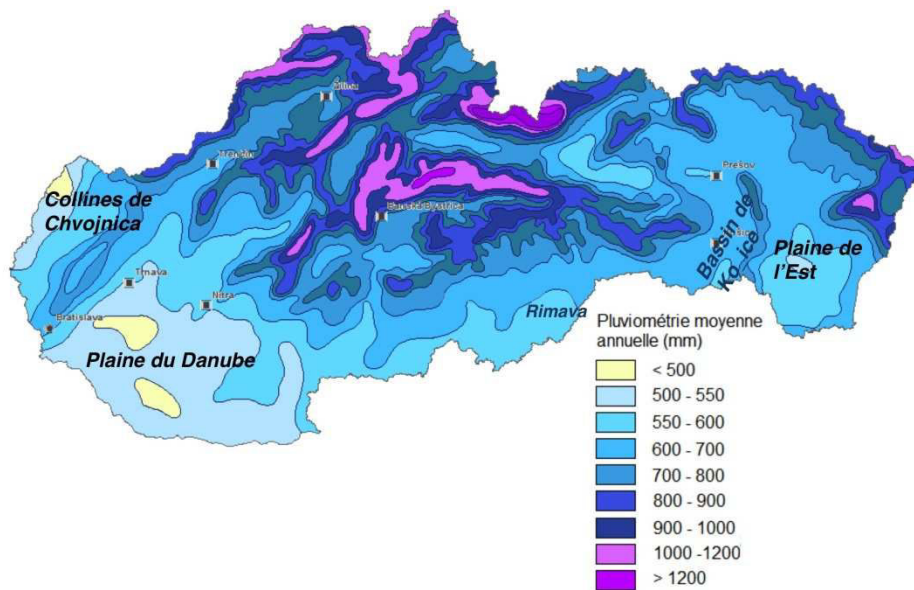


Figure 3.3. Pluviométrie annuelle en Slovaquie. Source : Atlas krajiny SR, 2002.



Figure 3.4. La répartition des chernozems en Slovaquie. D'après Granec et Šurina, 1999.

3.1.3. Hongrie

Les chernozems sont un sol emblématique de la Hongrie. Ils couvrent 21 % de la surface du pays (JRC EC, 2011). Dans la Grande Plaine hongroise (Alföld), ils se répartissent sur les reliefs lœssiques limitant les plaines alluviales du Danube et de la Tisza (Soil Map of Hungary, 2014 ; Virágh *et al.*, sans date). Des chernozems se trouvent également dans la zone de Hajduhat, sur des collines lœssiques entre Szolnok et Bácszka, dans la plaine de Mezöség, et sur les reliefs lœssiques des collines centrales. La distribution des précipitations moyennes annuelles est relativement uniforme dans la région des chernozems. Elle ne dépasse pas 600 mm. La température annuelle moyenne est de 10°C avec des amplitudes saisonnières importantes, de l'ordre de 23°C (Wiesbauer *et al.*, sans date).

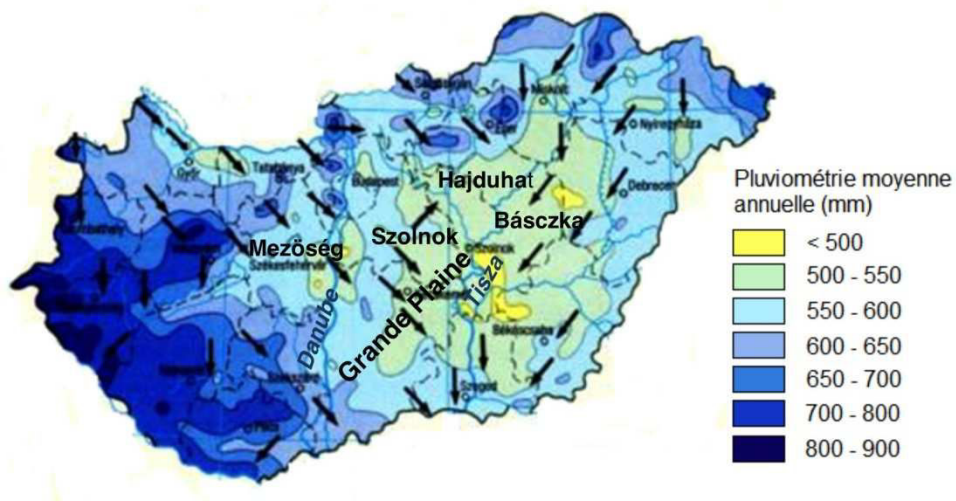


Figure 3.5. La pluviométrie moyenne annuelle et le sens des vents prédominants en Hongrie. Source : Westermann, 1999.

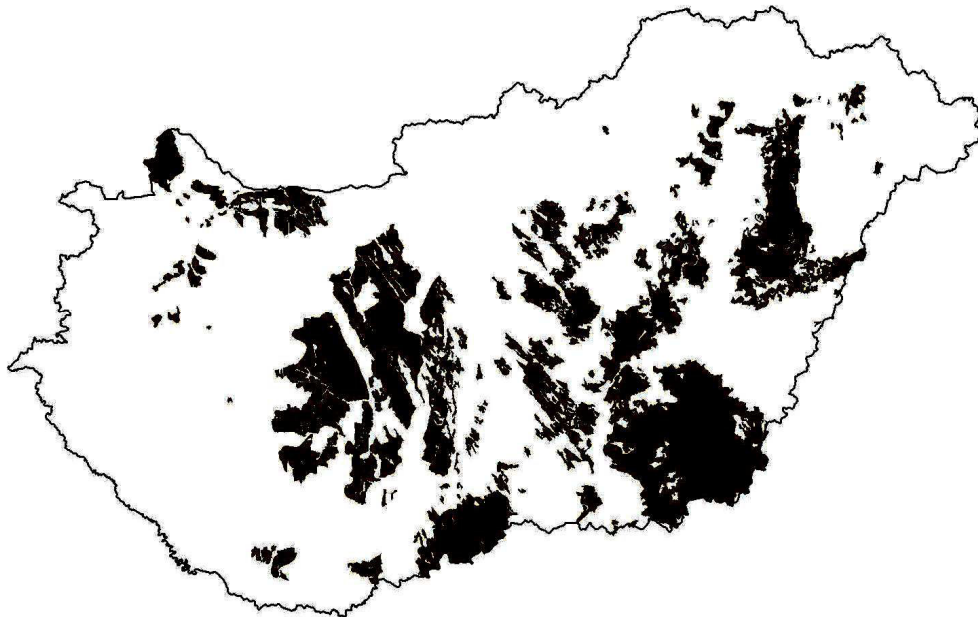


Figure 3.6. La répartition des chernozems en Hongrie. Source : <http://www.uni-miskolc.hu/~ecodobos/ktmcd1/csernoz/csern.ht>.

3.1.4. France

Les sols isohumiques se trouvent en France dans le Massif Central. Ils correspondent à un ensemble de sols appelé « Terre Noires de Limagne ». En plus de sols isohumiques comparables à des chernozems, le terme comprend des sols bruns calcaires, des sols bruns calciques, des sols alluviaux et des sols vertiques. Les sols isohumiques se répartissent dans plusieurs zones de la vallée de l'Allier. Le substratum d'origine sédimentaire est formé par des marnes tertiaires à granulométrie limoneuse. Le limon de remaniement qui en résulte par altération forme la roche-mère des terres noires isohumiques. Il est de couleur blanchâtre, à forte teneur en carbonates (30 à 50 %) (Legros, 2007 ; Bornard *et al.*, 1968). Le Val d'Allier central s'étend dans l'ombre pluviométrique du Massif Central ; la pluviométrie annuelle y varie entre 600 et 780 mm. Le climat local a un caractère semi-continentale. La température moyenne est de 10,8°C (Bornard *et al.*, 1968). Vu la faible extension des chernozems, nous n'en donnons pas de représentation graphique.

3.2. La relation chernozem-luvisol en Europe

Le loess est un type de sédiment très répandu, qui couvre environ un cinquième de la surface de l'Europe (Haase *et al.*, 2007). Il est la roche-mère de plusieurs types de sols, en particulier des chernozems et luvisols qui sont largement représentés en Europe. La figure 3.7 montre le recouvrement entre les loess et de ces deux types de sols sur l'ensemble de l'Europe.

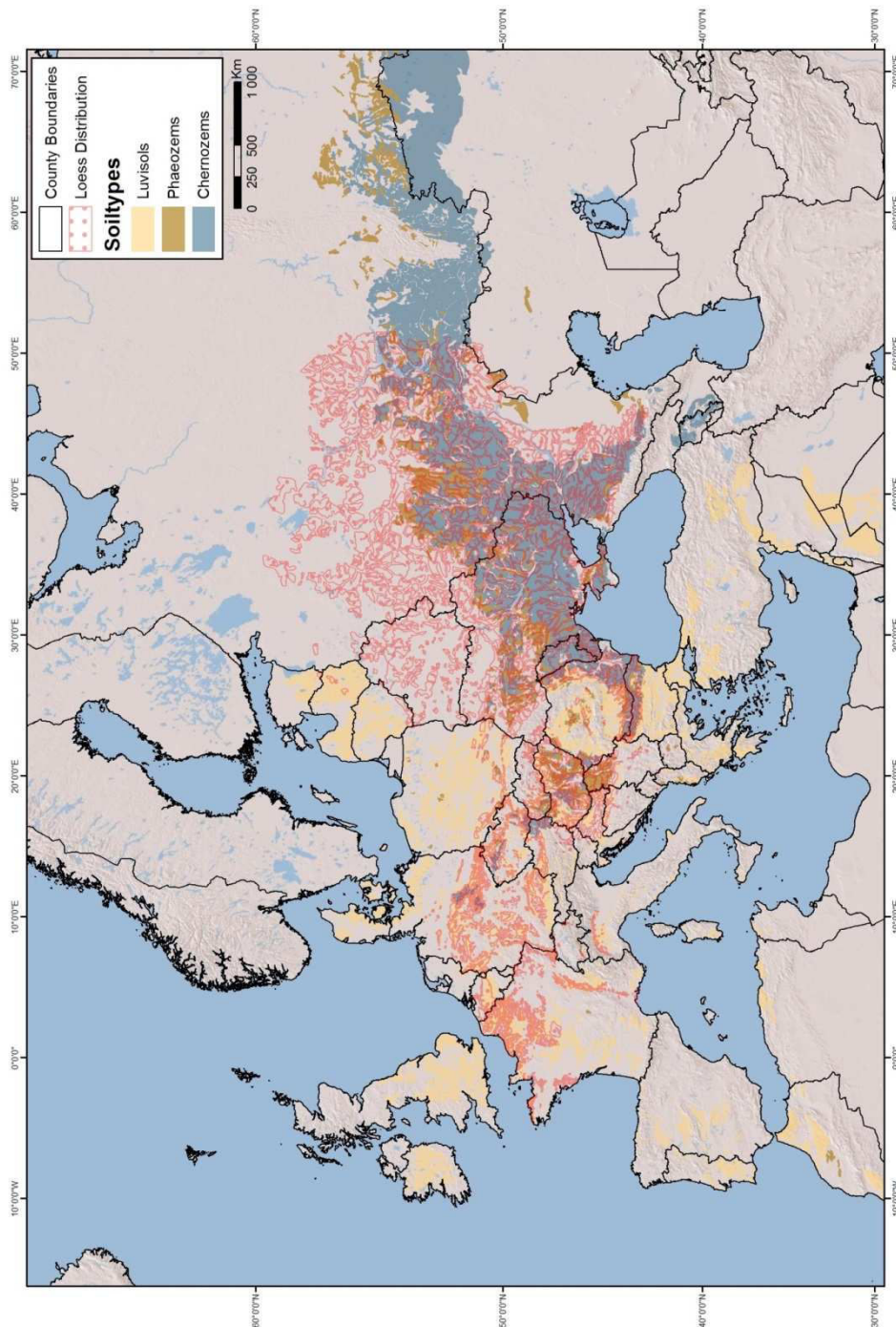


Figure 3.7. La répartition des lœss (en rouge), chernozems, luvisols et phaeozems en Europe (Haase *et al.*, 2007 ; <http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/data.html>, 25.4.2013).

Le luvisol est un sol caractérisé par une forte différenciation texturale dans le profil. Le processus principal de pédogénèse est le lessivage des argiles. Sous l'horizon de surface A en général peu épais (sauf quand il est remplacé par un horizon de labour L, voir figure 3.8), l'horizon éluvial E est appauvri en argiles, perméable, moins coloré et moins bien structuré que l'horizon sous-jacent BT, dans lequel s'accumulent les argiles transportées par l'eau d'infiltration. Cet horizon *argique* a une structure polyédrique ou prismatique ; il est plus coloré et moins perméable. Les argiles mobilisées dans l'horizon E s'accumulent sous forme

de revêtements argilo-organiques, le long des parois des agrégats et des galeries de racines ou de vers de terres. Elles sont relativement mobiles (Baize et Girard, 2008 ; FAO/ISRIC/ISSS., 2006). Le terme de luvisol est utilisé dans sur la carte mondiale des sols (FAO et UNESCO, 1972). Il répond à celui de *sol brun lessivé* de l'ancienne classification française (CPCS, 1967), à celui de *parabraunerde* de la terminologie allemande (Kuntze *et al.*, 1984), et de sol *pseudo-podzolique* dans la terminologie russe (FAO/ISRIC/ISSS, 2006). Notons que le système taxonomique de classification des sols tchèques (Němeček *et al.*, 2001) emploie le terme de « Luvisol » dans un sens sensiblement différent. Il appelle ainsi la classe de référence qui contient trois types de sol dont le processus de pédogénèse principal est le lessivage des argiles : *šedozem*, *hnědozem*, *luvizem*. « Šedozem » est un sol développé sur loess avec un horizon mollique profond appauvri en argiles (parfois avec un E développé) et un horizon Bth au-dessous qui contient des argilanes sombres. Il correspond par ces caractéristiques au *Luvic Greyic Phaeozems* du WRB 2006 (Zádorová et Penížek, 2011). « Luvizem » est un sol avec un horizon *albic* bien exprimé, qui passe à un horizon *luvic* en profondeur. Il correspond par ces caractéristiques à un *albeluvisol* du WRB (2006) (Zádorová et Penížek, 2011; FAO/ISRIC/ISSS, 2006). Le luvisol au sens international (FAO/ISRIC/ISSS, 2006) correspond par ses caractéristiques à un « *hnědozem* » de la classe des luvisols tchèques (Zádorová et Penížek, 2011, Němeček *et al.*, 2001).

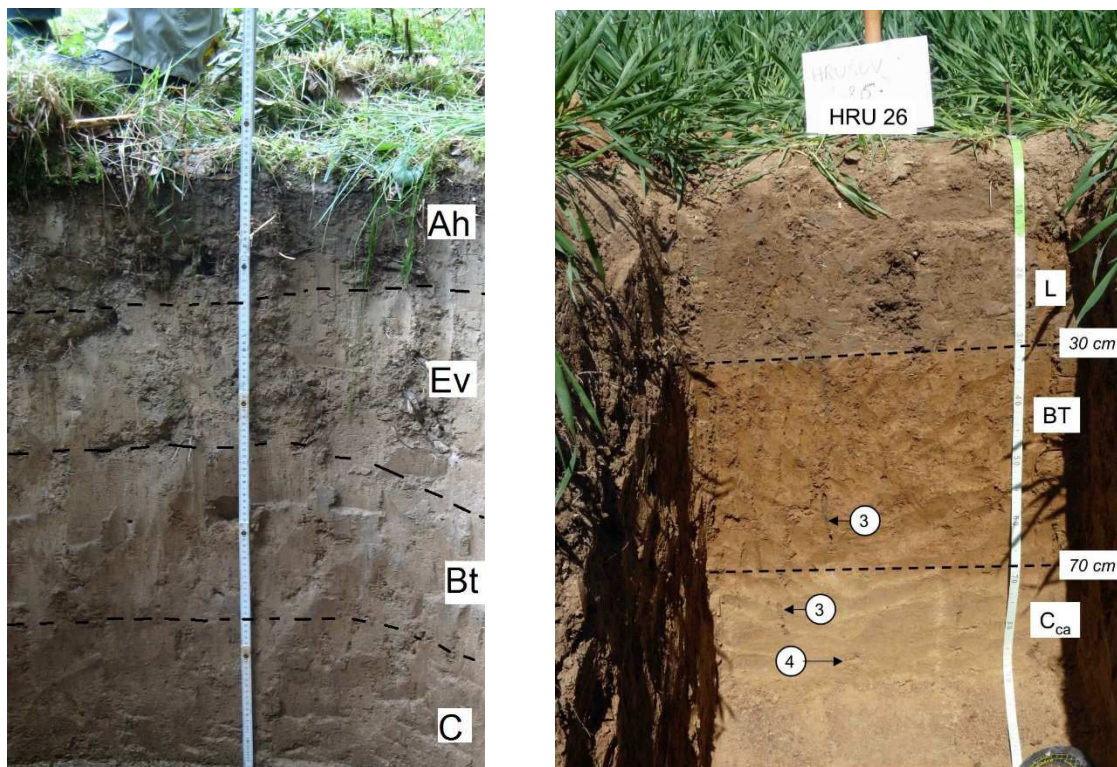


Figure 3.8. Deux exemples de luvisols sur loess : un luvisol sous forêt (à gauche) à Forchtenberg (Allemagne) : sous l'horizon Ah forestier se trouve l'horizon appauvri en argile Ev ; l'argile s'accumule dans l'horizon BT ; à droite, luvisol sous culture près de Hrušov (Rép. Tchèque). L'horizon A et E sont entièrement mélangés et transformés par le labour en horizon L. Au-dessous de l'horizon L se trouve l'horizon BT, puis le C carbonaté (3 : galeries de vers anécique ; 4 : poupées de loess). Photos : B. Vysloužilová (à gauche) et D. Schwartz (à droite).

En principe, la répartition spatiale des luvisols et des chernozems est liée à des conditions différentes de pédogenèse. Le chernozem, avec son horizon noir organo-minéral épais, est par définition le sol zonal steppique sous climat continental sec (Dokuchaev, 1883 ; FAO/ ISRIC/ ISSS, 2006) . Au contraire, la formation des luvisols est conditionnée par le climat océanique, tempéré humide et la végétation forestière (Němeček *et al.* 2001 ; FAO/ ISRIC/ ISSS, 2006, Duchaufour, 1998 ; Baize et Girard, 2008), qui rendent possibles le lessivage des argiles et la formation des horizons E et BT. Néanmoins, chernozems et luvisols coexistent en Europe Centrale au niveau régional (European Commission, 2005 ; Eckmeier *et al.*, 2007), dans des régions où le climat n'est pas favorable à l'existence de végétation steppique.

La carte de l'Europe (figure 3.7) montre le gradient ouest-est de l'importance de ces deux types de sols (Ganssen, 1972). Les luvisols sont présents sur les îles Britanniques ; puis la bande de luvisols s'allonge depuis la côte de l'Atlantique, du Sud de la péninsule Ibérique jusqu'au nord du Jutland, et le long de la Baltique, du Jutland jusqu'au Golfe de Finlande. Dans toute cette région, les chernozems sont quasiment absents. Au centre de l'Europe, les deux types sont présents et coexistent l'un à côté de l'autre. A l'Est du bassin des rivières Prut et Dniestr, les chernozems forment la couverture pédologique dominante.

En Europe Centrale, la répartition des chernozems et des luvisols serait liée aux conditions climatiques régionales (Tomášek, 2007 ; Němeček, 2001). Les chernozems sont présents dans les zones à pluviométrie annuelle comprise entre 450 et 650 mm et à température moyenne supérieure à 8°C, tandis que les luvisols le sont dans les zones à pluviométrie entre 500 et 700 mm et à température moyenne entre 7 et 9°C. On notera que ces différences sont faibles. Ces différences paraissent faibles. Mais les différences régionales sont peut-être plus fortes, et masquées par la variabilité à l'échelle continentale. D'après Tomášek (2007) et Hauptmann *et al.* (2009) les deux types de sols se forment surtout dans les zones plaines, mais aussi dans les zones vallonnées et sur des plateaux. Cependant, les chernozems ne sont pas présents normalement au-dessus de 300 m d'altitude. La végétation climacique des deux types de sol sont les chênaies ou chênaie-charmaie (Chytrý *et al.*, 2010, Němeček *et al.*, 2001 ; Neuhäuselová, 1998).

On note également, aux échelles locales, que malgré des différences de processus de pédogénèse bien définies, les deux types de sols peuvent se trouver dans les mêmes conditions géographiques. Sur les cartes pédologiques à grande échelle, on peut souvent observer une mosaïque entre chernozems et luvisols. A l'échelle locale, l'origine de la distribution spatiale des chernozems et luvisols est difficile à expliquer, parce que les conditions climatiques, topographiques et géologiques sont identiques (Ložek et Smolíková, 1978 ; Vysloužilová *et al.*, 2014). Ces observations montrent qu'il y a un besoin d'études plus approfondies afin de comprendre le rôle des facteurs environnementaux, en particulier celui de la végétation et des conditions paléoenvironnementales sur la formation de ces types de sols (Eckmeier *et al.*, 2007).

3.3. Le mécanisme de contrôle de la répartition des chernozems et luvisols en Europe Centrale

Ainsi, nous observons une relation spatiale étroite entre les chernozems et les luvisols. Les deux se placent dans la même série de développement sur loëss, matériau qui semble être le dénominateur commun. Les conditions écologiques qui prévalent sont cependant sensé être différentes : forêt et Holocène pour les luvisols, steppe et Tardiglaciaire pour les chernozems (Scheffer et Meyer, 1963 ; Leser et Maqsud, 1975 ; Lorz et Saile, 2011 ; Ložek, 1973 ; Němeček *et al.*, 1990 , Duchaufour, 1977). Il pourrait donc y avoir une série évolutive entre les deux sols. Ce point mérite donc qu'on s'y intéresse davantage.

La formation de sols sur loëss peut se dérouler en plusieurs phases successives de développement (Leser et Maqsud, 1975). L'évolution théorique, à l'Holocène, d'un loëss initial vers un luvisol sous une couverture végétale qui suit une dynamique naturelle est présentée sur la figure 3.9, tirée de Lorz et Saile (2011). D'après ces auteurs, après la sédimentation du loëss au Weichselien (Würm) supérieur, le sol initial calcaire se développe sous une végétation steppique. Le climat plus chaud et humide au Préboréal et au Boréal permet la formation d'un régosol calcaire/rendzine. L'horizon humique s'épaissit et à la fin du Boréal un chernozem s'est formé (Leser et Maqsud, 1975 ; Lorz et Saile, 2011 ; Scheffer et Meyer, 1963). Dans l'Europe Centrale, où les conditions climatiques deviennent plus humides lors de l'Atlantique, la végétation devient forestière, hors intervention humaine. Les conditions forestières induisent une décarbonatation, corrélée à l'acidification du sol par les matières organiques issues des ligneux. Le sol décarbonaté est ensuite soumis au lessivage. La descente des argiles dans le profil et l'abaissement de la limite de décalcification aboutit d'abord à la formation d'un horizon cambique, puis argillique tout en conservant l'horizon A chernique superficiel. Enfin, au Subboréal et au Subatlantique, le sol prend sa morphologie de luvisol avec des horizons E et Bt développés (Lorz et Saile, 2011 ; Němeček *et al.*, 1990). La transformation d'un chernozem en luvisol a été bien étudiée dans le Caucase du Nord : la construction successive de tumulus a permis de préserver des stades de la genèse d'un luvisol consécutive au remplacement d'une steppe par une forêt (Alexandrovskiy, 2000). D'après ce travail, le chernozem initial, formé sous steppe s'est transformé en luvisol, sous conditions forestières, en moins de 3000 ans. Pour Alexandrovskiy (2000) le chernozem n'est donc pas un sol stable.

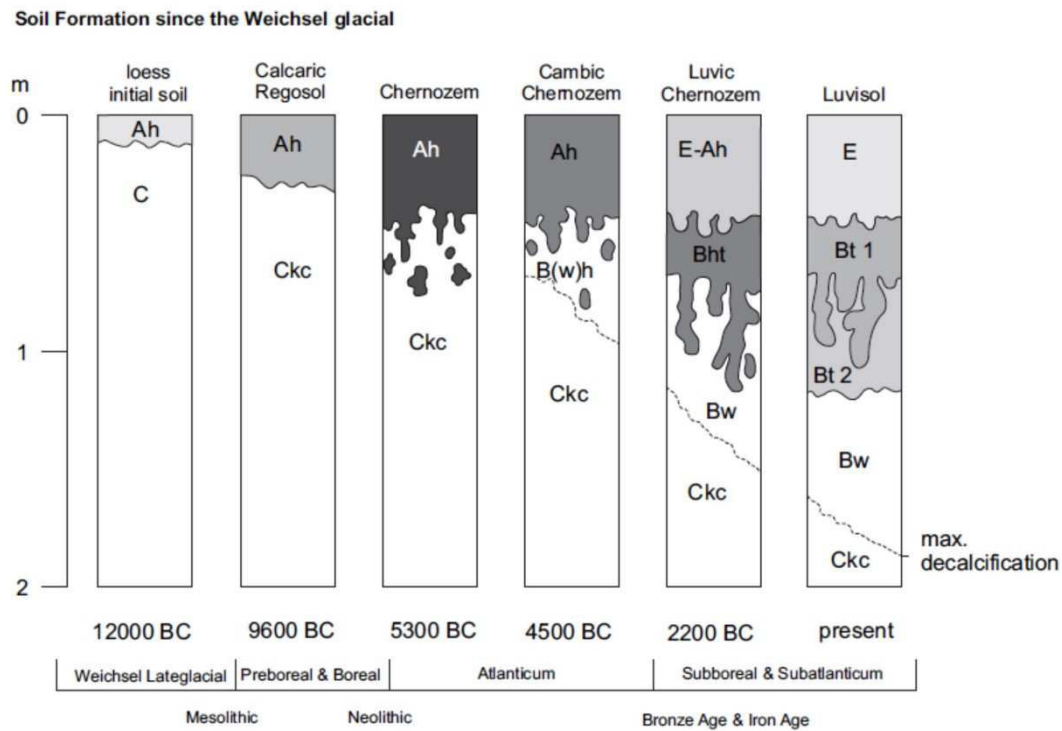


Figure 3.9. Développement des chernozems et luvisols selon les conditions climatiques à l'Holocène d'après Lorz et Saile (2011).

Pour leur part, Scheffer et Meyer (1963) décrivent le développement d'un sol initial sur loess vers un chernozem et un phaeozem au sud de la Basse-Saxe en Allemagne (fig. 3.10). Le sol initial sur loess est représenté par le profil I. Le chernozem (II) est capable de se développer assez vite. Dans les zones où le chernozem atteint les conditions de climax, il représente le stade de développement final, comme dans les zones de forêts-steppes d'Europe de l'Est (courbes a, b sur la figure 3.10). Dans des conditions plus humides, ressemblant au modèle de Lorz et Saile (2011), la limite de décarbonatation s'approfondit avec le temps, le sol s'acidifie et le lessivage des argiles démarre. Selon le degré/durée d'évolution, le sol devient un chernozem lessivé (III), un chernozem gris (IV), un phaeozem ou un phaeozem gleyique (V, VI ; courbes b et c). La vitesse de développement de cette série et son mécanisme de contrôle sont la dynamique des carbonates et l'abaissement de la limite de décarbonatation (Scheffer et Meyer, 1963 ; Rohdenburg et Meyer, 1968). La décarbonatation est contrôlée par les changements climatiques de l'Holocène. Minimale au début de l'Holocène, elle s'est renforcée au début de l'Atlantique avec l'augmentation de la pluviométrie et le développement des forêts. Mais à l'inverse, ce mécanisme de décarbonatation lié aux évolutions climatiques peut être freiné par différents facteurs comme une teneur élevée en carbonates de la roche-mère ou par le stockage des eaux souterraines calcaires à partir de la période Atlantique. Dans ce cas, il y a formation de chernozems gleyiques et pseudogleyiques (Scheffer et Meyer, 1963 ; Fischer-Zujkov, 2000).

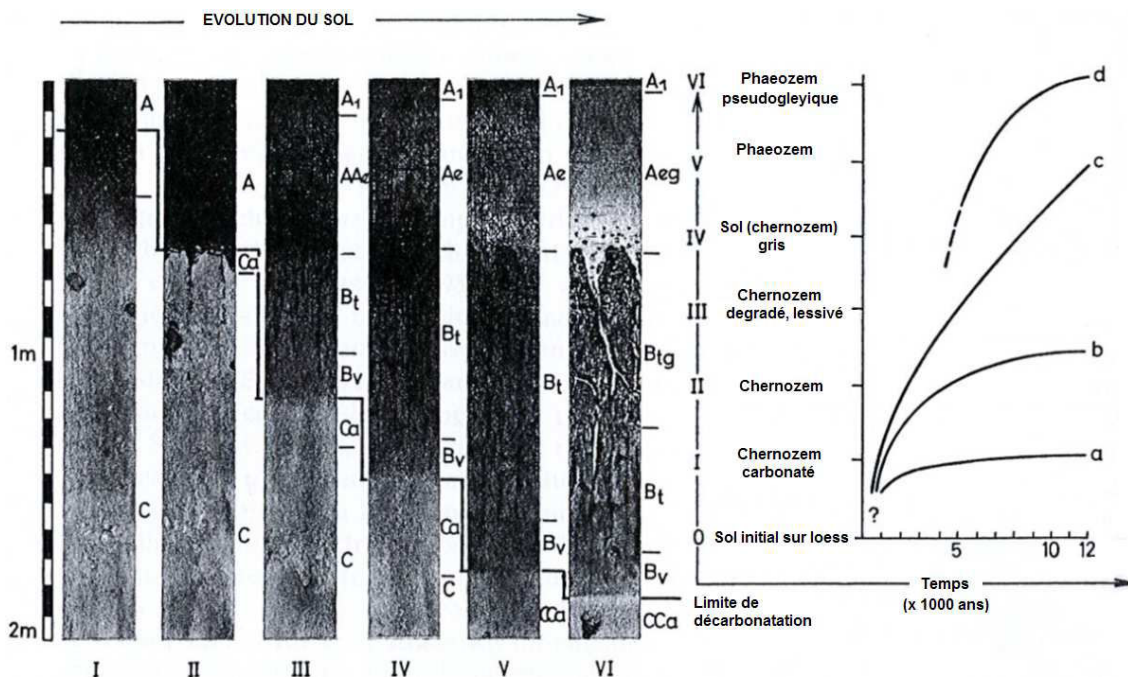


Figure 3.10. Le développement des chernozems en phaeozems, puis en phaeozems pseudogleyiques et le schéma de la décarbonatation d'après Scheffer et Meyer (1963).

L'apparition de forêts climaciques n'est pas, selon Fischer-Zujkov (2000), un facteur susceptible de causer la dégradation des chernozems. En effet, en Europe Centrale, dans l'aire d'extension des chernozems, la forêt naturelle doit ressembler à une chênaie ou une chênaie-charmaie avec toujours une strate herbacée très dense (Kreuz, 2008, Chytrý *et al.*, 2010 ; Scheffer et Meyer, 1963). Dans ces conditions, les apports de matière organique au sol sont peu différents entre des forêts relativement claires et les steppes, ce qui explique, selon Fischer-Zujkov (2000) que le chernozem fait preuve d'une certaine stabilité sous la végétation forestière. Ce point de vue s'oppose à celui de Němeček *et al.* (1990) qui constatent que les chernozems se dégradent en luvisols en conditions forestières stables. Mais dans ce cas, l'évolution peut être interrompue par la mise en place d'une « steppe culturale » (par défrichement de forêt). La culture de céréales aboutirait à la mise en place de conditions proches de celles des végétations naturelles à base de Poacées comme les steppes. Une évolution rétrograde du chernozem pourrait s'établir : la teneur en humus augmente et les propriétés de sol lessivé disparaissent. Néanmoins, quelques traces comme la brunification, l'agrégation polyédrique et les revêtements argilo-humiques restent conservés dans les horizons profonds. Ce type de chernozem est nommé « pseudochernozem » par Němeček *et al.* (1990).

Ainsi qu'on l'a déjà signalé, les chernozems se seraient formés en Europe Centrale dans la première moitié de l'Holocène. D'après Ložek (2004) les premiers agriculteurs LBK ont encore trouvé des reliques de chernozems dans les régions les plus chaudes et les plus sèches. D'autres auteurs (Beneš, 2012 ; Dreslerová, 2012) affirment qu'ils ont pu trouver les

chernozems couverts de forêts, ou au moins sous forêt-steppe. Dans les deux cas, le peuplement qui est enregistré dans les zones d'extension des chernozems depuis le Néolithique, a stoppé la dynamique naturelle de la végétation et c'est probablement grâce à l'activité des agriculteurs préhistoriques que nous retrouvons des chernozems en mosaïque voisinant avec les autres sols sur loess en Europe Centrale. Par ailleurs, l'activité agricole a mis en route des processus d'érosion et sédimentation qui aboutissent à la formation de régosols et colluviosols à partir de chernozems (Zádorová, 2013 ; Fischer-Zujkov, 2000).

En fait, peu de certitudes existent quant aux raisons qui font que chernozems et luvisols avoisinent. De plus, il ne faut pas oublier que la connaissance de la couverture pédologique au Néolithique est très fragmentaire. Si les sols se sont développés depuis la fin de la dernière glaciation (Duchaufour, 1998) ils en étaient au moment de l'arrivée des premiers agriculteurs, à mi-temps de leur développement actuel. Leurs caractéristiques physico-chimiques étaient sans aucun doute différentes de celles qui sont connues aujourd'hui. Or, les raisonnements tenus sur les séries évolutives sont tous faits sur la base de l'observation des sols actuels.

3.4. La relation zonale entre les chernozems et les autres sols isohumiques

La séquence de sols bioclimatiques de la figure 3.11 (WRB Draft, 1994, *in* Nestroy, 2007) illustre la relation entre types de sols isohumiques et conditions environnementales (pluviométrie, végétation) en Europe de l'Est. Les zones les plus humides au nord sont caractérisées par la présence de forêt claire et forêt-steppe. Vers les zones plus sèches, la steppe devient de moins en moins dense.

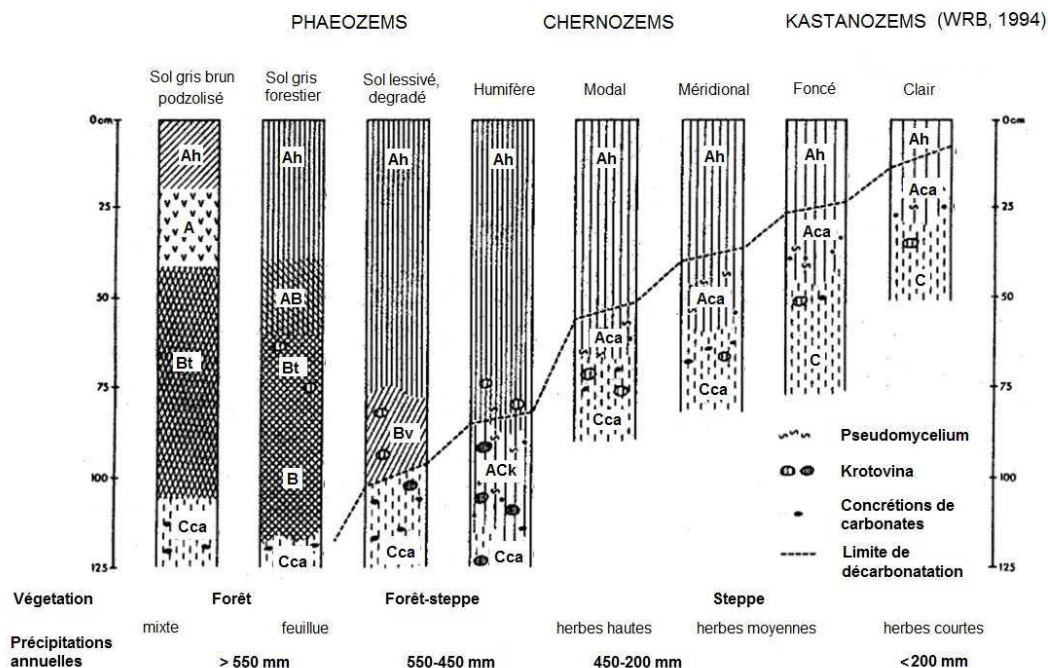


Figure 3.11. Séquence (bio-)climatique des sols loessiques en Europe de l'Est (adapté d'après WRB Draft, 1994, *in* Nestroy, 2007 ; Mathieu, 2009).

En fonction des types de climat, le sol présente des caractéristiques très différentes. Au nord, où les précipitations sont les plus élevées, nous trouvons des phaeozems ; au centre, dans la zone de forêt-steppe se développent des chernozems humifères, puis des chernozems ordinaires sous steppe ; au sud, zone où les précipitations sont minimales se développent des kastanozems. Les propriétés des sols varient surtout du point de vue du développement du profil (figure 3.11) et dans la répartition de la MO et du calcaire, comme illustré sur la figure 3.12. Du nord au sud, avec la pluviométrie décroissante, l'épaisseur de l'horizon humique décroît, tandis que la profondeur de la limite de décarbonatation diminue.

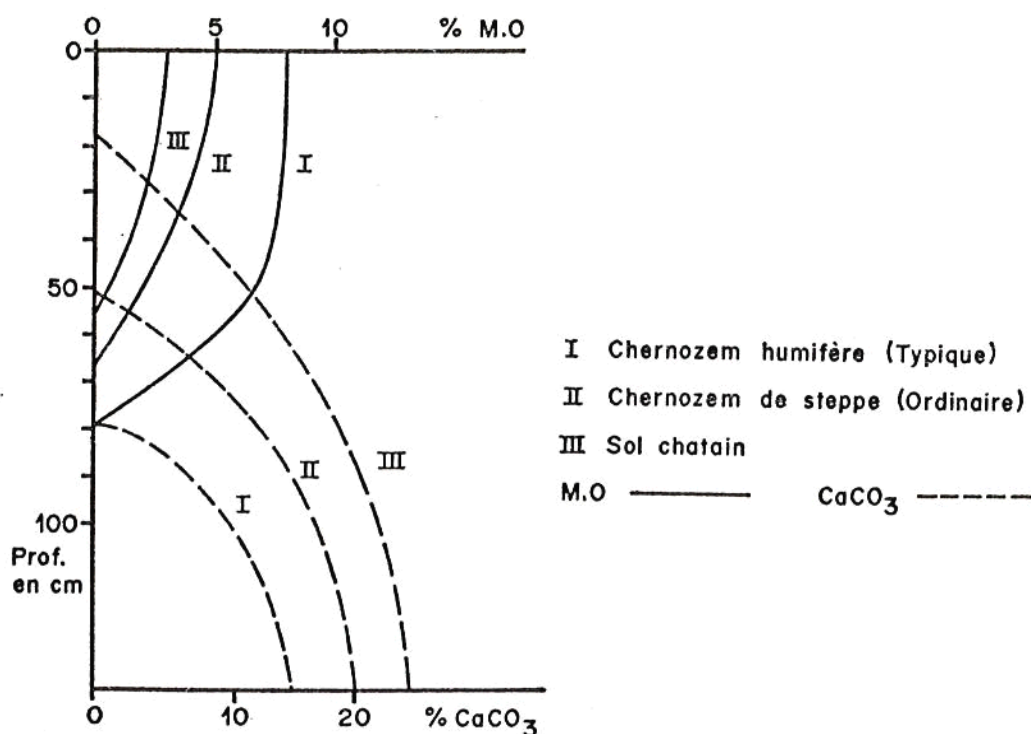


Figure 3.12. La répartition de la MO et du carbonate de calcium dans trois types de sols isohumiques : I. chernozem humifère (typique), II chernozem modal (ordinaire), III sol châtain (kastanozem). Repris de Duchaufour (1977).

Au nord de la zone de chernozems, sous les forêts mixtes, la couverture pédologique est formée par les phaeozems (figures 3.11 et 3.12). Les précipitations annuelles sont supérieures à 550 mm (Mathieu, 2009). Les phaeozems sont des sols épais, riches en matières organiques, sans concentrations de carbonates secondaires qui sont intensivement lessivés dans les saisons humides, c'est-à-dire en été (FAO/ISRIC/ISSS, 2006 ; Nestroy, 2007 ; Duchaufour, 1977 ; Bridges, 1970). Dans la zone de transition entre les phaeozems sous forêt mixte et les chernozems sous steppe, se trouvent des chernozems lessivés (Nestroy, 2007 ; Duchaufour, 1977). Sur les chernozems lessivés, la végétation est constituée de forêts de feuillus. La pluviométrie annuelle est d'environ 500 mm (Mathieu,

2009). Dans ce type de chernozem, l'horizon Cca, est situé très en profondeur. Par contre l'horizon d'accumulation d'argiles BT est bien exprimé.

La zone de forêt-steppe est caractérisée par le chernozem humifère (« typique »). De tous les chernozems, ce sont ceux qui ont les accumulations de matière organique les plus importantes, à la fois en pourcentage et en épaisseur de l'horizon A. On peut observer les signes de la formation d'un B polyédrique. La limite supérieure de l'horizon Cca est profonde. Ce dernier horizon est caractérisé par du pseudomycélium très diffus (Duchaufour, 1977). Sous les steppes, on trouve le chernozem modal (ordinaire), avec un A épais, mais un peu moins humifère que le chernozem de forêt-steppe. Le Cca est situé moins en profondeur, avec des concrétions pulvérulentes qui forment des taches blanches. Plus au sud, on trouve le chernozem méridional qui est moins humifère, moins décarbonaté et qui fait la transition avec les kastanozems (Duchaufour, 1977).

Les kastanozems (sol châtain, chestnut soils) ont un profil similaire à celui des chernozems mais l'horizon de surface riche en humus est plus mince et pas aussi sombre que celui des chernozems. Ils montrent une accumulation plus importante de carbonates secondaires. La couleur marron-brun de la surface du sol se reflète dans le nom kastanozem (FAO/ISRIC/ISSS, 2006 ; Bridges, 1970 ; Duchaufour, 1977). La végétation ressemble à une steppe continentale sèche à herbes courtes. Les régions où ils sont localisés sont caractérisées par une pluviométrie limitée d'environ 200 à 400 mm (Bridges, 1970 ; Mathieu, 2009). A l'extrémité sud de la zone de sols isohumiques, se trouvent des sols bruns de steppe (les calcisols) (Duchaufour, 1977 ; Mathieu, 2009). La pluviométrie annuelle descend en dessous de 200 mm (Mathieu, 2009). La végétation est plus xérophile. La teneur en MO décroît très vite avec la profondeur. Le profil est très faiblement ou pas du tout décarbonaté.

3.5. Conclusion

En règle générale, l'existence d'un soubassement loessique (ou équivalent, comme les marnes de l'Allier en France) est une condition quasiment indispensable pour la formation de chernozems. Cette condition n'est pas suffisante. En effet, la répartition des chernozems en Europe Centrale semble fortement liée à l'existence d'ombres pluviométriques, qui représentent des zones sèches par rapport au climat général. Lorsqu'on se déplace vers le sud-est, la continentalité du climat se renforce. Ce ne sont plus ici des zones d'ombre pluviométriques régionales qui règnent, mais une tendance généralisée du climat, et la fréquence des chernozems augmente fortement.

Néanmoins, lorsqu'on change d'échelle spatiale, on observe que les chernozems entretiennent une proximité étroite avec d'autres types de sols, surtout des luvisols et des phaeozems. Si le mécanisme de contrôle de répartition de ces sols est clairement explicable au niveau continental, il devient une énigme en Europe Centrale, à l'échelle régionale. La répartition des chernozems y ressemble à une mosaïque où l'effet du climat en soi ne peut expliquer les variations brusques de la couverture pédologique. Entre séquences évolutives et influence anthropique, les explications données pour comprendre la présence simultanée de luvisols et de chernozems ne sont pour l'instant pas probantes.

PARTIE II

Du choix des terrains à l'analyse des profils :

matériels et méthodes

Dans cette partie, nous présenterons les étapes méthodologiques de notre travail. En premier lieu (chapitre 4), nous présenterons notre démarche, puis les données de base - cartes pédologiques et historiques - qui nous ont servi à sélectionner les stations. Nous décrirons les principes qui ont régi leur choix, et leur classement en grandes catégories. Ensuite, pour chaque catégorie, nous donnerons pour tous les sites une description de la végétation, du sol et de l'environnement. Dans un second temps (chapitre 5), nous décrirons les méthodes de prélèvement et d'analyses utilisées, en détaillant plus particulièrement la méthode de la SPIR qualitative, encore peu connue et qui est au cœur de notre démarche.

Chapitre 4

De la démarche générale à la description des sites

Le chapitre 4 présente en premier lieu la démarche qui a été mise en œuvre pour répondre au questionnement scientifique qui sous-tend notre travail. Non présenterons ensuite les documents cartographiques nécessaires à la sélection des sites, puis l'ensemble des stations retenues et leurs caractéristiques : la localisation géographique, le type de sol, les conditions environnementales actuelles, l'historique des sites tiré des archives cartographiques ou de recherches historiques.

4.1. Reconstituer l'histoire des chernozems : quelle démarche ?

En résumant, notre thématique consiste à reconstituer les conditions environnementales de la formation des chernozems. Comme nous l'avons vu dans le chapitre 2 (§ 2.4), l'histoire environnementale des chernozems a été reconstituée jusqu'à présent à l'aide de méthodes variées. Des approches palynologiques, malacologiques, anthracologiques, phytolithaires et de biomarqueurs moléculaires ont été appliquées. Pourtant, ces méthodes ne sont pas toutes adaptées à l'étude des conditions environnementales de la pédogénèse. Tout d'abord, certaines ne sont pas adaptées à l'échelle spatiale du questionnement. Ainsi, la palynologie donne une image d'une végétation locale ou régionale, pas forcément celle des formations végétales présentes sur les chernozems. En second lieu, d'autres n'y répondent pas par leur temporalité : la malacologie donne une image ultime du sol lors de son enfouissement, et pas forcément pendant les siècles ou millénaires pendant lesquels il a été fonctionnel. Les phytolithes ont une persistance variable dans le sol, et les Poacées y sont largement sur-représentées. En définitive, il apparaît nous constatons que ce sont les archives pédologiques, et plus particulièrement la matière organique, qui devrait donner la meilleure image de la formation et du fonctionnement des chernozems. Les matières organiques sont d'origine locale. Très hétérochrones, notamment en fonction de la profondeur (voir § 1.2), elles couvrent une bonne partie de la durée de fonctionnement du sol.

Sans négliger d'autres approches (pédoanthracologie, micromorphologie), nous avons privilégié dans notre travail l'analyse de la matière organique du sol par la spectroscopie proche infrarouge qualitative – SPIRqual. La SPIR est une mesure de l'absorbance d'un matériau dans la bande spectrale 1100-2500nm. Le signal spectral acquis peut être considéré comme « l'empreinte digitale » de la matière organique (Palmborg et Nordgren, 1996). La SPIRqual est un outil efficace, capable de distinguer l'origine des matières organiques du sol selon le type de végétation (Ertlen, 2009 ; Ertlen *et al.*, 2010). Certaines fractions organiques du sol sont capables de résider dans les chernozems pendant des milliers d'années (voir paragraphe 1.2). La SPIR représente donc une nouvelle piste pour la

reconstruction des paléo-environnements grâce des archives pédologiques. Outre la reconstruction des paléovégétations, elle doit permettre, également, d'identifier des changements de végétation majeurs. C'est un outil qui semble bien adapté au questionnement des rapports entre la formation des chernozems et le/les types de végétation qui y sont associés.

Sans entrer dans les détails (voir chap. 5), le principe de la SPIRqual consiste à comparer le signal spectral d'échantillons de sol dont la MO a une signature végétale, écosystémique, connue, avec le signal d'un échantillon inconnu. Pour ceci, il faut d'abord construire une base de référence : la librairie spectrale des chernozems. Cette librairie spectrale est constituée d'échantillons d'horizons de surface de sols. En effet, il n'y a guère que sur les horizons de surface que l'on puisse associer avec certitude la matière organique à la végétation qui les a produites (cf. infra). Ces références permettent une confrontation directe avec la population des échantillons de profils complets de sols et paléosol inconnus. La construction de la librairie spectrale des chernozems consiste donc à sélectionner puis prélever des horizons de surface de sols dont nous connaissons bien le type de végétation et sa stabilité. Nous avons choisi de préférence les chernozems, mais nous avons inclus dans la librairie quelques autres sols formés sur loess, soit parce qu'ils présentaient une végétation de steppe comparable à celle des chernozems, soit parce que les références de chernozems sous forêt sont rares et que le choix de quelques stations forestières sur sol loessique constituait le moins mauvais palliatif, en supprimant le biais éventuel lié au type de matériau parental. Les critères de choix des stations de référence reposaient sur l'existence avérée, localement, d'une végétation donnée, forestière ou prairiale, sur une durée d'au moins 150 ans. Par le terme de « prairie », nous désignons des formations herbacées, sans ligneux (ou alors très minoritaires), quelle que soit leur origine, naturelle ou anthropique.

Il convient d'expliquer rapidement les raisons de ce choix d'une durée minimale de 150 ans de persistance d'un écosystème pour qu'il serve de référence. Dans les horizons de surface des sols, le temps moyen de résidence (TMR) des matières organiques (MOS) est faible, de l'ordre de 50 ans, voire inférieure à cette durée (Bird *et al.* 2002 ; Chen *et al.*, 2013 ; Balesdent, 1982). On peut mesurer le renouvellement de la MOS selon différents modèles. Si l'on prend le modèle simple de Jenkinson *et al.* (1990), le renouvellement de la matière organique s'exprime selon la formule suivante :

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

Q_0 est la quantité totale de carbone au départ

Q_t est la quantité restante du carbone initial au temps t , ce qui permet d'estimer le taux de renouvellement.

Ainsi, lorsque $t = TMR$, on note que 63 % du carbone a été remplacé par des apports récents. Il ne reste que 37 % du carbone initial. Au bout d'un temps $t = 3 TMR$, il ne reste

donc plus que $0,37 \times 0,37 \times 0,37 \times 100 = 5 \%$ de la matière organique initiale. On peut donc considérer que pour un TMR de 50 ans, le spectre reflète au bout d'une durée de 150 ans à 95 % au moins la végétation de référence. Dans la pratique, sur l'épaisseur 0-5 cm, le TMR est inférieur à 50 ans, et le signal est encore plus pur. Ce principe a été appliqué dans diverses études (Balesdent et Guillet, 1982 ; Schwartz *et al.*, 1996 ; Ertlen *et al.*, soumis).

Pour les paléosols, lorsque cela a été possible, nous nous sommes servis des résultats d'études paléo-environnementales préalables faites par d'autres auteurs pour calibrer nos résultats. Ces comparaisons nous ont permis de valider notre approche sur un certain nombre de sites, et confortent dès lors nos résultats sur des paléosols qui n'ont pas été étudiés de quelque manière que ce soit dans le passé.

Par ailleurs, en dehors de la SPIRqual, nous avons également procédé à d'autres approches. La pédoanthracologie a été appliquée ponctuellement sur certains sols et paléosols dans lesquels des charbons de bois ont été repérés. En plus de cette démarche, nous avons également effectué l'étude d'une catena chernozem - luvisol à une échelle locale. A cette échelle, les facteurs généraux (climat, relief, lithologie) n'interviennent plus pour expliquer la genèse de sols si différents. Nous avons appliqué à cette séance une analyse SPIRqual, mais aussi une approche micromorphologique.

4.2. L'aire d'étude : répartition spatiale des sites retenus (fig. 4.1)

Le cœur de notre zone d'étude est constitué par la République tchèque (Bresnice, Brozany, Brumovice, Bubeneč, Bulhary, Hrušov, Kolín, Kopeč, Kuchyňka, Poplze-profil, Poplze-paléosol, Zeměchy) et la Hongrie (Battonya-Gulya Gyep, Bugacpuszta, Csikospuszta, Godollo-Hills, Hajdubagos, Mezofold-Belsobarand Valley, Pocsaj, Sarand, Tard, Tokaj). D'autres sites ont été étudiés en Slovaquie (Dubník, Babský les, Senec) et en France. A l'exception de Clermont-Ferrand, les sites français sont complètement en dehors de la zone d'extension des chernozems. Ce sont des paléosols scellés sous des colluvions : Clermont-Ferrand dans le Puy-de-Dôme, Sainte-Croix-en-Plaine, Morschwiller dans le Haut-Rhin, Gougenheim et Wiwersheim dans le Bas-Rhin. Nous avons aussi échantillonné en Alsace des sols autres que les chernozems, mais également développés sur loess (Hirsingue, Didenheim, Carspach).

Nous avons également étudié des chernozems qui sont situés dans l'aire de répartition des chernozems zonaux, en Ukraine (Mikhajovska Celina, Homutovsky steppe, kastanozem d'Askania Nova) et en Russie (Kursk, Streleck). Un site se trouve dans la zone de chernozems de Pologne (Młodzewo).

Les sites ont été décrits et prélevés lors de différentes opérations de terrain. En outre, nous avons bénéficié de descriptions et d'échantillons de sols prélevés par quelques collègues lors d'opérations de terrain antérieures. Ainsi, des échantillons de quelques sites alsaciens ont été fournis par Damien Ertlen. Des échantillons de kastanozems et de chernozems de sites d'Ukraine et un site de chernozem polonais nous ont été confiés par Maria Jelenska, chercheur de l'Académie des Sciences de Pologne (Jelenska *et al.*, 2008). Les échantillons de chernozems et de paléo-chernozems scellés sous les colluvions de Brumovice en République tchèque ont été fournis par Tereza Zádorová, chercheur de l'Université de Sciences de la Vie de Prague (Zádorová *et al.*, 2013).

La répartition d'ensemble des sites est représentée sur la figure 4.1. Les sites y sont classés en trois catégories : d'une part, les sites de surface, qui ont servi pour la construction de la librairie spectrale de chernozems, d'autre part les profils de chernozems fonctionnels auxquels s'ajoutent quelques autres types de sols, et enfin ceux de paléo-chernozems, qui ont été étudiés pour reconstituer leur dynamique et les conditions de leur genèse. A chaque site a été attribué un code qui est utilisé systématiquement dès l'échantillonnage jusqu'à l'interprétation des résultats. Les sites sur lesquels nous avons effectué à la fois un échantillonnage de surface et un échantillonnage sur toute l'épaisseur du profil sont marqués par un astérisque. Une description de chaque site est donnée plus loin dans ce chapitre (§ 4.4). Des détails sur les descriptions de profils, les photos et les caractéristiques analytiques sont donnés dans les annexes sur des fiches individualisées pour chaque site.

4.3. Les documents de base : cartes pédologiques et historiques

A partir des cartes pédologiques et historiques nous avons choisi les sites appropriés pour notre recherche. Les cartes pédologiques sont un support nécessaire lors la prospection du terrain : elles servent comme une référence de la répartition de chernozems et des autres sols étudiés. Les cartes historiques sont indispensables pour connaître la nature de l'occupation du sol et donc pour déterminer sa stabilité. En effet, comme expliqué *supra* (§4.1), la construction du référentiel de surface en SPIRqual exige de choisir des sites stables pendant une durée de 150 ans.

4.3.1. Les cartes pédologiques

Les cartes pédologiques disponibles sur le territoire de la République tchèque et de la Slovaquie sont les cartes issues de la cartographie intégrale des sols agricoles (*Komplexní průzkum půd - KPP*) effectuée en Tchécoslovaquie dans les années 1961-1970 à l'échelle du 1:5000. Cette œuvre cartographique est accompagnée par une notice des propriétés pédologiques mesurées en s'appuyant sur un réseau dense de sondages. L'avantage de cette carte est qu'elle a été élaborée pour toutes les terres agricoles de tout le territoire selon la même méthode définie par l'arrêté no. 47/1961 du Ministère de l'Agriculture, de la Gestion des Forêts et de l'Eau en 1961. Cet arrêté définit le système de la classification de sols employé (*La classification génétique agronomique des sols*). Ces cartes sont consultables à l'Institut de l'amélioration et de la protection des sols (Výzkumný ústav meliorací a ochrany půd v.v.i.) à Praha-Zbraslav. Depuis peu, elles sont également disponibles à partir des archives web de KPP (WAKPP - *Webový archiv Komplexního průzkumu půd.*). Les cartes de l'Agence de la protection de la nature et du paysage (*Agentura ochrany přírody a krajiny*) sont une compilation des cartes des sols agricoles et des cartes des sols forestiers à l'échelle du 1:50000. Ces cartes se basent sur la classification des sols de Němeček *et al.* (2001). Elles sont accessibles via le Service géologique tchèque (*Česká geologická služba*). Nous avons à disposition cette ressource sous la forme de documents numérisés.

La collection des cartes pédologiques de la Hongrie est accessible dans les archives du site du *Joint Research Center* de la Commission Européenne (http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/library/maps/country_maps/metadata.cfm?mycountry=HU). Nous nous sommes surtout servis de la carte des sols de Hongrie au 1:100000 (non datée).

Pour la France, les cartes pédologiques sont peu nombreuses et à une échelle médiocre. Pour la région des Terres Noires de Limagne, nous avons utilisé la carte pédologique du Val d'Allier à 1:100000 (Bornand *et al.*, 1968). Les sols de l'Alsace sont cartographiés sur la carte pédologique de la France au millionième (Dupuis, 1966 *in* Ertlen 2009) et plus récemment dans le guide des sols agricoles de l'Alsace avec une résolution limitée à l'échelle du 1:100000 (Koller et Party, 1994, *in* Ertlen, 2009).

4.3.2. Les cartes historiques

La stabilité de l'occupation du sol et de la végétation sur une période pluriséculaire, nécessaire pour la collecte des échantillons constituant la base de référence, se vérifie à l'aide de documents historiques. La première ressource historique utilisée est la première enquête militaire qui s'est déroulée entre 1763 et 1787. Elle a abouti à la cartographie du territoire de l'Empire autrichien, à l'échelle 1:28800. Dans la pratique, il s'agit d'une esquisse peu précise, car aucun système de triangulation n'a été utilisé, et le système de représentation n'est pas harmonisé. Toutefois, ce travail permet de faire une bonne distinction entre les grands types de végétation (forêts, prairies, cultures). Pour le territoire tchèque, ces cartes sont disponibles dans une application sur le site web du *Laboratoř geoinformatiky, Univerzita J.E. Purkyně* (<http://oldmaps.geolab.cz>). Cela n'est pas le cas de la Slovaquie, mais nous avons pu utiliser une version papier grâce à l'obligeance de deux collègues slovaques, Dr. F. Petrovič et Dr. M. Hajnalová.

La principale ressource cartographique, qui a été élaborée de manière précise, couvre la totalité de la surface des territoires tchèque, slovaque et hongrois. Ce sont les cartes réalisées lors de la II^o enquête militaire à l'échelle 1:28800 dans l'Empire autrichien. Pour la Bohême, les cartes ont été réalisées entre 1842 et 1852, pour la Moravie entre 1836 et 1840, et pour la Slovaquie et la Hongrie entre 1819 et 1869. Ces cartes sont disponibles pour tout le territoire de l'ancien l'Empire d'Autriche sur le site web de *Austrian State Archive/Military Archive, Vienne* (<http://mapire.staatsarchiv.at/en/>). L'altimétrie des cartes de la II^o enquête militaire a été mise à jour par la III^o enquête militaire entre 1869 et 1884. Pour la République tchèque, les cartes ont été numérisées et mises à disposition sur le site web de *Laboratoř geoinformatiky Univerzita J.E. Purkyně* (<http://oldmaps.geolab.cz>).

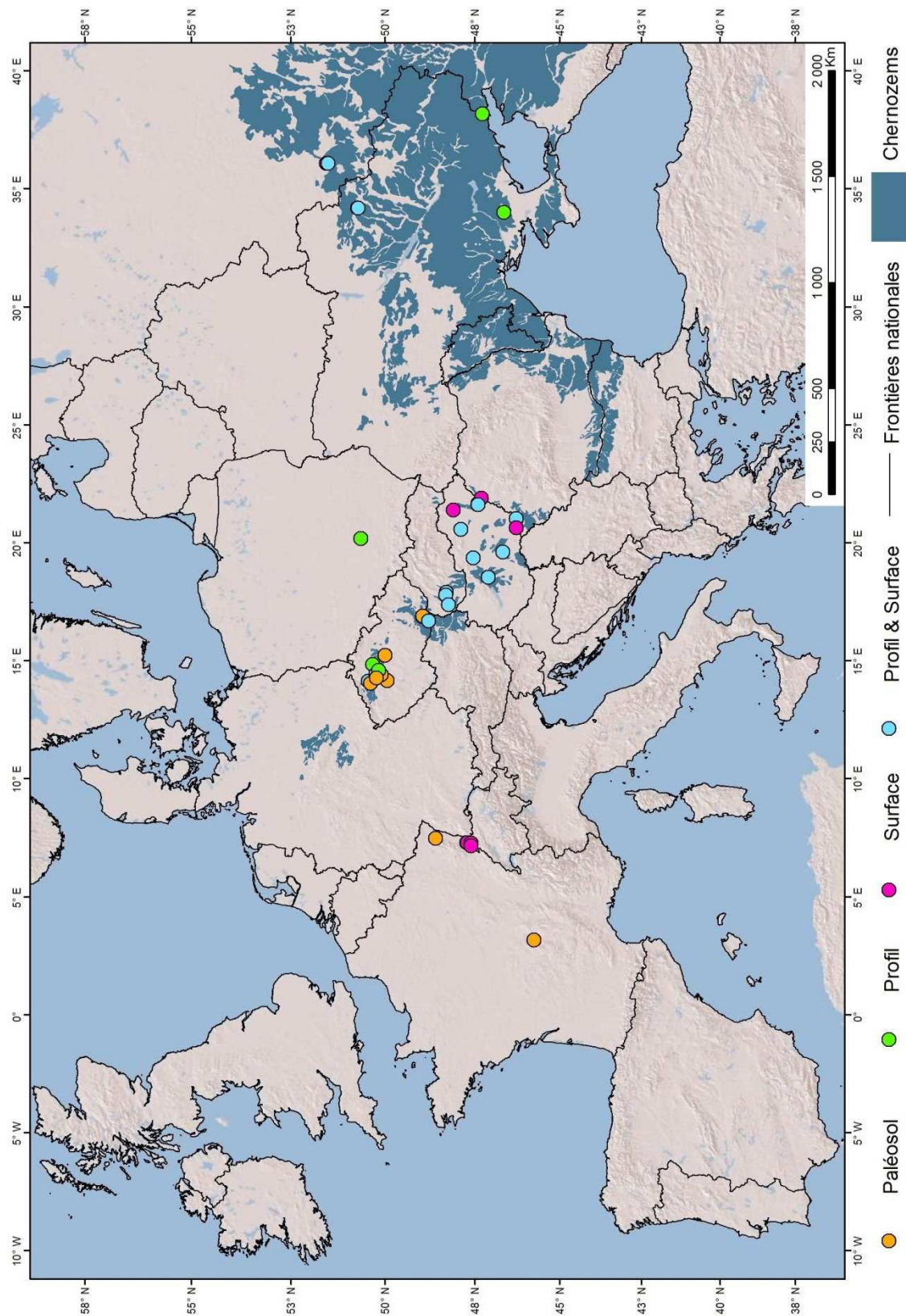


Figure 4.1. La répartition de sites de prélèvement

Plusieurs séries de photos aériennes ont été faites de manière systématique sur le territoire tchécoslovaque pendant le 20^{ème} siècle. L'intégralité des orthophotos des années 1949-1954 est publiée sur le site de *Česká informační agentura životního prostředí* (<http://kontaminace.cenia.cz/>, 15.4.2015). Les cartes topographiques des années 1920 (*Topografická mapa ČSR*) et 1980 (*Mapa Generálního štábu čs. Armády*) sont accessibles à la Cartothèque de la Faculté des Sciences, Université Charles de Prague.

Les renseignements sur les sites alsaciens proviennent des plans de finage de 1760-62, du cadastre napoléonien établi dans les années 1820, des cartes topographiques à 1:50000 allemandes des années 1880 et des archives de l'Office National des Forêts (depuis 1860) (Ertlen, 2009 ; Ertlen et Schwartz, 2010). La dynamique de la végétation au 20^{ème} siècle est observée grâce aux cartes produites pour le territoire alsacien entre 1918 et 1940 par le Service Géographique des Armées. L'Institut Géographique National (IGN) créé en 1940 prend la relève du Service Géographique des Armées en 1947. Après 1947, l'IGN produit des cartes au 1:50000. La végétation se décline en zones boisées et en zones non-boisées, seules certaines cultures (vignes, vergers) étant représentées. L'examen des cartes doit donc s'accompagner par des observations de photos aériennes (Ertlen, 2009).

Nous avons également utilisé les cartes de paysage et les photos aériennes actuelles qui sont accessibles via *Google Maps* sur www.maps.google.com et *Google Earth*.

4.4. Les sites de surface : constitution de la base de référence

4.4.1. Introduction

En règle générale, les sites potentiellement utilisables pour la constitution du référentiel de surface nous ont été signalés par différents collègues, fins connaisseurs des terrains de leur pays. Ce signalement a d'abord été confirmé par l'analyse des cartes pédologiques et historiques. Les sites ont ensuite fait l'objet d'une reconnaissance sur le terrain avant d'être validés ou exclus du choix. La détection et la sélection des sites retenus en définitive n'a pas toujours été facile. En effet, les chernozems sont des sols très riches d'un point de vue agronomique et en Europe centrale, ils sont donc le plus souvent exploités comme terres agricoles. La recherche de chernozems occupés par des végétations de steppe naturelle ou semi-naturelle a été un véritable challenge. Les sites répondant à cette caractéristique ont été repérés dans certaines zones naturelles protégées de Hongrie (Wiesbauer *et al.*, non-daté ; Nagy *et al.*, 2007; Virágh *et al.*, 2008 ; Horvath , 2010), d'Ukraine (Jelenska *et al.*, 2008) et de Russie (Khitrov *et al.*, 2013). L'échantillonnage a été complété par quelques stations de steppe à composition floristique proche de celles des steppes sur chernozem, mais localisées sur d'autres types de sols (sols bruns calcaires et rendzines). Il a encore été plus difficile de détecter des chernozems forestiers dans notre zone d'étude. Seules quelques stations de Slovaquie et Moravie ont pu être retenues. Dans la mesure où il était nécessaire de disposer d'un nombre suffisamment important de sols de référence, nous avons complété ce dispositif par quelques stations forestières localisées sur des sols formés sur matériau loessique en Alsace.

En définitive, nous avons retenu 24 sites de surface. Dix-sept sites sont couverts par une végétation steppique : 14 sur chernozems, 1 sur rendzine, 1 sur sol brun calcaire, 1 sur sol sableux hydromorphe. Sept sites se trouvent sous forêt : 4 sur chernozems et 3 sur sol brun calcaire. Les caractéristiques principales des sites sont résumées dans le tableau 4.1. Leur localisation précise est donnée par les figures 4.2 à 4.5. Dans la suite, les sites sont présentés dans l'ordre du tableau, mais en séparant les prairies et les forêts.

4.4.2. Les sites de référence pour les végétations ouvertes (prairies, steppes,...)

Brozany – BRO (Rép. Tchèque)*

50°27'21"N, 14°08'19"E, alt. 170 m

Le site de Brozany se trouve au nord-ouest de la Bohême. Le lœss forme ici un escarpement de 30 m de haut en bordure d'une vallée. La carte de la Deuxième Enquête Militaire (1842-1852) montre que l'escarpement était déjà dans sa position actuelle à cette époque. Le bord de l'escarpement n'est pas labouré, par crainte d'un effondrement. La bande protectrice entre l'escarpement et les champs est donc couverte par une prairie. Il est vraisemblable que le chernozem que nous avons prélevé n'ait pas été labouré depuis au moins 1852. La végétation est dominée par des Poacées et des Astéracées. Le climat est caractérisé par une pluviométrie annuelle moyenne faible (443 mm) et une température moyenne annuelle de 9,4°C (fig. 4.2).

Kopeč - KOC (chernozem) et KOR (rendzine) (Rép. Tchèque)*

50°14'58"N, 14°25'42"E, alt. 212 m

La zone protégée de steppe semi-naturelle de Kopeč est située près du village d'Užice (fig. 4.2). Bien que le site soit situé au cœur de la région de chernozems de Bohême centrale, il n'est pas utilisé comme terre agricole parce que ce chernozem est un îlot situé entre des rendzines peu profondes. La réserve est protégée depuis 1946 en raison de sa richesse floristique. Les archives cartographiques des 18^{ème} et 19^{ème} siècles indiquent que la zone était couverte par une prairie. Parmi les taxons herbacés abondants, on note : *Dactylis glomerata*, *Arrhenatherum elatius* (Poacées), *Fragaria vesca*, *Convolvulus* sp., *Galium verum*, *Hypericum perforatum* et *Cirsium* sp. On assiste à un envahissement récent du site par des espèces arbustives de fruticées : *Crataegus monogyna*, *Prunus spinosa*, *Rosa canina*. Les prélèvements de surface ont été effectués sur les deux types de sol, chernozem (KOC) et rendzine (KOR). Le climat est caractérisé par une pluviométrie annuelle moyenne faible (478 mm) et une température moyenne annuelle de 9°C.

Identification du site		Position géographique				Sol	Nombre d'échant.
Code	Nom de site	Pays	Latitude N	Longitude E	Altitude m		
BRO	Brozany* (P)	Rép. Tchèque	50°27'21"	14°08'19"	170	chernozem	15
BUL	Bulhary* (F)	Rép. Tchèque	48°48'0"	16°41'58"	283	chernozem	30
KOC	Kopeč* (P)	Rép. Tchèque	50°14'58"	14°25'42"	212	chernozem	15
KOR	Kopeč* (P)	Rép. Tchèque	50°14'58"	14°25'42"	212	rendzine	15
BAB	Babský les* (F)	Slovaquie	48°18'9"	17°53'19"	215	chernozem cambique	30
DUB	Dubník* (F)	Slovaquie	48°18'49"	17°46'57"	184	chernozem	15
SEN	Senec* (F)	Slovaquie	48°14'40"	17°22'14"	158	chernozem	30
HUB	Battonya-Gulya Gyep* (P)	Hongrie	46°17'59"	21°01'25"	96	chernozem verticale	20
HUUD	Bugacpuszta – (P) depression*	Hongrie	46°41'27"	19°36'04"	106	régosol hydromorphe(?)	20
HUU	Bugacpuszta (P) – dune*	Hongrie	46°41'27"	19°36'04"	107	chernozem arénique	20
HUC	Csikospuszta (P)	Hongrie	46°17'42"	20°38'36"	86	chernozem verticale	20
HUM1	Mezofold - Belsobarand-valley* (P)	Hongrie	47°6'18"	18°32'03"	117	chernozem	20
HUM2	Mezofold - Belsobarand-valley - versant ensoleillé (P)	Hongrie	47°6'18"	18°32'03"	117	régosol	20
HUR	Tard* (P)	Hongrie	47°53'48"	20°34'23"	160	chernozem à BT	20
HUS	Sarand (P)	Hongrie	47°24'13"	21°37'25"	100	chernozem arénique	20
HUT	Tokaj (P)	Hongrie	48°6'32"	21°23'01"	152	sol peu évolué	20
HUH	Hajdubagos (P)	Hongrie	47°24'9"	21°40'19"	100	chernozem arenique	20
HUP	Pocsaj (P)	Hongrie	47°18'7"	21°53'04"	113	chernozem	20
KUR	Kursk* (P)	Russie	51°32'24"	36°05'12"	200	chernozem	8
STR	Streletsk (P)	Russie	51°34'17"	36°05'40"	225	chernozem	10

Identification du site		Position géographique				Sol	Nombre d'échant.
Code	Nom de site	Pays	Latitude N	Longitude E	Altitude m		
MIK	Mikhajlovska celina* (P)	Ukraine	50°44'0"	34°12'00"	117	chernozem	10
HIR	Hirsingue-Breitholtz (F)	France	47°36'5"	7°15'29"	385	sol brun calcaire	10
CAR	Carspach-Stoeffelhag(F)	France	47°36'0"	7°09'39"	390	sol brun calcaire	10
DID	Didenheim-Gallenhölzchen (F)	France	47°42'46"	7°17'25"	320	sol brun calcaire	10

Tableau 4.1. Principales caractéristiques des sites de référence de surface qui ont servi pour la construction de la librairie spectrale. F = station forestière ; P = station de prairie.

Battonya Gulya-Gyep(Hongrie) – HUB*

46°17'59"N, 21°01'25"E, alt. 96 m

Le chernozem vertique de Battonya Gulya-Gyep est localisé dans la plaine de la rivière Maros, au sud-est de la Hongrie (fig. 4.3). La végétation du site est une prairie régulièrement fauchée. Il s'agit d'anciens pâturages du village, qui n'auraient jamais été labourés (Direction du Parc National Körös-Maros Nemzeti Park, communication personnelle). Ce fait est confirmé par la carte de la 2^{ème} enquête militaire sur laquelle l'endroit est marqué comme prairie aux alentours de 1850. Les espèces les plus abondantes sont : *Phleum* sp. (Poacées), *Galium verum*, *Ranunculus* sp., *Vicia* sp., *Lathyrus* sp., *Daucus carotta* et *Potentilla argentea*. Ce site fait partie du réseau NATURA 2000. La pluviométrie moyenne annuelle est de 550 mm et la température est de 10,5°C.

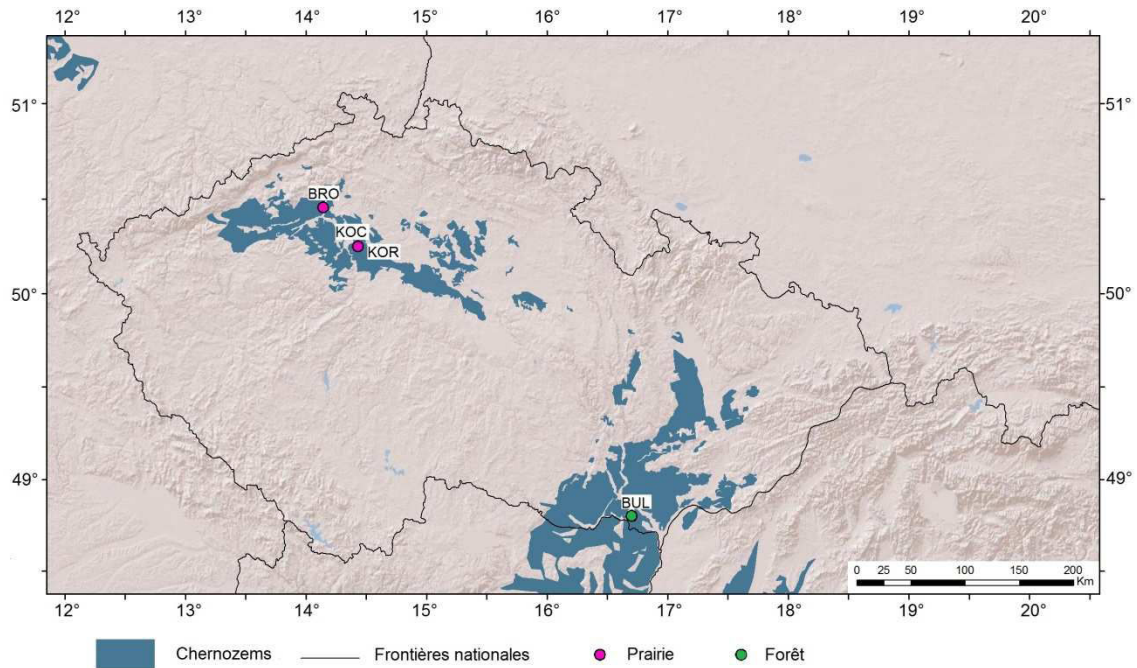


Figure 4.2. Répartition des sites de prélèvement de surface en République Tchèque. BRO = Brozany ; BUL = Bulhary ; KOR & KOP = Kopeč.

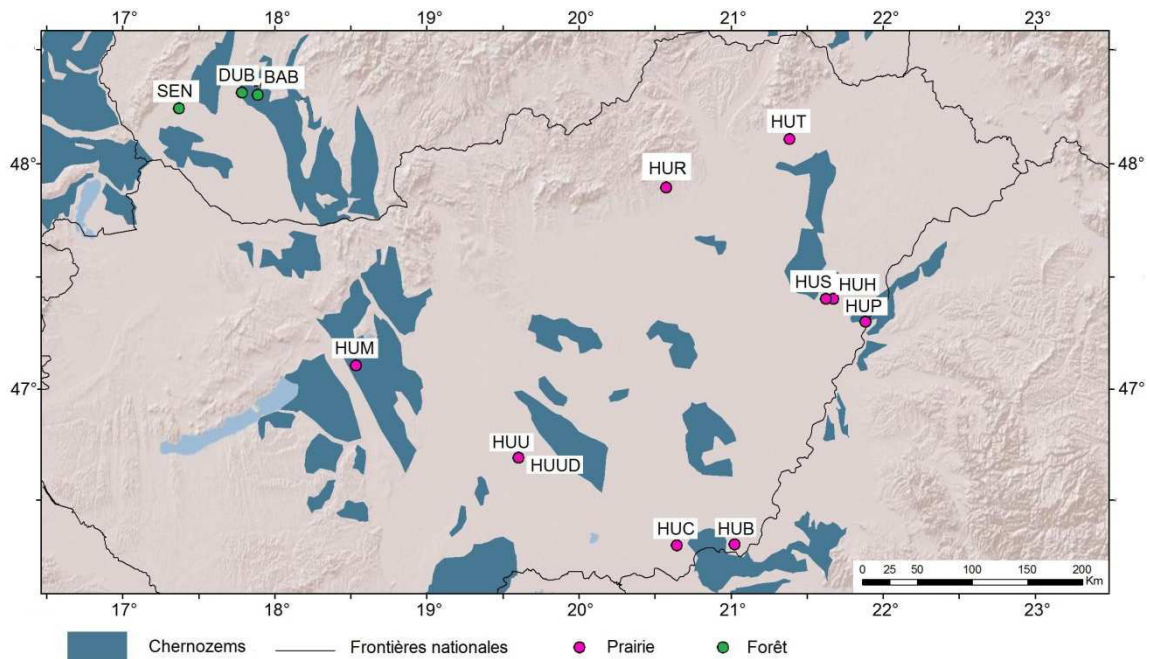


Figure 4.3. Répartition des sites de prélèvement de surface en Slovaquie et Hongrie : BAB = Babský les ; DUB = Dubník ; HUB = Battonya-Gulya Gyep ; HUC = Csikospuszta ; HUH = Hajdubagos ; HUM = Mezofold - Belsobarand-valley ; HUP = Pocsaj ; HUR = Tard ; HUS = Sarand ; HUT = Tokaj ; HUU & HUUD = Bugac puszta ; SEN = Senec.

*Bugacpuszta** (Hongrie) - HUU et HUUD

46°41'27"N, 19°36'4"E, alt. 104-106 m

Bugacpuszta est situé dans la Grande Plaine Hongroise (fig. 4.3). Le site est localisé à l'emplacement d'une station météorologique et d'une station de recherche consacrées à l'étude des flux de gaz entre sol et atmosphère en environnement steppique (Nagy *et al.*, 2007 ; Machon *et al.*, 2010 ; Czóbel *et al.*, 2010 ; Schlaufer *et al.*, 2010), et fait partie du Parc National de Kiskunsag. Le site est un bel exemple de *puszta* (= steppe en hongrois) ; d'après les cartes de la 2^{ème} enquête militaire, il était déjà signalé comme occupé par une végétation prairiale aux alentours de 1850. Le climat de la région est continental, avec des précipitations annuelles de 553 mm. La température moyenne annuelle est 10,7°C. Des dunes pléistocènes d'origine éolienne occupent une partie de la zone. Le sol est un « chernozem arénique » sur le sommet des dunes et un régosol hydromorphe dans les dépressions interdunaires. Nous avons échantillonné deux placettes : une située sur une dune (HUU) et une autre située dans la dépression au pied de la précédente (HUUD). La distance entre les deux placettes est de 20 m. La végétation est prairiale, dominée par *Festuca* sp. (Poacées), *Carex* sp., *Trifolium* sp. et *Salvia pratensis*. La prairie a été gérée en pâturage extensif pendant les 20 dernières années. La pression de pâturage moyenne est de 0,56 UGB/ha (Nagy *et al.*, 2007).

Csikospuszta – HUC (Hongrie)

45°17'42"N, 20°38'36"E, alt. 86 m

La réserve naturelle de Csikospuszta se trouve au sud de la Hongrie près du village de Királyhegyes (fig. 4.3). Intégrée au réseau de réserves protégées du Körös-Maros Nemzeti Park, elle est consacrée à la protection de biotopes de marais et de lac alcalin (www.kmnp.hu), avec une zone tampon couverte par une prairie, « *puszta* » qui, selon E. Micheli (communication personnelle), n'a jamais été labourée. La zone tampon figure déjà comme prairie sur la carte de la 2^{ème} enquête militaire des années 1850. Le climat est caractérisé par une pluviométrie moyenne annuelle de 550 mm et par une température moyenne annuelle de 10,5°C. La végétation est composée de *Bromus sterilis*, *B. mollis*, *Festuca rupicola*, *Alopecurus pratensis*, *Phleum* cf. *pratense* (Poacées), *Marubium* sp. En raison des mesures de protection intégrale, les échantillons de surface ont été prélevés dans la steppe de la zone tampon.

*Mezofold - Belsobarand-valley** - HUM1 et HUM2 (Hongrie)
117m

47°6'18"N, 18°32'3"E, alt.

Le site se trouve à proximité du village d'Aba dans le centre de la Hongrie (fig. 4.3). Une belle steppe naturelle à *Brachypodium pinnatum* sur versants est préservée en réserve naturelle (Virágh *et al.*, 2011). Plusieurs vallons secondaires orientés O-E se rattachent à la vallée principale. Ils ont tous un versant « ubac » et un versant « adret », dont la flore steppique diffère par sa composition. D'après A. Horvath (communication personnelle), le plateau sommital, actuellement cultivé, devait être boisé à l'origine. En revanche, les versants très bien drainés sont très secs et ont toujours dû être couverts par une steppe, qui serait donc ici entièrement naturelle, liée à la sécheresse édaphique. Situé sur des versants

raides, le site n'a pas été cultivé. Selon la 2^{ème} enquête militaire, il était couvert par une prairie dans les années 1850. La pluviométrie annuelle est comprise entre 550 et 600 mm. La température moyenne annuelle est entre 10 et 11 °C. Nous avons prospecté les deux versants d'un vallon secondaire. Le versant adret (HUM2), sec, est caractérisé par un régosol à horizon A épais d'environ 20 cm, à teneur en MO peu élevée (3 – 5 %) et très argileux. En revanche, le versant ubac (HUM1) est couvert par un sol isohumique limoneux, qui est soit un chernozem, soit un colluviosol chernique. Il n'a pas été possible de trancher entre les deux hypothèses. Nous avons prélevé des échantillons de surface sur les deux versants.

Tard – HUR (Hongrie) 47°53'48"N, 20°34'23"E, alt. 160 m*

Le site de Tard se trouve sur les contreforts de la montagne Bükk (fig. 4.3). La végétation est une steppe secondaire et fait l'objet de recherches botaniques sur le long terme (Virágh, non daté). La carte de la 2^{ème} enquête militaire indique que le lieu était déjà couvert de prairie dans les années 1850. Selon K. Virágh (communication personnelle), de nombreuses espèces herbacées forestières ou de steppe-forêt sont présentes ici. Elles semblent indiquer que le site était recouvert de forêt il y a quelques siècles (au minimum 400 ans). Autrefois, le site était pâturé. Depuis l'abandon du pâturage, on note un envahissement par des espèces arbustives de fruticées comme les aubépines *Crataegus*, ou le prunellier *Prunus spinosa*. La pluviométrie annuelle atteint 600 mm. La température moyenne annuelle est de 9 °C.

Hajdúbagos-HUH (Hongrie) 47°24'9"N, 21°40'19"E, alt. 100m

Le site de prélèvement est localisé au sud de Debrecen, à l'est de la Hongrie (fig. 4.3). Il porte le nom du village voisin. Il s'agit d'une réserve naturelle, Hajdusági Tajvedelmi Körzet, qui fait une partie du réseau de sites protégés de Hortobágyi Nemzeti Park. La protection est liée à la présence d'une taupe rare, complètement aveugle (*Nannospalax leucodon*) et du spermophile *Spermophilus citellus*. Le site est exploité comme pâturage communal. Le site était déjà prairial au milieu du 19^{ème} siècle comme l'indiquent les cartes de la 2^{ème} enquête militaire. La végétation de « *puszta* » est composée pour l'essentiel de *Festuca pseudovina*, *F. rupicola*, *Bromus mollis*, *Poa cf. annua* ou *pratensis*, *Cynodon dactylon* (Poacées), *Luzula* sp., *Eryngium campestre*, *Potentilla argentea*, *Achillea millefolium*, *A. setacea*, *Trifolium* spp., *Cruciata glabra*, *Vicia* sp. Localement, la steppe est sous-pâturée ce qui aboutit à un envahissement par des buissons tels que l'aubépine *Crataegus monogyna* et le prunellier *Prunus spinosa*. Le sol est un chernozem arénique. Le climat est caractérisé par une pluviométrie de 550 à 600 mm et une température moyenne annuelle comprise entre 10 et 11 °C.

Pocsaj- HUP (Hongrie) 47°18'7"N, 21°53'4"E, alt. 113 m

Le site de Pocsaj se trouve à l'Est de la Hongrie, à la frontière avec la Roumanie (fig. 4.3). C'est une réserve naturelle installée sur un versant steppique raide, en rive gauche de la rivière Er. D'après T. Novák (communication personnelle), la steppe n'a été jamais cultivée à

cause de sa pente forte. En revanche, elle était pâturée. La prairie est signalée sur la carte de la 2^{ème} enquête milliaire vers les années 1850. Actuellement, l'absence de pâturage conduit à un envahissement rapide par des espèces ligneuses. La végétation est très variée et constituée de nombreuses Poacées, Lamiacées, Apiacées, Astéracées, Fabacées, Renonculacées, Caryophyllacées, Brassicacées, Campanulacées, Liliacées, Plantaginacées, Rubiacées, Scrofulariacées. Le climat est caractérisé par une pluviométrie comprise entre 550 et 600 mm et une température annuelle moyenne comprise entre 10 et 11 °C.

Sarand - HUS (Hongrie)*

47°24'14"N, 21°37'25"E, alt. 100 m

Le site se trouve à proximité immédiate du village de Sarand, dans une plaine sur laquelle on peut observer des dunes de sables éoliens (fig. 4.3). Par endroits, il y a du loess plus ou moins pur. Le sol est un sol isohumique développé dans un matériau sableux, un chernozem arénique. D'après T. Novák (communication personnelle) le site n'a jamais été cultivé, mais utilisé en tant que pâturage. La prairie était déjà présente sur la carte de la 2^{ème} cartographie milliaire des années 1850. La végétation est de type steppe à Poacées (*Festuca rupicola*, *Elymus repens*, *Koeleria* sp., *Poa pratensis*, *Bromus sterilis*, *B. mollis*, Lamiacées (*Marubium peregrinum*), Borraginacées (*Nonea pulla*) et Cypéracées (*Carex stenophylla*). Le climat est caractérisé par une pluviométrie annuelle moyenne comprise entre 550 et 600 mm et une température annuelle moyenne entre 10 et 11 °C.

Tokaj – HUT (Hongrie)

48°6'32"N, 21°23'1"E, alt. 152m

Le site de Tokaj se trouve sur un versant anciennement viticole, qui est actuellement occupé par une steppe secondaire en cours d'envahissement par une fruticée (fig. 4.3). Cependant, une partie du versant n'aurait jamais été cultivée (T. Novák, communication personnelle) et les steppes y seraient naturelles. Sur la carte historique du 19^{ème} siècle, le versant n'est pas forestier, mais pour des raisons de repérage, il n'a pas été possible de préciser le type de végétation (vigne ou prairie) qui l'occupait vers 1850. La composition floristique correspond à celle d'une steppe quasiment naturelle : Poacées (*Festuca rupicola*, *F. pseudovina*, *Stipa pulcherrima*), Iridacées (*Iris pumila*), Astéracées (*Inula ensifolia*), Fabacées (*Lathyrus lacteus*), Santalacées (*Thesium* sp.), Lamiacées (*Stachys recta*). Le versant est protégé comme réserve naturelle. Le sol est un sol squelettique sur loess avec un horizon humifère peu épais. La roche constituant le substratum sous le loess est parfois affleurante. Nous avons gardé ce site, bien que le sol soit peu évolué, car la végétation a une composition identique à celle des steppes sur chernozem. Le climat est caractérisé par une pluviométrie moyenne annuelle comprise entre 550 et 600 mm et une température annuelle moyenne entre 9 et 10 °C.

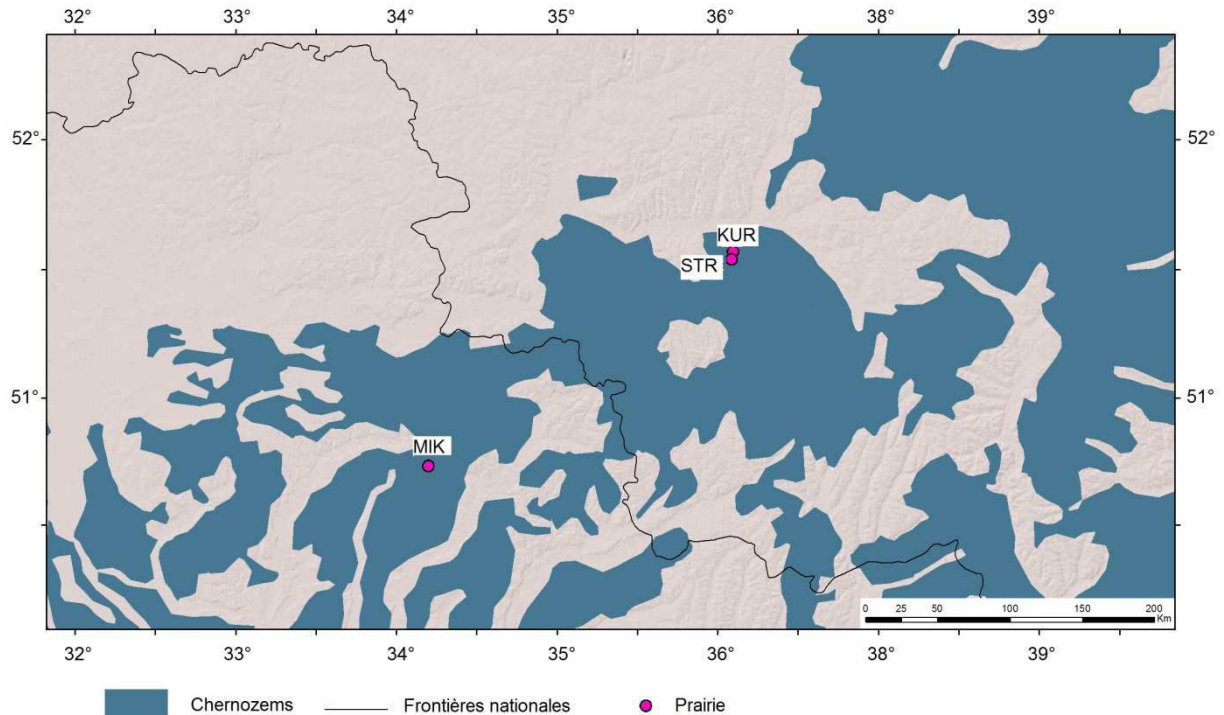


Figure 4.4. Répartition des sites de prélèvement de surface en Ukraine et en Russie : KUR = Kursk ; MIK = Mikhajlovskaja celina ; STR = Streletsk.

Kursk - KUR (Russie) 51°32'24"N, 36°5'12"E, alt. 200 m*

Le site appelé Kursk se trouve au sud-ouest de la Russie dans la zone bioclimatique de forêt-steppe (fig. 4.4). Le sol est un chernozem épais. La végétation est une steppe dominée par les *Stipa* et les *Festuca* (Poacées). On note la présence de ligneux bas. D'après B. Bronikova (comm. orale), le site n'a jamais été labouré, contrairement à d'autres chernozems des environs, qui sont actuellement cultivés. La pluviométrie annuelle atteint 550-600 mm. Les températures moyennes annuelles varient entre 6° et 7°C ; en hiver, elles descendent jusqu'à -10°C.

Streletsk – STR (Russie) 51°34'17"N, 36°5'40"E, alt. 225 m

Le site de Streletsk se trouve dans la réserve de la biosphère V.V. Alekhin au sud-ouest de la Russie, à 20 km au sud de Kursk (fig. 4.4). La réserve est protégée depuis 1935 en tant que site de steppe naturelle climacique. Le site n'a jamais été labouré. Son histoire est connue depuis le 16^{ème} siècle où le Tsar a fait cadeau de ce terrain à la population de Streletsk et aux Kazakh en remerciement pour leurs services rendus comme gardiens de la frontière russe. Cette population a utilisé la zone comme pâturage et pour l'affouragement pendant des siècles (www.wild-russia.org). Aujourd'hui, le site fait l'objet de recherches scientifiques sur le long terme. Les prélèvements de surface ont été effectués dans la partie

de la réserve où la végétation de steppe vierge suit une succession naturelle (sans fauche ni pâture). La végétation est composée d'une gamme très large d'herbacées : *Bromus riparius*, *B. inermis*, *Calamagrostis epigeios*, *Stipa pennata*, *S. dasyphylla*, *S. stenophylla*, *Festuca rupicola* (Poacées), *Adonis vernalis*, *Primula veris*, *Filipendula hexapetala*, *Iris aphylla*, *Pulsatilla patens*, *Salvia pratensis*, *S. nutans*, *Trifolium montanum*, *Myosotis popovii*, *Veronica chamaedrys*, *Veronica prostrata*, *Hypericum perforatum*, *Galium* spp., *Iris aphylla*. On note un très net envahissement de la steppe par des arbustes de fruticée : *Prunus spinosa*, *Malus* sp., *Pyrus* sp. et *Padus racemosa*. Le sol est un chernozem vermique. La température annuelle est de 5.3°C ; les mois les plus froids sont janvier et février, dont la moyenne descend à -9°C. En été la moyenne thermique atteint 17° à 19°C.

Mikhajlovska celina – MIK (Ukraine)*

50°45'N, 34°11'E, alt. 172m et 50°44'N, 34°12'E, alt. 117m

La réserve naturelle de Mikhajlovska celina fait partie du réseau Ukrainskyi stepovyi zapovidnyk (Réserves naturelles des steppes d'Ukraine). Elle est protégée depuis 1961 comme une réserve de sol naturel sur 202 hectares. Le site se trouve à 22 km au nord de la ville de Lebedyn (région de Sumy), au nord-est de l'Ukraine. Bien que située dans la zone bioclimatique de forêt-steppe, la Réserve de Mykhailivka est principalement une réserve de steppe pure. Parmi ses 960 variétés de plantes, on trouve environ 40 plantes rares (www.encyclopediaofukraine.com). La réserve est pâturée, mais dans les zones les plus éloignées des villages, la steppe est en cours d'enforestation, ce qui semble indiquer que la végétation n'est pas entièrement naturelle, mais en équilibre métastable conditionné par l'élevage. Le sol est un chernozem typique épais sur loess, avec une structure grenue. Les moyennes annuelles sont de 600 mm pour la pluviométrie et de 6°C pour la température (fig. 4.4).

4.4.3. Les sites de référence pour les forêts

Bulhary - BUL (Rép. Tchèque)*

48°48'0"N, 16°41'58"E, alt. 283 m

La réserve de chasse de Bulhary est située dans le sud de la Moravie (fig. 4.2). Le site retenu correspond à un chernozem sous forêt. Selon les sources cartographiques et historiques, la forêt occupe l'endroit depuis au moins 700 ans (Szabo, communication personnelle). La roche mère est du loess. La végétation arborée est composée de *Fraxinus excelsior*, *Quercus* sp., *Acer campestre*, *Crataegus monogyna* ; la strate herbacée est très dense et composée de *Dactylis glomerata* et autres diverses Poaceae, de *Geum* sp., *Saxifraga* sp., *Hypericum* sp., *Mercurialis perennis*, *Lamiaceae* sp., *Carex* sp. Le climat est caractérisé par une pluviométrie annuelle moyenne de 567 mm et une température annuelle moyenne 9,4°C (Správa chráněné krajinné oblasti Pálava, 2006).

Babský les* (Slovaquie) – BAB

48°18'9"N, 17°53'19"E, alt. 215m

Babský les est un site de forêt sur chernozem situé au sud de la Slovaquie (fig. 4.3). L'existence de la forêt est attestée par des sources cartographiques du 18^{ème} siècle, sur les cartes qui résultent de la Première Enquête Militaire, qui a été effectuée entre 1769 et 1785 sur le territoire slovaque. Le sol est un chernozem cambique sur loess. La composition floristique est maintenant dominée par *Ailanthus altissima*, une essence invasive arrivée récemment qui tend à supplanter les espèces autochtones (*Quercus cerris*, *Acer campestre* (abondante en sous-bois), *Ulmus laevis*, *Sorbus torminalis*, *Carpinus betulus*, *Cornus mas*, *C. monogyna*, *Fraxinus excelsior*) et une plante exotique indéterminable, échappée sans doute d'un parc situé à proximité. La strate herbacée représente entre 30 et 70 % de la couverture végétale. Elle est constituée par *Hedera helix*, *Mercurialis perennis*, *Geum* sp., et par une Lamiacée inconnue. Le climat est caractérisé par une pluviométrie moyenne annuelle comprise entre 500 et 550 mm et une température moyenne annuelle entre 9° et 10°C. Notons qu'en plus de la placette de référence, nous avons aussi prélevé, par curiosité, des échantillons de surface dans un champ adjacent à cette forêt, dont nous savons qu'il était encore forestier sur les cartes de la 1^{ère} enquête militaire (vers 1780), mais déjà en culture au moment de la deuxième enquête (entre 1819 et 1869). Cette placette est analysée avec les échantillons « inconnus ».

Dubník* – DUB (Slovaquie)

48°18'49"N, 17°46'57"E, alt. 184 m

Dubník est situé au sud de la Slovaquie, à proximité de Sered. L'existence d'une forêt sur chernozem est documentée dans les cartes résultant de la Première Enquête Militaire, réalisées entre 1769 et 1785. La forêt est protégée comme un îlot naturel dans le paysage agricole et en raison de la présence du Petit-duc *Otus scops*. La strate arborée se compose de *Quercus* sp. (*robur* ?), *Cornus mas*, *Acer campestre*, *Tilia platyphillos*. On note sur le sol la présence de nombreuses plantules et jeunes *Acer* et *Tilia* témoignant d'une bonne régénération. La strate herbacée est très discontinue. Le climat est caractérisé par une pluviométrie annuelle moyenne comprise entre 500 et 550 mm et une température annuelle moyenne entre 9° et 10°C (fig. 4.3).

Senec* - SEN (Slovaquie)

48°14'40"N, 17°22'14"E, alt. 158 m

Le site de chernozem boisé de Martinský les est situé au sud de la Slovaquie (fig. 4.3). L'existence d'une forêt est attestée depuis le 18^{ème} siècle au moins dans les cartes résultant de la Première Enquête Militaire, effectuée entre 1769 et 1785. Actuellement, la végétation est une forêt d'aspect jeune, suite à son exploitation. Sur les cartes de la 1^{ère} enquête militaire, on note que la forêt est scindée en parcelles, ce qui témoigne d'une exploitation déjà organisée au 18^{ème} siècle. La strate arborée est composée de *Quercus* sp. (*robur* ?), *Acer campestre*, *Ulmus* sp., *Crataegus monogyna* et *Fraxinus excelsior* (peu abondant). On note un envahissement de presque toutes les lisières par l'Ailante (*Ailanthus altissima*). Celui-ci commence à pénétrer à l'intérieur de la forêt, à l'occasion des coupes. La strate herbacée est très discontinue. Le sol est un chernozem cambique. Le climat est caractérisé par une pluviométrie annuelle moyenne comprise entre 500 et 550 mm et une température annuelle moyenne entre 9° et 10°C.

Les trois sites ci-dessous ont été prélevés sous forêts dans la petite région du Sundgau à l'extrême sud de l'Alsace, en France (fig. 4.5). Le climat est tempéré à tendance semi-continentale avec des précipitations annuelles supérieures à 800 mm (REKLIP et al., 1995). Aucun chernozem n'est observé dans la région sans doute en raison de la pluviométrie importante, mais ces sites ont été retenus pour étoffer le référentiel de sol sur substrat carbonaté et en l'occurrence sur substrat loessique.

Hirsingue- Breitholz – HIR (France)

47°36'5"N, 7°15'29"E, alt. 385 m

La colline du Breitholz, située au nord-est du ban de la commune de Hirsingue, appartient à l'interfluve qui sépare les vallées de l'Ill et du Thalbach. Elle est couverte par une hêtraie-chênaie. La présence de la forêt est attestée depuis au moins 250 ans par divers documents cartographiques dont le plan de finage de l'Intendance d'Alsace daté de 1760 (Ertlen et Schwartz, 2010). La placette de prélèvement est située au sommet de la colline. Le sol est décrit comme un sol brun calcaire formé sur loess (Ertlen, 2009).

Carspach - Stoeffelhag – CAR (France)

47°36'0"N, 7°9'39"E, alt. 390 m

Le site du Stoeffelhag est situé sur le ban de la commune de Carspach dans la forêt communale située au sud-ouest du village. Il s'agit d'un replat en rive gauche du Dorfbach. La forêt attestée depuis au moins 250 ans par divers documents cartographiques (Ertlen et Schwartz, 2010) est une hêtraie. Le sol est décrit comme un sol brun calcaire formé sur loess (Ertlen, 2009).

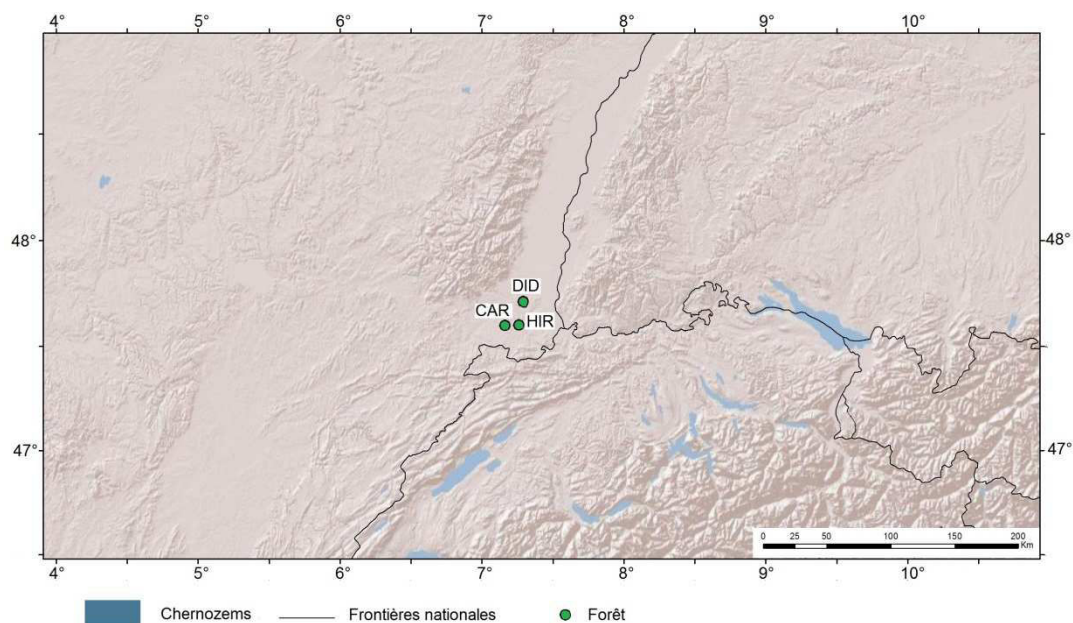


Figure 4.5. Répartition de sites de prélèvement de surface en France : CAR = Carspach - Stoeffelhag ; DID = Didenheim - Gallenhölzchen ; HIR = Hirsingue – Breitholz.

Didenheim - Gallenhölzchen – DID (France)

47°42'46"N, 7°17'25"E, alt. 320 m

Le site du Gallenhölzchen est situé sur le ban du village de Didenheim à l'extrémité nord du Sundgau. Il s'agit d'une colline couverte de loess situé au sud-ouest du village. La végétation est une forêt attestée depuis au moins 250 ans (Ertlen et Schwartz, 2010). Elle présente une forte biodiversité avec une dominante de chêne dans la strate arborée. Le sol est décrit comme un sol brun calcaire formé sur loess (Ertlen, 2009).

4.5. Les profils de sols fonctionnels

Seules les caractéristiques principales des profils sont rappelées ici. Pour une description complète, on se réfèrera aux fiches individuelles en annexe. L'ordre de présentation est celui du tableau 4.2. Les sites marqués d'un astérisque ont aussi été décrits comme site de prélèvement de surface, et des renseignements complémentaires figurent donc au § 4.4.

4.5.1. Introduction

Vingt-six profils de chernozems et sols apparentés ont été analysés. Ils sont tous localisés en Europe centrale et de l'Est. Leur localisation et quelques caractéristiques de bases sont rappelées sur la fig. 4.1. et dans le tableau 4.2. Leur localisation plus précise est donnée par les figures 4.6 à 4.8. Dans ce tableau, les profils sont présentés selon un gradient de continentalité/zonalité Ouest-Est. Chacun de ces profils fait l'objet d'une fiche descriptive complète, donnée en annexe. À deux exceptions près, ces sols ne sont pas ou plus cultivés. Certains d'entre eux, situés dans des réserves n'auraient jamais été cultivés et peuvent éventuellement servir de référence.

4.5.2. Description des profils

Brumovice – BRC (Rép. Tchèque)

48°57'36"N, 16°52'50"E, alt. 250 m

Brumovice se trouve en Moravie du Sud, au cœur de la zone Est des chernozems tchèques (cf. fig. 3.2 et fig. 4.6). Le profil BRC est localisé à l'amont d'un versant, sur une parcelle d'étude des processus d'érosion et de colluvionnement (Zádorová *et al.*, 2013). Plus précisément, sa position sommitale, sur une zone tabulaire, plane, fait qu'il n'est apparemment pas touché par ces processus, à l'inverse du profil BRK situé à l'aval, un chernozem scellé sous les colluvions (cf. § 4.6). Le versant est cultivé probablement depuis le Néolithique (Zádorová *et al.*, 2013). Le sol est un chernozem en voie de décarbonatation. L'horizon chernique est en grande partie transformé par la culture (sur 30 cm d'épaisseur). Seule sa base conserve ses caractères d'origine. Le climat est caractérisé par une pluviométrie annuelle comprise entre 500 et 600 mm et une température annuelle moyenne entre 9° et 10°C.

Brozany* – BRO (Rép. Tchèque)

50°27'21"N, 14°8'19"E, alt. 170 m

Le chernozem a été échantillonné en bordure d'un escarpement de 30 m de haut, dont la partie sommitale est constituée par un dépôt de loess (fig. 4.6). L'escarpement étant stable depuis au moins 1852 (2° Enquête Militaire), il est certain que le profil n'a pas été labouré depuis au moins cette date. Le sol est un chernozem typique. L'horizon Ac fait environ 30 cm d'épaisseur. Il se prolonge par un horizon de transition épais de 15 cm. Quelques fragments minuscules de charbon ont été observés dans l'horizon AC, mais n'ont pu être analysés. Le sol est carbonaté sur toute son épaisseur.

Identification du site		Position géographique				Sol	Nombre d'échant.
Code	Nom de site	Pays	Latitude N	Longitude E	Altitude m		
BRC	Brumovice – chernozem	Rép. Tchèque	48°57'36"	16°52'50"	250	chernozem	6
BRO	Brozany*	Rép. Tchèque	50°27'21"	14°8'19"	170	chernozem	36
BUL	Bulhary*	Rép. Tchèque	48°48'0"	16°41'58"	283	chernozem	60
KOC	Kopeč*	Rép. Tchèque	50°14'58"	14°25'42"	212	chernozem	8
KOR	Kopeč*	Rép. Tchèque	50°14'58"	14°25'42"	212	rendzine	30
KUC	Kuchyňka	Rép. Tchèque	50°10'54"	14°35'43"	240	chernozem	72
POP	Poplze chernozem	Rép. Tchèque	50°23'44"	14°2'45"	183	chernozem	48
MD	Mlodzewo	Pologne	50°40'0"	20°11'0"	262	chernozem	12
BAB	Babský les*	Slovaquie	48°18'9"	17°53'19"	215	chernozem cambique	51
DUB	Dubník*	Slovaquie	48°18'49"	17°46'57"	184	chernozem	27
SEN	Senec*	Slovaquie	48°14'40"	17°22'14"	158	chernozem	33
HUB	Battonya-Gulya Gyep*	Hongrie	46°17'59"	21°1'25"	96	chernozem verticale	51
HUG	Godolo hills - Szarkaberki valley – steppe*	Hongrie	47°32'33"	19°21'29"	217	chernozem	22
HUGF	Godolo hills - Szarkaberki valley - foret-steppe*	Hongrie	47°32'33"	19°21'29"	217	chernozem	20
HUM1	Mezofold - Belsobarand-valley*	Hongrie	47°6'18"	18°32'3"	117	chernozem	35

Identification du site		Position géographique				Sol	Nombre d'échant.
Code	Nom de site	Pays	Latitude N	Longitude E	Altitude m		
HUR	Tard*	Hongrie	47°53'48"	20°34'23"	160	chernozem à BT	20
HUS	Sarand*	Hongrie	47°24'13"	21°37'25"	100	chernozem arénique	60
HUU	Bugac puszta – dune*	Hongrie	46°41'27"	19°36'04"	107	chernozem arénique	20
HUUD	Bugac puszta – depression*	Hongrie	46°41'27"	19°36'4"	106	régosol hydromorphe (?)	14
A1	Askania Nova 1	Ukraine	46°39'0"	34°0'	27	kastanozem	13
A2	Askania Nova 2	Ukraine	46°39'0"	34°0'	27	kastanozem	17
A3	Askania Nova 3	Ukraine	46°39'0"	34°0'	27	kastanozem	14
CT	Mikhajlovska celina	Ukraine	50°45'0"	34°11'0"	172	chernozem	14
H1	Homutovsky steppe	Ukraine	47°17'0"	38°11'0"	57	chernozem	17
MIK	Mikhajlovska celina MIK*	Ukraine	50°44'0"	34°12'0"	117	chernozem	10
KUR	Kursk*	Russie	51°32'24"	36°05'12"	200	chernozem	12

Tableau 4.2. Principales caractéristiques des profils analysés.

*Bulhary** - BUL (Rép. Tchèque)

48°48'0"N, 16°41'58"E, alt. 283 m

Bulhary est situé dans le sud de la Moravie (fig. 4.6). Le sol est un chernozem sur loess, sous forêt. Selon les sources cartographiques et historiques, la forêt occupe l'endroit depuis au moins 700 ans (Szabo, communication personnelle). L'horizon Ac est épais (50 cm). On passe au loess par un horizon de transition A/C formé par bioturbation et mélange des deux horizons A et C. Les pH sont peu élevés, et le sol est peu carbonaté, conséquence peut-être de son histoire forestière.

Kopeč - KOC (chernozem) et KOR (rendzine) (Rép. Tchèque)*

50°14'58"N, 14°25'42"E, alt. 212 m

La zone protégée de Kopeč est située près du village d'Užice (fig. 4.6). Le substratum géologique local est constitué de néphéline, qui forme des pointements où la roche affleure et de calcaire et marnes entre ces éminences. Les prélèvements ont été faits dans une zone de probable mélange de matériaux, car le sol est légèrement carbonaté tout en étant très sableux. En raison des mesures de protection qui affectent la zone, seuls des prélèvements à la tarière ont été effectués sur deux sols: une rendzine peu profonde (15 cm) et un chernozem épais d'au moins 40 cm.

Kuchyňka – KUC (Rép. Tchèque)

50°10'54"N, 14°35'43"E, alt. 240 m

Le site est localisé dans la réserve naturelle de Kuchyňka, à proximité du village de Brázdím en Bohême Centrale (fig. 4.6). Le soubassement est constitué de silex, recouvert de loess dans lesquels s'intercalent des niveaux de silex remaniés sur les pentes en conditions périglaciaires. Le climat est caractérisé par une pluviométrie annuelle moyenne comprise entre 500 et 550 mm et une température annuelle moyenne entre 9° et 10°C. La végétation semi-naturelle (forêt claire) a été préservée parce que le site est localisé en rebord de pente forte. Le chernozem a été prélevé sur le front de taille d'une ancienne carrière. Il s'agit d'un chernozem épais. Il est carbonaté. Par endroits, on peut observer un horizon structural calcaire discontinu entre le loess remanié et l'horizon Ac (voir figure 1.8).

Poplze profil - POP (Rép. Tchèque)

50°23'44"N, 14°2'45"E, alt. 183 m

Le lieu de prélèvement est situé en bordure d'une carrière à l'entrée du village de Poplze u Libochovic dans le bassin de la rivière Ohre au nord-ouest de la Bohême Centrale (fig. 4.6). Le climat est caractérisé par une pluviométrie annuelle moyenne de 490 mm et une température annuelle moyenne de 8,5°C. Le soubassement est formé de marnes calcaires. Le chernozem a une morphologie typique. Bien qu'il ne soit plus labouré depuis l'avancée de l'exploitation de la carrière, on peut observer un ancien horizon de labour épais de 30 cm. L'horizon Ac non perturbé par le labour fait près de 30 cm d'épaisseur. Le profil est toutefois remanié, car on peut y collecter en profondeur d'assez abondants tessons de céramique de l'Age du Bronze (Dreslerova, comm. orale).

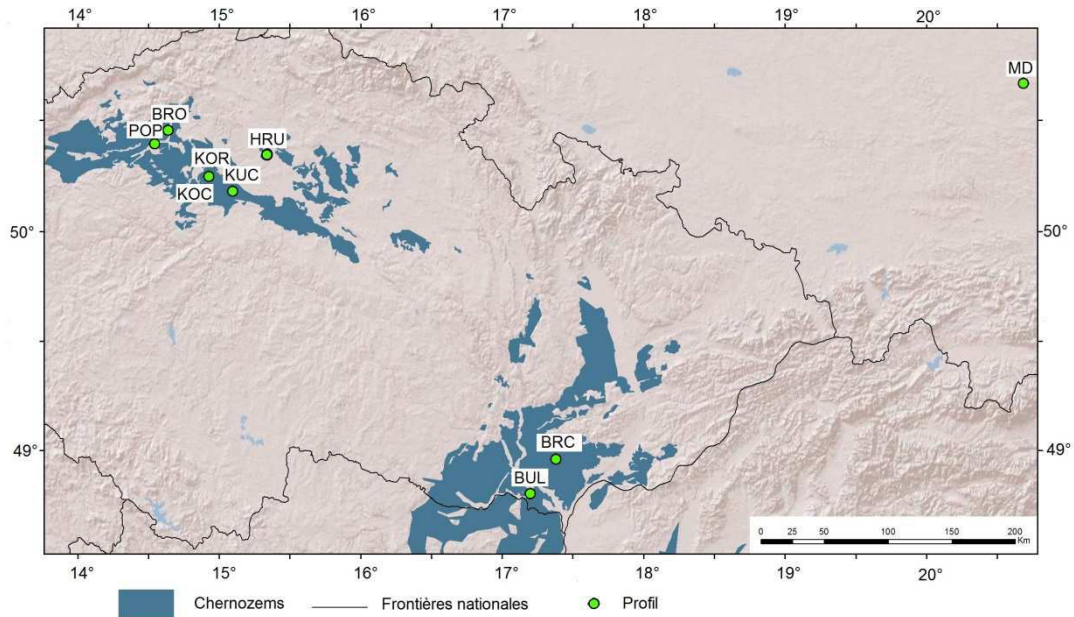


Figure 4.6. Répartition des sites de prélèvement de profils de sols en République Tchèque et en Pologne : BRC = Brumovice ; BRO = Brozany ; BUL = Bulhary ; HRU = Hrušov ; KOR & KOC = Kopeč ; KUC = Kuchyňka ; POP = Poplze ; MD = . Mlodzewo.

Mlodzewo – MD (Pologne)

50°40'N, 20°11', alt. 262m

Ce sol, situé au sud de la Pologne (fig. 4.6), a fait l'objet d'une étude préalable par Jelenska *et al.* (2008), qui en ont étudié les propriétés magnétiques et nous ont aimablement fourni les échantillons. Il a été cultivé dans un passé lointain, mais évolue naturellement depuis, sans que la date précise en soit connue. La végétation est de type prairial. Il s'agit d'un chernozem non-dégradé sur loess (Jelenska *et al.*, 2008). La pluviométrie locale est de 550 mm et la température moyenne annuelle de 8°C.

Babský les(Slovaquie) –profil BAB*

48°18'9"N, 17°53'19"E, alt. 215m

Babský les est situé au sud de la Slovaquie (fig. 4.7). La roche mère est du loess. Le sol est un chernozem cambique. Un horizon mollique de 57 cm d'épaisseur surmonte un horizon cambique Bw de 25 cm d'épaisseur. Le profil est situé sous forêt, et le pH est très acide jusqu'à 25 cm de profondeur, acide ensuite jusqu'à 80 cm de profondeur. Il ne devient basique que dans l'horizon C. Quelques carbonates subsistent toutefois sur toute l'épaisseur du profil.

Dubník – DUB (Slovaquie)*

48°18'49"N, 17°46'57"E, alt. 184 m

Dubník est situé au sud de la Slovaquie, à proximité de Sered (fig. 4.7). La forêt est attestée sur ce chernozem carbonaté depuis au moins 250 ans. Le sol semble être un chernozem

typique, carbonaté, avec un A épais de 45 cm. Le loëss apparaît à 50 cm. L'humus est curieusement de type moder avec un pH de 6,3 (malgré la présence de quelques carbonates). Cela pourrait être la conséquence de la sécheresse de surface. Ce sol n'a été prélevé qu'à la tarière.

Senec - SEN (Slovaquie)*

48°14'40"N, 17°22'14"E, alt. 158 m

Le chernozem sous forêt de Senec est situé au sud de la Slovaquie (fig. 4.7). La roche mère est le loëss. L'existence d'une forêt est attestée depuis 250 ans au moins. Le sol est un chernozem cambique : sous un horizon A peu épais (25 cm), il y a un horizon S, à couleur jaune bien marquée (expression du fer). Cet horizon se distingue bien de l'horizon de transition A/C, formé par simple bioturbation dans les chernozems typiques. Le loëss est décarbonaté à son sommet. Les pH sont acides jusqu'au loëss.

Battonya Gulya-Gyep(Hongrie) –HUB*

46°17'59"N, 21°1'25"E, alt. 96 m

Battonya Gulya-Gyep est localisé dans le bassin de la rivière Maros, au sud-est de la Hongrie (fig. 4.7). Le sol est un chernozem vertique de plaine, sous steppe. L'horizon A est épais (65 cm), limono-argileux. La structure est polyédrique anguleuse malgré une très forte activité de vers de terre. La transition entre l'horizon A et le loëss est progressive : l'horizon A/C de bioturbation qui sépare l'horizon humifère du loëss fait plus de 25 cm d'épaisseur. Le loëss n'a pas été atteint, en raison des difficultés à creuser la fosse dans un matériau très compact et sec. Le sol est carbonaté, mais un transfert des carbonates a lieu, comme en témoigne l'abondance de poupées de loëss dans l'horizon A/C. Les traces d'activité biologiques (crotonas et galeries de vers sont très abondantes.

Gödölö hills - Szarkaberki valley – HUG & HUGF (Hongrie)

47°32'33"N, 19°21'29"E, alt. 217m

La station d'étude Gödölö hills - Szarkaberki valley est située près du village d'Isaszeg, à 25 km à l'est de Budapest (fig. 4.7). Le site est localisé sur un versant loëssique dont le sol n'a jamais été labouré. Jusqu'au début du 20^{ème} siècle, le site était couvert par une forêt à chêne pubescent. Après défrichement, il a été utilisé comme pâturage (Fekete *et al.*, 1998). Cette affirmation est difficile à prouver en observant la carte historique, car la représentation de la végétation y est masquée par les hachures représentant le relief. Actuellement, le site est strictement protégé et en évolution non contrôlée. La succession de végétation est donc entièrement naturelle. On observe que la steppe à *Brachypodium pinnatum* est en cours d'élimination par l'extension d'une fruticée et de chênes pubescents. Nous avons prélevé deux placettes de surface (non retenues dans le référentiel, mais utilisées comme « inconnues ») et deux fosses pédologiques représentatives de deux situations différentes : HUG qui correspond à une steppe et HUGF qui correspond à une forêt-steppe pour pouvoir observer le changement des caractéristiques de sol avec le changement de la couverture végétale. Le site a été retenu en raison de la présence d'une végétation steppique, mais le sol n'est pas un chernozem. Il s'agit d'un régosol limono-sableux. Sous forêt (HUGF),

l'horizon A fait 27 cm d'épaisseur. Le profil est acide (pH aux alentours de 5,6), bien que quelques traces de carbonates subsistent (environ 1,5 %). Sous steppe (HUG), l'horizon A a une épaisseur équivalente, mais le profil est carbonaté, avec des pH compris entre 7,4 et 8,2. La pluviométrie moyenne annuelle est de 600 mm. La température moyenne annuelle est de 9°C.

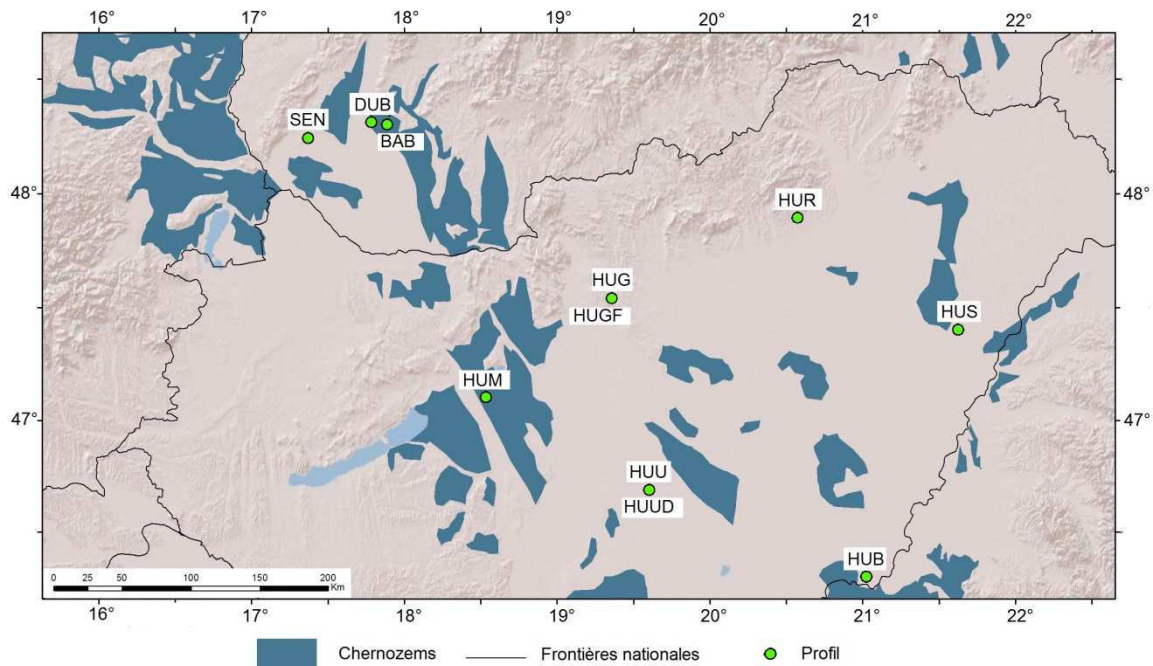


Figure 4.7. Répartition des sites de prélèvement de profils complets en Slovaquie et Hongrie : BAB = Babský les ; DUB = Dubník ; HUB = Battonya-Gulya Gyep ; HUG & HUGF = Godolo hills - Szarkaberki valley ; HUM = Mezofold - Belsobarand-valley ; HUR = Tard ; HUS = Sarand ; HUU & HUUD = Bugac puszta ; SEN = Senec.

Mezofold - Belsobarand-valley - HUM1 (Hongrie) 47°6'18"N, 18°32'3"E, alt. 117m*

Le site se trouve à proximité du village d'Aba dans le centre de la Hongrie, au sein d'une réserve naturelle de steppe (fig. 4.7). Le sol a été prélevé sur le versant ubac d'un vallon secondaire. Il s'agit d'un sol isohumique limoneux, dont il n'a pas été possible de préciser s'il s'agit d'un chernozem, ou d'un colluviosol chernique. L'horizon A fait 70 cm d'épaisseur, ce qui laisse supposer qu'il est *a minima* légèrement épaissi par colluvionnement. Il est carbonaté. La structure est celle d'un chernozem typique, grumeleuse. La texture est limoneuse, mais il y a une fraction sableuse non négligeable dans le sol.

Tard – HUR (Hongrie) 47°53'48"N, 20°34'23"E, alt. 160 m*

Le site de Tard se trouve sur les contreforts de la montagne Bükk (fig. 4.7). Le sol est extrêmement compact et très difficile à creuser. Il s'agit d'un chernozem dégradé à horizon

BT, qui pourrait être la preuve de l'ancienne présence d'une forêt. La zone est en prairie depuis 400 ans au moins, semble-t-il. Dans la classification hongroise, le sol est classé comme un « chernozem brown forest soil ». L'horizon A fait 30 cm d'épaisseur. L'horizon BT a au moins 25 cm d'épaisseur (base non atteinte). Le sol est entièrement décarbonaté et acide, jusqu'à la base du profil prélevé. La roche mère est du loess.

Sarand - HUS (Hongrie)*

47°24'14"N, 21°37'25"E, alt. 100 m

Le sol a été prélevé à proximité immédiate du village de Sarand (fig. 4.7). Il est développé au sommet d'une des dunes éoliennes sableuses pléistocènes qui parsèment la plaine environnante, développée dans un loess plus ou moins pur. Il est clairement isohumique et a une morphologie de chernozem arénique. L'horizon A est très épais : 1,25 m. Il surmonte des horizons peu organiques, dans lesquels on peut observer de très nombreuses crotovinas. Le sol est acide. Il devient neutre à 1,8 m de profondeur. La question est alors posée de son rattachement aux chernozems. Il serait plutôt à rapporter aux regozems.

Bugac puszta (Hongrie) - HUU et HUUD*

46°41'27"N, 19°36'4"E, alt. 104-106 m

Bugacpuszta est situé dans la Grande Plaine Hongroise (fig. 4.7). Des dunes pléistocènes d'origine éoliennes occupent une partie de la zone. Le sol est un « chernozem arénique » sur le sommet des dunes et un régosol hydromorphe dans les dépressions interdunaires. Nous avons creusé et échantillonné deux fosses : une située sur une dune (HUU) et une autre située dans la dépression à son pied (HUUD). La distance entre les deux fosses est de 20 m. Le chernozem arénique (HUU) se caractérise par un horizon A épais de 40 cm, avec une transition nette avec l'horizon C. Le sol est très sableux et décarbonaté jusqu'à la base de l'horizon 1, puis légèrement carbonaté dans l'horizon C. Le régosol hydromorphe (HUUD) a un horizon A moins épais (25 cm), une transition glossique vers un horizon E, témoignant du battement de la nappe. L'influence de l'hydromorphie se traduit également par sa couleur plus sombre et sa teneur en matières organiques plus importante. Il est carbonaté.

Askania Nova (Ukraine) – profils A1, A2, A3

46°28'N, 33°54'E, alt. 27m

Askania Nova est une réserve naturelle de la biosphère située au sud de l'Ukraine (fig. 4.8). Le climat y est très sec, et les sols qui se sont formés sur loess sont de ce fait des kastanozems et non des chernozems. Au départ, ces échantillons ont été prélevés pour l'étude des propriétés magnétiques de sols non-pollués (Jelenska *et al.*, 2008). Le sol a été classé comme « kastanozem salin » (WRB 1997). Il a fait l'objet de prélèvement dans trois fosses notées A1, A3 et A3, qui correspondent à des couverts végétaux de nature différente. A1 est situé au cœur d'une réserve de steppe (protégée depuis 1898) à *Stipa* et *Festuca rupicola*. Le profil A2 se trouve sous une prairie fauchée à *Stipa* et *Festuca rupicola*. Le profil A3 se trouve sous une steppe récente à *Stipa* et *Festuca rupicola* qui a succédé à de la culture. Mais le sol n'a plus été cultivé et labouré depuis au moins 50 ans (Jelenska, comm. personnelle). L'horizon A fait environ 45 cm d'épaisseur. En dessous, on trouve un horizon Bht illuvial, encore riche en matière organique. Le pH est neutre, puis basique. En

profondeur (70 cm), il devient très élevé (9,37), ce qui ne peut s'expliquer que par la présence de carbonate de sodium ou de sulfate de calcium. Le sol contient d'ailleurs du gypse. Le climat est caractérisé par une température moyenne annuelle de 9°C et par des précipitations annuelles moyennes de 345 mm.

Mikhajlovska celina – CT et MIK (Ukraine)* 50°45'N, 34°11'E, alt. 172m et 50°44'N, 34°12'E, alt. 117m

La réserve naturelle de Mikhajlovska celina se trouve à 22 km au nord de la ville de Lebedyn au nord-est de l'Ukraine (fig. 4.8). Le sol est un chernozem typique épais sur loess, avec une structure grenue. Deux fosses ont été prélevées : l'une (CT) par le Professeur M. Jelenska dans le cadre de ses travaux sur le magnétisme (Jelenska *et al.*, 2008), et la deuxième par nos soins lors d'un colloque en 2013. Les deux profils sont très comparables. L'horizon A fait 80 cm d'épaisseur. IL est carbonaté à l'exception de sa partie superficielle. La partie située entre 80 et 110 cm de profondeur est un horizon de transition à nombreuses crotovinas.

Homutovsky steppe- H1 (Ukraine) 47°17'0"N, 38°11'0"E, alt. 57 m

La réserve naturelle de Homutovsky steppe fait partie du réseau Ukrainyskyi stepovyi zapovidnyk (Réserves naturelle de steppes d'Ukraine) (fig. 4.8). Elle occupe une superficie de 1030,4 hectares et est protégée depuis 1961. Elle est située au nord du village d'Homutove, sur la rive gauche de la rivière Gruzky Yelanchik et à 20 km de la côte nord de la mer d'Azov dans l'est de l'Ukraine. La température moyenne annuelle est de 9,4°C, la pluviométrie n'atteint que 444 mm. La végétation est caractérisée par une steppe à *Festuca rupicola*, *Stipa* spp. et autres Poacées. Le sol a été échantillonné par M. Jelenska pour l'étude de ses propriétés magnétiques. Par ses caractéristiques, le sol correspond à un chernozem typique formé sur loess (Jelenska *et al.*, 2008 ; Jelenska, comm. pers.). L'horizon A fait 60 cm d'épaisseur. On passe ensuite à un horizon calcique avec accumulation de carbonates sous forme de poupées de loess. Le loess est atteint à 83 cm de profondeur.

Kursk- KUR (Russie)* 51°32'24"N, 36°5'12"E, alt. 200 m

Kursk se trouve au sud-ouest de la Russie dans la zone bioclimatique de forêt-steppe (fig. 4.8). Le sol est un chernozem épais, sur loess, avec un horizon A/C fortement bioturbé. Il a servi de profil modèle pour la WRB. D'après B. Bronikova (comm. orale), il n'a jamais été labouré, contrairement à d'autres chernozems des environs, actuellement cultivés. L'horizon A est très épais, plus d'un mètre. L'horizon de transition entre A et C est épais de 30 à 50 cm, très irrégulier et fortement marqué par l'abondance de l'activité biologique, crotovinas et galeries verticales de vers de terre. Il est décarbonaté jusqu'à 75 cm de profondeur, très carbonaté ensuite. La granulométrie est limono-sableuse.

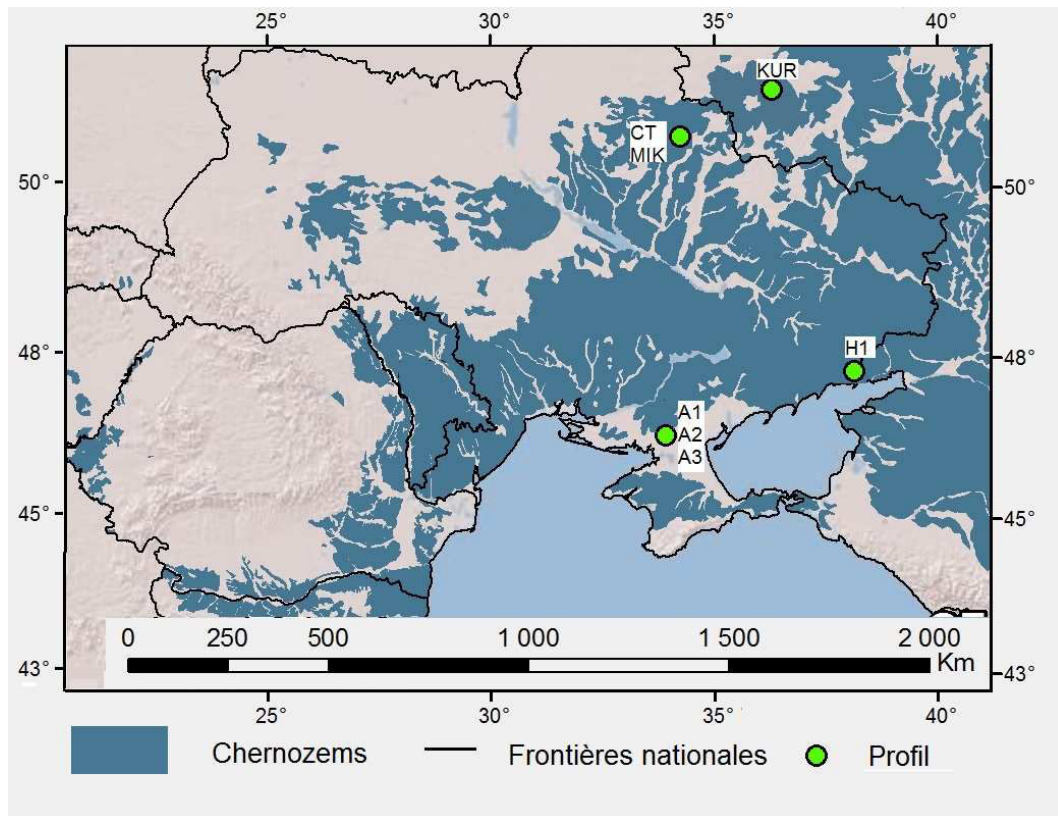


Figure 4.8. Répartition des sites de prélèvement de profils complets en Ukraine et en Russie : A1, A2, A3 = Askania Nova ; MIK & CT = Mikhajlovskaja celina ; H1 = Homutovskij steppe ; KUR = Kursk.

4.6. Les paléochernozems et les colluvions qui les recouvrent

4.6.1. Introduction

L'ensemble des paléosols provient de République Tchèque (figure 4.9) ou de France (figure 4.11). Certains ont été identifiés grâce à la coopération avec des services archéologiques (*cf. infra* : BUB, CPB, MOR, KOL1, KOL2, KOL3). Les échantillons des sites WIW et SCD ont été transmis par Damien Ertlen (Université de Strasbourg). Deux paléosols d'Alsace (ZMC, S8SD294) ont fait l'objet d'une première étude dans la thèse de Ertlen (2009), mais sont détaillés ici avec un nouveau référentiel. Deux paléosols tchèques (BRE et POL) ont fait l'objet d'étude paléoenvironnementales (Ložek, 1974 ; Ložek et Smolíková, 1978). Le Dr. V. Ložek nous a aimablement servi de guide pour localiser précisément sur le terrain les affleurements qu'il avait étudiés dans les années 1970. Les échantillons BRC nous ont été transmis par Tereza Zadorova (Université des Sciences de la Vie, Prague). Les derniers (ZMK et ZMC) proviennent du site classique de Zeměchy, publié par Zander *et al.* (2000), Cílek (1995) et Ložek (1995), qui l'avaient étudié à l'aide d'autres méthodes. Au total, 16 paléosols ont été prélevés. Douze sont holocènes, quatre sont pléistocènes. Leurs principales caractéristiques sont résumées dans le tableau 4.3.

Quand cela a été possible, nous avons également prélevé les sédiments qui scellent le paléosol, c'est-à-dire des colluvions qui sont le plus souvent d'origine agricole. En effet, ces colluvions résultent de l'érosion des horizons de surface et sont susceptibles d'apporter des renseignements complémentaires lors de l'analyse SPIR. En revanche, le matériau loessique qui sépare les deux paléosols de Zeměchy n'a pas été prélevé.

4.6.2. Description des sites

Les sites sont présentés dans le même ordre que sur le tableau 4.3 : République tchèque, puis France, Holocène puis Pléistocène. Des fiches de description plus précises (avec photos) sont données en annexe. Les coupes stratigraphiques sont présentées sur les figures 4.10 (paléosols tchèques) et 4.12 (France).

Břesnice - BRE (Rép. Tchèque)

49 °56'44"N, 14 °9'22"E, alt. 291 m

Le site de Břesnice est situé à proximité du village de Srbsko en Bohême (fig. 4.9 & 4.10). Cette séquence sédimentaire de l'Holocène est formée à la base d'un chernozem attribué au Boréal (Ložek, 1974). Ce paléosol est recouvert par deux couches successives de sédiments de 120 cm d'épaisseur : tout d'abord, des sédiments carbonatés de milieux marécageux, puis au-dessus, les colluvions modernes dont la partie supérieure est pédogénétisée et forme un colluviosol. Le paléochernozem a une structure massive. L'horizon A a une épaisseur de 65 cm. Il est parsemé de fins tubules de carbonates sous forme de pseudo-mycélium. Il y a aussi de nombreux éléments grossiers et des microcharbons de bois dans ce sol. L'horizon C est constitué par du loess remanié.

Brumovice – BRK (Rép. Tchèque)

48 °58'5"N, 16 °53'8"E, alt. 195 m

Le site de Brumovice se trouve en Moravie de Sud (fig. 4.9 & 4.10). Les échantillons ont été prélevés sur une parcelle d'étude des processus d'érosion et de colluvionnement (Zádorová *et al.*, 2013). Le paléosol est un chernozem scellé sous 1,5 m de colluvions et situé dans la partie inférieure du versant. Le secteur est cultivé de façon plus ou moins continue probablement depuis le Néolithique (Zádorová, 2013). L'épaisseur de l'horizon A du paléochernozem est de 1,1 m, ce qui laisse supposer qu'il a aussi été épaissi par colluvionnement.

Identification		Position géographique				Type de sol	Nombre d'échantillons	
Code de site	Nom de site	Pays	Latitude N	Longitude E	Altitude m		Colluvions	Paléosols
BRE (H)	Břesnice	Rép. Tchèque	49°56'44"	14°09'22"	291	Paléo-chnozem	42	51
BRK (H)	Brumovice	Rép. Tchèque	48°58'05"	16°53'08"	195	Paléo-chnozem	15	18
BUB (H)	Bubeneč	Rép. Tchèque	50°06'30"	14°24'04"	196	Paléo-chnozem	0	35
KOL1 (H)	Kolín	Rép. Tchèque	50°00'17"	15°14'02"	205	Paléo-chnozem	21	63
KOL2 (H)	Kolín	Rép. Tchèque	50°00'20"	15°14'07"	205	Paléo-chnozem	0	63
KOL3 (H)	Kolín	Rép. Tchèque	50°00'16"	15°14'04"	205	Paléo-chnozem	0	48
POL (H)	Poplze	Rép. Tchèque	50°23'43"	14°02'33"	181	Paléo-chnozem	21	101
ZMC (P)	Zeměchy	Rép. Tchèque	50°14'00"	14°16'00"	±210	Paléo-chnozem	0	9
ZMK (P)	Zeměchy	Rép. Tchèque	50°14'00"	14°16'00"	±210	Paléo-chnozem	0	14
CPB1 (H)	Clermont-Ferrand	France	45°45'52"	3°09'30"	352	Paléo-chnozem	39	21
CPB2 (H)	Clermont -Ferrand	France	45°45'52"	3°09'30"	352	Paléo-chnozem	0	18
CPB3 (H)	Clermont -Ferrand	France	45°45'52"	3°09'30"	352	Fosse comblée	0	10
MOR (H)	Didenheim-Morschwiller	France	47°43'50"	7°16'58"	275	Paléo-chnozem	24	24
SCD (H)	Sainte-Croix-en-Plaine	France	48°00'48"	7°22'17"	201	Paléosol isohumique	0	6
GOU (P)	Gougenheim	France	48°42'35"	7°33'56"	201	Paléosol isohumique	0	4
WIW (P)	Wiwersheim	France	48°38'19"	7°36'20"	170	Paléosol isohumique	0	4

Tableau 4.3. Principales caractéristiques des paléosols.

Bubeneč – BUB (Rép. Tchèque)

49°57'N, 14°9'E, alt. 196 m

Le site est localisé à Prague-Bubene, en zone urbanisée. Le paléochernozem a été révélé au cours de la fouille archéologique d'une station multiculturelle occupée au Néolithique, à l'Age du Bronze et au Moyen Age. Le paléochernozem est bien structuré et recouvert par 150 cm de sédiments d'origine archéologique. La surface ondulée du paléochernozem correspond au début de l'Enéolithique (ca. 4200-3800 avant JC) (Maříková-Vičková, non publié). L'horizon A a 65 cm d'épaisseur. L'horizon C est formé par du loëss, avec quelques crotovinas (fig. 4.9 & 4.10).

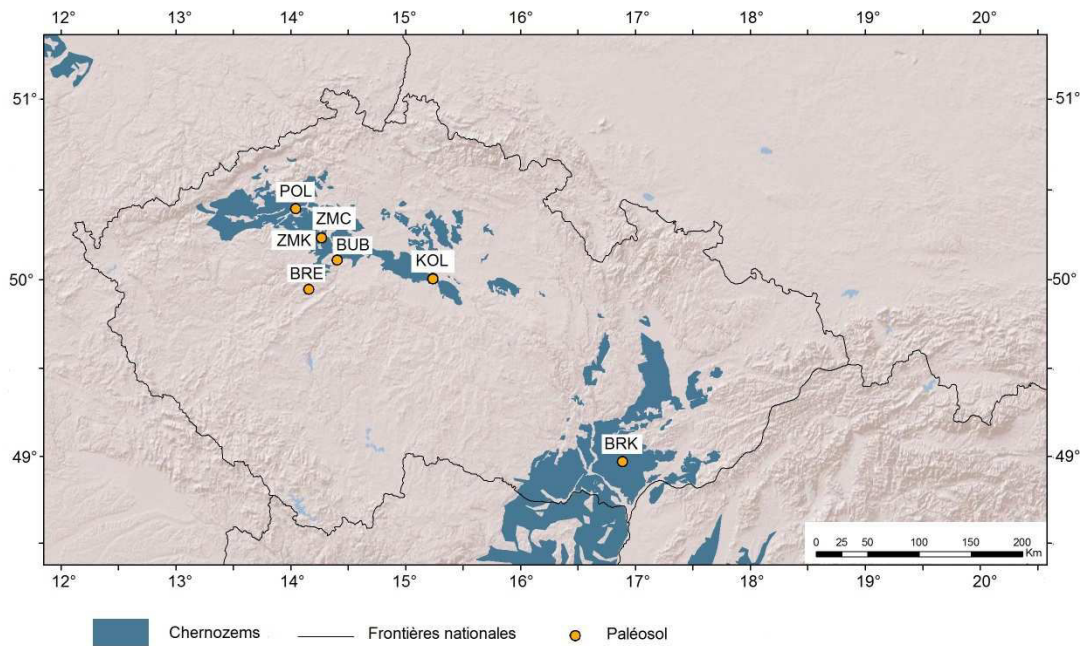


Figure 4.9. La répartition de sites de prélèvement de paléo-profils en République Tchèque : BRE = Břesnice ; BRK = Brumovice ; BUB = Bubeneč ; KOL = Kolín ; POP = Poplze, ZMK = Zeměchy.

Kolín - KOL (Rép. Tchèque)

50°0'17"N, 15°14'2"E, alt. 205 m

Le site de Kolín est situé à l'extrémité Est de la ville de Kolín en Bohême centrale, en rive gauche de l'Elbe (Labe en tchèque). Le paléochernozem est recouvert d'une couche d'environ 60 cm de colluvions (fig. 4.9 & 4.10). La roche-mère est formée de loëss remaniés. Le paléochernozem a été mis au jour lors d'une opération d'archéologie préventive précédant l'élargissement d'une route. Un important habitat LBK a été fouillé sur ce site. Des vestiges de l'âge du Fer et de la Période de Migration (VI^e-VII^e siècles AD) ont également été trouvés là. Le secteur est constitué de terres agricoles, exploitées de façon plus ou moins continue depuis le LBK. Les échantillons de sols ont été prélevés dans trois fosses appelées KOL1, KOL2, KOL3, distantes chacune d'une cinquantaine de mètres. KOL 1 est situé juste à l'extérieur de l'habitat LBK, tandis que les deux autres sont situés sur la zone archéologique. Un échantillon pour l'analyse pédoanthracologique a également été prélevé sur le profil KOL1. L'horizon A du paléochernozem a une épaisseur d'environ 80 cm.

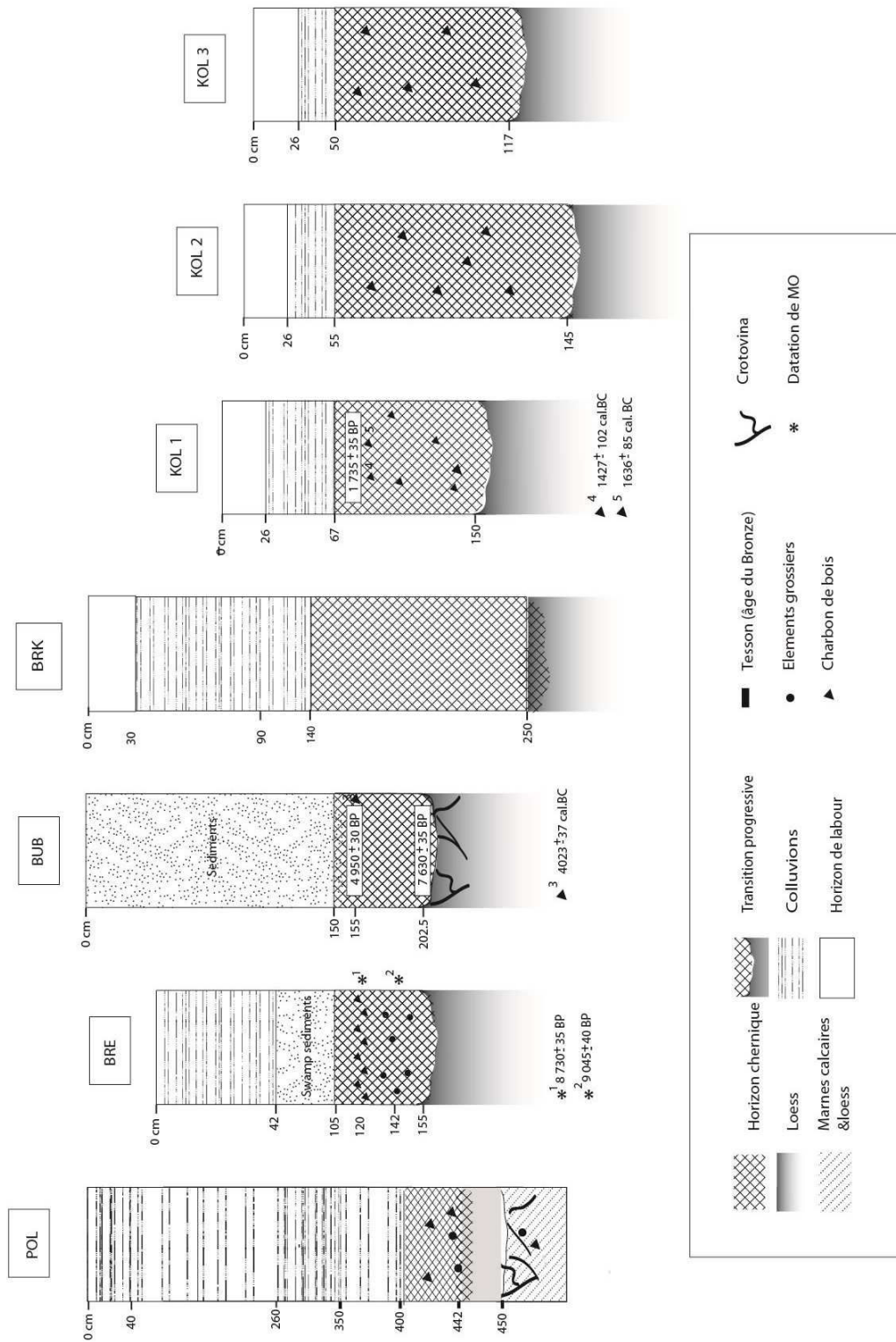


Figure 4.10a. Coupes stratigraphiques des paléosols tchèques (à l'exception de Zeměchy).

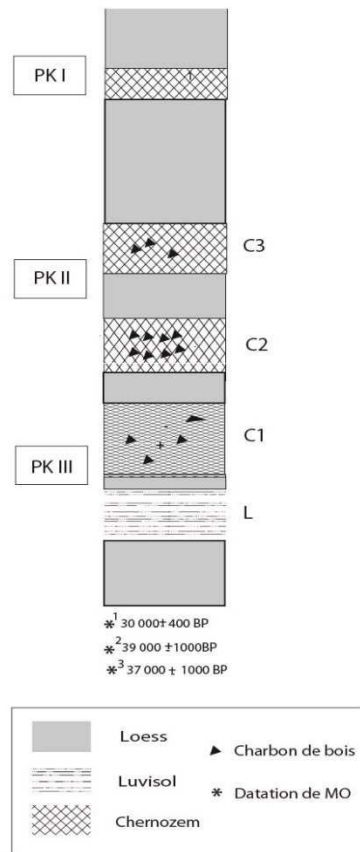


Figure 4.10b. Coupes stratigraphiques des paléosols tchèques – Zeměchy

Poplze- POL (Rép. Tchèque)

50°23'43"N, 14°2'33"E, 183 m

Le site est localisé au centre du village de Poplze u Libochovic dans le bassin de la rivière Ohre au nord-ouest de la Bohême Centrale (fig. 4.9 & 4.10). La stratigraphie correspond à un paléochernozem recouvert par une couche de 4 m de haut de colluvions. Ce profil a déjà été décrit par Ložek et Smolíková (1978). Le paléochernozem est considéré comme Holocène par ces auteurs, mais n'a pas été daté directement. Ce sont les aspects stratigraphiques et malacologiques qui sont à l'origine de la proposition de datation. La région a été peuplée depuis le Néolithique, et quelques fragments remaniés de poterie du Néolithique et de l'âge du Bronze ont été trouvés dans les colluvions. L'horizon A du paléochernozem a une épaisseur de 40 cm seulement. En dessous se trouve un horizon cambique de 8 cm, nettement identifiable.

On peut observer l'épaisse série de loess de Zeměchy (Bohême Centrale) dans une longue gorge de 350 m. Le substratum géologique est formé de grès du Carbonifère supérieur, qui sont recouverts par une couche de sable et une terrasse de graviers de la rivière Knovizsky Potok. La terrasse est recouverte par une dune de loess de 12 m d'épaisseur (Cílek, 1996). Le loess est interrompu par quatre sols fossiles des pédocomplexes PK II (= Würm précoce et inférieur) et PKIII (= interface Riss - Würm) (fig. 4.9 & 4.10 ; voir aussi § 2.4.1.). PK III est formé par un luvisol (L) à la base, surmonté par un chernozem (C1) ; dont il est séparé par une couche mince de colluvions loessiques. PK II est composé de deux chernozems (C2 et C3), séparés par une couche de loess remaniée par colluvionnement. L'ensemble est recouvert par une couche de loess de la dernière période glaciaire. Un chernozem fonctionnel, cultivé, est présent au sommet de cette série. Bien que la Bohême centrale ait été très peuplée depuis le Paléolithique, seuls quelques artefacts de l'âge du Bronze et de la Période de Migration ont été trouvés, au sommet du profil (Cílek, 1996) .Les échantillons pour analyse de charbon de bois ont été prélevés sur les chernozems du Pléistocène de PKII (C3 et C2) ainsi que sur le chernozem et le luvisol du PK III (C1 et L). Les trois paléochernozems ont été échantillonnés pour les analyses SPIR.

Le site de Petit-Baulieu, à l'est de Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme), se trouve dans une région agricole appelée Terres Noires de Limagne (fig. 4.11 & 4.12). Dans cette région, des sols que l'on peut qualifier de chernozems sont présents en mosaïque avec d'autres types de sols organiques (Bornand *et al.*, 1968 ; Legros, 2007). En raison des conditions climatiques spécifiques (voir § 3.1.4.), cette région est la seule en France où les chernozems sont représentés, bien à l'ouest de leurs zones d'extension en Europe Centrale et Orientale. Le paléochernozem a été découvert lors de la fouille archéologique préventive d'un vaste habitat de l'Age du Bronze (1900-1750 avant JC) (Thirault *et al.*, 2013). Il est recouvert par 130 cm de colluvions résultant de l'érosion agricole depuis au moins l'Age du Fer. Les 25 cm supérieurs du paléochernozem semblent avoir été transformés par le travail du sol pendant l'Age du Bronze. L'horizon C est caractérisé par la présence d'abondantes crotovinas. La roche mère est constituée par des marnes lacustres du Stampien, très riches en limons. Ce matériau carbonaté a des caractéristiques relativement proches des loess. Trois profils ont été prélevés. Le premier (CPB1) correspond à une colonne stratigraphique complète, allant de la base du paléochernozem au sommet des colluvions. Il fait 2,6 m d'épaisseur. L'horizon A du paléochernozem fait environ 50 cm d'épaisseur, et sa partie supérieure semble avoir été remaniée sur 25 cm environ par des labours post Age du Bronze. Pour leur part, les colluvions qui recouvrent le paléochernozem font 1,3 m d'épaisseur. Elles sont constituées de matériel provenant de l'érosion des « Terres noires ». Le profil CPB1 est le profil de référence. Sur le deuxième profil (CPB2) n'a été prélevé que le paléochernozem pour compléter certaines interprétations du géo-archéologue qui a suivi le chantier. Le troisième (CPB3) correspond à un comblement de fosse archéologique de l'Age du Bronze. L'hypothèse qui prévaut est que le comblement date de l'Age du Bronze ancien, et qu'il est constitué d'horizons de surface des sols érodés. Sa signature pourrait nous renseigner sur le type de végétation, et manquer dans la colonne stratigraphique complète, si le paléochernozem a été érodé avant d'être enfoui.

Didenheim-Morschwiller- MOR (France) 47°43'50"N, 7°16'58"E, alt. 275 m

Ce paléosol, localisé à l'Est de Mulhouse dans le Haut-Rhin, a été découvert lors de la fouille archéologique préventive d'un site multiculturel (fig. 4.11 & 4.12). Sur ce site, ont été découverts les plus remarquables vestiges de la culture Horgen (3300-2700 avant J.C.) connus dans le sud de la vallée du Rhin supérieur. Le début de l'exploitation agricole de ce paléosol correspond probablement à cette culture Horgen, et l'exploitation de ce sol a persisté peut-être à l'Age du Bronze et à La Tène (Vergnaud *et al.*, en préparation). Le paléosol isohumique de type chernozem est recouvert par une couche de 95 à 110 cm d'épaisseur de colluvions dont les 45 cm supérieurs se sont transformés en brunisol. Dans le paléosol, la structure grumeleuse typique des chernozems fonctionnels n'est pas conservée. La roche mère de ce sol est du loess. Notons que les chernozems ne sont pas représentés dans la couverture pédologique actuelle de toute la région.

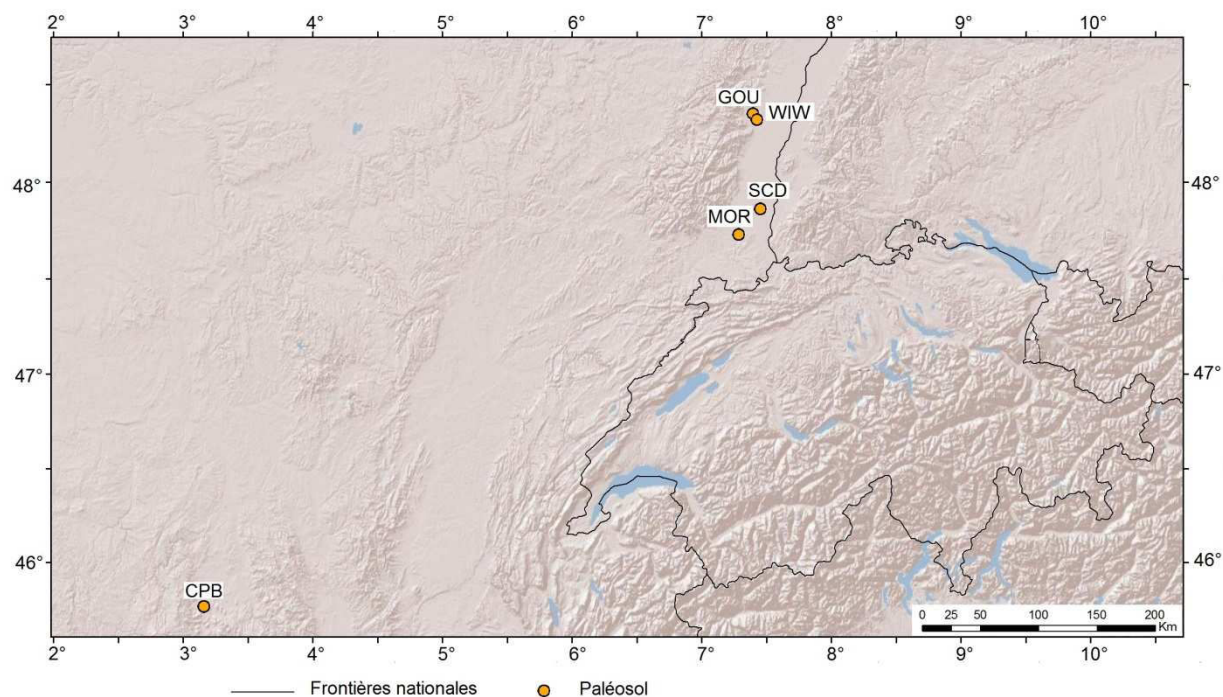


Figure 4.11. La répartition de sites de prélèvement de paléo-profil en France : CPB = Clermont-Ferrand ; MOR = Didenheim-Morschwiller ; GOU = Gougenheim ; SCD = Sainte-Croix-en-Plaine ; WIW = Wiwersheim

Gougenheim GOU (France)

48 °42'35"N, 7 °33'56", alt. 182 m

Ce paléosol localisé sur la commune de Gougenheim dans le Bas-Rhin se situe au nord du village, au lieu-dit Heidenberg. Cette stratigraphie a été relevée lors du diagnostic géoarchéologique réalisé par l'INRAP (Schneider et Ertlen, 2010) en amont des travaux de construction de la ligne à grande vitesse (LGV Est Européenne) entre Baudrecourt (France) et Strasbourg (Bas-Rhin, France). Le paléosol apparaît sous environ 150 cm de colluvions. Il est imprégné en matière organique sur une épaisseur importante (MO > 4 % sur 60 cm d'épaisseur). Cette unité pédologique est parcourue par des galeries fossiles de rongeurs matérialisées par des taches circulaires plus claires. Il s'agit d'un paléosol isohumique typique des milieux continentaux. Deux échantillons de ce sol ont été datés par ¹⁴C dans le sondage F294 à des profondeurs de 1,6 et 2 m. Les deux dates correspondent au dernier maximum glaciaire (19290 ± 90 BP ; 20110 ± 100 BP). L'écart entre les deux dates signifie que lors du recouvrement du paléosol par des colluvions le temps moyen de résidence de la matière organique à 40 cm de profondeur était de l'ordre de 800 ans. Ce gradient du temps moyen de résidence correspond à l'ordre de grandeur pour les sols isohumiques (Scharpenseel et Pietig, 1970 ; 1971). Dans le sondage 347, le niveau le plus organique est surmonté d'une unité stratigraphique également légèrement imprégnée en MO. Pour cette unité, aucun trait pédologique n'est observé. Il s'agit plutôt de colluvions provenant de versants, eux-même recouverts d'un sol isohumique. Ceci un en accord avec la disposition paléotopographique.

Sainte-Croix-en-Plaine

SCC

48 °00'48"N, 7 °22'17", alt. 196 m

Ce paléosol, localisé au sud de Colmar en Alsace (fig. 4.11 & 4.12) a été découvert lors d'une fouille archéologique préventive. Le sol étudié, un sol isohumique de type « sol gris de steppe » a été recouvert par des matériaux alluviaux ou colluvio-alluviaux à l'Holocène supérieur (impossible de préciser). Il n'a pas une teneur en MO suffisante pour pouvoir être classé comme un chernozem. Le horizon A est épais une trentaine de cm, il était probablement tronqué. On distingue des crotovinas. C'est la surface de ce sol qui constitue ici la surface d'occupation archéologique du Bronze final. Le sous-sol est constitué par un dépôt rhénan qui a subi une cimentation partielle sous forme calcaire (Vogt et Marocke, 1972-74).

Wiwersheim WIW

48 °36'20"N, 7 °36'20"E, alt. 167 m

Il s'agit ici d'un paléosol développé dans un lœss, qui a été découvert lors de la recherche d'archéologie préventive dans le village de Wiwersheim, rue des Vignes (fig. 4.11 & 4.12). Le paléosol est gris-brun avec une structure polyédrique anguleuse fine. Il a environ 40 cm d'épaisseur. Des accumulations de carbonates secondaires sont présentes au sommet. Le paléosol passe progressivement à sa base à un niveau de lœss orangé, plus argileux et à pénétration verticales de matière organique (ancien luvisol ?) qui forme le substrat. Le paléosol est recouvert par une couche de limons organiques bruns, très compacts et massifs, dont il a été impossible de distinguer s'il s'agit de simples colluvions ou d'un autre paléosol.

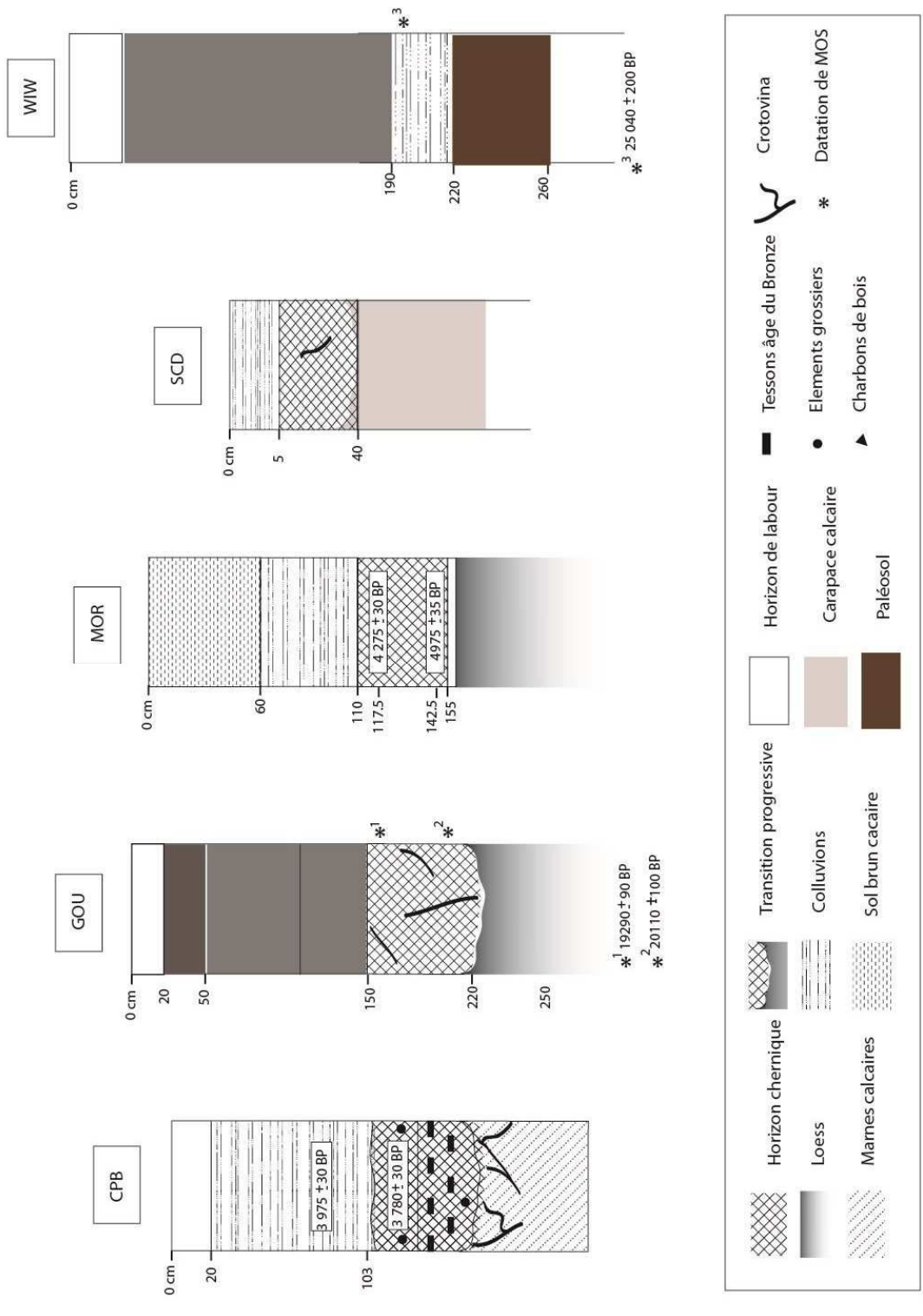


Figure 4.12. Stratigraphie des sites français

4.7. Analyse d'une catena chernozem-luvisol

4.7.1. Conditions de sélection des sites

L'objectif, ici, est d'étudier le contact entre luvisol et chernozem à l'échelle très locale d'un transect de quelques centaines de mètres. En effet, à cette échelle, il n'est pas possible de faire appel à des différences importantes dans l'expression des facteurs environnementaux généraux (lithologie, climat,...) pour expliquer que la genèse des sols se soit orientée dans un cas vers la formation d'un chernozem et dans l'autre vers un luvisol. Seuls deux cas de figure permettent d'expliquer ce fait :

- soit les deux sols sont juxtaposés en raison des variations d'un facteur environnemental local (différences d'occupation du sol sur une durée très longue, par exemple),
- soit les deux sols sont les termes extrêmes d'un système de lente transformation d'un des sols en l'autre (chernozem vers luvisol, ou luvisol vers chernozem) en raison d'un changement environnemental ancien ou d'une série évolutive.

L'analyse fine d'un transect est, a priori, le meilleur moyen de répondre à cette question. A cet effet, le choix d'un site approprié à ce type d'étude doit s'appuyer sur les critères suivants :

- présence des deux types de sol, l'un au contact de l'autre dans des conditions environnementales générales absolument identiques (pluviométrie, exposition, relief, matériau parental)
- forte expression des caractères des horizons diagnostics des deux types de sol (horizon BT très lessivé pour le luvisol ; horizon A ou L mollique pour le chernozem)
- existence de sols de transition entre les deux termes extrêmes
- topographie plane pour s'affranchir des problèmes de remaniements latéraux et/ou de l'influence de facteurs environnementaux locaux.

Cette dernière condition est très importante. En effet, on observe très fréquemment que la transition entre chernozem et luvisol correspond à un changement de pente. Les luvisols sont alors présents dans les zones pentues, tandis que les chernozems se localisent sur les zones planes : plaines des parties basses du relief et/ou zones tabulaires des parties hautes. La limite entre les deux sols se marque sur les cartes par une courbe de niveau. Dans ce cas, l'explication de la présence des deux types de sol peut être cette différence topographique.

Notons toutefois que les chernozems peuvent être également présents sur pente forte.

Ainsi, en Moravie du Sud, il existe une mosaïque de chernozems, chernozems dégradés et chernozems colluvionnés dérivant d'une couverture initialement uniforme de chernozems dans les régions vallonnées (Zádorová *et al.*, 2011).

Quelques endroits ont été pré-sélectionnés à partir des cartes pédologiques avant d'être prospectés. L'identification d'un transect propice à l'étude a été difficile pour plusieurs raisons.

- Approximations cartographiques. Le critère majeur de diagnostic d'un chernozem est l'épaisseur de l'horizon chernique : 40 à 60 cm (Němeček *et al.* 2001). Or, les chernozems dégradés par l'érosion perdent de leur épaisseur. A leur place se trouvent des sols qui peuvent être qualifiés de « chernozems tronqués ». Sur les cartes pédologiques, de tels sols sont parfois qualifiés incorrectement de luvisols.

- Classification de sols incorrecte. Certains sols classés comme chernozems sur les cartes pédologiques n'en sont en définitive pas. Ceci peut être lié à des interpolations cartographiques sans vérification sur le terrain.

En définitive, nous avons réussi à sélectionner une catena de sols correspondant aux critères rappelés *supra*. Cette séquence est localisée à l'ouest du village de Hrušov (carte, figure 4.12). Elle est située dans la partie sommitale, plane, d'une colline tabulaire recouverte de loess. La longueur du transect étudié est de 331,2 mètres. Les chernozems occupent la partie centrale de la zone tabulaire, et les luvisols, la zone périphérique ; ces derniers se prolongent ensuite sur les versants. La transition entre les deux termes de la catena se fait par un chernozem montrant des signes de lessivage, et qualifié de ce fait de « chernozem à BT ». Les sols de la catena ont été étudiés en détail. Ils ont fait l'objet en particulier d'une étude micromorphologique.

4.7.2. Description de site de Hrušov *HRU (50 °21'N, 14 °50'E, alt. 262 m)*

Le village de Hrušov se trouve en Bohême Centrale, à 50 km nord-est de Prague. Le site d'étude est localisé dans les champs à l'ouest du village. Sur la carte pédologique (figure 4.13), nous observons que les chernozems se trouvent dans un périmètre de 500 à 700 m au nord et l'ouest du village. Plus loin à l'ouest, se trouve une enclave de phaeozems. Au sud du village, on peut observer des luvisols. A l'est du village, le sol est classé comme une pararendzine, mais sa répartition correspond à une zone de changement important de la pente du terrain.

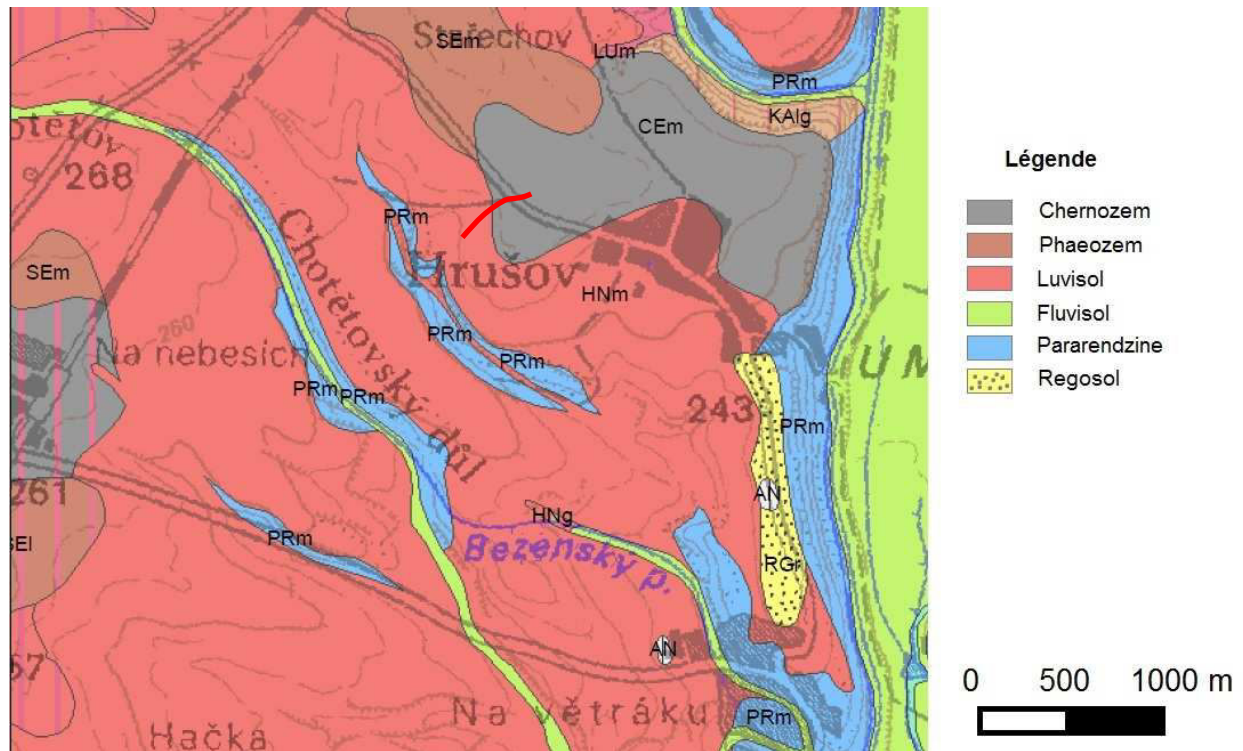


Figure 4.13. Extrait de la carte pédologique 1 : 50.000 : le site Hrušov (AOPK, 2005). Le transect étudié est souligné par le trait rouge.

Les conditions environnementales des chernozems et des luvisols sont identiques sur le site. Dans les deux cas, le substratum géologique est formé par du loess, comme indiqué sur la figure 4.14 (Česká geologická služba, 2013). La pluviométrie sur le site atteint 500 à 600 mm ; la température moyenne annuelle varie entre 8 et 9° C (Tolasz, 2007). Tout le terrain est cultivé, ce qui est visible sur l'image aérienne présentée sur la figure 4.15, avec une succession de cultures de blé, betterave, maïs, colza (communication orale des agriculteurs locaux). L'utilisation agricole du site est déjà enregistrée dans les cartes de la 2^e moitié du 18^{ème} siècle sur la figure 4.16.



Figure 4.14. Extrait de la carte géologique à 1 :50.000 : le site Hrušov (Česká geologická služba, 2013). Le transect étudié est figuré par le trait rouge.

Notons par ailleurs que l'existence du village est documentée pour la première fois dans les archives historiques en 1346. Quelques vestiges peu nombreux de l'époque préhistorique ont également été découverts : un objet de culture de la céramique décorée au poinçon (Néolithique), un objet de la culture d'Unetice (ca. 2200-1600 BC). La plupart des objets trouvés proviennent de la culture Lusacienne et du Hallstatt (ca. 1000-400 BC) (Institut de l'archéologie de l'Académie de Science à Prague, non publié).

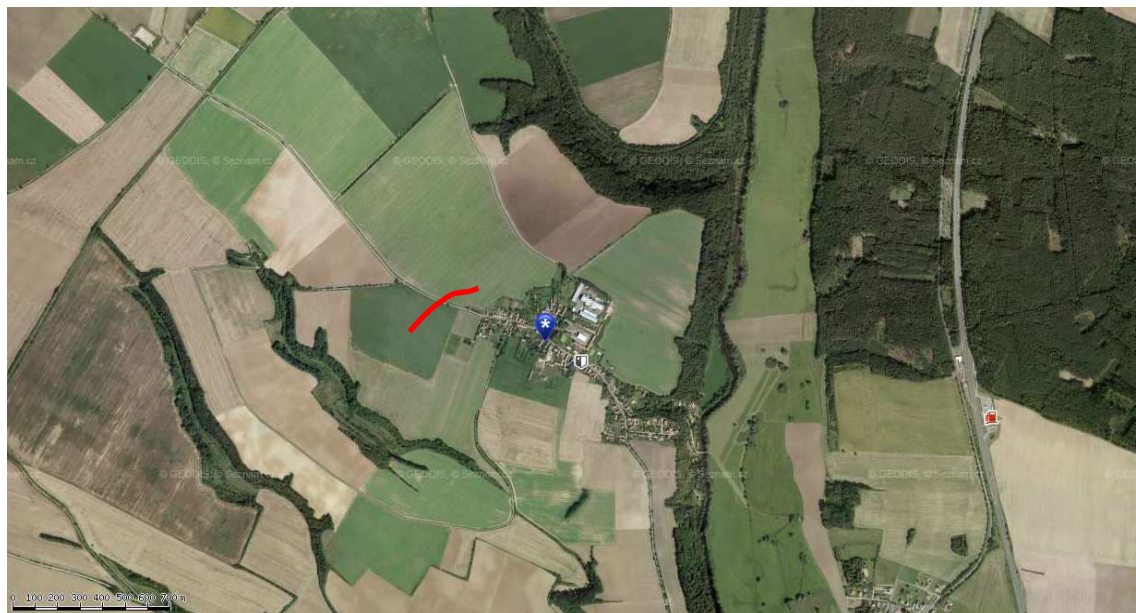


Figure 4.15. Extrait de la photo aérienne 2013 : le site de Hrušov (www.mapy.cz). Le transect étudié est figuré par le trait rouge.



Figure 4.16. Extrait de la carte de la Première Enquête Militaire à 1 : 2880 (1842-1852) : le site de Hrušov (<http://mapire.staatsarchiv.at>). Le transect étudié est figuré par le trait rouge.

Sur le site de Hrušov, nous avons creusé 7 fosses pour étudier en détail des propriétés de sol sur une catena : HRU20, HRU21, HRU22, HRU 23, HRU24, HRU25, HRU26. Nous avons effectué une étude de la catena des propriétés physico-chimiques et micromorphologiques des sols. La localisation des fosses est détaillée sur la figure 4.17. La localisation exacte des fosses a été mesurée avec un GPS. L'altitude exacte a été mesurée au tachéomètre. Ces données sont présentées dans le tableau 4.4. et sur la coupe altimétrique (fig. 4.18).

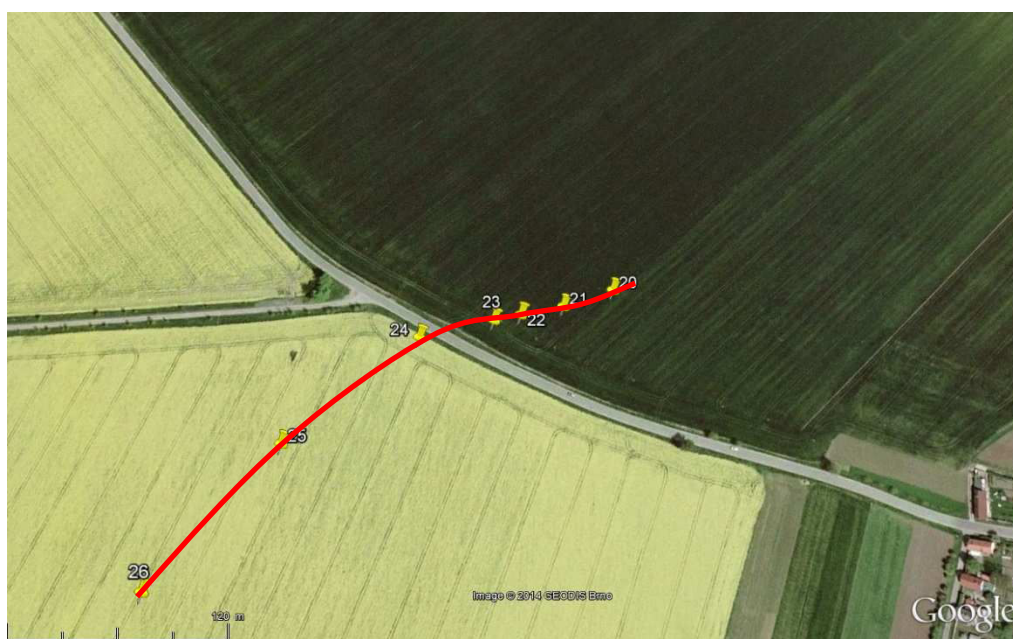


Figure 4.17. Localisation des fosses sur le site Hrušov (le fond de carte par GoogleEarth). Le transect étudié est figuré par le trait rouge.

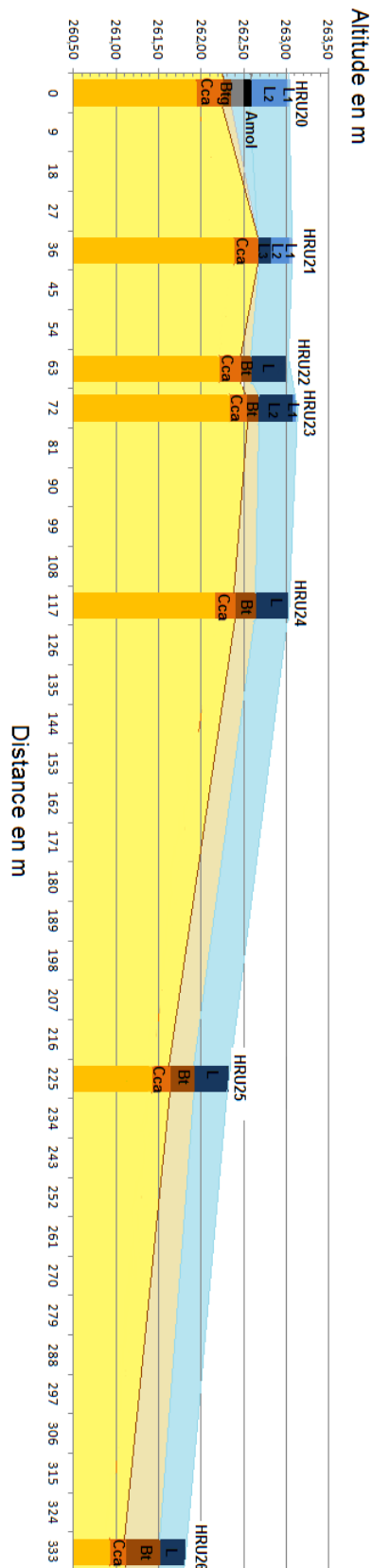


Figure 4.18. Représentation de la catena de Hrušov, prenant en compte les altitudes des différents profils. Hauteur des profils non exagérée par rapport à l'altitude (en cm).

Code de la fosse	Coordonnées			Type de sol	Nombre d'échantillons	
	Latitude N	Longitude E	Altitude m		NIRS	Lames minces
HRU20	50°20,822'	14°50,393'	263,053	chernozem à Bt	60	9
HRU21	50°20,816'	14°50,367'	263,074	chernozem typique	39	5
HRU22	50°20,813'	14°50,345'	262,997	chernozem à Bt	0	1
HRU23	50°20,811'	14°50,331'	263,121	chernozem à Bt	45	7
HRU24	50°20,805'	14°50,293'	263,017	luvisol	48	12
HRU25	50°20,769'	14°50,228'	262,323	luvisol	48	7
HRU26	50°20,724'	14°50,171'	261,815	luvisol	48	7

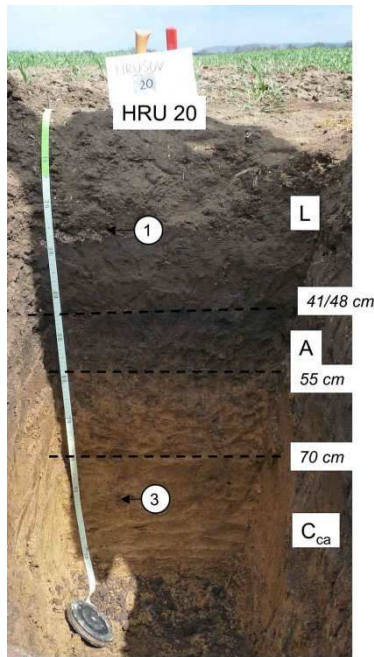
Tableau 4.4. La liste de fosses effectuées sur le site de Hrušov

4.7.3. Description des profils de la catena de Hrušov

Dans ce paragraphe nous allons donner les descriptions détaillées des profils de sols de la catena luvisol – chernozem.

Profil HRU20

HRU 20 (fig. 4.19) est un chernozem luvique, parce que sous l'horizon mollique se trouve un horizon BT (peu épais) enrichi en argiles. L'horizon mollique organo-minéral est suffisamment épais (55 cm) pour que sa base soit conservée sous l'horizon de labour L. On peut ainsi observer la transition naturelle entre les horizons A et B, par un véritable horizon de transition A/B.



L1 : 0 - 3/5 cm ; 10 YR 3/2 ; limoneux ; frais ; structure grenue ; non effervescent ; transition nette avec :

L2 : 3/5 - 45/48 cm ; 10 YR 3/2 ; limoneux ; frais ; structure polyédrique anguleuse ; non effervescent ; transition brutale, subhorizontale avec :

Amol : 45/48 - 55 cm ; 10 YR 2/2 (très noir) ; limoneux ; structure grenue ; aspect luisant des agrégats ; non effervescent ; transition nette, irrégulière avec :

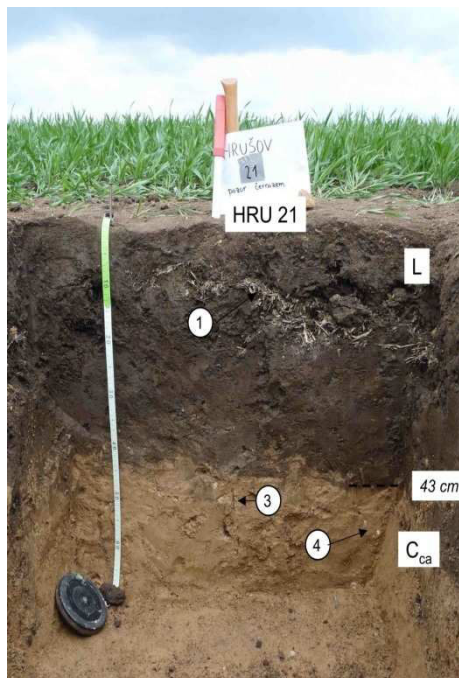
A/B : 55 - 70 cm ; horizon de transition, juxtaposition de A et B ; non effervescent ; transition graduelle avec :

BTg : 70 - 80 cm ; 10 YR 4/6 ; limono-argileux ; non effervescent ; légèrement marbré, avec taches rouilles et taches MO ; transition nette, subhorizontale avec :

Cca : > 80 cm ; 10 YR 5/5 ; loessique ; effervescence très légère au sommet, plus nette en profondeur sans jamais être très forte. Galeries de vers anéciques jusqu'à la base du profil (soit 110 cm).

Figure 4.19. Profil HRU20. Photo : D. Schwartz

HRU21



L1 : 0 - 3/5 cm ; 10 YR 3/2 ; limoneux ; structure grenue ; peu de racines, fines ;

L2 : 3/5 - 25 cm ; 10 YR 3/2 ; limoneux ; structure polyédrique anguleuse, centimétrique (1 à 3 cm) ; non effervescent, très peu de racines ;

L3ca : 25 - 38/43 cm ; 10 YR 3/2 ; limoneux ; effervescent (d'abord faiblement, puis plus net) ; peu de racines ; transition brutale, irrégulière à plane selon les endroits ;

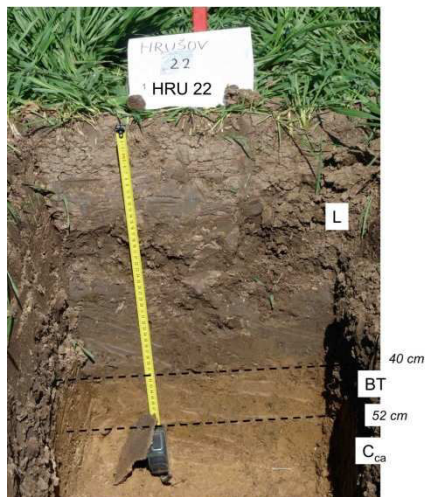
Cca : > 38/43 cm ; 10 YR 5/4 ; loess ; limoneux ; nombreuses poupées de loess, dès la surface. Structure microagrégée ; nombreuses galeries de vers. Fond du profil à 68 cm.

Figure 4.20. Profil HRU 21. 1 : lit de pailles non décomposée ; 3 : galeries de vers de terre ; 4 : poupées de loess. Photo : D. Schwartz.

HRU21 est un chernozem typique (fig. 4.20). L'horizon mollique est (épisodiquement) entièrement labouré jusqu'à la base (43 cm) provoquant une interpénétration A et C. Entre 10 et 23 cm nous observons un lit de paille peu décomposée presque continu, indiquant la profondeur du dernier labour (23 cm). L'horizon de labour est partiellement décarbonaté, jusqu'à 25 cm de profondeur. L'horizon C contient des poupees de loess depuis son sommet. Dans le sol nous avons trouvé nombreux éléments grossiers d'origine anthropique comme des fragments de charbons, des tessons modernes et des briques. Dans l'horizon C, il y a de nombreuses galeries de vers.

HRU 22

Le profil HRU 22 (fig. 4.21) est un chernozem luvique, avec un horizon BT, qui est très semblable à HRU 23. Nous avons creusé la fosse, mais nous ne l'avons pas prélevé en raison des similitudes avec le profil suivant.



L : 0 - 40 cm ; limoneux ; structure polyédrique anguleuse ; transition brutale avec :

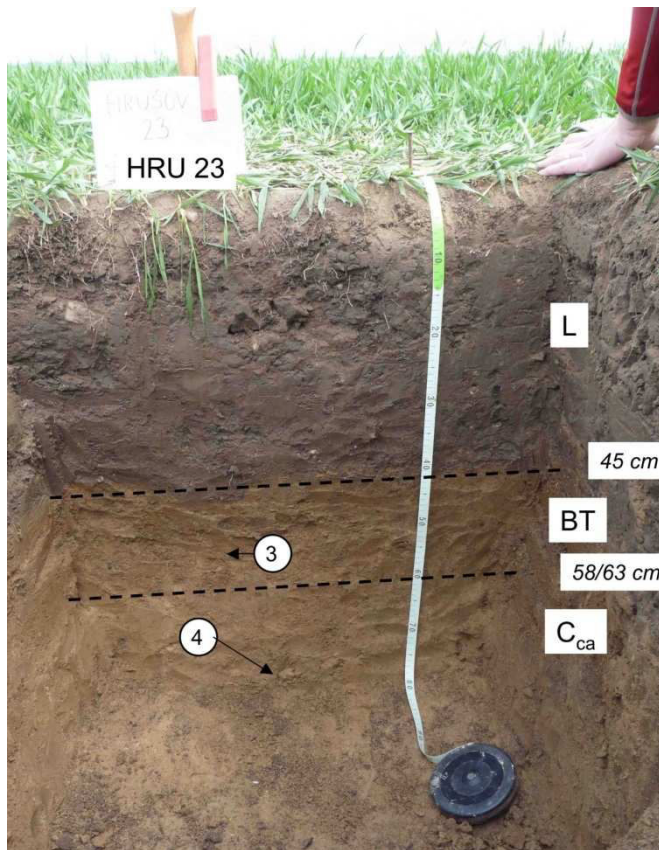
BT: 40 - 52 cm ; 10 YR 4/5 ;

Cca : > 52 cm ; loess 10 YR 5/4.

Figure 4.21. Profil HRU 22. Photo : D. Schwartz

HRU 23

Le sol HRU23 est un chernozem luvique (fig. 4.22), « à BT ». Le BT est entièrement décarbonaté ; la transition entre l'horizon de labour L et le BT se fait par digitation. Dans le BT nous observons des passées organiques comme s'il s'agissait d'un horizon A en cours de « digestion ». Le sol contient des éléments grossiers d'origine anthropique tels que des briques et charbons dans l'horizon L.



L1 : 0 à 5 cm ; 10 YR 4/3 ; sec : structure grenue ;

L2 : 5 à 45 cm ; 10 YR 3/2 ; frais ; structure polyédrique anguleuse ; transition nette mais interdigitée ;

BT : 45 à 58/63 cm ; 10 YR 3,5/6 ; front de décarbonatation net vers 60 cm ; transition graduelle, subhorizontale, avec :

Cca : > 58/63 cm ; 10 YR 5/4 ; poupées de loess vers 70 cm ; fond du profil vers 78 cm.

Figure 4.22. Profil HRU23.; 3 : galeries de vers de terre ; 4 : poupées de loess.

Photo : D. Schwartz

HRU24

Le profil HRU24 (fig. 4.23) est un luvisol qui est profondément remanié par l'activité humaine. En raison de labours profonds (40 cm) effectués lors des saisons de culture de betterave, l'horizon E et la partie supérieure du BT ne sont plus visibles, mélangés à l'horizon A pour former un horizon L épais. Lors des saisons de culture du blé, le labour est plus superficiel : 25 à 35 cm environ.

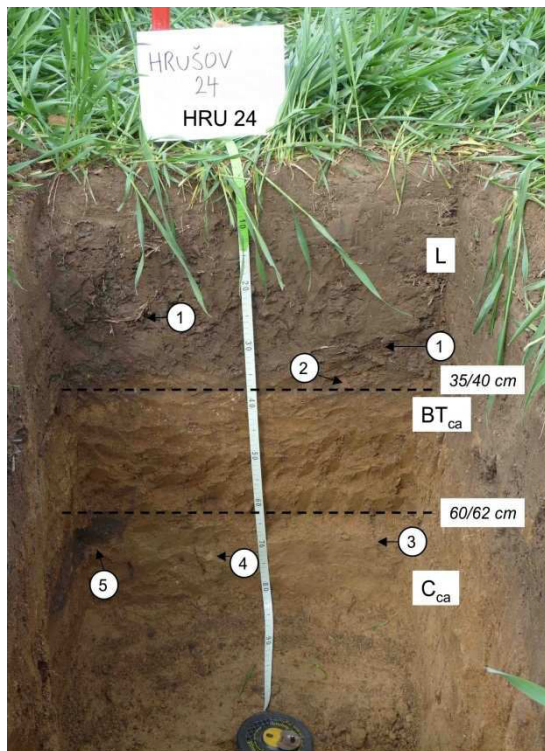


Figure 4.23. Profil HRU 24.

Photo : D. Schwartz

L : 0 à 35/40 cm ; 10 YR 3/2 ; frais ; limoneux ; non effervescent ; structure grenue (0 à 8 cm = L1) puis polyédrique anguleuse (8 – 35/50 cm = L2). Présence de lits de paille, discontinus à 17/25 et 30/35 cm (n° 1 sur la photo) ; présence d'éléments anthropiques : brique et fragment de calcaire à 40 cm (° 2 sur la photo) ; relativement compact ; quelques racines, très fines (diamètre inférieur à 1 mm) ;

Transition brutale, mais irrégulière avec :

BTca : 35/40 à 60/62 cm ; 10 YR 4/6 ; frais ; limono-argileux ; effervescence faible, et présence de zones décarbonatées ; structure polyédrique subanguleuse, peu développée, 0,5 à 1 cm de diamètre ; bonne porosité inter-agrégat ; quelques racines, très fines (diamètre inférieur à 1 mm) ; nombreuses galeries de vers anéciques (n° 3 sur la photo) ; transition nette, ondulée, avec :

Cca : > 62 cm ; 10 YR 5/4 ; frais ; limoneux (lœss carbonaté) ; nombreuses galeries de vers anéciques, jusqu'à la base du profil ; rares racines très fines ; présence de poupées de lœss (n° 4) à partir de 70 cm et de crotovinas (n° 5) ; fond du profil à 85 cm

HRU25

HRU 25 (fig. 4.24) est un luvisol, qui est profondément remanié par l'activité humaine. En raison de labours profonds (40 cm) effectués lors des saisons de culture de betterave, l'horizon E et la partie supérieure du BT ne sont plus visibles, mélangés à l'horizon A pour former un horizon de labour L épais. Lors des saisons de blé, le labour est plus superficiel : 25 à 35 cm environ. Le profil ressemble à HRU24, mais en plus évolué : l'horizon BT est entièrement décarbonaté et plus épais, et L à structure entièrement polyédrique.

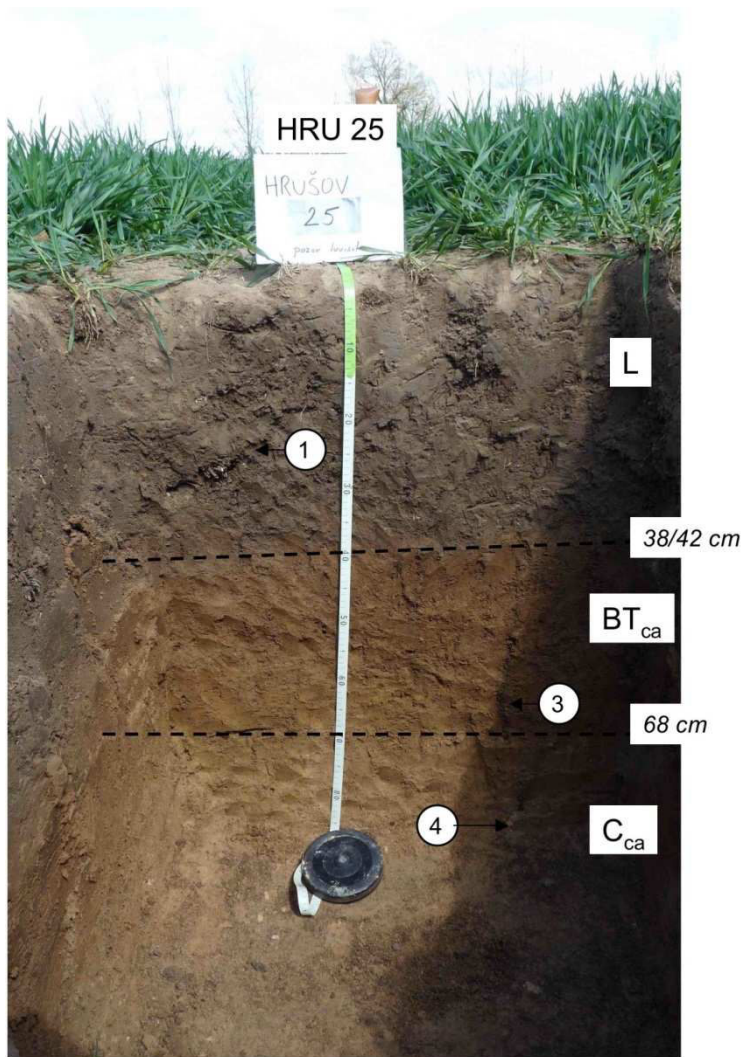


Figure 4.24. Profil HRU25. Photo : D. Schwartz

L : 0 à 38/42 cm ; 10 YR 3,5/3 ; sec au sommet, frais ensuite ; limoneux ; non effervescent ; structure polyédrique anguleuse. Présence de lits de paille, discontinus entre 20 et 30 cm (n° 1 sur la photo) ; présence d'éléments anthropiques : brique, cailloux, charbons ; relativement compact ; quelques racines, très fines (diamètre inférieur à 1 mm) ; Transition brutale, subhorizontale avec :

BT : 38/42 à 68 cm ; 10 YR 3/6 au sommet, 10 YR 4/6 à la base ; frais ; limono-argileux ; effervescence faible, et présence de zones décarbonatées ; structure polyédrique subanguleuse, peu développée, 0,5 à 1 cm de diamètre + structure microagrégée ; bonne porosité inter-agrégat ; rares racines, très fines (diamètre inférieur à 1 mm) ; décarbonaté ; nombreuses galeries de vers anéciques (n° 3 sur la photo) ; transition nette, subhorizontale, avec :

Cca : > 68 cm ; 10 YR 5/4 ; frais ; limoneux (löss carbonaté) ; nombreuses galeries de vers anéciques, jusqu'à la base du profil ; rares racines très fines ; présence de poupées de löss (n° 4) à partir de 80 cm ; fond du profil à 90 cm

HRU26

Le sol HRU26 (fig. 4.25) est un luvisol qui est profondément remanié par l'activité humaine. Les labours sont ici moins profonds (30 cm), mais de la même manière, l'horizon E et la partie supérieure du BT ne sont plus visibles, mélangés à l'horizon A pour former un horizon L épais. Toutefois, la base du BT est à peu près la même profondeur que dans les profils précédents. Le profil est très proche du HRU25, mais le BT est plus épais. Ce sol est considéré comme un luvisol cultivé « typique ».

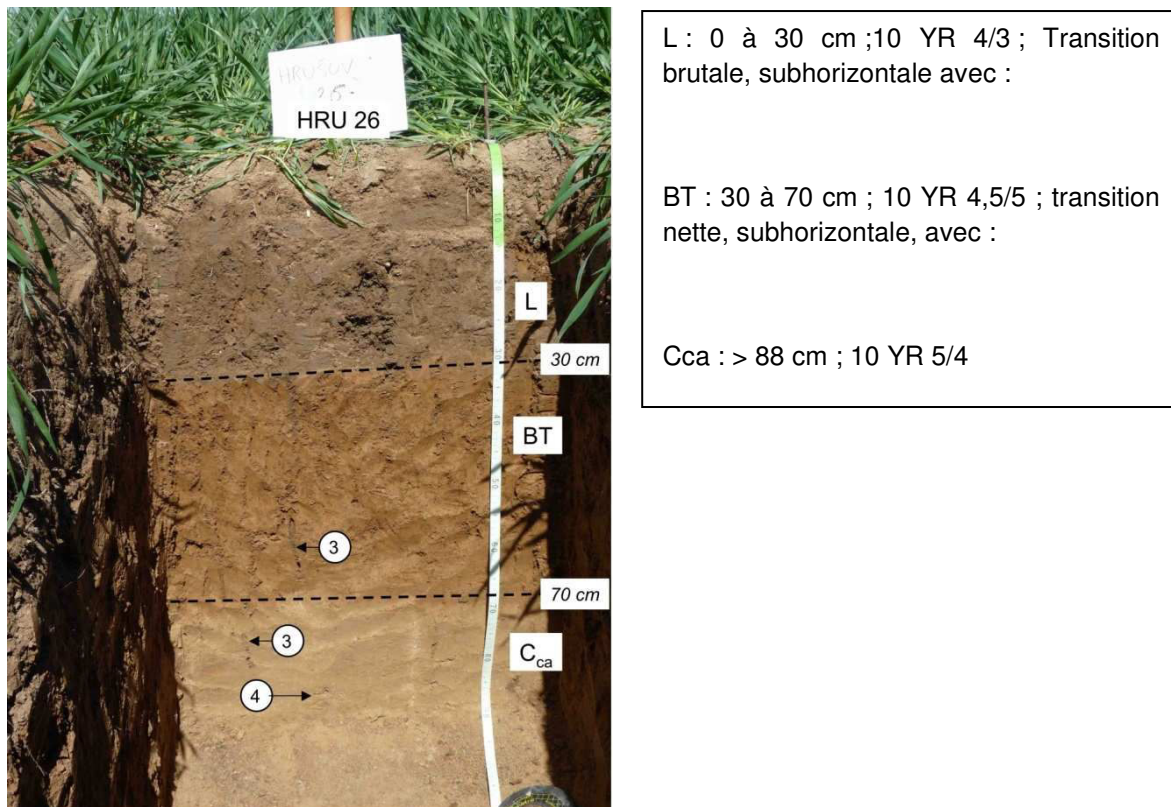


Figure 4.25. Profil HRU26. 3 : galeries de vers de terre ; 4 : poupées de loess. Photo D. Schwartz.

4.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu la démarche nécessaire pour le choix de terrain approprié pour pouvoir remplir les objectifs de notre travail. D'abord nous avons présenté les 24 sites de surface qui ont servi pour la construction du référentiel SPIR robuste. A l'aide de ce référentiel, nous serons capables distinguer l'origine de la matière organique de sol fonctionnels et paléosols, qui nous avons présenté ensuite. Au total, nous allons étudier 26 de sols fonctionnels et 15 paléosols. En plus, sur la station de Hrušov nous allons procéder l'étude de catena de transition entre le chernozem et le luvisol.

Chapitre 5

Du terrain au laboratoire :

protocoles d'échantillonnage et d'analyse

Le chapitre 5 présente le devenir des échantillons, de leur collecte sur le terrain à l'obtention des mesures en laboratoire. Nous présenterons d'abord les protocoles d'échantillonnage et de prélèvement, puis les différentes méthodes analytiques auxquels les échantillons ont été soumis, en insistant sur la description de la SPIR.

5.1. Les protocoles de prélèvement

Il n'y a pas de mode de prélèvement unique. En effet, le protocole d'échantillonnage varie en fonction des objectifs suivis et des méthodes analytiques.

5.1.1. L'échantillonnage pour l'obtention du référentiel de surface en SPIRqual.

Entre 10 et 30 échantillons ont été prélevés sur chaque placette de surface. Un nombre élevé d'échantillons permet de prendre en compte la variabilité à l'intérieur d'un même écosystème et améliore la représentativité de chaque site. C'est particulièrement vrai lorsque la station est très hétérogène (par exemple : forêt avec un sous-bois discontinu). Toutefois, un certain nombre de sites sont localisés dans des zones protégées par la loi, ce qui nous a conduit à limiter le nombre de prélèvements.

L'échantillonnage se fait de manière systématique sur une placette d'aire rectangulaire d'une surface d'environ 3 m sur 12 m (10 échantillons prélevés), 6 m sur 12 m (15 échantillons prélevés), 9 m sur 12 m (20 échantillons), 12 m sur 12 m (30 échantillons). Les échantillons sont prélevés tous les 3 m sur des lignes parallèles espacées de 3 m. Le prélèvement se fait à l'aide d'un cylindre métallique d'une hauteur de 4 cm, enfoncé verticalement après nettoyage de la litière, quand celle-ci est présente. Un échantillon de sol pèse entre 50 et 80 g. Chaque site est noté par un code unique de trois lettres (en principe

les trois premières lettres du nom de site ou du village le plus proche). Ensuite, chaque échantillon est repéré par un code composé de ces trois lettres et de deux ou trois numéros.

Au total nous avons prélevé 428 échantillons de surface intégrés au référentiel : 293 échantillons sous steppes et 135 sous forêts. Le nombre d'échantillons de chaque placette est indiqué dans le tableau 4.1 (voir chapitre 4). S'y ajoutent 62 échantillons classés comme « inconnus » (donc non intégrés dans le référentiel).

5.1.2. L'échantillonnage des fosses pédologiques pour la SPIRqual

Les profils qui ont fait l'objet d'une analyse en SPIRqual ont été prélevés dans des fosses pédologiques creusées pour l'occasion ou sur une coupe verticale pré-existante après rafraîchissement. Deux ou trois (cinq pour BUL) séries de prélèvements parallèles ont été effectuées sur toute l'épaisseur du sol avec une maille de 5 cm. Ce protocole n'a pu être appliqué sur les stations KOR, KOC et DUB en raison des mesures de protection appliquées à ces sites. Dans ce cas, les prélèvements ont été effectués à la tarière. Notons que les prélèvements systématiques, par maille régulière de 5 cm, ne tient pas compte des limites d'horizons. Les échantillons, prélevés au couteau ou à la truelle ont une masse de 50 à 80 g en moyenne.

5.1.3. Prélèvements pour l'étude micromorphologique

L'échantillonnage pour la fabrication des lames minces exige une attention particulière, car l'échantillon doit être prélevé sans perturber la structure du sol. Dans les matériaux meubles des sols loessiques, nous avons utilisé des boîtes rectangulaires de dimension 9,5 x 6,5 x 4 cm fabriquées à partir de briques de boissons, en coupant le fond. Le sol est coupé délicatement au couteau aux dimensions de la boîte, appliquée sur la paroi du profil et enfoncée au fur et à mesure. Une fois la boîte remplie du bloc de sol, celui-ci est détaché. L'échantillon est ensuite consolidé dans la boîte grâce à un ruban adhésif pour préserver l'organisation du matériau. On note scrupuleusement sur la boîte l'orientation verticale de l'échantillon dans le profil et sa profondeur.

5.1.4. Autres analyses

Les analyses de caractérisation des sols ont été effectuées sur des échantillons prélevés à cet effet, en grande quantité et en tenant compte des limites d'horizons. Certaines mesures ont toutefois été effectuées sur les échantillons prélevés pour la SPIRqual. Cette méthode n'est en effet pas destructive et permet de réutiliser l'échantillon à d'autres fins. Dans ce cas, l'analyse est faite sur un échantillon composite mélangeant les échantillons prélevés à un niveau donné, après quartage.

Les prélèvements pour analyses ¹⁴C ont été effectués sur des échantillons de sols prélevés à ce seul effet sur le terrain, pour éviter toute contamination éventuelle. Les datations étant effectuées par la méthode AMS, une masse relativement faible (moins de 10 g en général) est nécessaire. Les prélèvements sont effectués dans des zones de sol

homogène (absence de galeries de vers de terre tapissées de matière organique récente,...) et non occupées par des racines.

Les analyses pédoanthracologiques n'ont pas été faites systématiquement, mais à raison d'un prélèvement par horizon. La masse prélevée est importante : entre 5 et 23 kg par niveau. Au total, seuls 6 échantillons ont été analysés par cette méthode.

5.2. Les prétraitements au laboratoire

Après prélèvement, les échantillons sont amenés au Laboratoire d'analyses de sols et de formations superficielles de l'EOST (UMS 630). A l'exception des blocs prélevés pour les lames minces et des prélèvements pour la pédoanthracologie, les échantillons collectés sont séchés à l'étuve à 40°C pendant une semaine. Ensuite, ils ont été tamisés à 2 mm. Les éléments grossiers et l'essentiel des racines sont enlevés avec une pincette.

Les blocs pour les lames minces et les échantillons pour l'analyse pédoanthracologique ont été séchés à l'air dans un local ventilé.

Les analyses sont effectuées après homogénéisation des échantillons et/ou quartage.

5.3. Les analyses de caractérisation des sols

5.3.1. La granulométrie laser

L'analyse granulométrique permet de mesurer la taille des particules élémentaires du sol. Le laboratoire est équipé d'un granulomètre laser COULTER BECKMANN modèle LS230. Il consiste en un banc optique laser et en deux modules interchangeables permettant la mesure en voie aqueuse – que nous avons utilisée - ou en voie sèche. Il possède le dispositif optique PIDS (*Polarization Intensity Differential Scattering*) pour l'analyse submicronique et 126 détecteurs permettant la détection de 116 classes de taille de particules.

Le principe de la mesure porte sur la mesure de la quantité de la lumière déviée et l'importance de l'angle de déviation. Cette lumière est émise par un faisceau laser à l'arsenure de gallium (longueur d'onde 750nm). La gamme d'analyse du granulomètre va de 0,0004 à 2 mm. La résolution fine est rendue possible grâce à une optique à double lentille de Fourier qui permet de capter en une seule mesure les intensités lumineuses diffusées sur une zone angulaire de 0 à 35°. Grâce au système PIDS, il est possible de mesurer des particules jusqu'à 40 nm avec exactitude.

Les intensités obtenues par les 126 détecteurs et points de mesures obtenus avec le PIDS sont numérisés et analysés par calcul pour obtenir une distribution granulométrique de 0,0004 à 2mm. Les résultats obtenus sont présentés sous la forme de quantités par classe de taille et de courbe cumulative.

Le protocole de préparation des échantillons demande beaucoup du temps. Le but de la manœuvre est de défloculer au maximum l'échantillon afin qu'il n'y ait plus d'agrégats.

Le protocole de préparation est basé sur celui de Blanck (1976) et adapté par Martine Trautmann de Laboratoire d'analyse de sols et de formation superficielles, EOST. La fraction utilisée pour la préparation de l'échantillon est obtenue par quartage. Cinquante grammes de sol sont mélangés avec de l'eau distillée pour obtenir une boue homogène. Vingt grammes de cette boue sont mis dans un tube à centrifuger avec de l'eau distillée. Dans un premier temps, on détruit la matière organique par plusieurs attaques successives à l'eau oxygénée H_2O_2 . Ensuite, les ions flocculants Ca^{2+} sont éliminés à l'acide chlorhydrique dans les échantillons non calcaire et au chlorure de potassium dans les échantillons calcaires. Après élimination des ions Ca^{2+} , l'échantillon est lavé avec à l'eau déminéralisée tiède. L'échantillon prétraité est conservé dans un tube, dans une solution d'hexamétaphosphate de sodium, ce qui a pour effet de disperser les constituants fins. Avant la mesure, l'échantillon subit un traitement aux ultrasons pour achever la défloculation.

Avant la mesure, l'échantillon est placé sur un agitateur magnétique pendant plusieurs heures pour homogénéisation. On prélève à la pipette quelques grammes d'échantillon, qui sont placés dans la cellule de mesure du granulomètre. La mesure est automatisée, et les courbes sont affichées sur l'écran de l'ordinateur branché sur l'appareil. Les données sont exportées dans un tableur.

5.3.2. Mesures du carbone et de la matière organique

Quatre méthodes différentes ont été utilisées.

- La perte au feu : cette méthode repose sur la pesée d'un échantillon avant et après passage au four à 375° pendant 16 heures. Cette méthode permet de donner directement une mesure approximative de la teneur en matière organique. Dans la pratique, elle est peu précise, et est essentiellement utilisée pour déterminer la prise d'échantillon indispensable pour mesurer le taux de carbone par la méthode Walkley et Black (ci-dessous).
- L'oxydation par voie humide par la méthode Walkley and Black (1934) permet de mesurer la teneur en carbone organique. Elle exige le broyage de l'échantillon à $100\ \mu m$. Le principe consiste à faire réagir la MO avec un corps oxydant dans des conditions bien définies. C'est l'excès de corps oxydant qui est dosé. Pour l'oxydation, nous employons le bichromate de potassium en milieu sulfurique. L'excès de bichromate est dosé par le sel de Mohr en présence de diphénylamine, dont le changement de coloration met en évidence la fin de la réaction, et de fluorure de sodium, qui forme avec les ions ferriques gênants un sel peu dissocié. La fin du dosage est exprimée par le passage de la couleur du milieu du brun au violet puis au vert bleu. La teneur en MO est définie comme :

$$MO (\%) = 1,724 * C (\%)$$

Pour les détails, on se référera à la publication des auteurs (Walkley et Black, 1934).

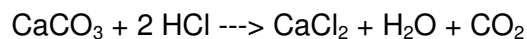
- La mesure des teneurs en carbone par le CHN. On mesure la conductivité des gaz, CO_2 et NO_2 , dégagés par la combustion de l'échantillon à $1100^\circ C$ par une injection

flash d'oxygène à l'aide de l'Organic Elemental Analyzer Flash 2000. Les résultats sont retranscrits sous forme de pics dont la surface est proportionnelle à la concentration de gaz ; ces chromatogrammes sont étudiés à l'aide du logiciel *Eager 300 for Ta 1112*. La méthode donne la teneur en carbone et en azote total. Pour les échantillons calcaires, cette mesure doit être accompagnée par la mesure de la teneur en carbonates (*cf. infra*). La teneur en carbone organique est représentée par la différence entre le carbone total mesuré au CHN et en carbone contenu dans les carbonates (le carbone représente 12 % de la masse de la molécule de CaCO₃).

- La SPIR quantitative (SPIRquant) peut également être utilisée pour modéliser les propriétés physiques et chimiques des sols (Cécillon *et al.*, 2009). Cette méthode est basée sur la comparaison d'un spectre du proche infrarouge d'un échantillon dont les propriétés sont inconnues avec un échantillon de la population des échantillons de référence où les spectres sont attribués à une valeur de la teneur absolue en carbone mesurée par Walkley et Black (1934) ou par CHN auparavant. L'acquisition des spectres se passe de la même façon que celle décrite dans le paragraphe 5.4. A partir des spectres et des données quantitatives connues, il faut construire un modèle qui sert plus tard pour la prédiction des valeurs inconnues.

5.3.3. Teneur en carbonates

La teneur de carbonates du sol est mesurée au calcimètre de Bernard. Le principe de la calcimétrie consiste dans la mesure de CO₂ dégagé lors la réaction entre HCl et CaCO₃ contenu dans le sol :



Le principe consiste dans la comparaison de la teneur en carbonate d'un échantillon témoin à teneur en CaCO₃ connue (CaCO₃ pur) avec celle d'un échantillon inconnu. Un échantillon d'environ 4 g de sol, pesé précisément, est mis dans un erlenmayer et mélangé avec HCl. Le volume de CO₂ dégagé est mesuré dans une atmosphère fermée.

La teneur en carbonates de l'échantillon est ensuite calculée comme suit :

$$P_2 = (V_1 \times P_1) / V_2$$

où P₁ est la masse de CaCO₃ du témoin, P₂ représente la masse de CaCO₃ dans le sol, V₁ le volume CO₂ dégagé lors la réaction entre le témoin et HCl, V₂ le volume de CO₂ dégagé lors la réaction entre l'échantillon et HCl.

5.3.4. Le pH_{eau}

Le pH_{eau} du sol correspond au pH d'une solution à l'équilibre avec un échantillon de sol mis en suspension dans de l'eau distillée dans un rapport défini (20 g du sol pour 50 ml d'eau). Le pH_{eau} répond à une acidité libre qui résulte de la libération dans la solution de

cation H⁺ initialement adsorbés sur le complexe argilo-humique.

5.4. La spectroscopie proche-infrarouge qualitative (SPIRqual)

Les spectres SPIR peuvent être considérés comme « l’empreinte digitale » d’un échantillon de sol (Palmborg et Nordgren, 1996). Le spectre mesuré contient des informations qualitatives et quantitatives qui peuvent être révélées et interprétées à l’aide de pré-traitements mathématiques et d’analyses statistiques multi-variées. Dans la phase de prétraitement mathématique des spectres, nous utiliserons le logiciel Unscrambler 10.3, puis dans l’analyse statistique le logiciel IBM SPSS 20. L’efficacité des deux logiciels dans les calculs a été vérifiée par Froehlicher (2013).

La SPIR qualitative adaptée aux sols est une méthode récente mise au point par Ertlen (2009). Elle est utilisée pour identifier le type de végétation, forestière ou prairiale, qui a produit les matières organiques du sol (MOS). Cette méthode est fondée sur la comparaison d’un spectre proche infrarouge (1000-2500 nm) d’un échantillon d’origine inconnue avec ceux des échantillons d’une librairie spectrale de référence. Celle-ci est créée sur la base d’échantillons d’horizons superficiels de sols couverts par un type de la végétation bien connu qui garantit l’origine de la matière organique (Ertlen *et al.*, 2010). Des spectres de référence déjà existants ont été utilisés (Ertlen, 2009 ; Froehlicher, 2013) ainsi qu’une nouvelle librairie spectrale de chernozems et de sols formés sur loess produite dans le cadre de ce travail de thèse. Dans un premier temps, nous présenterons les librairies spectrales, avant de détailler l’acquisition des spectres inconnus et leur exploitation.

5.4.1. La librairie spectrale de référence construite par Ertlen (2009) et Froehlicher (2013)

Ertlen (2009) a construit une librairie spectrale de référence de sols sous deux grands types d’écosystèmes : prairies et forêts (fig. 5.1.). Le référentiel est composé de 996 échantillons provenant de 30 sites forestiers (585 échantillons) et 21 sites prairiaux (411 échantillons). Ce référentiel spectral a été établi à partir de types de sols différents. L’échantillonnage a été mené de telle sorte que les propriétés des horizons de surface soient indépendantes du type de couverture végétale. Ertlen (2009) a réussi à distinguer non seulement la MOS provenant de la végétation sous prairie et sous forêt, mais aussi à préciser l’origine de la MOS entre les sols sous les forêts de feuillus, mixtes et de conifères (fig. 5.2.). Il a envisagé la possibilité de distinction des écosystèmes plus spécifiques (chênaies et hêtraies).

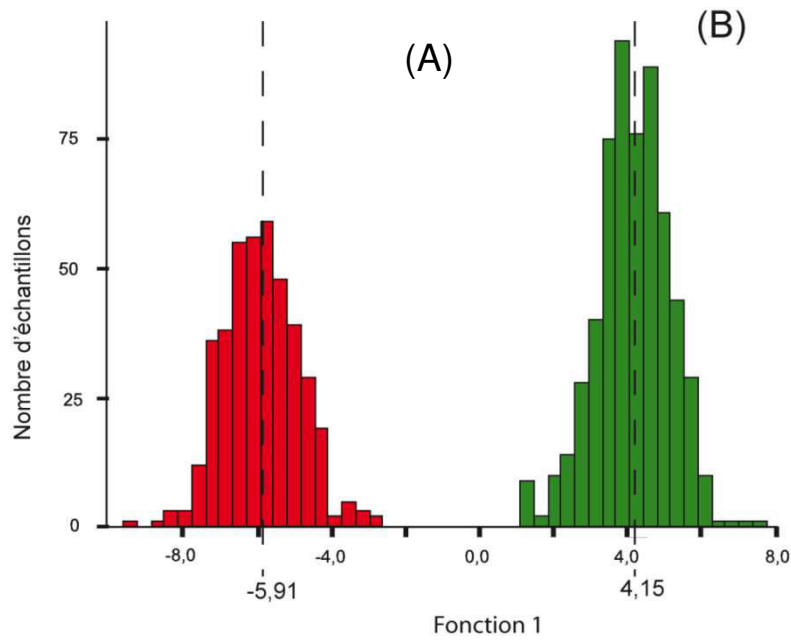


Figure 5.1. Fonction canonique de l'analyse discriminante entre les sols sous forêts et les sols sous prairies avant (A) et après (B) l'application des prétraitements mathématiques (d'après Ertlen, 2009).

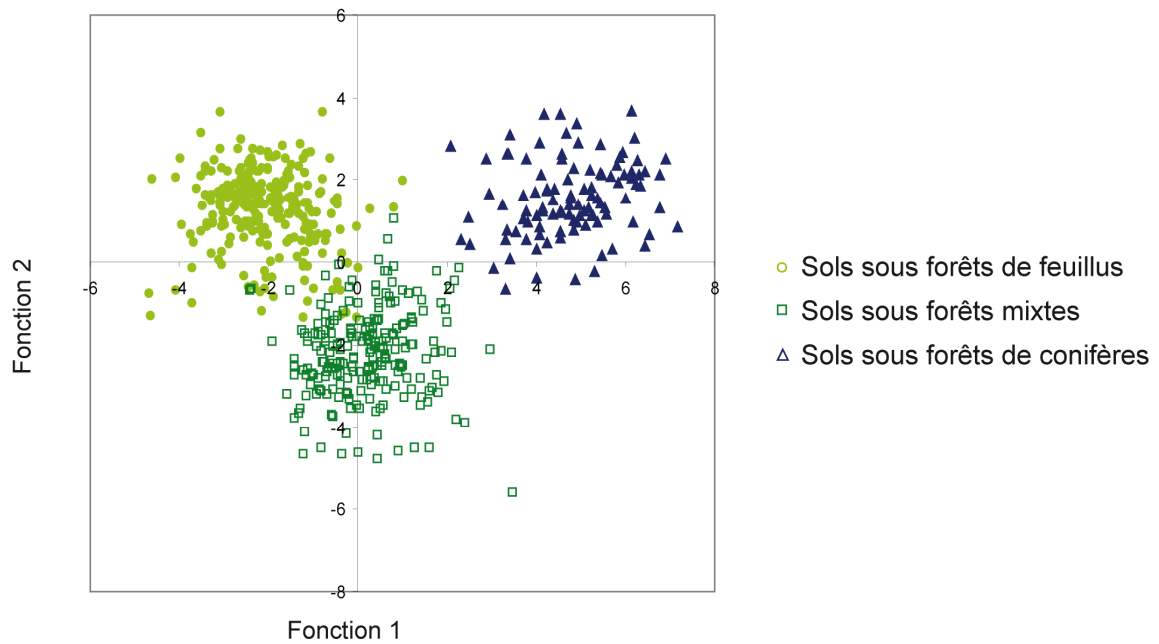


Figure 5.2. Fonctions canoniques de l'analyse discriminante (AD5) entre les trois grandes classes de forêts (d'après Ertlen, 2009).

La faiblesse du référentiel de Ertlen (2009) résidait dans l'absence de milieux cultivés. Cette lacune était principalement due au fait que la généralisation de la monoculture donne un signal fortement marqué par une culture précise et ne permet pas de comparaison avec des signatures d'agricultures traditionnelles, dans lesquelles la rotation des cultures est la règle. Le travail de master de Froehlicher (2013) a permis de combler cette lacune en intégrant dans le référentiel 165 échantillons de colluvions agricoles historiques, dont on a fait l'hypothèse que leur signature spectrale était celle des horizons de surface cultivés érodés. Les analyses discriminantes ont permis de distinguer cette catégorie des deux autres (fig. 5.3) et une validation a été effectuée sur quelques échantillons indépendants.

Ce nouveau référentiel est fondamental. De facto, le référentiel bi-partite forêt – prairie ne peut s'appliquer que dans des milieux dans lesquels le couvert végétal a toujours oscillé entre ces deux pôles. En effet, dans le cas où la MOS de certains horizons du sol aurait une signature de sol cultivé, le traitement statistique effectué sur la base d'un référentiel bi-partite aboutirait automatiquement à ranger ces échantillons dans la classe, « forêt » ou « prairie », dont ils seraient les moins éloignés. Le référentiel tripartite élimine donc un risque de biais tout en donnant une précision supplémentaire sur les couverts végétaux.

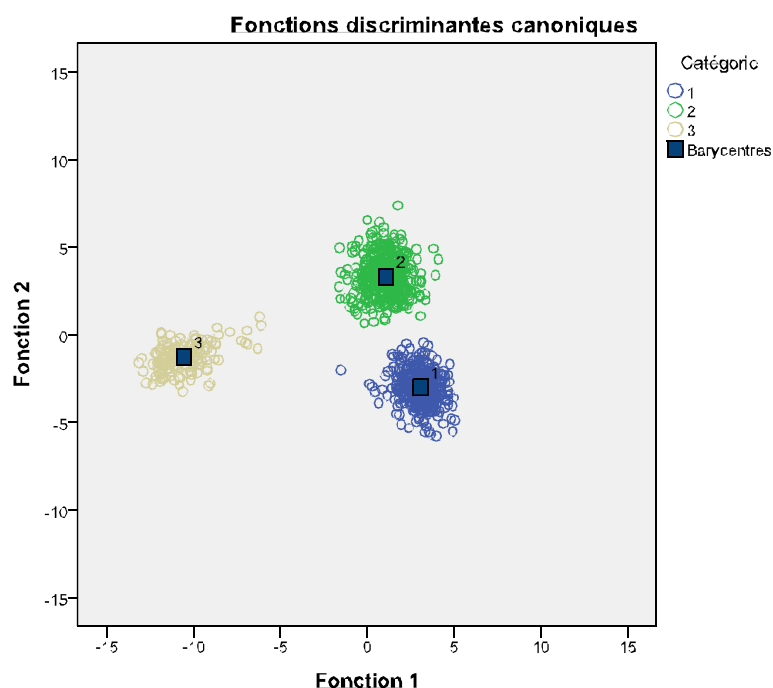


Figure 5.3. Scores des deux fonctions canoniques discriminantes. 1 sols sous prairie, 2 sols sous forêt, 3 colluvions agricoles.

5.4.2. Construction de la librairie spectrale de référence de chernozems et sols sur loëss

La librairie spectrale de référence SPIRqual mise en place dans ce travail est adaptée au type de sol étudié : le chernozem et les autres types de sol formés sur loëss qui sont caractérisés par des teneurs élevées en calcaire. Or les carbonates de calcium ont une influence non négligeable sur les spectres proche infrarouge. Ils peuvent masquer une partie de l'information sur la matière organique en particulier lorsque les pourcentages de matière organique sont faibles (cas des paléosols) Il a donc fallu constituer un référentiel spécifique pour les chernozems et autres sols sur loëss. Pour cette raison, des échantillons d'horizons superficiels de chernozems et d'autres sols sur loëss ont été collectés dans diverses forêts et prairies selon le protocole d'échantillonnage décrit dans le point 5.1.1. sur une profondeur standard de 4 cm. Comme nous l'avons précisé dans le chapitre 4 (§ 4.1), la stabilité de la végétation sur au moins 150 ans garantit la pureté du signal de référence (au moins 95 % de matière organique issue de la végétation qui occupe actuellement le sol). Seules les stations répondant à ce critère ont été retenues pour établir le référentiel de surface.

5.4.3. L'acquisition des spectres

Après séchage et tamisage à 2 mm, les échantillons de sols sont placés dans une coupelle de diamètre 9 cm (figure 5.4.) d'un spectromètre type FT- IR Frontier Spectrometer (PerkinElmer, figure 5.5.) et analysés à l'aide d'une séparatrice CaF_2 , d'une sphère d'intégration et d'un détecteur InGaAs. Chaque spectre a été mesuré sur la moyenne de 99 scans. Grâce à la rotation de la coupelle pendant la mesure, chaque scan d'une surface d'environ 1 cm^2 est effectué sur un sous-échantillon différent. Ceci permet une excellente représentativité de la mesure équivalente à une mesure « fixe » répétée de nombreuses fois. Les spectres sont analysés dans la plage de nombre d'onde de $10\,000$ à $4\,000 \text{ cm}^{-1}$, soit une longueur d'onde comprise entre $1\,000$ et $2\,500 \text{ nm}$ selon une résolution que l'on peut choisir.

La relation entre le nombre d'onde et la longueur d'onde est définie par l'équation suivante :

$$v = \frac{1}{\lambda}$$

où v est le nombre d'onde et λ est la longueur d'onde.



Figure 5.4. Placement de l'échantillon de sol sur une coupelle avant la mesure. Photo : B. Vysloužilová.



Figure 5.5. Le spectromètre FT- IR Frontier Spectrometer (PerkinElmer). Photo : B. Vysloužilová.

La relation inversement proportionnelle entre nombre et longueur d'onde est représentée graphiquement sur la figure 5.6. Elle n'est pas linéaire. De ce fait, la résolution définie en nombre d'onde n'est pas proportionnelle à la résolution en longueur d'onde : la résolution en longueur d'onde augmente quand le nombre d'onde décroît (tableau 5.1).

ν (cm^{-1})	10000	9992	7000	6992	6000	5992	5000	4992	4008	4000
λ (nm)	1000	1000,80	1428,57	1430,21	1666,67	1668,89	2000	2003,21	2495,01	2500
Résolution en ν (cm^{-1})	8		8		8		8		8	
Résolution λ (nm)	0,801		1,635		2,225		3,205		4,99	

Tableau 5.1. Evolution de la résolution en nanomètres pour une résolution fixée à 8 cm^{-1} .

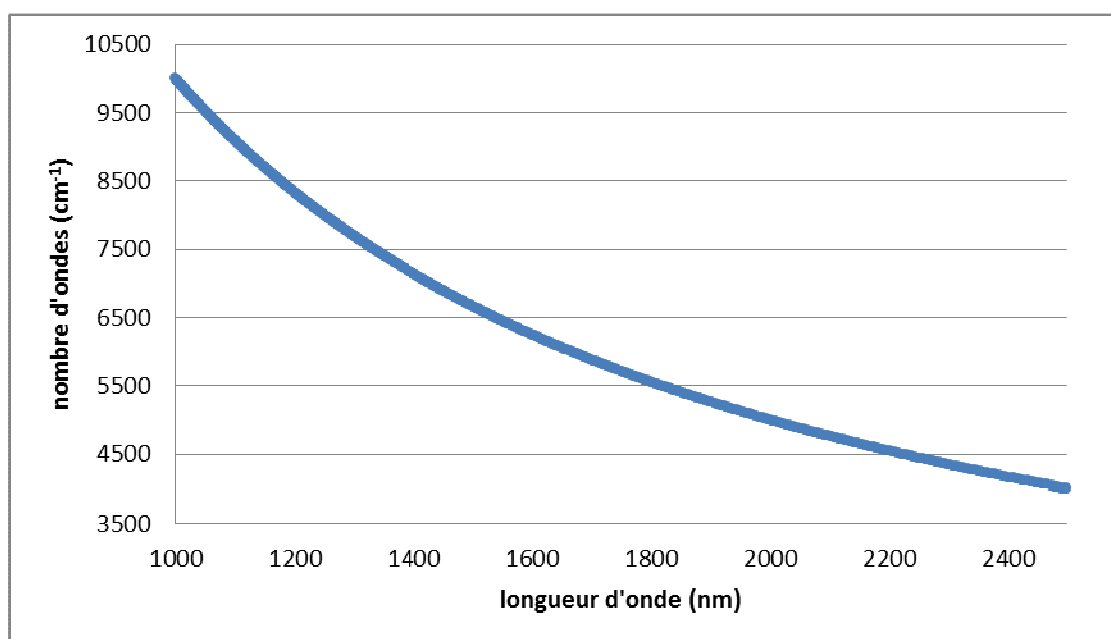


Figure 5.6. Relation entre le nombre d'onde (cm^{-1}) et la longueur d'onde (nm).

Par conséquent, le choix d'une résolution de 8 cm^{-1} permet d'obtenir une résolution comprise entre 0,8 et 4,99 nanomètres, ce qui est tout à fait comparable avec les résolutions les plus fréquemment rencontrées dans la littérature (i.e Henderson *et al.*, 1992 ; Velasquez *et al.*, 2005). Ainsi, une matrice de données obtenue avec 3001 colonnes et réduite à un intervalle de 8 cm^{-1} permet de traiter une matrice réduite à seulement 751 colonnes. Avec un

intervalle de 16 cm^{-1} , une matrice de 375 colonnes et pour un intervalle de 32 cm^{-1} , 187 colonnes. Cette réduction a deux objectifs : l'élimination d'une incertitude et la réduction de la matrice de données à un nombre qui est gérable pour l'analyse discriminante dans le logiciel SPSS (Froehlicher, 2013 ; Ertlen *et al.*, 2010). En effet une des conditions de validité de l'analyse discriminante est d'avoir une matrice avec au moins autant d'observations que de variables.

Les données spectrales acquises se présentent sous forme de matrice où les colonnes sont les variables (soit les bandes de longueur d'onde) et les lignes sont les observations (soit les échantillons mesurés). A la résolution 8 cm^{-1} , nous obtenons une matrice de 751 colonnes. Le nombre de lignes dans la matrice correspond au nombre d'échantillons traités.

La réflectance mesurée (R) par le spectromètre (figure 5.7.) est par ailleurs transformée en absorbance (A) (fig. 5.6) à l'aide de l'équation suivante :

$$A = \log_{10}(1/R).$$

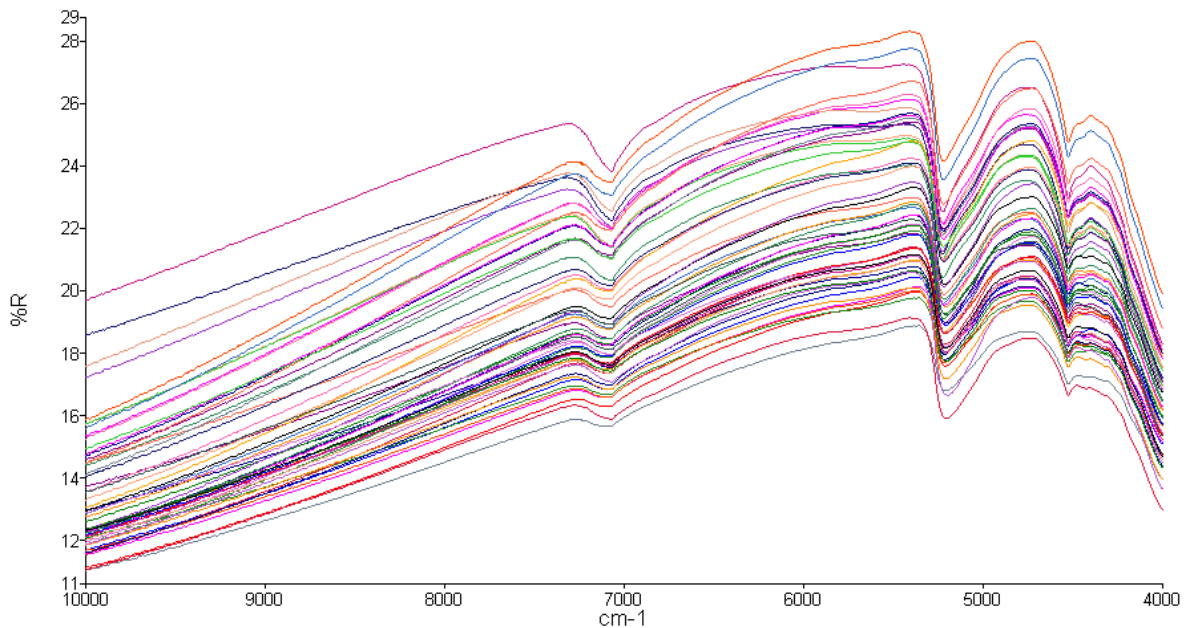


Figure 5.7. Visualisation de données « brutes » de la réflectance mesurée sur un groupe d'échantillons, dans un simple objectif illustratif. Les spectres sont visualisés dans le logiciel *PerkinElmer Spectrum*.

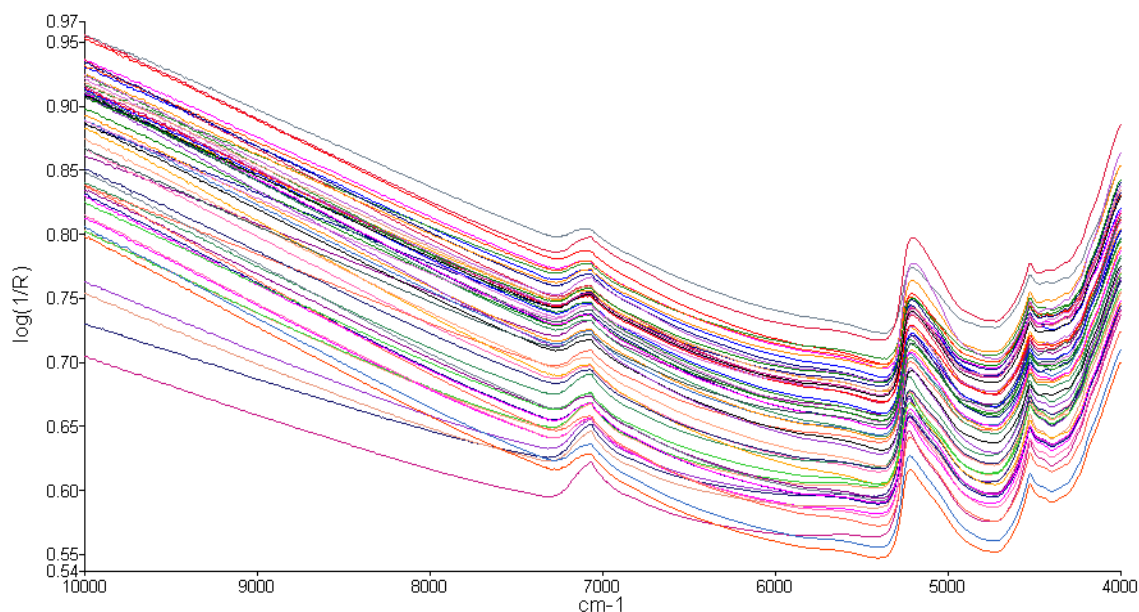


Figure 5.8. Visualisation des données « brutes » de l'absorbance du même groupe d'échantillons. Les spectres sont affichés dans le logiciel *PerkinElmer Spectrum*.

Les bandes spectrales intéressantes dans notre cas se situent entre 7300-4000 cm^{-1} (voir fig. 5.8.) En effet, entre 10000 et 7300 cm^{-1} , il n'y a pas de pics mais un bruit de fond élevé. L'enlèvement des bandes spectrales entre 10000-7300 cm^{-1} qui ne montrent aucune information pertinente permet de réduire le nombre de colonnes de la matrice à 412 colonnes.

5.4.4. Le prétraitement des spectres

Dans la littérature, aucun prétraitement standard ne se dégage (Coûteaux *et al.*, 2003). En fonction des applications et des jeux d'échantillons, un traitement s'avère plus efficace qu'un autre. Dans notre cas, nous avons testé plusieurs pré-traitements et combinaisons de pré-traitements dans le but de maximiser les distances entre les groupes définis en fonction du couvert végétal. Parmi ces prétraitements, nous avons testé :

* La standardisation (fonction *Standard Normal Variate* = SNV dans le logiciel Unscrambler 10.3) est le type de prétraitement correctif, appliqué systématiquement, qui permet la soustraction de l'absorbance moyenne de la plage de spectres à partir de tous les spectres dans la matrice. Cette transformation a pour effet de réduire l'influence de la quantité de la MO et de l'hétérogénéité de taille des particules (Shenk *et al.*, 2001; Barnes *et al.*, 1989). La transformation est également utile pour mettre en évidence les informations qualitatives contenues dans les spectres. L'effet de ce traitement de spectres est visualisé sur la figure 5.9.

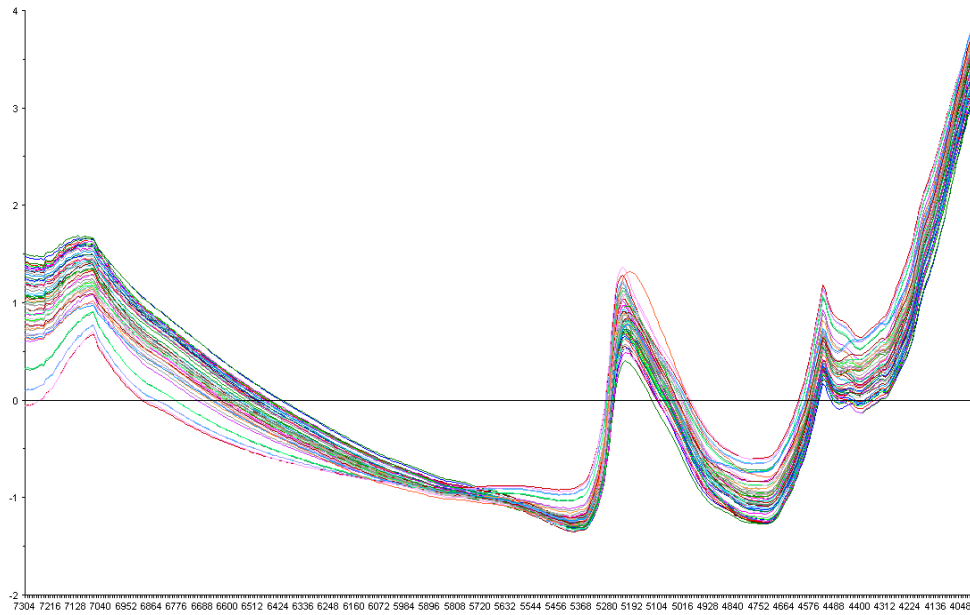


Figure 5.9. Les spectres de la même population d'échantillons après standardisation : application de la fonction SNV du logiciel Unscrambler 10.3. sur la bande 7003 – 4000 cm^{-1} .

* La fonction *detrend* est un prétraitement supplémentaire qui est parfois appliqué pour améliorer le traitement statistique ultérieur. Elle consiste à appliquer une fonction puissance pour rectifier la tendance curvilinéaire du spectre dans les valeurs proches de l'extrémité haute (4000 cm^{-1}) (Ertlen, 2009). L'effet de ce prétraitement est visualisé sur la figure 5.10.

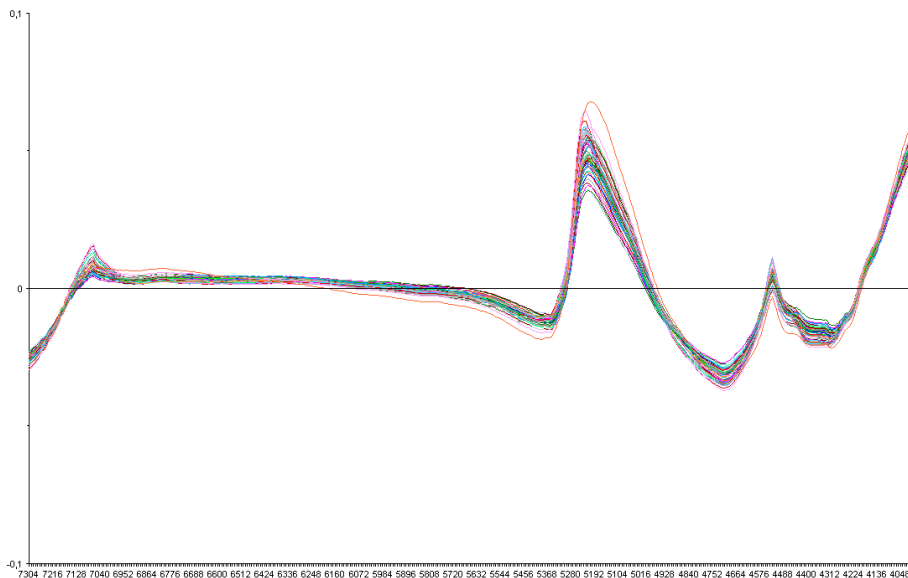


Figure 5.10. La visualisation de spectres du même groupe d'échantillons après l'application de la fonction *detrend* dans le logiciel Unscrambler 10.3.

* L'application des fonctions dérivées (1^{ère}, 2^{nde}) est également un prétraitement courant (Coûteaux *et al.*, 2003). Elle permet d'une part une amplification de l'ensemble des variations observées sur un spectre brut (variation de l'absorbance), mais aussi une mise en valeur des données standardisées (Ertlen, 2009). L'effet de l'application des dérivées sur les spectres est visualisé sur les figures 5.11 et 5.12.

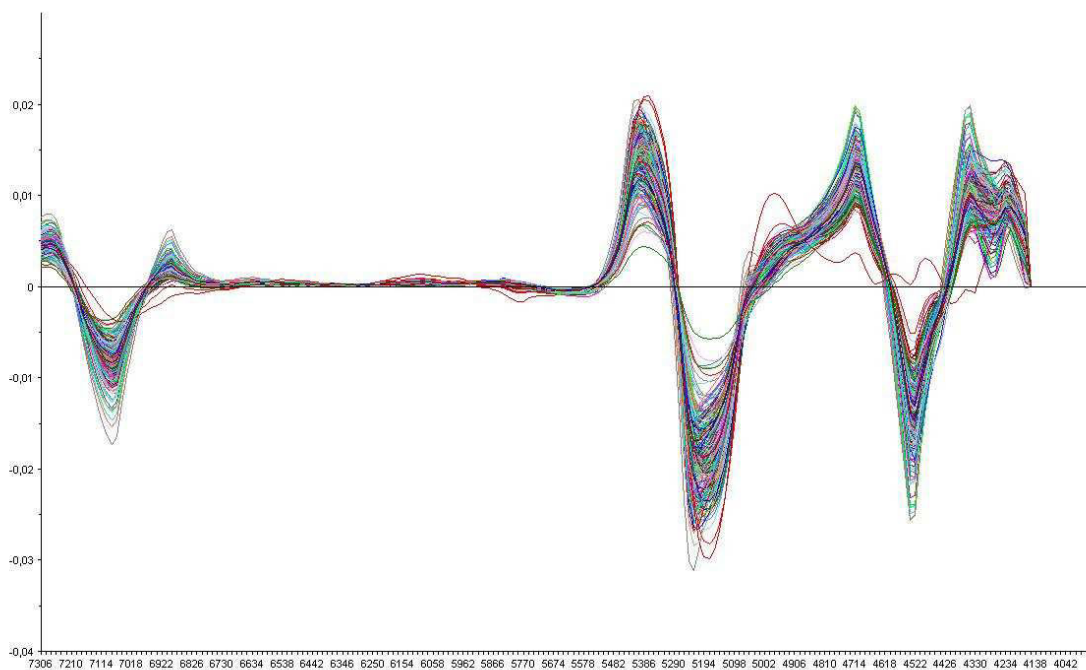


Figure 5.11. Visualisation de l'effet de l'application de la 1^{ère} dérivée sur la même population d'échantillons dans le logiciel Unscrambler 10.3.

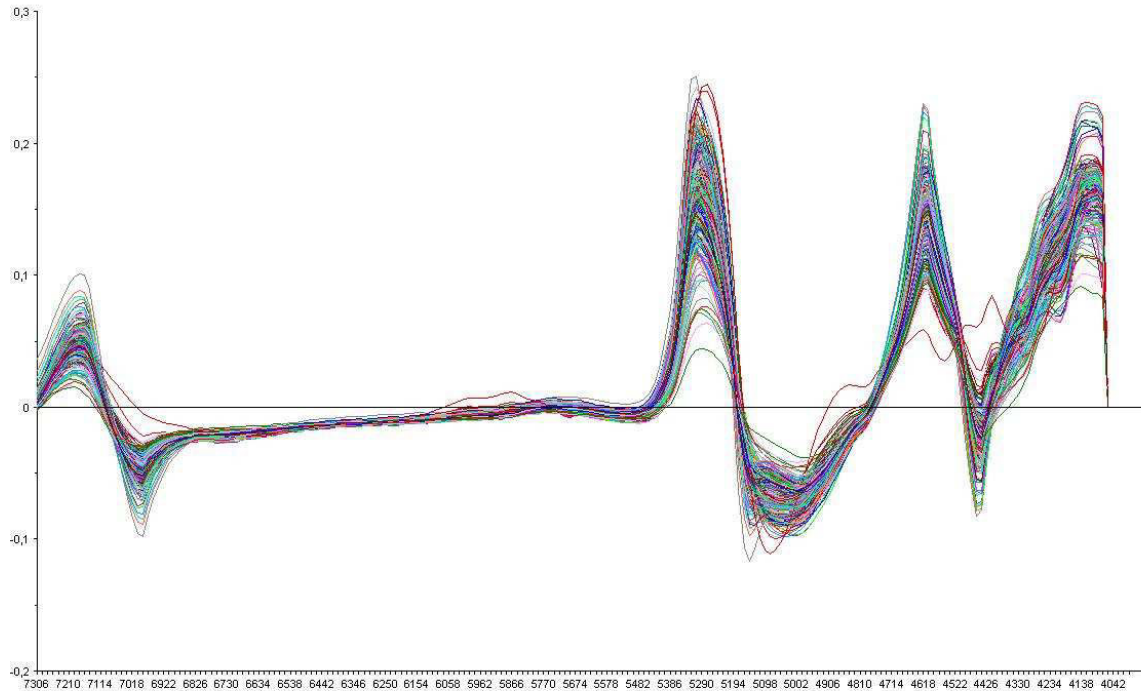


Figure 5.12. Visualisation de l'effet de l'application de 2nde dérivée sur la même population d'échantillons dans le logiciel Unscrambler 10.3.

5.4.5. L'analyse statistique des spectres

Il existe plusieurs outils de statistique multivariée adaptés aux données qualitatives. L'analyse en composante principale (ACP) est la plus utilisée. Elle permet d'extraire l'information principale d'une matrice de données en remplaçant un grand nombre de variables par quelques composantes qui synthétisent l'information. L'analyse discriminante permet d'extraire à partir d'un grand nombre de variables, celles qui permettent le mieux de séparer plusieurs groupes d'individus. Dans ce second outil, contrairement au premier, les groupes sont connus *a priori* et les variables discriminantes sont recherchées. Pour l'ACP, ce sont les groupes les plus évidents qui ressortent. Or, dans nos spectres proche-infrarouge l'information sur l'origine végétale de la matière organique, que nous recherchons, n'est pas nécessairement l'information dominante dans la matrice. Ainsi, l'analyse discriminante sera choisie, car elle ne met pas l'accent sur l'information dominante mais sur l'information recherchée, c'est-à-dire l'origine de la matière organique qui pourrait dans une ACP s'exprimer sur des composantes à très faible poids.

Nous allons construire et valider le référentiel bipartite de chernozems et de sols formés sur loess sous prairie ou forêt. Dans les étapes suivantes, nous allons en plus appliquer les référentiels créés auparavant par Ertlen (2009) et Froehlicher (2013). L'analyse discriminante ou analyse canonique est appliquée comme décrit par Ertlen *et al.* (2010) et Viscarra Rossel et Webster (2011).

Lorsqu'il y a deux classes (sols sous forêts et sol sous prairies par exemple), il y a une seule fonction canonique. A partir des fonctions canoniques, il est 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. Les informations importantes peuvent être tirées de fonctions canoniques. Les fonctions attribuent des coefficients à chacune des variables, ce qui permet de détecter les plus discriminantes.

Par conséquent, pour la construction du référentiel de chernozems et de sols formés sur loess, nous avons une population de 427 échantillons. Nous obtenons ainsi une matrice de 427 lignes (nombre d'échantillons) et 412 colonnes (bandes de nombres d'onde ; cf. § 5.4.3). Cette matrice est divisée en deux sous-matrices : une pour la prairie avec 292 lignes et une pour la forêt avec 135 lignes. A partir des deux sous-matrices, nous construisons un référentiel bipartite. La différence entre les populations est exprimée par la distance de Mahalanobis. L'objectif des prétraitements préalables consiste à augmenter cette distance. Lorsque cette distance est significative, et le modèle de populations distinctes est validé.

Dans une deuxième étape, l'algorithme calculé pour établir la fonction discriminante à partir des échantillons de référence est appliqué aux échantillons « inconnus ». Ceux-ci se classent en fonction de leurs scores dans une des classes définies dans le référentiel. Ainsi, le classement des données inconnues dans une des catégories du référentiel permet une interprétation de l'origine des MOS : forêt ou prairie dans le référentiel bipartite, forêt, prairie ou culture dans le référentiel tripartite. Le processus de la construction des référentiels et de leur application est schématisé sur la figure 5.13 (Froehlicher, 2013).

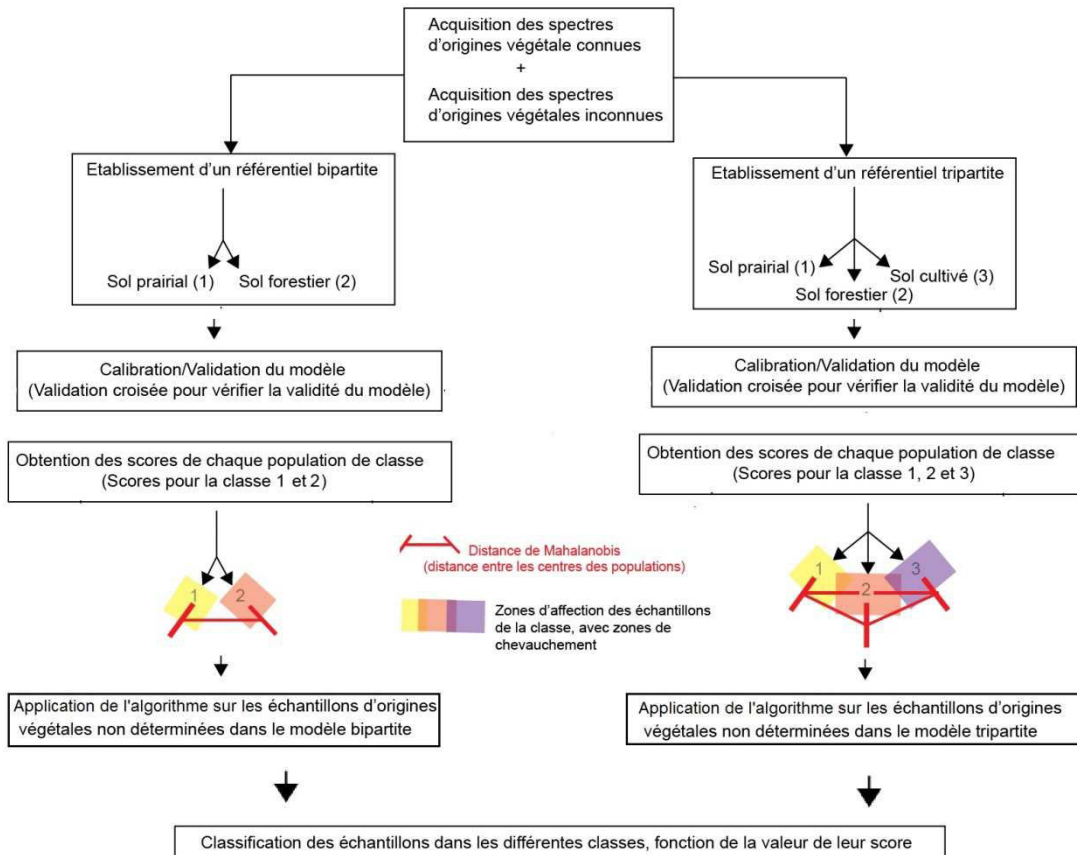


Figure 5.13. Présentation de la construction de la librairie de spectres de référence SPIR (adapté d'après Froehlicher, 2013) bipartite ou tripartite.

5.5. Les mesures d'âge radiocarbone ^{14}C

Les mesures d'âge ^{14}C sont interprétées d'une manière différente selon le type de matériau daté.

Sur charbons de bois, la mesure donne un âge absolu. L'âge radiocarbone de charbons de bois provenant de Kolín et de Bubeneč a été mesuré au *Laboratoire de Mesure du Carbone 14* à Gif-sur-Yvette en France. L'âge a ensuite été calibré au moyen du logiciel OxCal 4.2. (Université d'Oxford, laboratoire de recherche pour l'archéologie et l'histoire de l'art, <http://www.rlaha.ox.ac.uk/orau/index.htm>). Cette opération permet de passer des âges ^{14}C aux âges calendaires, fondés sur une année de 365 jours (Stuiver et Polach, 1977). En effet, l'écart entre l'âge brut et l'âge calendaire peut être important (Stuiver *et al.*, 1986 ; Stuiver et Pearson, 1986). Il peut atteindre 1000 ans à l'Holocène inférieur.

Dans les sols, l'interprétation diffère selon que la mesure ait été faite dans un sol fonctionnel ou dans un paléosol (Guillet, 1979). Dans les chernozems fonctionnels, l'âge ^{14}C mesure le temps moyen de résidence (TMR) des MOS. Celles-ci sont renouvelées en

permanence, par entrées (décomposition des matières organiques fraîches) et sorties (minéralisation des matières organiques humifiées) annuelles. Le TMR représente en fait l'espérance de vie des MOS dans le sol. Il intègre l'âge de constituants organiques très hétérochrones, certains récents, d'autres très anciens, dont la proportion varie en fonction de la profondeur échantillonnée. Dans les paléosols enfouis, l'âge ^{14}C est la somme du TMR au moment de l'enfouissement et de la durée de l'enfouissement. Pour le Pléistocène, le TMR peut être considéré comme l'âge approximatif de l'enfouissement, si l'on procède à la mesure sur l'ancien horizon de surface et que celui-ci n'a pas été tronqué. En effet, l'ordre de grandeur du TMR au moment de l'enfouissement (de l'ordre de 50 ans) est négligeable devant la durée de l'enfouissement.

Les TMR des sols de Kolín, Bubeneč, Morschwiller, Břesnice et Kuchyňka ont été mesurés au Laboratoire de Mesure du Carbone 14, Gif sur Yvette en France. Ceux des sites de Clermont-Ferrand et de Zeměchy ont été mesurés au Laboratoire de Radiocarbone de Poznań en Pologne. Les mesures de TMR n'ont pas été calibrées. En effet, la matière organique du sol étant composée de nombreux éléments hétérochrones, les modèles de calibration ne sont pas applicables.

5.6. L'identification des charbons de bois : étude pédoanthracologique

La pédoanthracologie vise à identifier les charbons de bois extraits du sol. La présence de charbons dans le sol fournit la preuve de l'existence de feux dans le passé. La carbonisation préserve la structure anatomique du bois. Par conséquent, il est possible d'identifier les taxons végétaux par l'observation au microscope des charbons. Cette méthode permet l'étude de paléovégétations et de la variabilité spatiale et temporelle des incendies (Figueiral et Mosbrugger, 2000). Les charbons ne voyageant pas par les vents, contrairement aux pollens, l'image fournie par leur étude est celle de la végétation locale.

Trois sites de paléo-chernozems enfouis sous des dépôts éoliens ou des colluvions ont été analysés pour leur contenu en charbon de bois : à Zeměchy, 3 chernozems superposés et 1 luvisol dans une séquence de loess pléistocène ; à Poplze et à Kolín, un chernozem enfoui dans les deux cas sous des colluvions holocènes. Le profil de Zeměchy a été analysé en coopération avec Lenka Danková et présenté dans son mémoire de master effectué au Département de Géographie Physique et Géoécologie de l'Université Charles de Prague en 2012. L'identification botanique des charbons de bois a été faite par Jan Novak de l'Université de Bohême du Sud. La détermination des charbons des sites de Kolín et de Poplze a été faite par Claire Delhon de l'Université de Nice.

Les échantillons de charbon ont été séchés à l'air et pesés. Puis ils ont été mélangés avec de l'eau dans des seaux et 2 g d'hexamétophosphate de sodium par litre de suspension ont été ajoutés pour dissoudre les agrégats de sol. Ensuite, la suspension a été versée dans une série de tamis à maille carrée de 2 mm, 0,8 mm et 0,5 mm. Le tamis de 2 mm intercepte les plus grands fragments de charbon sans prendre le risque de les endommager par le tamisage. L'analyse des charbons de bois des sites de Kolín et Poplze s'est focalisée sur les charbons de taille supérieure à 0,8 mm. Les charbons de sols de la Zeměchy ont été analysés à partir de 0,5 mm.

Une fois séchés, les charbons ont été brisés à la main sur les trois plans

caractéristiques (transversal, longitudinal-radial, longitudinal-tangentiel). Leurs caractéristiques anatomiques ont été observées sous une lumière réfléchie – sous microscope à un grossissement de 50 à 1000 pour les sites de Kolín et Poplze. Un microscope épiscopique (Nikon Eclipse 80i) à grossissement de 200 à 500 a été utilisé pour les quatre paléosols de Zeměchy. L'identification a été faite par comparaison avec les descriptions publiées dans les atlas d'anatomie du bois (Vernet *et al.*, 2001; Schweingruber, 1990 ; Heiss, 2006) et avec des fragments de bois carbonisés modernes de collections de référence. En raison de ces manipulations et de la nécessité d'observer diverses caractéristiques anatomiques, l'identification des fragments plus petits que 0,5 mm est à peine possible.

5.7. L'approche micromorphologique

La micromorphologie des sols et des sédiments est une méthode avancée de l'étude d'échantillons non perturbés en utilisant un microscope afin d'identifier les différents constituants du sol et d'analyser leur organisation. Ces études faites à une échelle très fine permettent d'identifier des processus et des dynamiques peu perceptibles à l'échelle macroscopique (Kubierna, 1938 ; Stoops et Eswaran, 1986 ; Fedoroff *et al.*, 1987).

La structure interne du sol (matrice) est un terme désignant l'organisation microscopique de l'horizon, qui est exprimée dans la disposition spatiale primaire de particules élémentaires (grains) et d'éléments structuraux secondaires avec un plasma, des résidus de minéraux et roches et des pores. La micromorphologie apporte des connaissances sur l'ensemble de propriétés des sols : les composantes primaires et secondaires, formes, processus de transformation et l'activité des microorganismes (Němeček *et al.*, 1990).

La composante primaire est définie comme étant l'ensemble des particules que l'on peut distinguer au microscope optique (fragments de faune, concrétions allochtones, fragments de sols plus anciens inactifs compris) et le degré de leur transformation. La forme d'altération des minéraux et roches peut fournir de l'information sur la relation entre les composantes autochtones et allochtones, qui a une signification importante sur la compréhension des pédogénèses polygéniques.

La composante secondaire est surtout représentée par le plasma du sol, à savoir les constituants qu'on ne peut distinguer au microscope optique. Ses formes sont importantes pour comprendre des aspects de la pédogénèse qui n'est observable que sous microscope (par exemple les revêtements argileux des BT). Ensuite, les diverses formes des concrétions témoignent des processus du passé (par exemple : les concrétions de braunlehm dans les chernozems). Les transformations secondaires de concrétions témoignent de changements des conditions environnementales de site : climat (ex. assèchement) ou végétation (mise en place de steppe secondaire).

Les lames de sol contiennent aussi des formes zoo-génétiques et des résidus de la

faune (coquilles de mollusques par exemple) ainsi que des résidus de plantes, des charbons de bois, fragments de litière.

Les lames ont été fabriquées dans le laboratoire spécialisé privé de Thomas Beckmann en Allemagne. L'échantillon est imprégné lentement par capillarité sous vide avec une résine synthétique mêlée d'un diluant volatile (Bonneau et Souchier, 1994). Une fois la résine séchée, l'échantillon est scié à la scie diamantée. Il est ensuite affiné mécaniquement, puis fini par polissage manuel. L'épaisseur des lames minces est de 20-25 μm .

L'étude micromorphologique a été employée pour l'étude de la catena chernozem - luvisol de Hrušov en République Tchèque. Les échantillons ont été prélevés dans 6 des fosses creusées sur ce transect. Sur chaque coupe, nous avons commencé à prélever à la limite entre l'horizon de labour et l'horizon non-perturbé par le labour jusqu'à l'horizon C. Pour avoir une image micromorphologique continue des sols, nous avons prélevé des échantillons dans deux colonnes contiguës, en alternance, avec un chevauchement de 3 cm entre deux échantillons successifs.

5.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'ensemble des méthodes utilisées lors notre travail. Ces méthodes sont variées, même si l'apport le plus innovant de ce travail consiste à l'application de la SPIRqual. C'est principalement cette approche qui nous permettra de mieux comprendre les conditions de formation des chernozems.

PARTIE III

Des données analytiques à l'évolution des chernozems :

Résultats et discussion

Dans cette troisième partie, nous présenterons les résultats des analyses de sols. Le chapitre 6 sera consacré à la présentation de la construction des bibliothèques spectrales PIR de référence. Une attention particulière est portée à la bibliothèque spectrale bipartite des chernozems sous forêt et sous prairie. Cette bibliothèque bipartite est ensuite étendue aux sols cultivés et à des sols sous différents couverts forestiers par adjonction de références apportées par Froehlicher (2013, Froehlicher *et al.*, 2014) et Ertlen (2010). Différents modèles statistiques sont construits à partir de ces référentiels. L'objectif du chapitre 7 est d'appliquer ces modèles à l'ensemble des spectres mesurés sur les sols et paléosols étudiés pour interpréter l'origine végétale de leur matière organique sous un angle paléoenvironnemental. Le chapitre 8 présente les résultats des analyses pédoanthracologiques effectuées sur certains paléosols pleistocènes et holocènes. Enfin, le chapitre 9 est consacré à l'étude d'une catena chernozem-luvisol observée sur le site de Hrušov.

Chapitre 6

La construction des bibliothèques spectrales de référence SPIR

Dans ce chapitre, nous présenterons les bibliothèques spectrales de référence prélevés sur des échantillons de surface. En premier lieu, nous présenterons la bibliothèque spectrale développée spécifiquement dans le cadre de ce travail pour l'étude des chernozems. Nous vérifierons la capacité de la SPIR à discriminer les deux populations d'échantillons développés sous forêt ou sous végétation prairiale. Comme nous l'avons précisé dans le chapitre 4, le nombre de placettes sélectionnées pour la construction de la bibliothèque spectrale est de 24 : 17 stations (293 échantillons d'horizons de surface) se rapportent à la végétation prairiale, et 7 stations (135 échantillons) à la végétation forestière. Des tests permettront de choisir le meilleur traitement statistique. Ensuite, nous présenterons les types de prétraitements statistiques que nous avons effectués pour optimiser la discrimination entre les deux populations. Dans un deuxième temps, nous élargirons notre bibliothèque spectrale de chernozems à celle construite auparavant par Froehlicher (2013) pour les sols cultivés. Dans un troisième temps, nous essayerons de préciser le type de forêts (feuillus, conifères, forêts mixtes) pour les sols qui ont été identifiés comme forestiers dans les deux premières étapes, à l'aide du référentiel établi à cet effet par Ertlen (2009).

6.1. Caractéristiques physico-chimiques des horizons de surface des sols de référence

Dans cette partie nous présentons uniquement les résultats concernant les sites du référentiel bipartite spécifique aux chernozems et acquis dans le cadre de cette thèse. Les résultats analytiques des autres sites sont présentés par Froehlicher (2013) et Ertlen (2009).

L'objectif des analyses physico-chimiques des horizons de surface de référence est de vérifier que leurs caractéristiques ne soient pas strictement inféodées à la végétation. En effet, dans ce cas, il serait difficile de déterminer si les populations différentes mises en évidence par les traitements statistiques dépendent principalement du type de végétation ou des caractéristiques physico-chimiques du sol, indépendamment de la végétation, même si les traitements statistiques ont aussi pour objet de diminuer ce biais. Les résultats analytiques sont rappelés dans le tableau 6.1.

6.1.1. Teneurs en carbone organique

La teneur en matière organique des horizons de surface (fig. 6.1.) varie, pour la tranche comprise entre 0 et 4 cm de profondeur, entre un minimum de 1,05 % (HUT) et un maximum de 6,77 % (BAB). En comparaison avec les résultats d'Ertlen (2009), ces variations sont relativement modérées. Le référentiel bâti par cet auteur montre en effet des extrêmes de 3 à 42 %. Les placettes sous forêt sont systématiquement riches en MO, dont la teneur dépasse à chaque fois 3 %. Ceci est dû à une répartition différente de la MO : elle est plus superficielle dans les sols forestiers, l'essentiel des apports se faisant par la litière. Dans les chernozems sous prairies, la décroissance des taux de M.O. avec la profondeur est moins brutale que dans les sols forestiers (fig. 6.2). On notera toutefois qu'il y a aussi des placettes prairiales à teneur en MO plus élevée que 3 %. Il y a une plage de recouvrement entre les deux types de couverts végétaux. Néanmoins, on ne peut pas dire que le taux de carbone est indépendant de la couverture végétale.

Code de site	Prof. (cm)	Propriétés chimiques			Granulométrie				
		pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	Corg %	Argiles (%)	Limons fins (%)	Limons gross. (%)	Sables fins (%)	Sables gross. (%)
BAB	0-4	5,06	1,24	4,97	16,10	27,60	30,50	19,70	6,10
BRO	0-4	7,67	15,01	2,20	17,10	27,80	31,30	21,50	3,00
BUL	0-4	6,88	1,31	6,77	14,00	22,00	21,00	24,50	18,50
CAR	0-4	4,10	0,00	4,62	10,40	32,50	35,10	14,90	7,10
DID	0-4	5,32	0,00	3,05	12,30	30,40	40,60	13,20	3,50
DUB	0-4	6,31	1,19	4,17	10,50	14,30	15,90	42,50	16,80
HIR	0-4	4,42	0,00	3,56	10,90	31,90	36,60	12,60	8,00
HUB	0-4	7,51	0,59	1,42	28,60	43,30	21,80	6,30	0,00
HUC	0-4	7,84	4,87	1,41	15,50	32,30	26,00	18,00	8,20
HUH	0-4	6,07	1,25	2,50	1,71	3,20	4,20	71,60	19,40
HUM1	0-4	7,38	1,69	1,55	9,80	24,70	26,80	29,50	9,20
HUM2	0-4	7,84	12,17	1,92	8,80	22,60	21,70	32,50	14,50
HUP	0-4	6,20	1,95	1,90	8,20	17,00	17,70	36,80	20,40
HUR	0-4	5,46	0,00	2,47	8,16	17,84	14,50	39,00	20,50
HUS	0-4	5,46	0,00	2,01	2,60	4,40	5,12	63,40	24,50
HUT	0-4	7,42	1,38	1,05	8,90	23,40	31,20	23,50	12,90
HUU	0-4	5,90	0,00	2,92	1,32	2,40	2,17	40,31	53,90
HUUD	0-4	6,82	0,00	2,92	4,60	14,90	8,60	22,40	49,50
KOC	0-4	7,30	3,75	3,17	7,70	7,10	3,60	7,80	73,80
KOR	0-4	7,70	3,21	2,82	9,60	10,50	6,00	9,50	64,40
KUR	0-4	6,70	0,00	4,58	38,00	30,00	30,00	1,00	1,00
MIK	0-4	6,80	0,00	4,90	-	-	-	-	-
SEN	0-4	5,65	0,99	4,30	17,90	30,60	25,90	19,30	6,30
STR	0-4	6,40	0,00	4,06	-	-	-	-	-

Tableau 6.1. Propriétés physico-chimiques des horizons de surfaces (les forêts sont indiquées en gris).

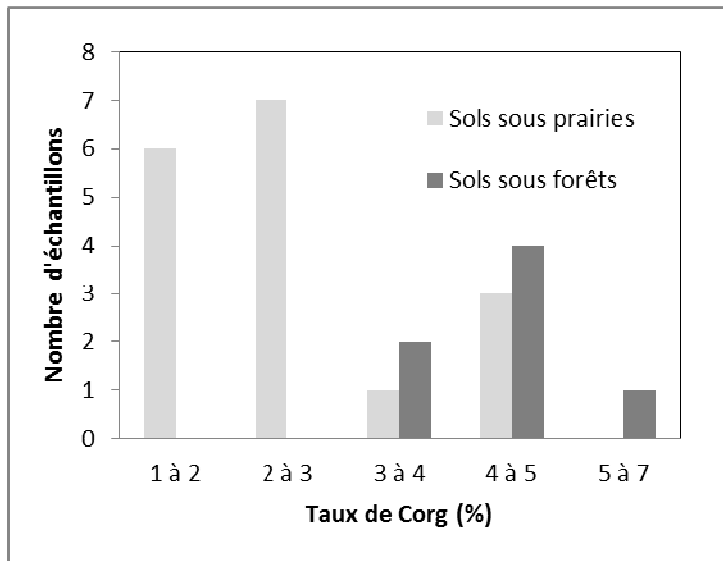


Figure 6.1. Nombre d'échantillons de surface (0-4 cm) de sols sous prairies et sous forêts en fonction des taux de Corg (%).

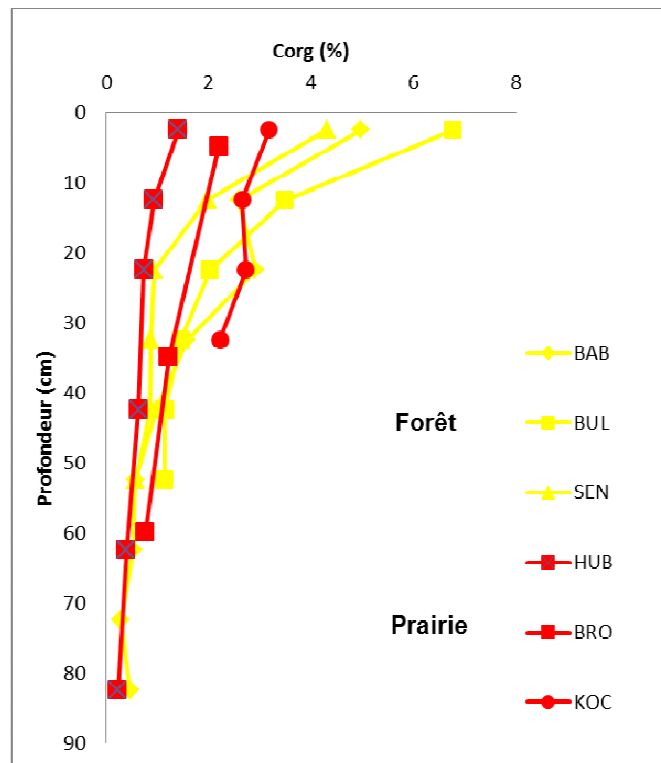


Figure 6.2. Exemples de profils de carbone organique des sols de forêts (en jaune) et de prairies (rouge). Voir aussi la fig. 7.1.

6.1.2. Valeurs du pH

Le pH_{eau} des sols varie entre un minimum de 4,1 pour la station forestière de CAR et un maximum de 7,84 pour la station prairiale de HUC. Notons que les trois placettes sous forêts ayant le pH le moins élevé sont celles des luvisols échantillonnés en France. Les sols classés comme chernozems sous forêts ont un pH_{eau} pratiquement comparable à celui des chernozems prairiaux, mais il ne dépasse jamais 7. Les sols à $\text{pH} > 7$ sont tous prairiaux. Cependant, globalement, le pH_{eau} des sols est indépendant de la couverture végétale (fig. 6.3.).

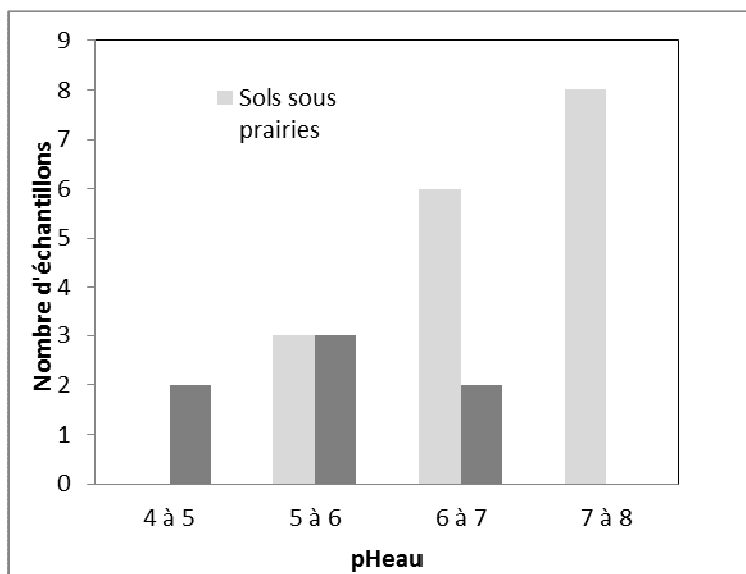


Figure 6.3. Nombre d'échantillons de surface (0-4 cm) de sols sous prairies et sous forêts en fonction du pH_{eau} .

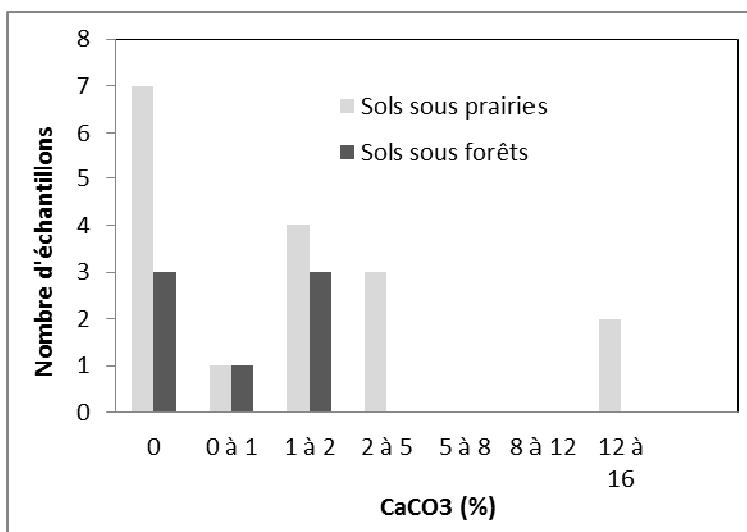


Figure 6.4. Nombre d'échantillons de surface (0-4 cm) de sols sous prairies et sous forêts en fonction de la teneur en CaCO_3 .

6.1.3. Teneurs en carbonates

La teneur en carbonates la plus élevée est celle de la placette prairiale de BRO où elle atteint 15,01 %. Il y a 10 placettes où la teneur en carbonates est nulle dans les horizons de surface, 7 de prairies et 3 de forêts. En fait, seules deux placettes (BRO et HUM2) ont des valeurs très fortes (de 12 à 15 %) par rapport aux autres, dont la teneur en carbonates est relativement homogène et comprise entre 1 et 3 %. La teneur en carbonates est indépendante du type de la végétation (fig. 6.4).

6.1.4. Inter-comparaisons des différentes propriétés physico-chimiques.

Comme nous l'avons vu sur les figures 6.1., 6.3. et 6.4., le taux de C_{org}, le pH_{eau} et la teneur en CaCO₃, pris indépendamment les uns des autres, sont en grande partie indépendants du type de couverture végétale. Toutefois, leur couplage (fig. 6.5 et 6.6.) révèle une séparation entre la population des sols forestiers et celle des sols sous prairies. Si ces différences semblent normales et logiques, elles risquent de peser sur les interprétations des spectres qualitatifs. Il est toutefois illusoire de trouver des chernozems sous forêt et sous prairies ayant des caractéristiques analytiques entièrement comparables.

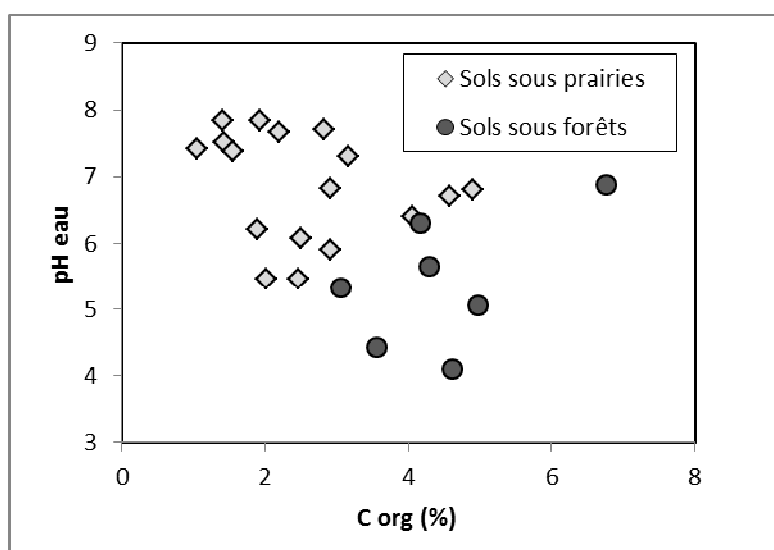


Figure 6.5. La relation entre le C_{org} (%) et le pH_{eau} pour les échantillons de surface (0-4 cm) sous prairies et pour les sols sous forêts.

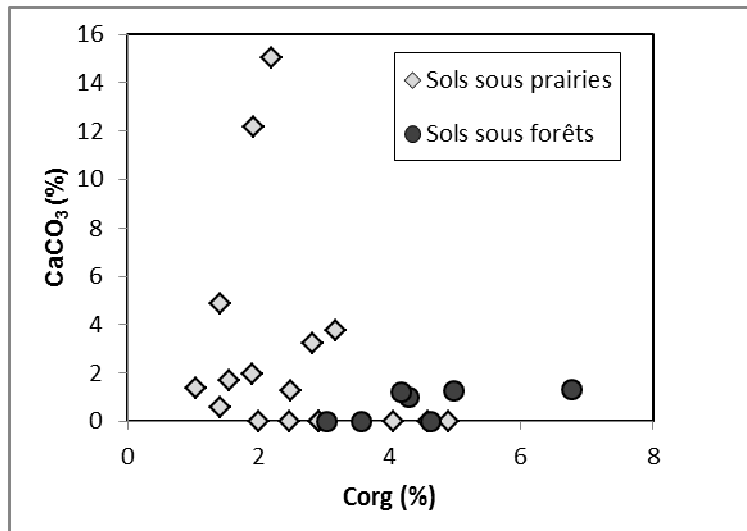


Figure 6.6. Relation entre le Corg (%) et la teneur en CaCO₃ (%) pour les échantillons de surface (0-4 cm) sous prairies et les sols sous forêts.

6.1.5. Composition granulométrique

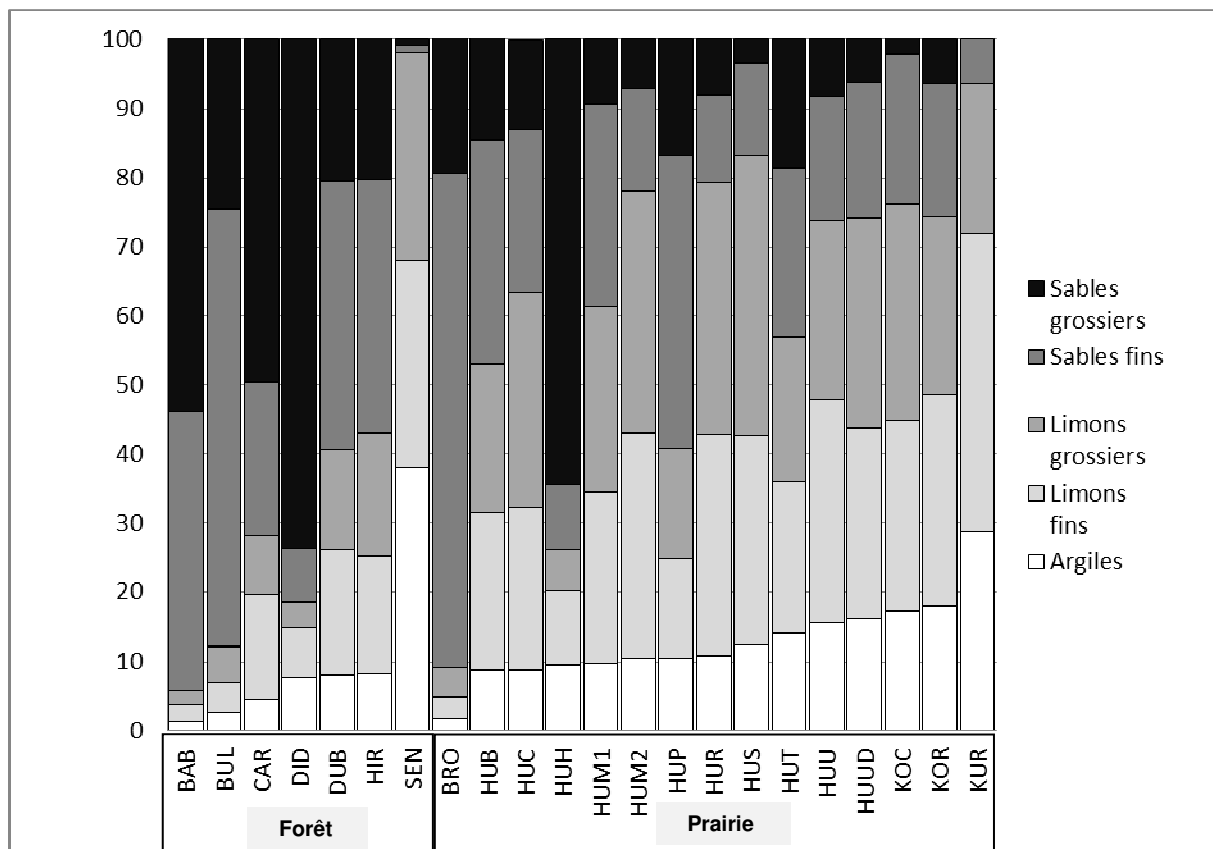


Figure 6.7. La distribution granulométrique de la fraction minérale pour les 22 placettes de surface (N.B. : les placettes MIK et STR n'ont pas été analysées).

La composition granulométrique des sols sous prairies et des sols sous forêts est très variée (fig. 6.7.) et semble complètement indépendante du type de végétation. D'une façon générale, les teneurs en argiles sont faibles. Les sols se répartissent entre un pôle sableux et un pôle limoneux. La population de sols forestiers est plus homogène que celle des sols prairiaux, dans lesquels on observe la présence de quelques sols très riches en sables grossiers. Toutefois, il se pourrait que la richesse en sables de certains échantillons soit liée à un biais analytique que nous avons rencontré de façon générale : une mauvaise défloculation des agrégats carbonatés. Ces « sables » seraient alors des pseudo-sables. Ce point est discuté plus en détail dans le chapitre 7.

Globalement les variables physico-chimiques du référentiel spécifique aux chernozems ont une amplitude inférieure aux amplitudes des référentiels de Ertlen (2009) et Froehlicher (2013). Ceci s'explique par le caractère spécifique et le choix délibéré de n'inclure que des sols développés sur loess et chaque fois que c'était possible des chernozems. Ainsi, il faut garder à l'esprit que ce référentiel plutôt homogène a pour unique vocation la détermination de l'origine végétale de la matière organique de chernozem.

6.2. La librairie spectrale bipartite spécifique aux chernozems : analyse discriminante

Grâce à l'analyse statistique multi-variée (analyse discriminante) des populations d'échantillons, nous obtenons une fonction canonique discriminante (voir chapitre 5.4). L'objectif du traitement statistique est de discriminer les deux populations avec un degré de confiance important et éliminer les influences des propriétés physico-chimiques sur les spectres en conservant l'information sur l'origine végétale de la MO. En effet, des teneurs élevées en M.O. et une granulométrie grossière augmentent l'absorbance des échantillons (Barnes *et al.*, 1989). La teneur en CaCO_3 diminue pour sa part l'absorbance dans certaines longueurs d'onde (Lagacherie *et al.*, 2008 ; Stenberg *et al.*, 2010).

Dans ce but, il faut choisir le traitement des spectres qui permet de maximiser la distance (appelée distance de Mahalanobis) entre les barycentres des deux groupes (prairie et forêt). Nous avons effectué plusieurs tests avec des résolutions (cf. 5.4.3.) et des prétraitements différents, détaillés sur le tableau 6.2. Nous observons que, quel que soit le traitement, nous arrivons toujours à distinguer les deux classes « forêt » et « prairie » avec au minimum 96,7 % d'échantillons bien classés. C'est un élément important pour affirmer que les deux populations sont bien distinctes.

La distance de Mahalanobis la moins élevée correspond aux spectres sans aucun traitement statistique. Quelle que soit la résolution (8, 16 ou 32 cm^{-1}), nous obtenons ici une distance de Mahalanobis d'une valeur comprise entre 3 et 3,1. La standardisation SNV augmente la distance de Mahalanobis sur chaque résolution jusqu'à une valeur de 7 à 9. La distance de Mahalanobis la plus élevée a été atteinte grâce à la résolution de 8 cm^{-1} , l'application du prétraitement SNV puis l'application d'une dérivée première. En revanche, l'application d'une dérivée seconde n'apporte pas d'amélioration importante de la distance de Mahalanobis.

Finalement, pour le traitement de l'ensemble des sols examinés, chernozems et autres sols sur lœss, nous avons choisi le test avec lequel nous avons atteint la distance de Mahalanobis la plus importante, soit 17,46 (fig.6.8.) : matrice des spectres réduite à la résolution de 8 cm⁻¹, traitement par standardisation SNV et 1^{ère} dérivée. Le score de la fonction canonique pour les prairies varie entre -8,88 et -3,14, centré sur -5,51 ; pour les forêts, les scores varient entre 9,11 et 14,42, et sont centrés sur la valeur de 11,95. La totalité des échantillons qui servent pour la librairie de surface de référence se classent correctement dans la classe prévue.

Résolution en cm ⁻¹	Grandeur de la matrice (fenêtre spectrale utilisé 7300-4000cm ⁻¹)	Type de prétraitement (dans le logiciel Unscrambler)	Pourcentage d'échantillons classés correctement	Barycentre du groupe		Distance Mahalanobis
				Classe 1	Classe 2	
8	414x428	aucun	97,4	0,972	-2,109	3,081
8	414x428	SNV	99,5	-2,418	5,247	7,665
8	414x428	SNV + 1 dérivée	100	-5,508	11,954	17,462
8	414x428	SNV + 2 dérivée	100	4,548	-9,872	14,42
8	414x428	SNV + detrend	100	4,178	-9,068	13,246
16	208x428	aucun	96,7	0,95	-2,061	3,011
16	208x428	SNV	99,8	-2,3	4,992	7,292
16	208x428	SNV + 1 dérivée	100	-4,489	9,742	14,231
16	208x428	SNV + 2 dérivée	100	4,226	-9,172	13,398
16	208x428	SNV + detrend	100	4,448	-9,74	14,188
32	105x428	aucun	97,9	0,954	-2,071	3,025
32	105x428	SNV	100	2,866	-6,221	9,087
32	105x428	SNV + 1 dérivée	100	-3,441	7,467	10,908
32	105x428	SNV + 2 dérivée	100	-3,867	8,393	12,26
32	105x428	SNV + detrend	100	4,097	-8,891	12,988

Tableau 6.2. Qualité de la discrimination entre les sols sous forêts et les sols sous prairies pour les différents pré-traitement mathématiques testés. En gras, le traitement qui donne les meilleurs résultats.

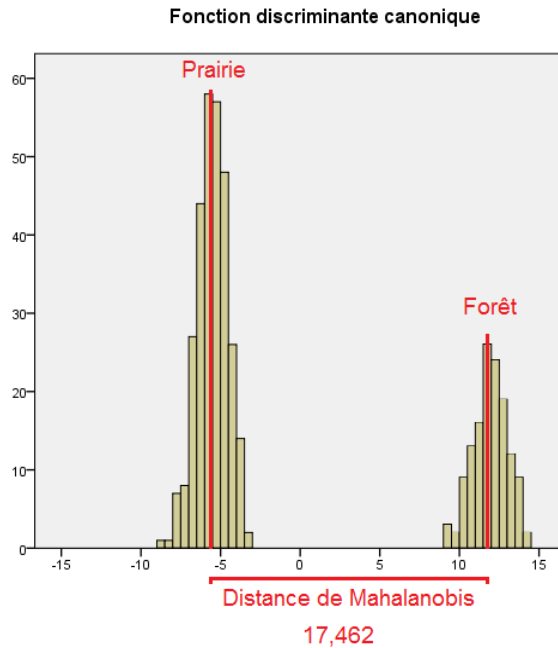


Figure 6.8. Fonction discriminante du référentiel spécifique aux chernozems et sols sur loëss. Les scores de la fonction canonique des prairies varient entre -8,883 et -3,140, avec un barycentre de -5,508 ; pour les forêts, les scores varient entre 9,108 et 14,423, avec un barycentre de 11,954. La distance entre les barycentres des deux groupes de sols est appelée la distance de Mahalanobis. Pour le traitement choisi, elle vaut 17,462.

6.3. La librairie spectrale tripartite : discrimination des classes

Du point de vue des écosystèmes, la librairie spectrale bipartite de référence est encore limitée. L'analyse discriminante ne peut fournir aucune distinction entre les différents types de forêts ou les différents types de prairies. En particulier, la distinction n'est pas encore possible entre la végétation naturelle de steppe, de prairies ou des terrains cultivés. Ceci limite les possibilités de reconstruction paléo-environnementale. Pour combler cette lacune, nous avons utilisé l'identification des sols cultivés par la SPIR mise au point par Froehlicher (2013). A cet effet, nous avons élargi la librairie spectrale bipartite des chernozems à une troisième classe : les sols cultivés. Les travaux de Froehlicher (2013) ont déjà testé l'indépendance des propriétés physico-chimiques des sols. C'est la raison pour laquelle nous n'allons pas développer cette problématique ici, comme nous l'avons fait pour la librairie spectrale de chernozems présentée dans le point 6.2. Froehlicher (2013) a en particulier remarqué que les valeurs de pH et de la teneur en carbone organique semblent influencer la qualité de distinction des groupes. Les valeurs surpondérées peuvent influencer la qualité de l'analyse discriminante. Ceci dit, les tests auxquels elle a procédé sur des échantillons « inconnus » mais indubitablement d'origine agricoles, ont été très satisfaisants.

Rappelons (cf. chap. 5.4) que la base de données de référence de sols cultivés a été créée à partir d'échantillons de colluvions d'origine agricole, qui ont été prélevés dans le cadre de cette thèse et du mémoire de M2 de Lucie Froehlicher. La nouvelle librairie

spectrale tripartite discutée ici provient de la fusion de la librairie établie par Froehlicher (2013) avec la librairie spectrale des chernozems. Nous obtenons alors une nouvelle base de données de spectres, qui compte 664 échantillons de sol sous prairie (39 sites de prélèvement), 514 échantillons de sols sous forêt (35 sites de prélèvement) et 165 échantillons de sols cultivés (8 sites de prélèvement).

Par cette opération, nous tentons de discriminer 3 classes de référence (sols sous forêt, prairie et culture), c'est-à-dire que nous cherchons à maximiser deux fonctions canoniques qui discriminent les trois classes. Froehlicher (2013) a utilisé le prétraitement qui consiste à réduire la matrice à une résolution de 16 cm^{-1} et à l'application des fonctions detrend et SNV. Même si ce type de prétraitement a donné de bons résultats, nous avons choisi le prétraitement qui consiste à l'application des fonctions detrend, SNV et première dérivée. En effet, l'application de ce prétraitement nous a amené à des résultats encore meilleurs : 99,3 % des échantillons sont classés correctement. L'analyse discriminante appliquée à cette matrice de données prétraitée a abouti à calculer les distances de Mahalanobis suivantes à partir des barycentres (tab. 6.3) :

Sur la fonction1 :

- une distance de 1,88 entre les classes de sols de prairies et de forêts (1 & 2)
- une distance de 8,54 entre les classes de sols de prairies et sols cultivés (1 & 3)
- une distance de 10,42 entre les classes de sols de forêts et sols cultivés (2 & 3)

Sur la fonction 2 :

- une distance de 4,74 entre les classes de sols de prairies et de forêts (1 & 2)
- une distance de 3,97 entre les classes de sols de prairies et de sols cultivés (1 & 3)
- une distance de 0,77 entre les classes de sols de forêts et sols cultivés (2 & 3)

Classe	Fonction	
	1	2
1 (prairie)	,330	2,301
2 (forêt)	2,210	-2,436
3 (culture)	-8,212	-1,670

Tableau 6.3. Coordonnées des barycentres (moyennes des groupes) pour les deux fonctions discriminantes canoniques.

Ces coordonnées permettent de calculer la distance de Mahalanobis

Dans la répartition des barycentres (fig. 6.9), c'est la fonction 1 qui nous permet de distinguer les sols cultivés (classe 3) des classes de sols non-cultivées (classes 1 prairie et 2 forêt). Nous observons que la classe 3 se détache très bien des classes 1 et 2 avec des distances de Mahalanobis sur la fonction 1 de 8,542 et 10,422. La fonction 2 permet de distinguer les sols sous forêts des sols sous prairies. La classe 1 (prairie) et la classe 2 (forêt) restent plus proches avec une distance de Mahalanobis de 4,737 que nous pouvons toutefois considérer comme discriminante.

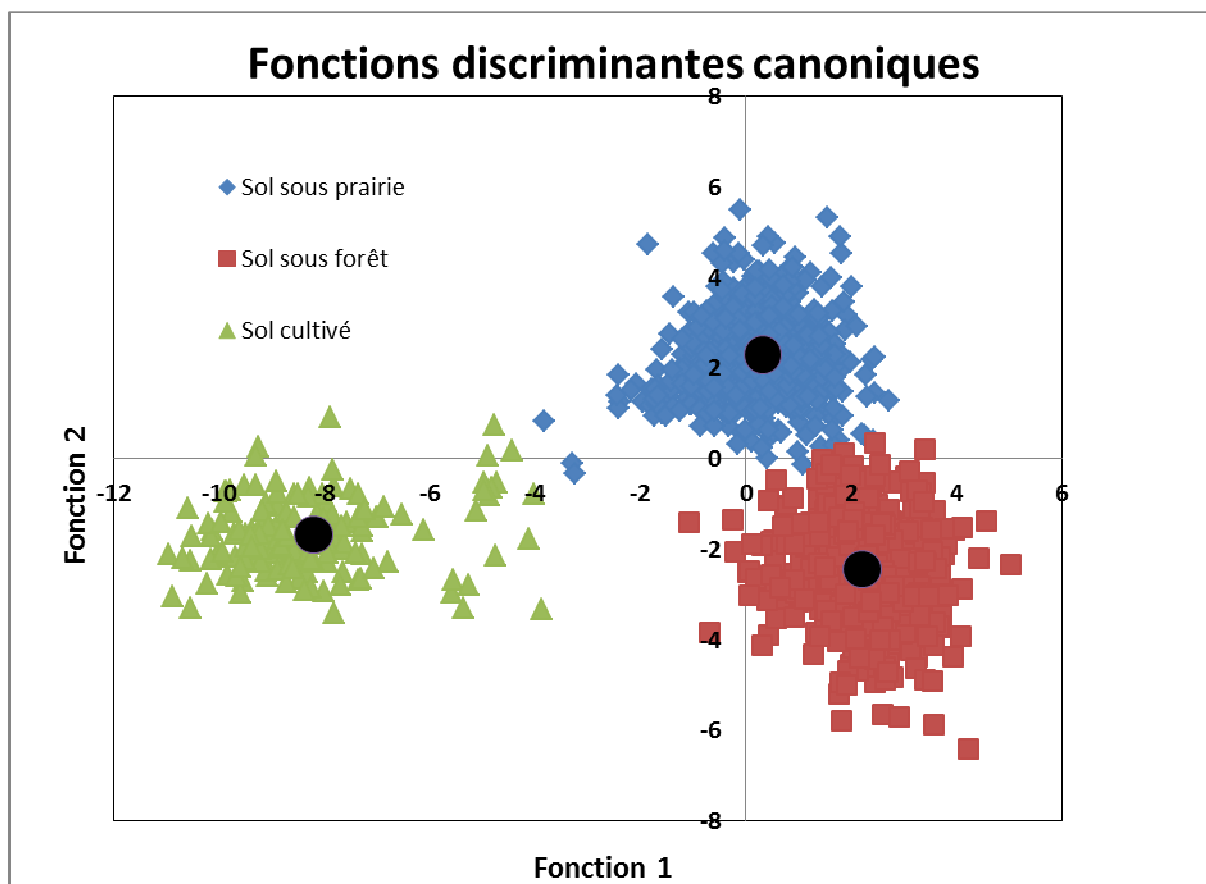


Figure 6.9. Fonctions discriminantes canoniques de l'analyse discriminante entre sols de prairie (classe 1), sols sous forêt (classe 2) et sols cultivés (classe 3). Les points noirs représentent les barycentres de chaque groupe. La classe 1 est limitée par les scores de la fonction 1 de -3,81 et 2,71 et par les scores de la fonction 2 de -0,31 et 5,49. La classe 2 est limitée par les scores de la fonction 1 de -1,08 et 5,03 et par les scores de -6,41 et 0,33 et par les scores de la fonction 2 de -6,41 et 0,33. La classe 3 est limitée par les scores de la fonction 1 de -10,96 et -2,11 et par les scores de la fonction 2 de -3,41 et 0,91.

6.4. La librairie spectrale de forêts : distinction entre types de forêts

Comme nous l'avons exposé dans le point 6.3., la librairie de référence bipartite pose des limites à l'identification des écosystèmes. Il n'est ainsi pas possible de distinguer différents types de forêts tels que les forêts feuillues, de conifères ou mixtes. Pour tenter de résoudre ce point, nous avons utilisé un référentiel développé par Ertlen (2009), qui a permis de distinguer avec un degré de confiance important ces trois types majeurs. Nous avons fusionné la partie de la librairie spectrale de Ertlen (2009) dédiée aux forêts avec les échantillons de référence de forêts feuillues prélevés lors de ce travail de thèse. De cette façon, nous avons obtenu une nouvelle librairie spectrale tripartite qui devrait avoir la capacité de distinguer ces trois classes. Cette nouvelle librairie spectrale compte 504

échantillons de sol : 265 sous forêts feuillues (17 sites de prélèvement), 104 sous forêts de conifères (9 sites), 135 échantillons sous forêts mixtes (conifères et feuillus, 9 sites).

Nous avons utilisé le même prétraitement statistique, c'est-à-dire l'application de detrend, SNV et de la première dérivée comme pour la librairie tripartite précédente. Ce prétraitement assure que 96,8 % des échantillons de référence sont classés correctement. L'analyse discriminante appliquée à cette matrice de données prétraitée a abouti à calculer les distances de Mahalanobis suivantes à partir des barycentres (tab. 6.4) :

Sur la fonction 1 :

- une distance de 4,87 entre les classes de sols sous forêts feuillues et de conifères (1 & 2)
- une distance de 3,57 entre les classes de sols sous forêts feuillues et mixtes (1 & 3)
- une distance de 1,30 entre les classes de sols sous forêts de conifères et mixtes (2 & 3)

Sur la fonction 2 :

- une distance de 1,65 entre les classes de sols sous forêts feuillues et conifères (1 & 2)
- une distance de 2,30 entre les classes de sols sous forêt feuillues et mixtes (1 & 3)
- une distance de 3,95 entre les classes de sols sous forêts conifère et mixtes (2 & 3)

Classe	Fonction	
	1	2
1 (forêts feuillues)	-1,965	-,276
2 (forêts de conifères)	2,903	-1,924
3 (forêts mixtes)	1,605	2,021

Tableau 6.4. Coordonnées des barycentres des groupes pour les deux fonctions discriminantes canoniques, appliquées aux groupes de forêts de feuillues (classe 1), de conifères (classe 2) et mixtes (classe 3).

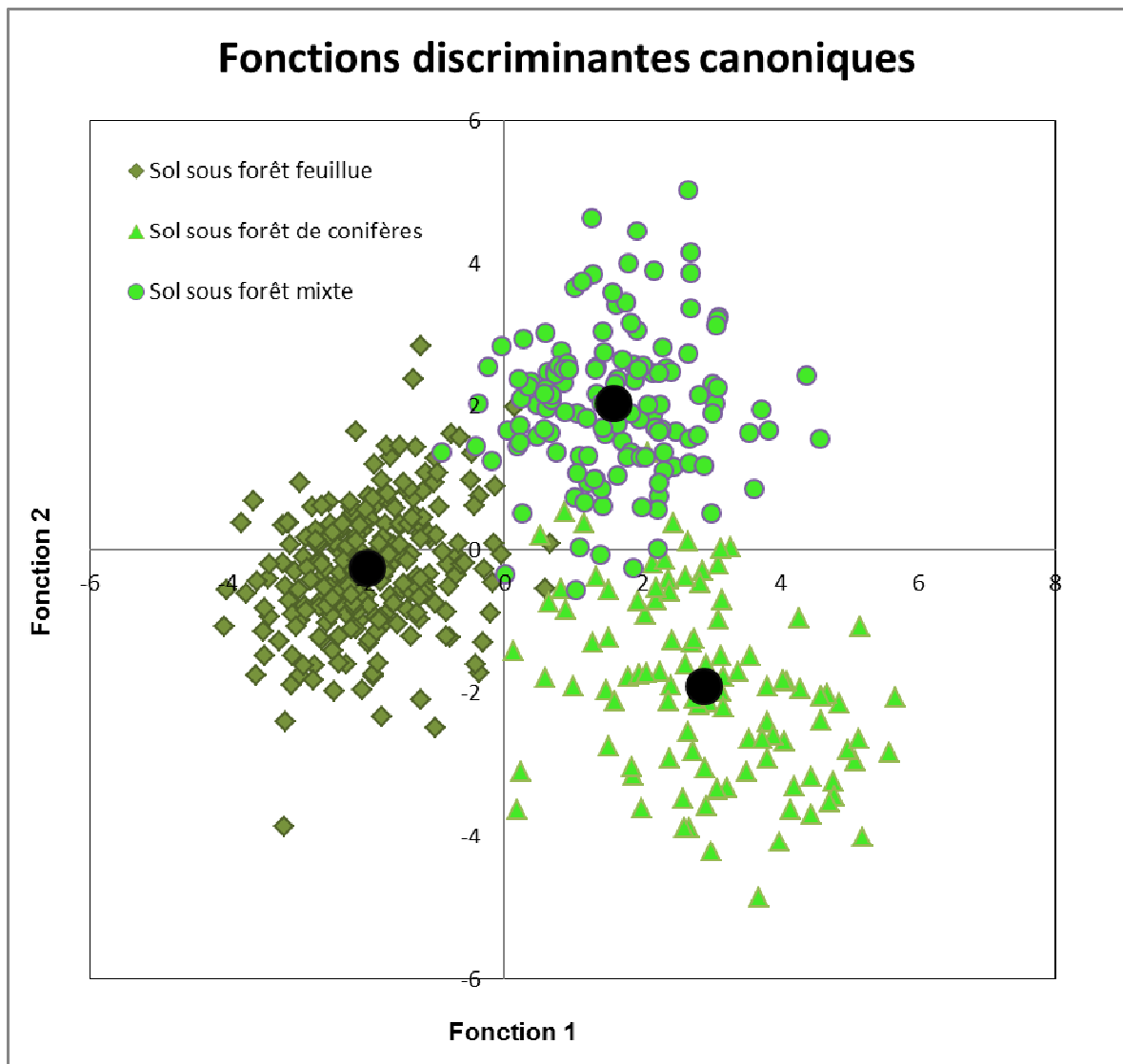


Figure 6.10. Fonctions discriminantes canoniques de l'analyse entre les sols sous forêts de feuillues, sous forêts de conifères et sous forêts mixtes. Les points noirs représentent les barycentres.

Dans cette répartition, les barycentres des trois groupes sont presque équidistants (fig. 6.10). La fonction 1 nous permet de distinguer les sols sous forêts de feuillues (classe 1) et les sols sous forêts de conifères (classe 2). Nous observons que les classes se détachent très bien entre elles. La distance de Mahalanobis entre les classes de sols sous forêts feuillues et de conifères est légèrement plus élevée que la distance entre les sols sous forêts feuillues et des forêts mixtes ou les forêts conifères et les forêts mixtes. Il s'agit d'une distinction convenable.

6.5. Les bibliothèques spectrales: discussion et conclusion

En premier lieu, il convient de se rappeler que les propriétés physico-chimiques des sols jouent un rôle sur l'absorbance. C'est particulièrement le cas de la teneur en carbonates. En revanche, le pH ne peut être prédit avec précision en approche SPIR quantitative (Cécillon *et al.*, 2009 ; Viscarra Rossel *et al.*, 2006 ; Chang *et al.*, 2001). Il convient donc de vérifier si ces propriétés physico-chimiques des échantillons sont – ou non – susceptibles de perturber l'interprétation qualitative sur l'origine végétale des matières organiques des sols (forêt, prairie,...).

Pour nous assurer que la distinction se fait sur l'origine de la M.O., et non sur une caractéristique de sol spécifique, nous avons analysé les paramètres principaux de ces sols : teneur en Corg, pH, teneur en CaCO_3 et la distribution granulométrique. En comparant ces propriétés une par une entre sols forestiers et sols sous prairies, nous avons montré que ces deux populations présentaient de grandes zones de recouvrement. Mais en couplant ces caractéristiques deux à deux, notamment le pH et la teneur en Corg, nous observons que les deux populations sont en fait différentes. Ces différences sont liées directement à la végétation : dans les forêts la teneur en MO est plus élevée en surface, parce que les apports de matière organique fraîche se font essentiellement en surface du sol, par les feuilles mortes. Il en résulte une acidité plus marquée dans les horizons superficiels et une teneur en carbonate moindre. Ces différences sont impossibles à éviter, parce qu'intrinsèquement liées au fonctionnement différent de ces deux types d'écosystèmes.

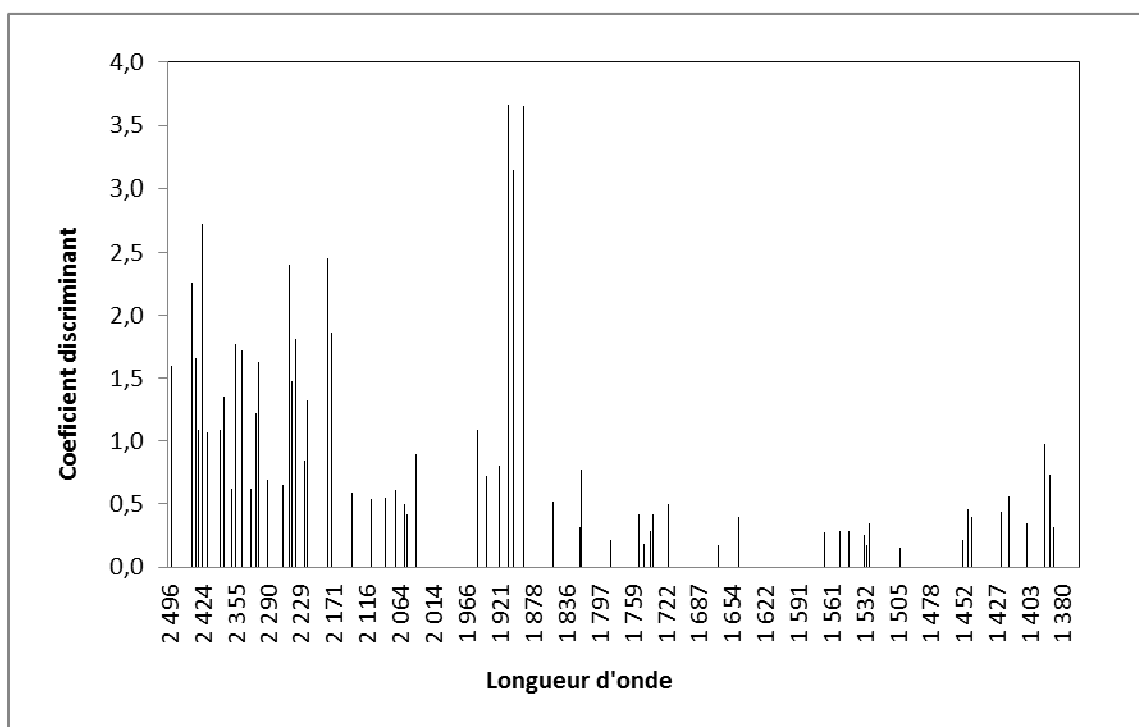


Figure 6.11. Les longueurs d'ondes discriminantes dans la bibliothèque spectrale de référence.

Pour mieux répondre au rôle de l'influence des propriétés chimiques, surtout à celui du pH et de CaCO_3 , nous avons relevé les longueurs d'ondes les plus discriminantes, c'est-à-dire celles qui ont un fort coefficient dans notre modèle. D'après Stenberg *et al.*, (2010) le CaCO_3 influence principalement les spectres proche infrarouge autour de 2335 nm et dans une moindre mesure autour de 1870, 1990, 2160, 2335 et 2500 nm. Parmi les bandes qui participent le plus à la discrimination de nos classes, nous trouvons dans la librairie spectrale bipartite (fig. 6.11) un maximum entre 1888 et 1909 nm, que l'on peut rapprocher dans une certaine mesure du pic de 1870 nm. Le pic de carbonates le plus important autour de 2335 nm est aussi pris en compte dans notre modèle avec un coefficient modeste de 1,77 (fig. 6.10). Ceci nous permet de dire que la teneur en carbonates joue un rôle lors des analyses qualitatives des spectres, mais que cette influence n'est pas prépondérante. Il est dès lors possible d'affirmer que les populations que nous avons mises en évidence reflètent bien le type de végétation et non les caractéristiques physico-chimiques des sols.

Ainsi, l'analyse discriminante de la librairie spectrale de référence bipartite construite sur les chernozems et sols formés sur loess confirme qu'il existe une distinction évidente de signatures entre les sols sous prairie et les sols sous forêt, liée à l'origine prairiale ou forestière des matières organiques du sol. Nous avons montré que la librairie spectrale présentée est très performante. En effet, elle nous permet de classer parfaitement la totalité de nos échantillons : 100 % sur le référentiel bipartite.

Après l'application des premières dérivées sur leur librairie de référence des sols très hétérogènes, Ertlen *et al.* (2010) observent une distance de Mahalanobis de 12,27 entre les sols des prairies et des sols forestiers. La librairie de référence constituée à partir de sols développés sur loess donne une distance de Mahalanobis plus importante, ce qui est normal car les sols sont plus homogènes, ce qui gomme des facteurs pouvant interférer dans le spectre. Au contraire de Ertlen *et al.* (2010), nous n'observons pas d'augmentation de la distance de Mahalanobis après l'application des dérivées secondes.

Du point de vue des écosystèmes, la librairie spectrale bipartite de référence reste limitée. L'analyse discriminante ne peut fournir aucune distinction entre les différents types de forêts ou les différents types de prairies. En particulier, la distinction n'est pas possible entre la végétation naturelle de steppe, de prairie ou les sols cultivés. La définition des écosystèmes intermédiaires tels que les forêts-steppe restent impossible dans la librairie de référence. Ces faits mettent des limites à la reconstruction des paléo-environnements. Pour résoudre ce problème, nous avons utilisé une approche d'identification des sols cultivés mise au point par Froehlicher (2013), qui devrait en théorie nous permettre une distinction plus précise. Nous avons élargi la librairie spectrale bipartite des chernozems à une troisième classe : les sols cultivés. Malgré les restrictions faites par Froehlicher (2013) sur l'influence potentielle des valeurs du pH et de la teneur en carbone organique sur la qualité de distinction des groupes, nous avons obtenu de très bons résultats, puisque nous avons bien classé 99,3 % des échantillons de référence. Ceci nous permet d'affirmer que ce référentiel tripartite est robuste.

La librairie spectrale tripartite sur les différentes forêts montre une bonne distinction entre les classes. Ertlen (2009) a prouvé une distinction entre les types de forêts avec un degré de confiance élevé. Dans notre cas, 96,8% des échantillons se sont classés correctement. Cependant, une faiblesse de cette librairie à prendre en compte est l'absence de références de sols formés sur loess sous forêts de conifères.

Chapitre 7

Application de la SPIR qualitative aux chernozems et paléochernozems

Dans un premier temps, nous présenterons les caractéristiques physico-chimiques des chernozems et paléochernozems étudiés. Nous présenterons ensuite le résultat des mesures ^{14}C effectuées sur les matières organiques des sols et les charbons de bois qui y sont conservés. Puis, nous comparerons les profils NIRS de l'ensemble de ces sols aux différents référentiels présentés dans le chapitre 6.

7.1. Caractéristiques physico-chimiques des chernozems et paléochernozems

7.1.1. Introduction

L'ensemble des sols et paléosols étudiés a fait l'objet de caractérisations analytiques. Nous avons mesuré systématiquement la teneur en carbone, le pH, la teneur en CaCO_3 et la composition granulométrique, sauf pour les échantillons qui nous ont été fournis par d'autres chercheurs. Pour ces échantillons, souvent de faible masse, nous avons repris les données fournies par ces personnes, lorsqu'elles existaient. L'ensemble des sols étudiés en NIRS est présenté sur les tableaux 7.1. (les sols fonctionnels) et 7.2. (les paléosols et leur couverture colluviale), à l'exception des ssols de la catena de Hrušov (cf. chapitre 9). Les mesures sont présentées en relation avec la profondeur. Par ailleurs, les résultats des analyses physico-chimiques sont également présentés site par site sous formes de tableaux dans les fiches de profils en annexes.

Nous avons séparé les sols fonctionnels et les paléosols car ces derniers présentent des propriétés morphologiques similaires à celles des chernozems définis par la WRB (FAO/ ISRIC/ ISSS, 2006) comme la présence d'un horizon humique foncé et épais, une roche mère carbonatée, des signes de bioturbation comme des crotovinas, etc. Néanmoins, ces sols ont subi des transformations après leur enfouissement (Gerasimov, 1971), ce qui implique que leurs caractères peuvent être différents de ceux décrits dans la WRB, qui est dédiée aux seuls sols fonctionnels. Les propriétés analytiques et leur répartition dans ces paléosols sont donc différentes, moins strictes, de celles définies par les systèmes de classifications de sols.

Nom Sol	Prof. cm	Granulométrie (%)					Propriétés chimiques				
		A	LF	LG	SF	SG	CaCO ₃ (%)	pH	Corg (%)	Ctot (%)	N(%)
A1	2,5	-	-	-	-	-	-	7,85	7,09	2,74*	-
A1	14	-	-	-	-	-	-	7,15	4,29	-	-
A1	32,5	-	-	-	-	-	-	7,72	1,84	2,55*	-
A1	50	-	-	-	-	-	-	8,79	1,75	2,21*	-
A1	75	-	-	-	-	-	-	9,37	0,99	2,7*	-
A2	3,50	-	-	-	-	-	-	-	2,85*	3,44*	-
A2	15,00	-	-	-	-	-	-	-	2,06*	2,47*	-
A2	25,00	-	-	-	-	-	-	-	1,80*	2,42*	-
A2	35,00	-	-	-	-	-	-	-	-*	1,53*	-
A2	45,00	-	-	-	-	-	-	-	-*	2,31*	-
A3	7,00	-	-	-	-	-	-	-	2,85*	2,40*	-
A3	15,00	-	-	-	-	-	-	-	1,70*	0,97*	-
A3	25,00	-	-	-	-	-	-	-	1,28*	-*	-
BAB	2,50	16,10	27,60	30,50	19,70	6,10	1,24	5,06	4,97	4,83	0,39
BAB	12,50	18,90	33,40	36,40	11,30	0,00	0,99	5,02	2,59	2,98	0,26
BAB	22,50	20,70	31,00	33,40	14,90	0,00	1,00	5,43	2,91	1,99	0,18
BAB	32,50	21,50	30,00	31,90	16,60	0,00	1,10	6,23	1,57	1,57	0,15
BAB	42,50	20,00	30,90	33,40	15,70	0,00	1,10	6,51	0,98	1,07	0,00
BAB	52,50	23,60	32,10	33,20	11,10	0,00	1,10	6,89	0,57	0,73	0,00
BAB	62,50	21,80	32,30	31,40	14,50	0,00	0,99	6,61	0,52	0,58	0,00
BAB	72,50	21,30	32,40	33,60	12,70	0,00	0,90	6,79	0,29	0,45	0,00
BAB	82,50	19,70	34,80	32,20	13,30	0,00	10,98	7,55	0,47	2,47	0,00
BRC	5,00	-	-	-	-	-	-	-	1,64*	1,74*	-
BRC	15,00	-	-	-	-	-	-	-	1,82*	1,95*	-
BRC	25,00	-	-	-	-	-	-	-	1,99*	2,12*	-
BRC	35,00	-	-	-	-	-	-	-	0,85*	0,97*	-
BRO	7,50	17,10	27,80	31,30	21,50	2,30	15,01	7,67	2,20	4,40	0,26
BRO	35,00	18,80	29,60	32,30	19,30	0,00	17,09	7,97	1,21	3,53	0,15
BRO	60,00	16,60	25,90	32,20	20,50	4,80	17,05	8,04	0,76	3,20	0,12
BUL	12,50	19,00	29,90	25,00	21,30	4,80	1,11	6,68	3,49	3,52	0,32
BUL	22,50	16,90	25,80	22,00	24,60	10,70	0,90	6,56	2,03	2,05	0,18
BUL	32,50	18,90	25,90	24,80	25,40	5,00	0,85	6,41	1,45	1,52	0,14
BUL	42,50	17,80	29,10	31,50	21,60	0,00	0,90	5,40	1,15	1,31	0,13
BUL	52,50	18,10	32,30	26,50	21,10	2,00	3,31	7,15	1,14	1,96	0,12
CT	5,00	-	-	-	-	-	0,00	6,80	4,58	2,97*	0,3
CT	30,00	-	-	-	-	-	0,38	7,40	4,26	2,54*	0,24
CT	50,00	-	-	-	-	-	3,54	7,40	3,55	2,48*	0,2
CT	85,00	-	-	-	-	-	5,22	7,80	2,26	2,43*	0,14

Nom Sol	Prof. cm	Granulométrie (%)					Propriétés chimiques				
		A	LF	LG	SF	SG	CaCO ₃ (%)	pH	Corg (%)	Ctot (%)	N(%)
CT	115,00	-	-	-	-	-	8,00	7,90	1,63	1,87*	0,1
CT	145,00	-	-	-	-	-	8,82	8,00	0,94	-	0,07
CT	215,00	-	-	-	-	-	7,09	8,30	-	-	0,02
DUB	2,50	10,50	14,30	15,90	42,50	16,80	1,19	-	4,17	4,20	0,33
DUB	12,50	12,60	15,60	17,10	38,50	16,20	1,19	-	1,46	1,55	0,15
DUB	22,50	11,20	13,30	12,60	38,20	24,70	1,10	-	1,28	1,79	0,14
DUB	32,50	12,40	15,30	13,60	40,90	17,80	1,11	-	1,05	1,85	0,11
HUB	2,50	28,60	43,30	21,80	6,30	0,00	0,59	7,51	1,4	4,14*	-
HUB	12,50	29,00	44,80	20,30	5,90	0,00	0,29	7,70	0,93	3,37*	-
HUB	22,50	29,70	44,60	19,70	6,00	0,00	0,58	7,69	0,73	2,97*	-
HUB	42,50	29,30	45,80	20,20	4,70	0,00	0,69	7,73	0,62	2,66*	-
HUB	62,50	28,20	45,80	20,40	5,60	0,00	1,57	7,93	0,39	2,20*	-
HUB	82,50	28,40	46,60	19,20	5,80	0,00	10,87	8,06	0,23	-*	-
HUG	2,50	10,20	19,70	20,80	42,20	7,10	2,07	7,36	2,15	-*	-
HUG	12,50	8,08	25,32	22,60	41,70	2,30	7,37	7,81	1,45	-*	-
HUG	22,50	8,31	29,49	19,50	40,40	2,30	13,79	7,99	1,25	-*	-
HUG	32,50	8,38	23,32	18,30	46,80	3,20	18,64	8,03	1,01	-*	-
HUG	47,50	-	-	-	-	-	25,17	8,19	0,27	-*	-
H1	5,00	-	-	-	-	-	-	7,59	3,99	4,00*	-
H1	25,00	-	-	-	-	-	-	7,74	2,94	3,02*	-
H1	55,00	-	-	-	-	-	-	7,97	2,03	2,87*	-
H1	75,00	-	-	-	-	-	-	8,57	0,71	-*	-
H1	135,00	-	-	-	-	-	-	9,04	0,32	-*	-
HUGF	2,50	9,09	21,71	22,70	40,60	5,90	1,18	5,64	2,08	-*	-
HUGF	12,50	11,10	21,20	22,10	44,10	1,50	1,28	5,44	1,22	-*	-
HUGF	22,50	10,90	20,10	21,50	47,00	0,50	1,65	5,71	0,82	-*	-
HUGF	32,50	8,48	19,52	23,50	48,20	0,30	2,37	5,65	0,42	-*	-
HUGF	47,50	8,61	21,19	24,20	45,70	0,30	1,49	5,54	0,24	-*	-
HUM	2,50	9,79	24,71	26,80	29,50	9,20	1,69	7,38	1,55	-*	-
HUM	12,50	9,97	21,93	26,20	33,50	8,40	5,44	7,73	1,57	-*	-
HUM	27,50	8,11	38,99	27,10	23,20	2,60	10,77	7,98	1,11	-*	-
HUM	52,50	13,40	34,50	28,00	24,10	0,00	15,82	8,19	0,6	-*	-
HUM	72,50	14,00	30,60	25,60	28,20	1,60	20,09	8,27	0,37	-*	-
HUR	2,50	8,16	17,84	14,50	39,00	20,50	0,00	5,46	1,95	-*	-
HUR	12,50	10,30	21,70	20,40	46,90	0,70	0,00	5,20	1,26	-*	-
HUR	22,50	3,82	6,28	4,90	35,40	49,60	0,00	5,53	0,83	-*	-
HUR	32,50	7,75	14,85	12,00	38,00	27,40	0,00	5,53	0,42	0,12*	-
HUR	42,50	8,50	15,20	11,80	33,40	31,10	0,00	5,50	0,00	0*	-
HUR	52,50	5,55	10,95	9,10	35,30	39,10	0,00	5,52	0,00	0*	-
HUS	2,50	2,58	4,40	5,12	63,40	24,50	0,00	6,17	1,89	-*	-
HUS	7,50	1,81	2,76	3,72	69,01	22,70	0,00	6,43	1,07	1,27*	-

Nom Sol	Prof. cm	Granulométrie (%)					Propriétés chimiques				
		A	LF	LG	SF	SG	CaCO ₃ (%)	pH	Corg (%)	Ctot (%)	N(%)
HUS	12,50	2,30	3,90	4,90	65,20	23,70	0,00	5,90	0,97	-*	-
HUS	22,50	2,40	3,63	3,82	63,85	26,30	0,00	5,86	0,7	-*	-
HUS	37,50	2,73	4,66	5,61	64,40	22,60	0,00	5,36	0,91	1,39*	-
HUS	52,50	2,00	3,68	4,42	66,70	23,20	0,00	5,67	0,66	1,33*	-
HUS	72,50	1,71	2,50	3,05	64,24	28,50	0,00	6,38	0,24	0,70*	-
HUS	92,50	2,56	3,80	4,14	62,00	27,50	0,00	6,51	0,16	0,48*	-
HUS	117,50	2,10	3,61	4,18	62,81	27,30	0,00	6,78	0,01	0,19*	-
HUS	147,50	2,19	3,86	4,65	63,40	25,90	0,00	6,98	0,00	0,31*	-
HUS	177,50	2,08	3,60	4,32	62,10	27,90	0,69	7,14	0,09	0,92*	-
HUU	2,50	1,32	2,40	2,17	40,31	53,80	0,00	5,90	2,98	-*	-
HUU	12,50	1,42	1,95	1,63	41,60	53,40	0,00	6,05	1,21	-*	-
HUU	22,50	1,44	2,28	2,45	48,23	45,60	0,00	6,55	1,25	1,57*	-
HUU	32,50	1,04	0,84	0,74	40,28	57,10	1,18	6,70	1,29	1,76*	-
HUU	47,50	1,09	0,88	0,84	43,69	53,50	1,48	7,91	0,94	-*	-
HUUD	2,50	4,61	14,89	8,60	22,40	49,50	4,45	6,82	2,92	-*	-
HUUD	12,50	1,75	2,51	1,56	16,38	77,80	1,19	7,71	1,27	-*	-
HUUD	22,50	1,07	1,35	1,29	20,89	75,40	4,99	8,19	0,64	-*	-
HUUD	32,50	0,89	1,02	0,99	20,70	76,40	6,76	8,63	0,22	-*	-
KOC	2,50	7,68	7,12	3,60	7,80	73,80	3,75	7,30	3,17	3,18	0,27
KOC	12,50	12,50	12,20	5,60	6,60	63,10	1,56	7,70	2,65	2,73	0,24
KOC	22,50	9,04	9,66	4,40	4,70	72,20	0,89	7,70	2,73	2,15	0,19
KOC	32,50	11,40	11,40	5,00	5,70	66,50	0,89	7,70	2,21	1,75	0,15
KOR	2,50	9,65	10,45	6,00	9,50	64,40	3,21	7,50	1,62	5,59	0,49
KOR	12,50	13,90	15,00	8,30	11,10	51,70	2,91	7,50	1,21	3,78	0,33
KUC	25,00	9,66	16,14	13,80	12,60	47,80	1,03	7,31	2,04	0,20	2,17
KUC	75,00	19,00	33,80	22,80	22,40	2,00	1,03	8,03	0,46	0,00	0,64
KUC	105,00	9,12	11,18	7,20	13,20	59,30	1,14	8,51	0,28	0,00	2,47
KUR	5,00								4,58*	5,12*	
KUR	25,00								3,60*	4,28*	
KUR	45,00								2,24*	3,85*	
KUR	65,00								1,68*	3,03*	
KUR	85,00								1,62*	2,99*	
KUR	105,00								1,03*	2,63*	
MIK	5,00								4,90*	5,13*	
MIK	15,00								3,65*	4,67*	
MIK	25,00								2,96*	3,89*	
MIK	35,00								2,54*	2,98*	
MIK	45,00								2,54*	2,94*	
MIK	55,00								2,37*	2,83*	
MIK	65,00								2,18*	2,29*	
MD	5,00	-	-	-	-	-	-	7,30	7,5	-*	-

Nom Sol	Prof. cm	Granulométrie (%)					Propriétés chimiques				
		A	LF	LG	SF	SG	CaCO ₃ (%)	pH	Corg (%)	Ctot (%)	N(%)
MD	35,00	-	-	-	-	-	-	8,60	1,8	1,7*	-
MD	135,00	-	-	-	-	-	-	8,90	0,1	-*	-
POP	7,50	7,12	7,38	3,80	6,60	75,10	15,36	7,80	3,06	3,50	0,18
POP	37,50	6,77	7,73	3,70	5,90	75,90	14,57	7,79	2,10	4,18	0,23
POP	62,50	8,30	8,70	3,40	3,60	76,00	29,11	7,82	0,83	4,64	0,13
SEN	2,50	17,90	30,60	25,90	19,30	6,30	0,99	5,65	4,30	4,42	0,34
SEN	12,50	20,10	31,40	25,80	17,60	5,10	1,09	5,17	1,97	1,59	0,15
SEN	22,50	20,80	31,10	27,00	18,40	2,70	0,90	5,79	0,92	0,59	0,00
SEN	32,50	21,30	40,30	33,60	4,80	0,00	1,09	5,63	0,87	0,52	0,00
SEN	42,50	17,40	31,00	28,80	19,10	3,70	0,90	5,96	0,85	0,80	0,00
SEN	52,50	16,20	31,60	29,50	20,40	2,30	9,98	7,82	0,57	2,05	0,00

Tableau 7.1. Principales caractéristiques physico-chimiques des sols fonctionnels. N.B. : le carbone total a été mesuré au CHN, le carbone organique a été mesuré par la méthode Walkley et Black, sauf pour les valeurs accompagnées d'un *, qui ont été prédites en SPIR quantitative. Lorsque la valeur est remplacée par les symboles « -* », la prédiction est rejetée car l'erreur-standard est supérieure à 1,5. A = Argiles ; LF = Limons fins ; LG = Limons grossiers ; SF = Sables fins ; SG = Sables grossiers.

Sol	Prof. cm	Granulométrie (%)					Propriétés chimiques				
		A	LF	LG	SF	SG	CaCO ₃ (%)	pH	Corg (%)	Ctot (%)	N(%)
BRK	5	-	-	-	-	-	-	-	2,57*	1,82*	-
BRK	15	-	-	-	-	-	-	-	2,40*	1,83*	-
BRK	25	-	-	-	-	-	-	-	2,56*	1,74*	-
BRK	35	-	-	-	-	-	-	-	2,58*	1,77*	-
BRK	45	-	-	-	-	-	-	-	2,43*	1,79*	-
BRK	55	-	-	-	-	-	-	-	2,15*	1,94*	-
BRK	65	-	-	-	-	-	-	-	1,83*	1,87*	-
BRK	75	-	-	-	-	-	-	-	0,24*	1,81*	-
BRK	85	-	-	-	-	-	-	-	0,86*	1,81*	-
BRK	95	-	-	-	-	-	-	-	0,89*	1,77*	-
BRK	105	-	-	-	-	-	-	-	-*	1,34*	-
BRK	115	-	-	-	-	-	-	-	-*	1,40*	-
BRK	125	-	-	-	-	-	-	-	-*	1,41*	-
BRK	135	-	-	-	-	-	-	-	-*	1,34*	-
BRK	145	-	-	-	-	-	-	-	-*	1,37*	-
BRK	155	-	-	-	-	-	-	-	0,23*	1,41*	-
BRK	165	-	-	-	-	-	-	-	0,36*	1,33*	-

Sol	Prof. cm	Granulométrie (%)					Propriétés chimiques				
		A	LF	LG	SF	SG	CaCO ₃ (%)	pH	Corg (%)	Ctot (%)	N(%)
BRK	175	-	-	-	-	-	-	-	0,13*	-*	-
BRK	185	-	-	-	-	-	-	-	0,07*	-*	-
BRK	195	-	-	-	-	-	-	-	0,18*	-*	-
BRK	205	-	-	-	-	-	-	-	0,00*	-*	-
BRK	215	-	-	-	-	-	-	-	0,00*	-*	-
BRK	225	-	-	-	-	-	-	-	0,00*	-*	-
BRK	235	-	-	-	-	-	-	-	0,13*	-*	-
BRK	245	-	-	-	-	-	-	-	0,38*	-*	-
BRK	255	-	-	-	-	-	-	-	0,80*	1,84*	-
BRK	265	-	-	-	-	-	-	-	1,36*	1,95*	-
BRK	275	-	-	-	-	-	-	-	1,56*	2,24*	-
BRK	285	-	-	-	-	-	-	-	2,06*	-*	-
BRK	295	-	-	-	-	-	-	-	2,36*	-*	-
BRK	305	-	-	-	-	-	-	-	2,77*	2,48*	-
BRK	315	-	-	-	-	-	-	-	2,22*	2,31*	-
BRE	7,50	23,80	33,80	24,90	15,20	2,30	2,62	7,44	2,86	3,55	0,32
BRE	37,50	23,50	38,30	18,10	14,20	5,90	5,96	8,03	1,10	2,00	0,16
BRE	63,00	18,50	26,50	17,40	27,90	9,70	38,92	8,03	0,86	5,81	0,12
BRE	69,00	23,70	31,00	19,60	19,90	5,80	46,16	8,2	0,86	0,00	0,00
BRE	82,50	14,80	19,30	12,00	14,10	39,80	54,57	8,29	0,50	16,63	0,19
BRE	97,50	17,20	22,70	12,30	16,20	31,60	64,83	8,32	0,34	9,31	0,07
BRE	112,50	20,10	29,90	16,70	15,40	17,90	66,62	7,80	0,55	9,37	0,08
BRE	127,50	19,40	31,10	19,30	24,10	6,10	37,27	7,88	0,79	5,57	0,10
BRE	177,50	16,40	25,30	13,50	15,60	29,20	37,88	7,87	0,68	5,54	0,09
BUB	152,50	13,20	25,40	14,80	20,50	26,10	6,23	7,91	1,19	1,97	0,13
BUB	152,50	13,90	23,20	13,80	24,60	24,50	1,77	7,79	0,97	1,45	0,14
BUB	157,50	11,80	16,20	10,80	22,70	38,50	1,03	7,92	1,40	1,55	0,14
BUB	175,00	14,30	20,30	16,10	26,90	22,40	1,04	7,96	0,72	0,96	0,09
CPB1	5,00	23,10	40,90	11,90	9,00	15,10	27,98	8,29	1,90	4,60	0,23
CPB1	15,00	26,20	43,50	12,20	6,60	11,50	32,50	8,22	1,46	4,33	0,21
CPB1	25,00	28,30	40,70	11,60	6,40	13,00	33,16	8,22	1,44	4,16	0,19
CPB1	32,00	22,10	29,80	7,80	6,80	33,50	34,01	8,33	0,81	3,58	0,14
CPB1	40,00	22,60	31,70	9,40	8,50	27,80	16,53	8,34	0,85	3,63	0,00
CPB1	50,00	19,20	27,00	8,30	7,80	37,70	32,52	8,41	0,89	3,63	0,11
CPB1	64,00	21,90	38,40	12,00	12,00	15,70	33,33	8,46	0,81	4,32	0,00
CPB1	70,00	29,60	40,30	10,90	6,80	12,40	31,66	8,34	0,83	3,33	0,00
CPB1	80,00	20,80	27,80	7,90	6,80	36,70	32,17	8,41	0,74	3,55	0,00
CPB1	90,00	24,60	35,80	9,70	9,00	20,90	20,50	8,41	0,60	3,26	0,10
CPB1	100,00	33,20	47,60	12,50	6,69	0,01	27,51	8,11	0,53	3,22	0,12
CPB1	110,00	35,00	41,60	10,80	7,30	5,30	31,24	7,98	0,75	2,81	0,11
CPB1	120,00	22,00	26,30	7,20	5,60	38,90	26,30	8,03	0,67	2,67	0,11
CPB1	130,00	13,90	20,10	5,80	10,70	49,50	32,29	7,92	0,79	2,53	0,00

Sol	Prof. cm	Granulométrie (%)					Propriétés chimiques				
		A	LF	LG	SF	SG	CaCO ₃ (%)	pH	Corg (%)	Ctot (%)	N(%)
CPB1	140,00	29,60	53,50	11,60	5,30	0,00	30,28	8,17	0,73	3,59	0,14
CPB1	150,00	11,50	19,00	4,40	4,40	60,70	28,13	8,05	0,70	3,65	0,12
CPB1	160,00	15,50	24,90	6,20	4,20	49,20	30,99	8,04	0,69	3,77	0,00
CPB1	167,50	25,80	37,60	9,60	3,50	23,50	35,98	8,03	0,74	4,01	0,12
CPB1	200,00	16,70	26,80	6,20	4,40	45,90	34,88	8,07	0,61	5,32	0,00
KOL1	12,50	9,41	19,69	26,70	28,80	15,40	1,02	7,92	2,70	2,00	2,00
KOL1	35,00	9,77	20,03	33,60	25,40	11,20	10,71	8,31	0,53	0,97	0,97
KOL1	55,00	9,31	19,29	27,80	26,40	17,20	13,17	8,54	0,46	0,95	0,95
KOL1	75,00	9,30	19,90	22,60	20,30	27,90	1,06	8,46	0,48	0,69	0,69
KOL1	95,00	11,10	19,80	20,50	20,10	28,50	0,60	8,39	0,57	0,72	0,72
KOL1	120,00	11,70	21,10	23,80	24,30	19,10	0,40	8,09	0,42	0,61	0,61
KOL1	140,00	5,82	9,68	10,80	23,60	50,10	0,40	8,29	0,36	0,45	0,45
KOL1	165,00	5,43	10,17	11,60	24,10	48,70	0,40	8,22	0,38	0,27	0,27
KOL2	7,50	7,89	15,31	18,30	24,60	33,90	1,00	7,95	1,50	1,46	1,46
KOL2	37,50	7,59	13,71	15,10	22,50	41,10	1,01	8,19	0,70	0,88	0,88
KOL2	65,00	9,95	17,55	20,10	25,20	27,20	0,91	8,19	0,56	0,85	0,85
KOL2	85,00	12,20	20,50	23,40	20,40	23,50	1,13	8,12	0,69	0,94	0,94
KOL2	115,00	6,58	10,72	11,10	23,90	47,70	0,92	7,93	0,89	1,02	1,02
KOL2	155,00	6,94	13,86	14,10	24,80	40,30	1,14	7,77	0,27	0,39	0,39
KOL3	7,50	8,83	18,77	19,70	26,20	26,50	0,80	8,01	1,31	1,44	1,44
KOL3	35,00	5,69	12,51	11,70	20,60	49,50	1,26	8,29	0,69	0,94	0,94
KOL3	60,00	4,07	7,43	8,40	29,10	51,00	0,57	8,33	0,86	0,92	0,92
KOL3	85,00	4,09	6,71	7,10	22,10	60,00	0,68	8,24	1,04	0,89	0,89
KOL3	105,00	3,70	6,25	7,25	23,00	59,80	1,03	8,13	0,59	0,60	0,60
KOL3	120,00	8,18	15,62	23,10	30,10	23,00	1,03	8,10	0,20	0,39	0,39
MOR	5,00	13,30	33,40	43,30	10,00	0,00	1,43	7,75	1,00	-*	3,72*
MOR	40,00	13,60	34,00	43,00	9,40	0,00	0,96	7,69	0,50	-*	2,88*
MOR	70,00	14,80	34,50	41,80	8,90	0,00	1,27	7,74	0,50	-*	2,04*
MOR	105,00	15,50	34,30	41,50	8,70	0,00	1,04	7,74	0,30	-*	1,57*
MOR	120,00	16,50	36,60	41,70	5,20	0,00	0,97	7,71	0,30	-*	2,40*
MOR	165,00	18,10	37,00	32,10	10,40	2,40	25,35	8,12	0,10	-*	2,15*
POL	45,00	8,98	10,52	8,20	12,10	60,20	16,88	7,57	0,84	2,38	0,13
POL	125,00	12,10	14,50	10,60	11,20	51,60	15,22	7,49	1,02	2,42	0,15
POL	225,00	17,40	22,50	13,10	14,20	32,80	16,40	7,53	0,79	2,68	0,17
POL	325,00	10,90	12,30	7,20	8,20	61,40	7,90	7,77	1,78	2,01	0,00
POL	420,00	14,80	13,80	7,30	12,50	51,60	2,02	7,73	0,34	0,83	0,00
POL	445,00	9,22	8,58	3,80	6,50	71,90	8,53	7,83	0,79	1,08	0,00
POL	452,50	7,37	7,13	3,10	4,40	78,00	16,96	7,83	0,00	1,39	0,00
POL	462,50	10,40	11,80	5,70	10,60	61,50	22,69	7,86	0,00	2,95	0,00
SCC01	5,00	-	-	-	-	-	-	-	3,58*	-*	-
SCD01	5,00	-	-	-	-	-	-	-	1,66*	-*	-
SCD02	10,00	-	-	-	-	-	-	-	1,25*	-*	-

Sol	Prof. cm	Granulométrie (%)					Propriétés chimiques				
		A	LF	LG	SF	SG	CaCO ₃ (%)	pH	Corg (%)	Ctot (%)	N(%)
SCD03	15,00	-	-	-	-	-	-	-	1,42*	*	-
SCD04	20,00	-	-	-	-	-	-	-	1,35*	1,71*	-
SCD05	25,00	-	-	-	-	-	-	-	1,90*	2,29*	-
WIW	10,00	-	-	-	-	-	-	-	-*	2,27*	-
WIW	20,00	-	-	-	-	-	-	-	-*	2,27*	-
WIW	30,00	-	-	-	-	-	-	-	-*	2,31*	-
WIW	80,00	-	-	-	-	-	-	-	-*	2,32*	-
ZMC (PKI)	ca.500	17,10	29,50	20,90	19,60	12,90	1,27	8,14	0,64	1,78	0,09
ZMC (PKI)	ca.515	16,00	21,70	20,50	32,20	9,60	0,63	8,38	0,61	0,85	0
ZMK (PKII)	ca.700	15,70	24,60	19,80	28,80	11,10	0,43	7,87	1,02	1,60	0,10
ZMK (PKII)	ca.715	13,60	27,40	33,70	25,30	0,00	0,00	8,03	0,74	0,90	0,10
ZMK (PKIII)	ca.1000	15,80	26,10	19,80	26,30	12,00	0,22	7,85	1,02	1,50	0,10

Tableau 7.2. Principales caractéristiques physico-chimiques des paléosols et de leur couverture colluviale. Les chernozems sont accentués en gris, la couverture colluviale est en blanc. N.B. : le carbone total a été mesuré au CHN, le carbone organique a été mesuré par la méthode Walkley et Black, sauf pour les valeurs accompagnées d'un *, qui ont été prédites en SPIR quantitative. . Lorsque la valeur est remplacée par les symboles « -* », la prédiction est rejetée car l'erreur-standard est supérieure à 1,5

7.1.2. Les teneurs en carbone organique, total et prédit des sols et paléosols

7.1.2.1. La teneur en carbone organique (WB)

De façon tout à fait normale, nous observons que dans les sols fonctionnels le maximum de Corg se trouve dans les horizons supérieurs, où elle varie entre 1,7 et 7,5 % (fig. 7.1). Cette valeur décroît avec la profondeur. A deux exceptions près (un kastanozem d'Ukraine et un chernozem polonais), la décroissance sous végétation prairiale est faible, alors qu'elle est très marquée sous forêt. Dans les horizon profonds, la teneur en Corg reste élevée, ce qui est une des caractéristiques des sols isohumiques ; elle atteint 1 à 2 %. Les différences entre forêt et prairie s'estompent. Le profil CT1 (un chernozem des steppes d'Ukraine) se démarque de tous les autres par ses teneurs très élevées en matière organique.

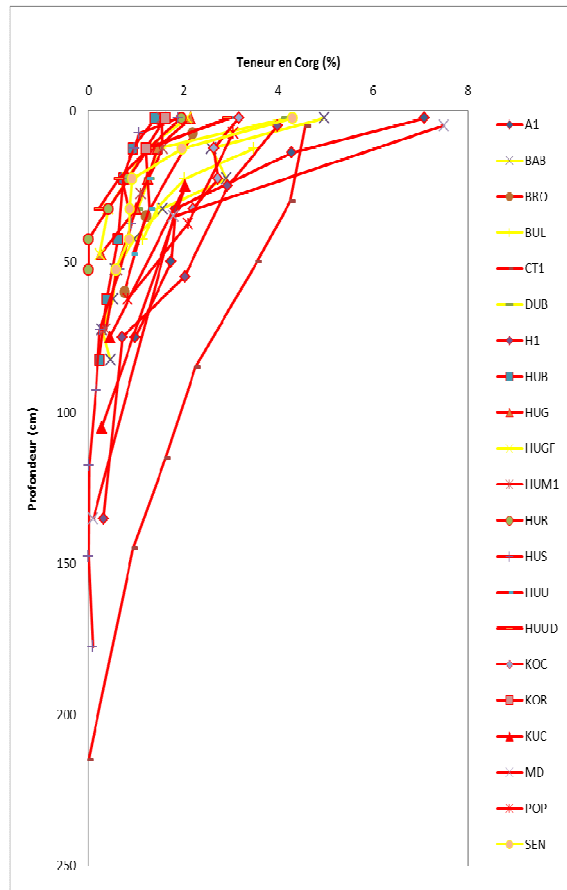


Figure 7.1. Variations des teneurs en carbone organique (WB) avec la profondeur. En rouge : sols actuellement sous prairie ; en jaune: sols sous forêts.

Nous avons également comparé les teneurs en carbone organique à la granulométrie (fig. 7.2). Cette comparaison ne porte que sur les sols sous prairie. Les sols forestiers étant tous limoneux nous les avons écartés de la comparaison pour ne pas rajouter un facteur de biais, la répartition de la matière organique étant différente sous forêt. Globalement, les sols sableux semblent légèrement moins organiques, mais la différence est faible. Elle est essentiellement due à trois sols : MD (chernozem polonais anciennement cultivé), CT1 (chernozem des steppes d'Ukraine) et A1 (kastanozem). Sur la population de sols tchèques et hongrois qui constitue l'essentiel de notre corpus de travail, il n'y a pas réellement de différences de teneurs en carbone organique entre sols limoneux et sols sableux.

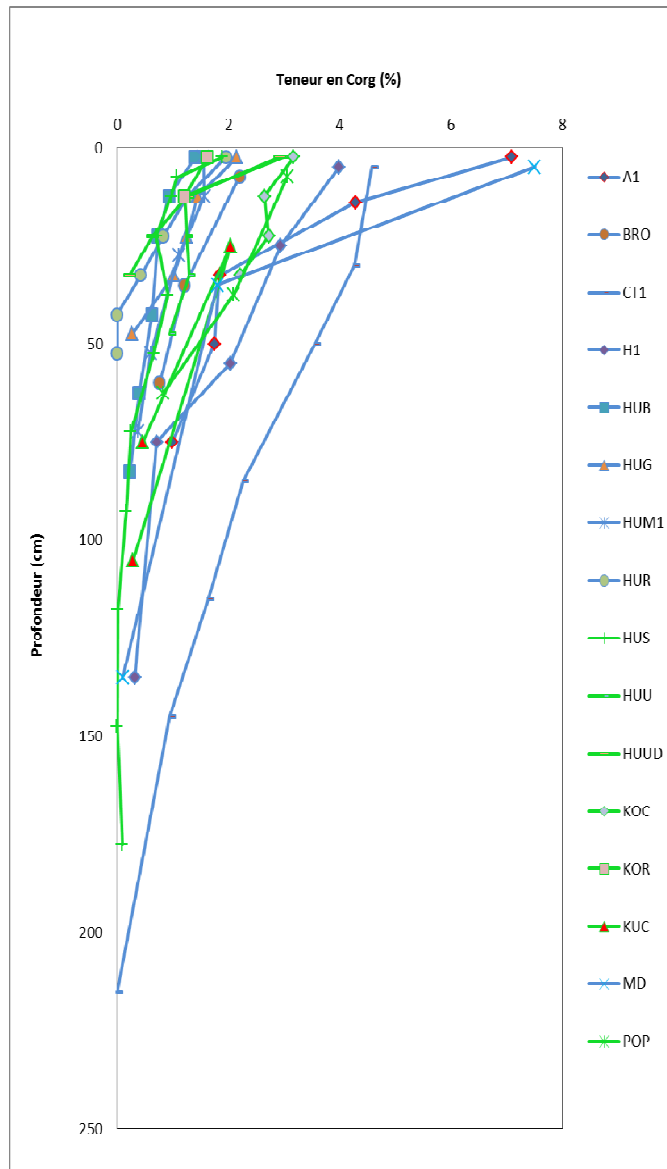


Figure 7.2. Les teneurs en carbone organique des sols : comparaison des sols sableux (en vert) et des sols limoneux (en bleu). N.B. : n'ont été conservés ici que les sols sous végétation prairiale, les sols forestiers étant tous limoneux.

Dans les paléosols, les teneurs en carbone organique sont dans l'ensemble faibles (tabl. 7.2). Elles varient entre 1 % au maximum et 0,1 %. Ceci est dû au fait qu'une partie de la matière organique se minéralise sans être remplacée par des matières organiques récentes. Les teneurs ne peuvent donc que diminuer. Morphologiquement, ceci n'est pas forcément perceptible, les horizons cherniques des paléosols restant de teinte sombre.

7.1.2.2. La teneur en carbone total (CHN)

La teneur en carbone total (C_{tot}), mesurée au CHN, dépend de deux facteurs : la teneur en C_{org} et celle en CaCO₃. Dans des sols acides, où la teneur en carbonate est nulle ou négligeable, les deux mesures sont très proches. Cependant, nos sols sont carbonatés en règle générale, et il y a donc une différence entre les mesures faites par la méthode Walkley et Black et celle faite au CHN. Dans les sols fonctionnels, elle est très variable dans les horizons de surface en fonction de l'acidité. En particulier, elle sera faible dans les sols forestiers. En revanche, dans les horizons profonds la teneur en carbonate est en général élevée, et la différence est marquée.

Dans les paléosols, la teneur en C_{tot} peut être élevée sur l'ensemble du profil, parce que les paléosols sont enfouis sous des matériaux carbonatés. Ils subissent alors des phénomènes de recarbonatation secondaire, liée à la précipitation de carbonates solubilisés dans les matériaux (colluvions) qui les recouvrent.

7.1.2.3. La modélisation des teneurs en carbone par la SPIR quantitative

Tous les échantillons n'ont pu faire l'objet de mesures directes des teneurs en carbone par la méthode Walkley et Black ou par le CHN. C'est le cas de certains sols prélevés tardivement et surtout d'échantillons qui nous ont été donnés par des collègues, mais en quantité réduite. Afin d'avoir une estimation des teneurs en carbone total et en carbone organique, nous avons procédé différemment pour ces échantillons.

Nous nous sommes servis de prédictions obtenues en SPIR quantitative. A cet effet, les spectres de sols ont été prétraités par l'application de la SNV et de la première dérivée, méthode qui s'est avérée comme la plus efficace. Les références qui ont servi à valider le modèle sont les échantillons qui ont été mesurés par Walkley et Black et au CHN. A l'aide de régressions moindres carrés que nous avons appliquées à la totalité des échantillons mesurés, nous avons obtenu une prédiction avec un $R^2 = 0,86$ et un écart type de 0,6 pour le C_{org} (fig. 7.3) et avec un $R^2 = 0,82$ et un écart type de 1,82 pour le C_{tot} (fig. 7.4). Ce modèle prédictif a ensuite été appliqué aux échantillons inconnus. Les valeurs obtenues ainsi figurent dans les tableaux 7.1 et 7.2 pour les échantillons qui n'ont pas été mesurés directement (en *italique* et avec un astérisque *).

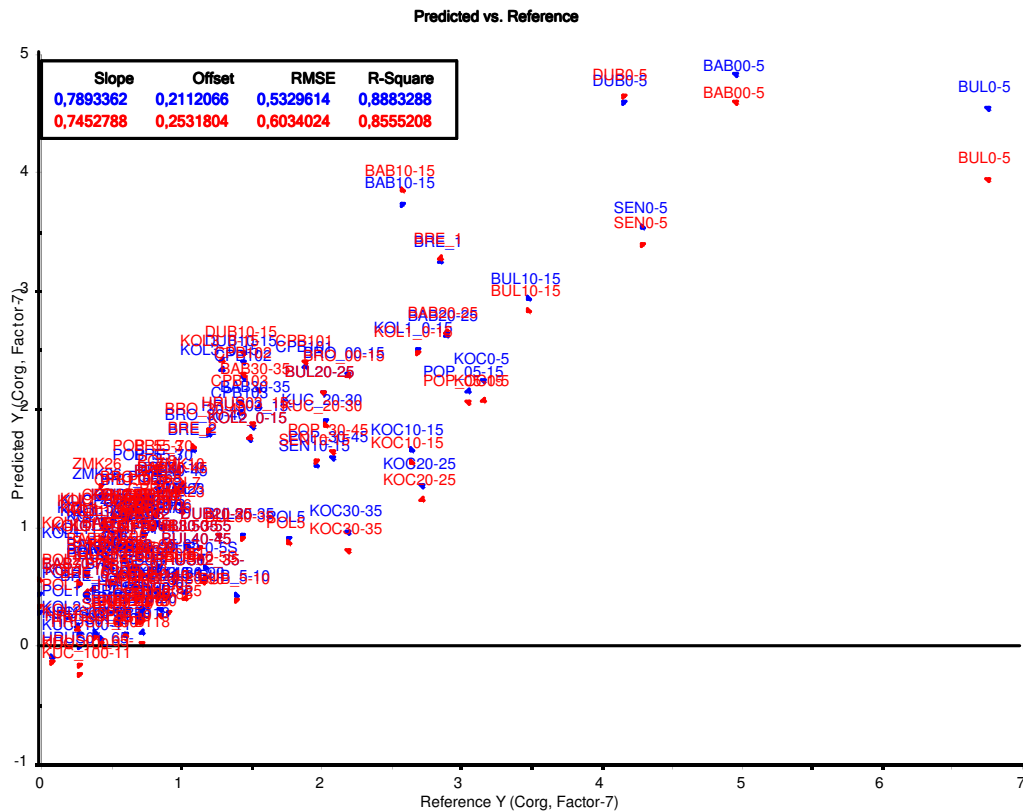


Figure 7.3. Modèle prédictif pour le Corg (logiciel Unscrambler) appliqué aux échantillons mesurés par la méthode Walkley et Black. Les valeurs mesurées sont marquées en rouge, les valeurs prédites en bleu.

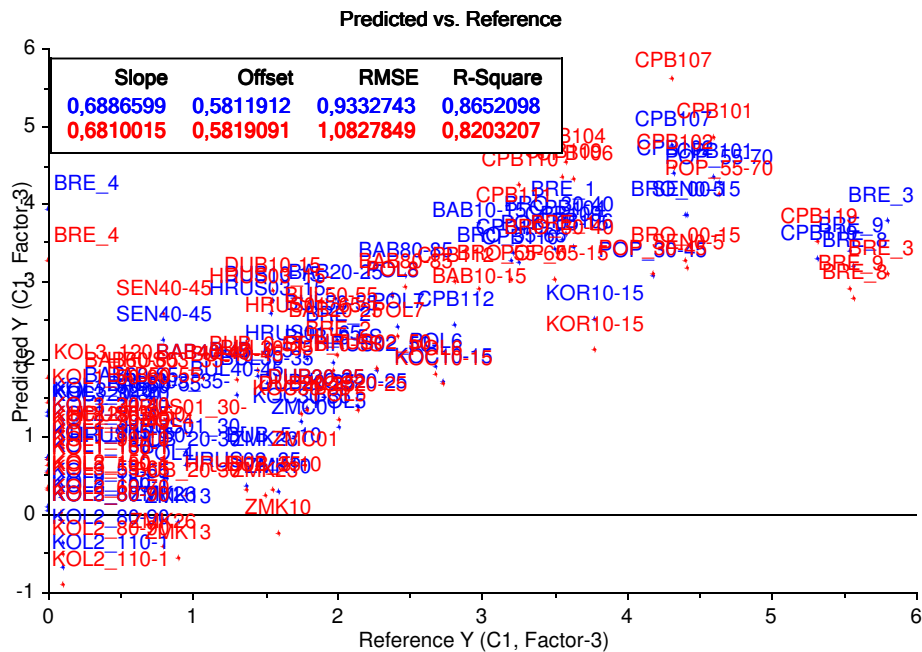


Figure 7.4. Modèle prédictif pour le Ctot (logiciel Unscrambler), appliqué aux échantillons mesurés au CHN. Les valeurs mesurées sont en rouge, les valeurs prédites en bleu.

7.1.3. Les valeurs du pH

Le pH de sols étudiés est très variable (fig. 7.5). En surface, il est compris entre 5 et 8. En profondeur, il augmente en règle générale pour atteindre un maximum de 8,5 dans les horizons de loess. Un sol fait exception avec une valeur de pH de 9,4 en profondeur. Il s'agit du kastanozem d'Ukraine, et il est vraisemblable que ce pH soit lié à la présence de carbonate de sodium. On notera que la valeur du pH dépend de la couverture végétale, les sols forestiers (BAB, BUL, DUB, SEN, HUGF) étant nettement plus acides, avec des pH de surface qui descendent jusqu'à 5. Deux sols de steppe sont également acides : il s'agit de HUR, un chernozem à horizon BT et de HUS, un chernozem arénique dont seule la base reste carbonatée.

La gamme de variation des pH de paléochernozems est beaucoup plus restreinte. Le pH est systématiquement compris entre 7 et 8, en raison de l'abondance des carbonates secondaires.

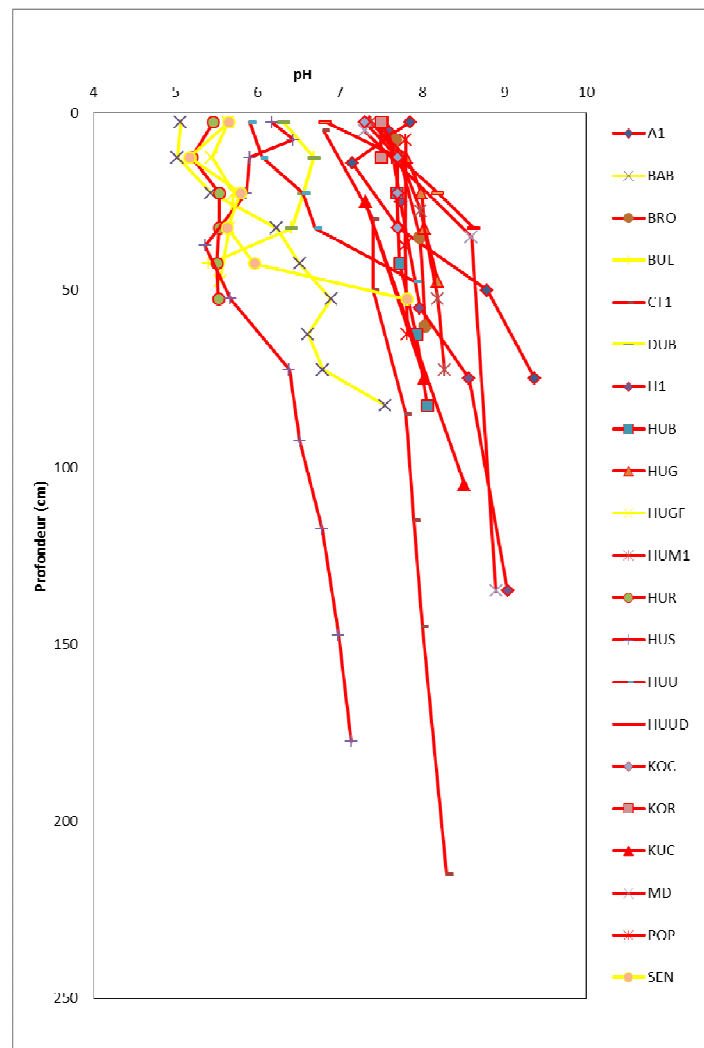


Figure 7.5. Valeurs du pH dans les sols fonctionnels

Dans les paléosols, la distribution de la teneur en CaCO_3 ne correspond pas à celle des sols fonctionnels. Comme nous l'avons déjà mentionné, les paléosols subissent des processus de recouvrement par des sédiments, puis d'enrichissement en carbonates secondaires issus des matériaux qui les recouvrent. Les formes de redistribution des carbonates dans le profil sont variées, mais souvent en pseudo-mycélium ou en tâches pulvérulantes dans les horizons A ou C. En revanche, nous n'avons pas détecté d'horizon d'accumulations de carbonates à la base (C carbonaté ou horizon calcique). Dans quelques cas, on observe des teneurs en carbonates élevés : le profil BRE, situé dans une région karstique, a été recouvert par des sédiments marécageux très riches en calcaire. La teneur en carbonates s'élève sur un échantillon jusqu'à 66 %. A Clermont-Ferrand, les profils CPB1 et CPB2 se sont formés sur des sédiments lacustres calcaires, et leur teneur en CaCO_3 atteint environ 30 %.

7.1.5. La composition granulométrique

La composition granulométrique des sols étudiés est très variée. D'une façon générale, les teneurs en argiles sont faibles. Les sols se répartissent entre un pôle sableux et un pôle limoneux. En théorie, les chernozems sont définis comme des sols limoneux. Néanmoins, nous observons dans nos sols la présence de sables fins relativement abondants, parfois même l'occurrence de sables grossiers. Pour 5 profils, les mesures sont cohérentes avec le terrain. Il s'agit des chernozems aréniques de HUU, HUUD et HUS, et des profils KOR et KUC, dans lequel les sables carbonatés s'observent sur le terrain. Pour les autres sols, les teneurs mesurées en sables sont bien plus importantes que ce que laissait prévoir les observations de terrain. Cette surreprésentation des sables dans nos mesures résulte sans doute du protocole analytique. Dans les sols calcaires, la défloculation préalable à la mesure granulométrique ne se fait pas avec de l'acide chlorhydrique HCl, mais avec du chlorure de potassium KCl. Il semble donc que la défloculation soit incomplète. La fraction sableuse correspond plutôt à des « pseudo-sables », c'est-à-dire d'agrégats, formés de complexes organo-minéraux, de grande stabilité, ce qui rend la dissociation des composés minéraux et organiques difficile avec les réactifs habituels (Duchaufour, 1977). La nature physique de cette liaison étroite est probablement due aux hydroxydes de fer intégrés dans les molécules organiques et minérales (Scharpenseel *et al.*, 1968 et Greenland 1974 *in* Duchaufour, 1977). Ce problème pose une complication majeure pour les comparaisons avec des autres études.

7.2. Les mesures de l'âge radiocarbone

Le tableau 7.3. présente les résultats de la mesure de l'âge ^{14}C de quelques échantillons de sols et des charbons qui nous avons effectués dans notre travail. Rappelons que ces mesures doivent être interprétées différemment selon qu'il s'agit de mesures sur la matière organique de sols fonctionnels, de paléosols ou de charbons de bois. ON renverra le lecteur au § 5.5 pour des explications complémentaires. Pour ces raisons, nous traiterons séparément chacun des sites.

Type d'échantillon	Réf. Labo	Site	Prof. (cm)	TMR (ans BP)	Age cal. BP
Matière organique	SacA 25548	KUC	30 (chernozem)	1485 ± 35	
Matière organique	SacA 25549	KUC	50 (chernozem)	3525 ± 40	
Matière organique	SacA 25550	KUC	80 (chernozem)	5825 ± 45	
Matière organique	SacA25551	KOL1	75 (paléochern.)	1735 ± 35	
Charbon de <i>Corylus</i>	SacA 29630	KOL1	85	1505 ± 30	533 ± 102
Charbon de <i>Maloideae</i>	SacA 29631	KOL1	105	1845 ± 30	324 ± 85
Matière organique	Poz-46306	CPB	64 (colluvion)	3975 ± 30	
Matière organique	Poz-46305	CPB	84 (paléochern.)	3780 ± 30	
Matière organique	SacA 32353	MOR	117,5 (paléochern.)	4275 ± 30	
Matière organique	SacA 32347	MOR	142,5 (paléochern.)	4975 ± 30	
Matière organique	SacA 32352	BRE	122,5 (paléochern.)	8370 ± 35	
Matière organique	SacA 32351	BRE	147,5 (paléochern.)	9045 ± 40	
Matière organique	SacA 32348	BUB	155 (paléochern.)	4950 ± 30	
Matière organique	SacA 32349	BUB	202,5 (paléochern.)	7630 ± 35	
Charbon de bois	SacA 32350	BUB	157,5	3610 ± 30	4023 ± 37
Matière organique	Poz-31186	SCD	65	4920 ± 40	
Matière organique	Poz-41197	WIW	230	25040 ± 200	
Matière organique	Poz-31184	ZMC	PKI ca. 400	30000 ± 400	
Matière organique	Poz-31181	ZMK	PKII ca.700	39000 ± 1000	
Matière organique	Poz-31183	ZMK	PKIII ca. 1000	37000 ± 1000	
Matière organique	Poz-28450	GOU	160	19290 ± 90	
Matière organique	Poz-28451	GOU	200	20110 ± 100	

Tableau 7.3. Résultats des mesures d'âge radiocarbone sur la matière organique des chernozems et paléochernozems et sur les charbons de bois

Kuchyňka

Les mesures d'âge donnent ici un TMR, le chernozem étant fonctionnel. Ces mesures ont été faites pour pouvoir caler d'éventuels changements de végétation détectés par la NIRS à l'aide d'un modèle de décroissance des matières organiques (voir Ertlen *et al.*, soumis). L'augmentation du TMR avec la profondeur est très régulière. Elle est de l'ordre de 730 ans/10 cm. Si on la compare aux données de la littérature, cette augmentation est plus forte que la moyenne des chernozems (cf. figure 1.5 et 1.6.), qui est de l'ordre de 490 ans/10 cm. Trois datations (BONN 442 à 444) provenant probablement du même site, mais sous le nom de Brazdim (Scharepensel et Pietig, 1970) donnent des résultats très proches des nôtres. Le temps moyen de résidence obtenu à la base de l'horizon chernique (5800 ans)

permet d'envisager un archivage des matières organiques sur la plus grande partie de l'Holocène, au minimum 6000 à 6500 ans.

Kolín

La mesure a été effectuée au sommet du paléochernozem enfoui sous des colluvions. Le TMR des horizons de surface des sols fonctionnels étant peu élevé (entre 50 et 300 ans dans un chernozem), la mesure correspond à 50-300 ans près à l'enfouissement. Celui-ci aurait donc eu lieu vers les III^e-VI^e siècles de notre ère, c'est-à-dire au début de la « Période de Migration » (Haut Moyen-Age). Les datations des charbons de bois sont cohérentes avec ce schéma. Ainsi, ce paléochernozem est restée fonctionnel de l'abandon du site par les LBK, soit au plus tard vers 4500 BC, jusqu'au début du Moyen-Age, soit au minimum 5000 ans. La signature NIRS de la matière organique doit refléter une partie de cette période. Celle des horizons supérieurs doit notamment refléter la nature du couvert végétal au moment de l'enfouissement.

Bubeneč

La datation obtenue à la surface du paléochernozem de Bubeneč (BUB) indique un enfouissement précoce, dès le Néolithique, sous des colluvions sans doute d'origine agricole. La différence entre les deux âges obtenus sur matière organique est d'environ 2700 pour 50 cm, soit un gradient de 540 ans/10 cm, normal pour des chernozems. En revanche, l'âge du charbon de bois n'est pas cohérent avec les âges des MOS. Il faut donc envisager deux possibilités : soit ce charbon a été intégré tardivement au paléochernozem, postérieurement à son enfouissement par bioturbation, soit la surface du paléochernozem a été tronquée par l'érosion juste avant l'enfouissement, auquel cas l'âge des matières organiques à l'enfouissement a pu être plus élevé que l'âge normal des horizons de surface. Il est difficile de choisir une de ces hypothèses, sachant que l'épaisseur totale des horizons A chernique est de 50 cm, c'est-à-dire une épaisseur normale dans les chernozems.

Břesnice

La mesure d'âge obtenue en surface du paléochernozem de Břesnice est de 8370 ± 35 BP. A une profondeur de 25 cm, l'âge est de 9045 ± 40 ans BP, soit un gradient faible de 270 ans, indiquant que la surface du paléochernozem n'a selon toute vraisemblance pas été tronquée avant l'enfouissement. Cet enfouissement est ancien et probablement naturel : les âges précèdent les phases agricoles du Néolithique. Nos datations sont cohérentes avec l'analyse de Ložek (1974), qui datait ce paléosl du Préboréal au Boréal, sur la base du contenu malacologique.

Morschwiller

La mesure d'âge du paléochernozem de MOR montre que le sol a été enfui vers 4275 ans BP. Ce fait est confirmé par la présence d'objets archéologiques de culture Horgen, daté de la même période. La datation sur MOS est parfaitement cohérente avec les découvertes archéologiques, ce qui montre que le paléosol a été très rapidement parfaitement scellé sous les colluvions, qui ont dû se déposer de façon relativement rapide, et donc brutale.

Clermont-Ferrand/Petit Beaulieu

Nous disposons de deux datations ^{14}C sur le site CPB. Curieusement, la datation des colluvions qui recouvrent le paléosol est plus ancien que la mesure effectuée à la surface du paléochernozem. Les colluvions étant normalement des horizons de surface à TMR peu élevé, nous pouvons faire l'hypothèse que ces colluvions d'origine chernozémique proviennent d'horizons profonds d'un sol amont déjà érodé. L'enfouissement de ce sol vers 3780 BP correspond à l'occupation de ce site à l'âge du Bronze.

Gougenheim

La datation de GOU indique que le paléosol isohumique a été enfouis en Pléniglaciaire supérieur.

Sainte-Croix-en-Plaine

La datation du paléosol SCD correspond grosso-modo à l'occupation de l'âge du Bronze relevée sur le terrain. Cela signifie que le site a été recouvert quasiment immédiatement après son abandon.

Wiwersheim

La datation de WIW indique que le paléosol a été enfoui dès le Pléniglaciaire. Il s'agirait donc d'un sol fonctionnel, soit au Pléniglaciaire, soit juste avant.

Zeměchy

Dans la série de Zeměchy, nous avons prélevé et daté trois échantillons, en surface des trois paléochernozems des complexes PKI, PKII et PKIII. Les âges obtenus sont de 30000 BP dans le PK I, 39 000 dans le PK II et 37000 dans le PKIII. Curieusement, la datation plus profonde est aussi plus récente, même si les différences ne sont pas significatives en raison de l'écart type. Notons aussi que nous nous retrouvons à la limite de la méthode du ^{14}C . Les possibilités d'erreur, de rajeunissement sur le terrain par des matières organiques récentes sont importantes. Ces données ne répondent pas aux

périodes définies pour les différents PKs, ni aux âges OSL donnés pour la mise en place des différents dépôts (Zander *et al.*, 2000). Ces restrictions faites, il est clair que la matière organique datée est très ancienne et peu contaminée par des matières organiques récentes. L'analyse NIRS est effectuée sur une MOS qui a été ultra-majoritairement scellée précocement au Pléistocène. Les spectres doivent donc rendre compte de la végétation de l'époque de l'enfouissement.

7.3. Application de la librairie spectrale bipartite de chernozems et sols sur lœss aux horizons profonds des profils étudiés (référentiel spécifique)

7.3.1. Application du modèle bipartite spécifique aux chernozems : généralités

Après avoir testé et validé le référentiel bipartite (forêt, prairie) spécifique des chernozems et sols sur lœss dans le chapitre 6, nous appliquons le modèle considéré comme le meilleur à l'ensemble des échantillons inconnus (cf. fig. 5.13). Pour la fonction élémentaire discriminant les sols sous prairies et les sols sous forêts, les scores élémentaires débordent largement l'intervalle défini par les scores des échantillons de la base de référence.

Sur la figure 7.7, nous avons représenté sous forme d'histogramme les scores de la fonction discriminante de chaque échantillon inconnu, en gris. Les scores des échantillons de surface sont également donnés, en rouge pour les prairies et en jaune pour les forêts. Les valeurs extrêmes indiquées par les échantillons de référence sont de -8,883 et 14,423. Les valeurs extrêmes typiques de la prairie sont de -8,883 et -3,140 ; pour la forêt, elles sont de 9,108 et 14,423. Les valeurs comprises entre -3,140 et 9,108 peuvent être considérées comme résultant d'un mélange de matières organiques de forêt et de prairies. Les valeurs situées à l'extérieur des bornes -8,883 et 14,423 sont difficiles à interpréter.

Si l'on place sur le référentiel forêt et prairie l'ensemble des échantillons inconnus, on observe que la matrice est répartie selon une loi normale avec quatre pics peu prononcés centrés sur -8, -2 et 4. Ces pics ne correspondent pas avec les pics des classes de référence, qui sont situés sur -5,508 pour les prairies et 11,954 pour les forêts.

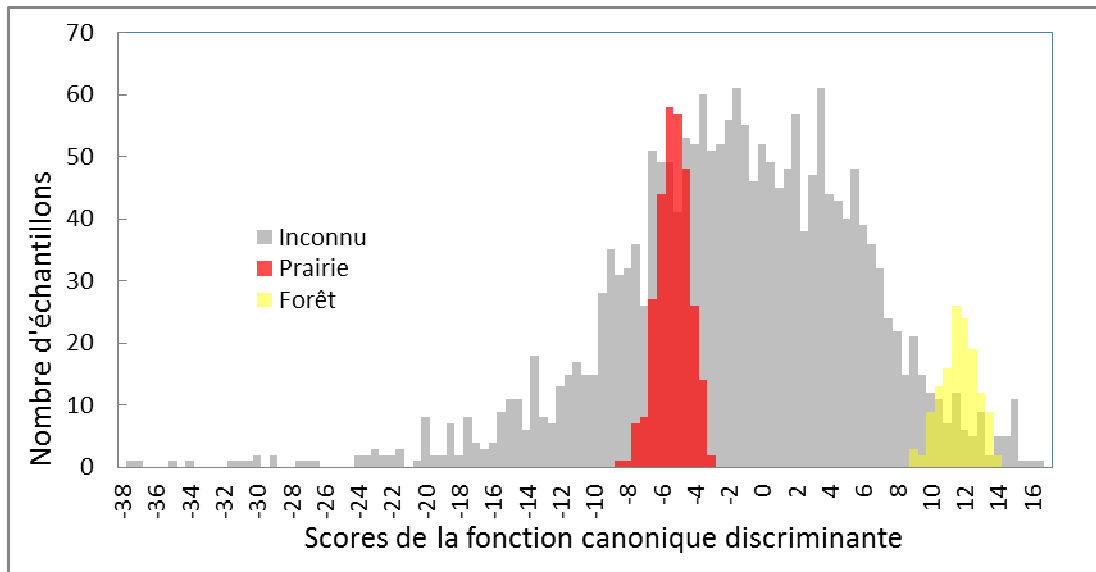


Figure 7.7. Les valeurs de scores de la fonction canonique pour la totalité des échantillons « inconnus », superposé avec les scores du référentiel spécifiques aux chernozems et sols sur loëss.

L'analyse discriminante permet de rapporter les échantillons inconnus à la classe de référence dont ils sont les plus proches. Sur un nombre total de 1815 échantillons de sols « inconnu », 74,5 % sont plus proche des sols de référence sous prairie et 25,5 % plus proche des sols de référence sous forêt. Dans la suite du chapitre, nous discuterons de cette répartition séparément pour les sols fonctionnels et les paléosols. Il faut dire que les échantillons qui débordent de manière significative de la gamme limitée par les classes de prairies et de forêts, c'est-à-dire les échantillons avec des scores compris entre -38 et -10 d'une part et entre 14 et 16 d'autre part sont difficile à interpréter.

Les scores de la fonction canonique discriminante élémentaire sont obtenus pour chaque échantillon de sol prélevé à une profondeur définie. Dans notre protocole d'échantillonnage, nous avons prélevé deux ou trois échantillons pour chaque profondeur, afin d'analyser la variabilité spatiale aux échelles élémentaires et assurer la représentativité des résultats acquis. Nous ne présenterons pas chacune des 2 ou 3 courbes obtenues par profil, mais le score canonique moyen des trois répétitions, présenté pour chacun des profils en fonction de la profondeur. Ce score est la moyenne arithmétique des valeurs obtenues à la même profondeur. Sur la fig. 7.8, nous en donnons un exemple pour le profil SEN, par la suite seule la moyenne sera présentée. La dispersion entre ces données est représentée par l'écart type. Nous considérons que la série de valeurs est convenable si la valeur de l'écart-type ne fait pas basculer la moyenne dans une autre classe. Ces valeurs sont listées dans le tableau en annexe.

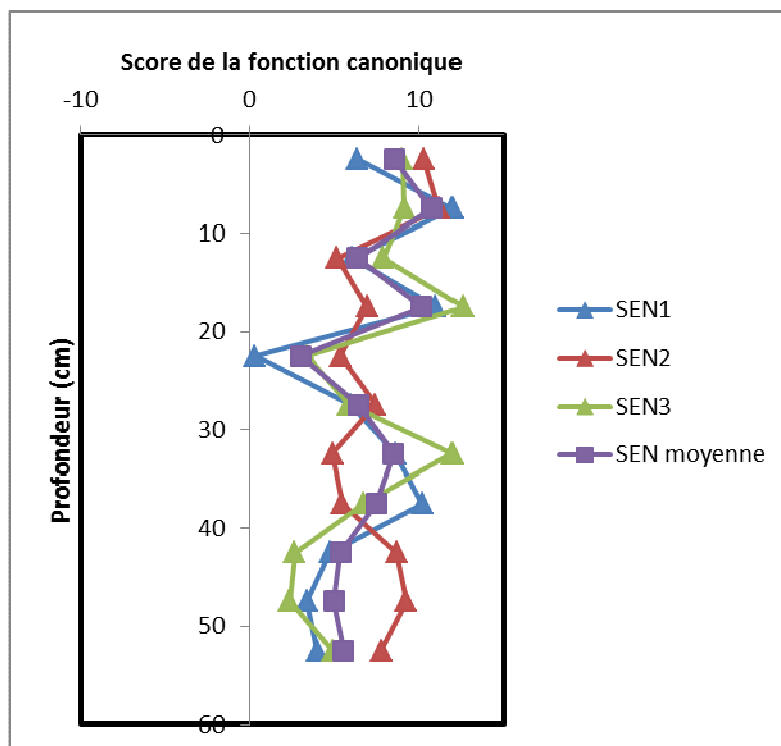


Figure 7.8. Variation des scores pour trois répétitions de prélèvement et leur moyenne : exemple du profil SEN.

7.3.2. Application du modèle bipartite spécifique aux chernozems aux profils de sols fonctionnels

Au total, nous avons examiné 664 échantillons de 26 profils de sols fonctionnels. Nous avons exclu de cette matrice les sols de la catena de Hrušov, (6 profils, 292 échantillons) afin de ne pas surreprésenter ce site qui a fait l'objet d'un échantillonnage plus intensif et qui sera présenté dans le chapitre 9. Les scores sont représentés sur la figure 7.9. Nous observons que la matrice est répartie selon une loi normale avec quatre pics qui sont mieux prononcés qu'en observant la totalité des échantillons. Les pics sont centrés sur -9, -7 -3 et 5. Ces pics ne correspondent pas avec les pics des classes de référence qui sont situés sur -5,508 pour les prairies et 11,954 pour les forêts. Le pic -9 est légèrement décalé vers les valeurs négatives par rapport aux prairies. En revanche, les pics à -7 et -3 recouvrent en partie le référentiel « prairies ». Le pic à 5 est situé dans la matrice des valeurs intermédiaires entre les deux classes. Il n'y a aucun pic centré sur la classe de forêts.

Nous observons que la totalité des échantillons ne se classe pas dans les groupes de référence prévus. La plupart des échantillons se concentre entre les deux classes de référence. Ces valeurs intermédiaires peuvent être interprétées comme résultant d'un mélange de MO issue d'une végétation ligneuse et de plantes herbacées. Deux cas de figures expliquent ce mélange i) une succession dans le temps d'une forêt dense et d'une végétation prairiale, ou ii) une source de matière organique intermédiaire, de type forêt-steppe. Selon l'évolution des scores avec la profondeur, nous pourrions dire s'il s'agit d'une végétation intermédiaire (forêt-steppe), stable (la courbe est stable tout au long de profil) ou

si cette valeur représente un mélange de MO consécutif à un changement de la végétation d'un type à l'autre. Nous développerons ce point ultérieurement pour chacun des profils analysés.

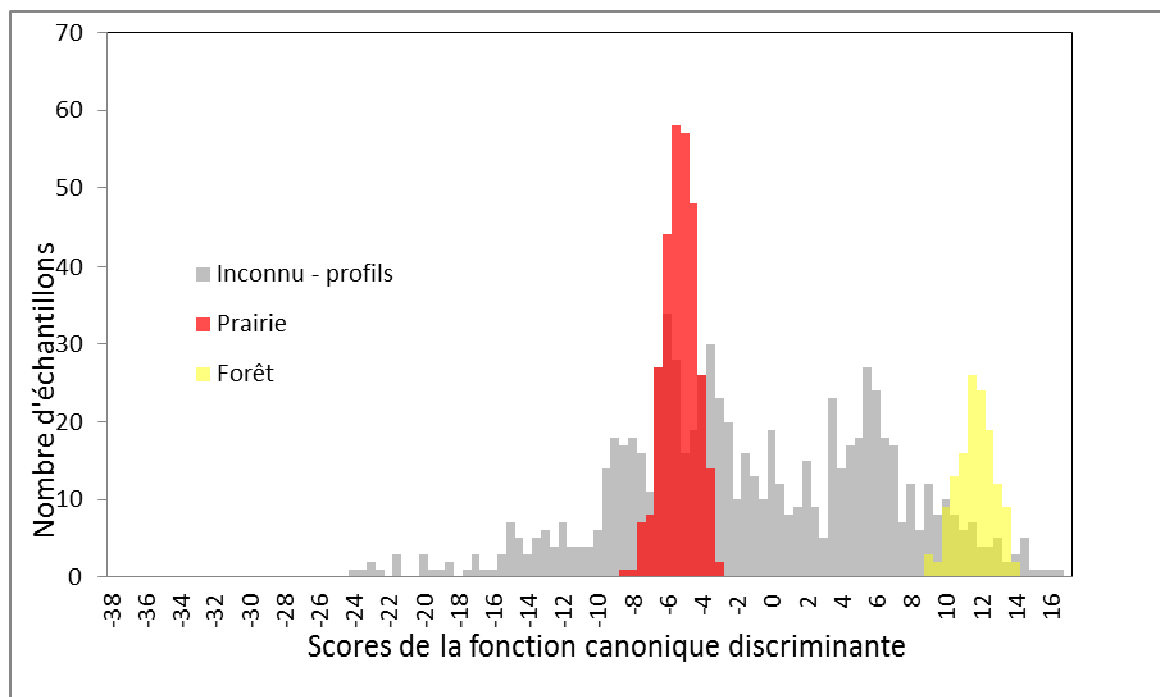


Figure 7.9. Les valeurs de scores de la fonction canonique (modèle bi-partite spécifique aux chernozems) pour les échantillons « inconnus » de profils de sols fonctionnels (catena de Hrušov exceptée.)

Lorsque les seuls sols fonctionnels sont analysés (fig. 7.9) par rapport à la totalité des profils (fig. 7.7), on observe qu'il y a nettement moins d'échantillons dont les scores débordent de l'intervalle défini par les classes de prairies et de forêts. Seuls 82 échantillons ont une valeur de la fonction canonique inférieure à -10 , ce qui les rend difficilement interprétable. Dans ce groupe, il y a des échantillons de la base des profils HUUD et HUR (107- 112). Leur mauvais classement est sans doute lié à la très faible teneur en carbone de ces échantillons ($<0,3\%$ Corg pour aux profondeurs concernée) prélevés dans des horizons C ou Bt. Ceci a été observé de façon très générale par Ertlen (2009). En l'absence de matière organique, ce sont d'autres caractéristiques pédologiques qui s'expriment. Mais dans ce groupe, nous trouvons aussi curieusement la totalité des échantillons du profil POP, pourtant très riche en matière organique. C'est ici sans doute la quantité importante de CaCO_3 (entre 15% et 30%) dans le profil qui perturbe le signal. En plus, il y a quelques échantillons apparemment aléatoires qui appartiennent aux profils A3, H1, KOR et HUB. Ces échantillons isolés n'empêchent pas de proposer des interprétations pour le reste du profil. A l'opposé du graphique, il n'y a que 3 échantillons dont les valeurs dépassent légèrement 15.

En fait, une analyse fine ne peut se faire que profil par profil. La figure 7.10 présente la totalité des profils de sols fonctionnels analysés. Cinq types d'évolution peuvent alors s'y observer :

- Onze profils (CT, HUB, HUUD, HUM, HUR, HUS, HUG, KOC, KOR, KUR, MIK) ont des scores qui s'inscrivent quasiment en totalité dans la référence prairiale. La matière organique de ces sols a pour seule origine une végétation de type prairiale.

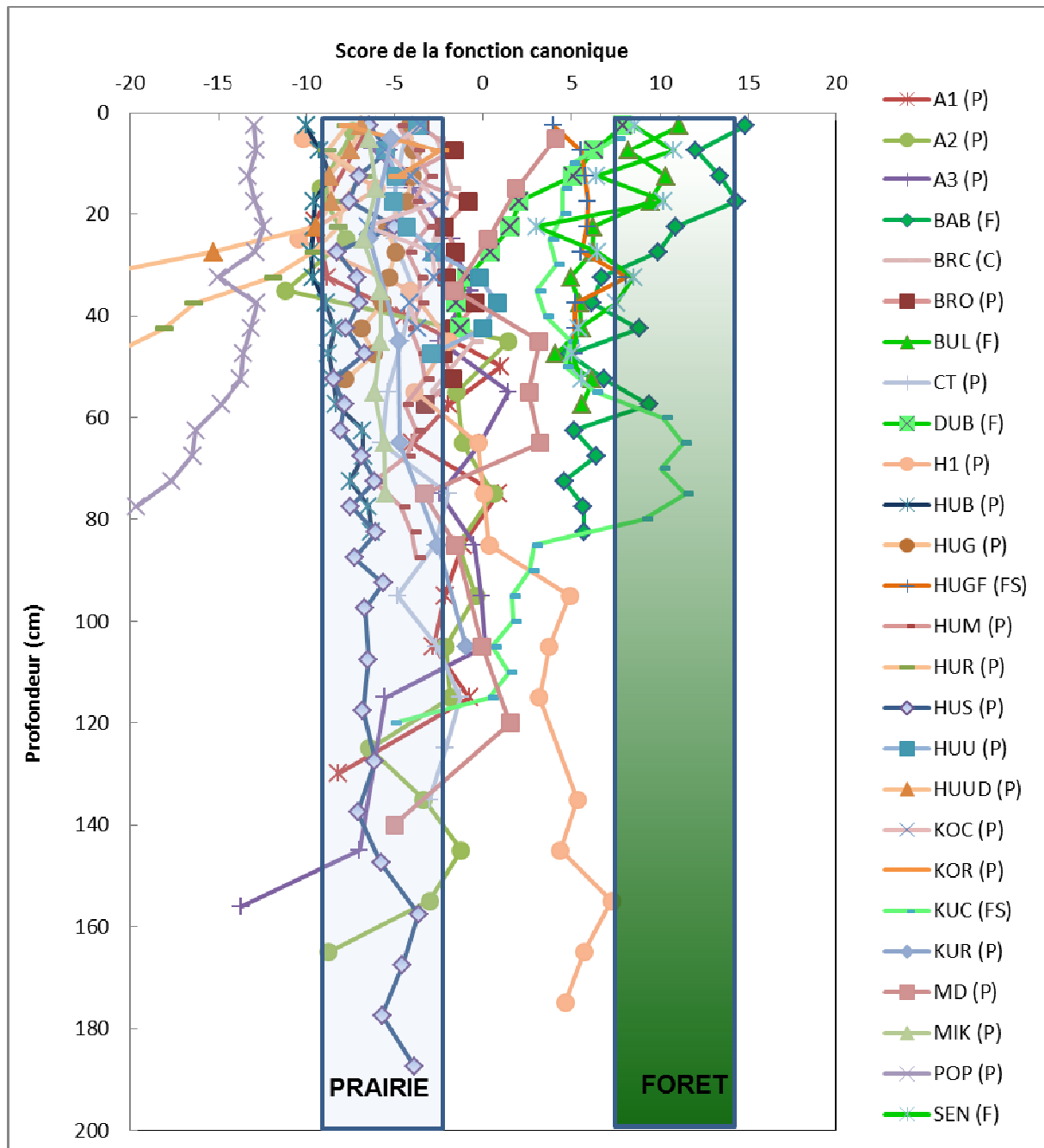


Figure 7.10 Scores moyens de la fonction discriminante (modèle bipartite spécifique aux chernozems) en fonction de la profondeur pour les 26 profils de sols analysés. Entre

parenthèse la végétation actuelle observé sur le site : P prairie, C culture, FS forêt-steppe, F forêt.

- Trois profils ont des scores entièrement compris dans la zone de valeurs intermédiaires entre les référentiels de prairie et de forêt, sans changements importants sur toute l'épaisseur du profil : BRC, BRO, HUGF (en jaune);
- Cinq profils montrent une tendance plutôt prairiale en profondeur et tendent vers la forêt dans la partie supérieure: BAB, BUL, DUB, KUC, SEN (en vert);
- Deux profils montrent une évolution inverse, à savoir une tendance forestière en profondeur et prairiale dans les horizons supérieurs : A1, H1 (en bleu) ;
- Quatre profils ont une évolution complexe entre les pôles forestières et prairiaux : A2, A3, HUU, MD (en rouge);
- Un dernier profil est Impossible à interpréter : POP parce que entièrement en dehors des valeurs de référence (en gris).

La figure 7.10 étant difficilement lisible en raison du nombre important de profil, nous détaillons ci-dessous deux figures reprenant la majorité des cas exposés. La figure 7.11 présente l'ensemble des dix profils stables, et la figure 7.12 l'ensemble des profils témoignant d'une évolution prairie-forêt ou forêt-prairie.

Pour ce qui est des profils stables (fig. 7.11), un sol se démarque. Il s'agit de HUGF qui est relativement proche de la classe de référence forêt par son score. La végétation actuelle qui recouvre ce sol est une forêt-steppe. La stabilité des scores avec la profondeur semble indiquer que l'ensemble de la matière organique a une signature de ce type. Les autres profils sont en revanche marqués par l'empreinte prairiale, qui correspond d'ailleurs à la végétation actuelle qui recouvre les sols. On peut ici aussi envisager une stabilité de ces écosystèmes sur une durée longue, largement plurimillénaire.

Pour les profils présentant des évolutions de la prairie vers la forêt, (fig. 7.12) celle-ci est très bien marquée sur au moins deux profils : KUC et DUB. La base de ces profils se classe clairement dans les scores de référence de prairie. L'évolution de la forêt vers la prairie est moins nette. En effet, aucun des sols n'a une signature purement forestière à sa base mais des signatures intermédiaires qui évolue en surface vers des signatures prairiales. Il faut noter que certains de ces profils ont une signature intermédiaire dès 40 cm dans l'horizon A. Les signatures des parties profondes des profils, au-delà de 80 cm, sont à considérer avec prudence puisqu'il s'agit presque toujours d'horizon C très pauvre en Corg.

D'une façon générale, aucun profil n'a une signature intégralement forestière, contrairement à certains profils qui ont une signature intégralement prairiale.

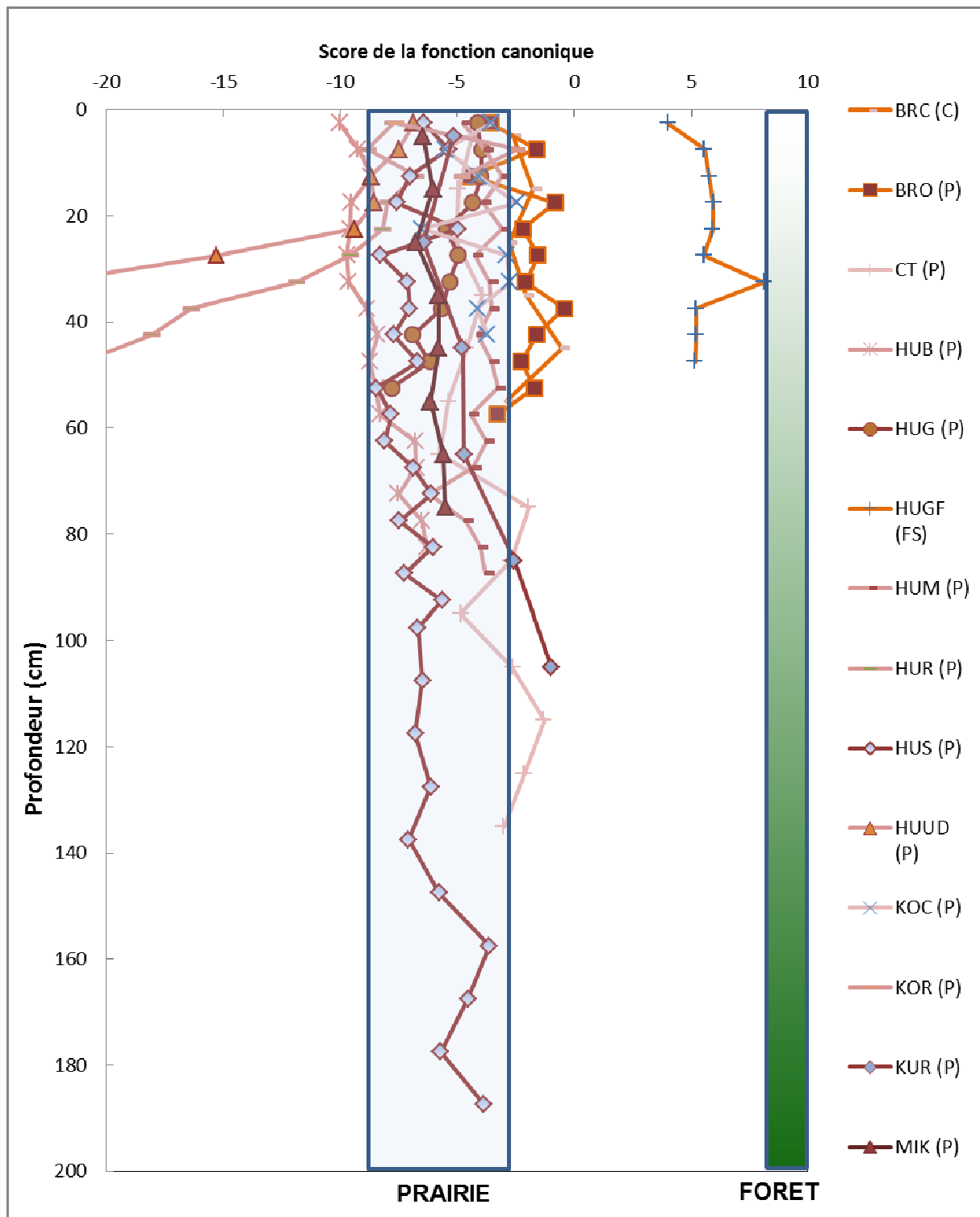


Figure 7.11. Valeurs du score moyen de la fonction canonique (modèle bi-partite spécifique aux chernozems) en fonction de la profondeur pour les profils de sols à score relativement constant. Entre parenthèse la végétation actuelle observé sur le site : P prairie, C culture, FS forêt-steppe, F forêt.

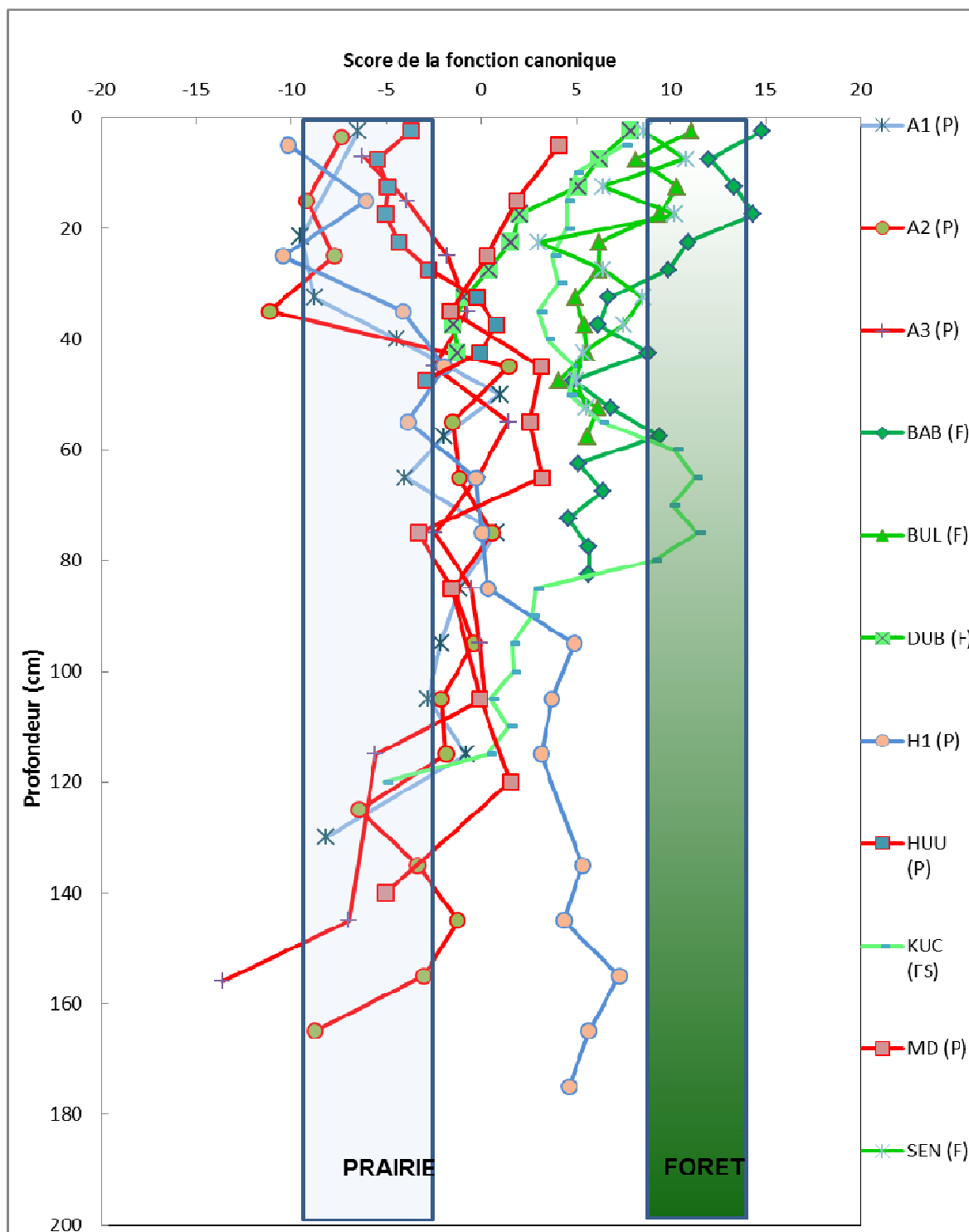


Figure 7.12. Valeurs du score moyen de la fonction canonique (modèle bipartite spécifique aux chernozems) en fonction de profondeur pour les sols dont le score montre une évolution. Entre parenthèse la végétation actuelle observé sur le site : P prairie, FS forêt-steppe, F forêt.

7.3.3. Application du modèle bipartite spécifique aux chernozems aux paléosols

Au total nous avons examiné 398 échantillons collectés sur 15 paléosols. Nous observons (fig. 7.13) que la matrice des paléosols est répartie irrégulièrement avec un pic bien prononcé vers le score de 2. Ces pics ne correspondent pas aux pics des classes de référence (pour rappel : -5,508 pour les prairies et 11,954 pour les forêts).

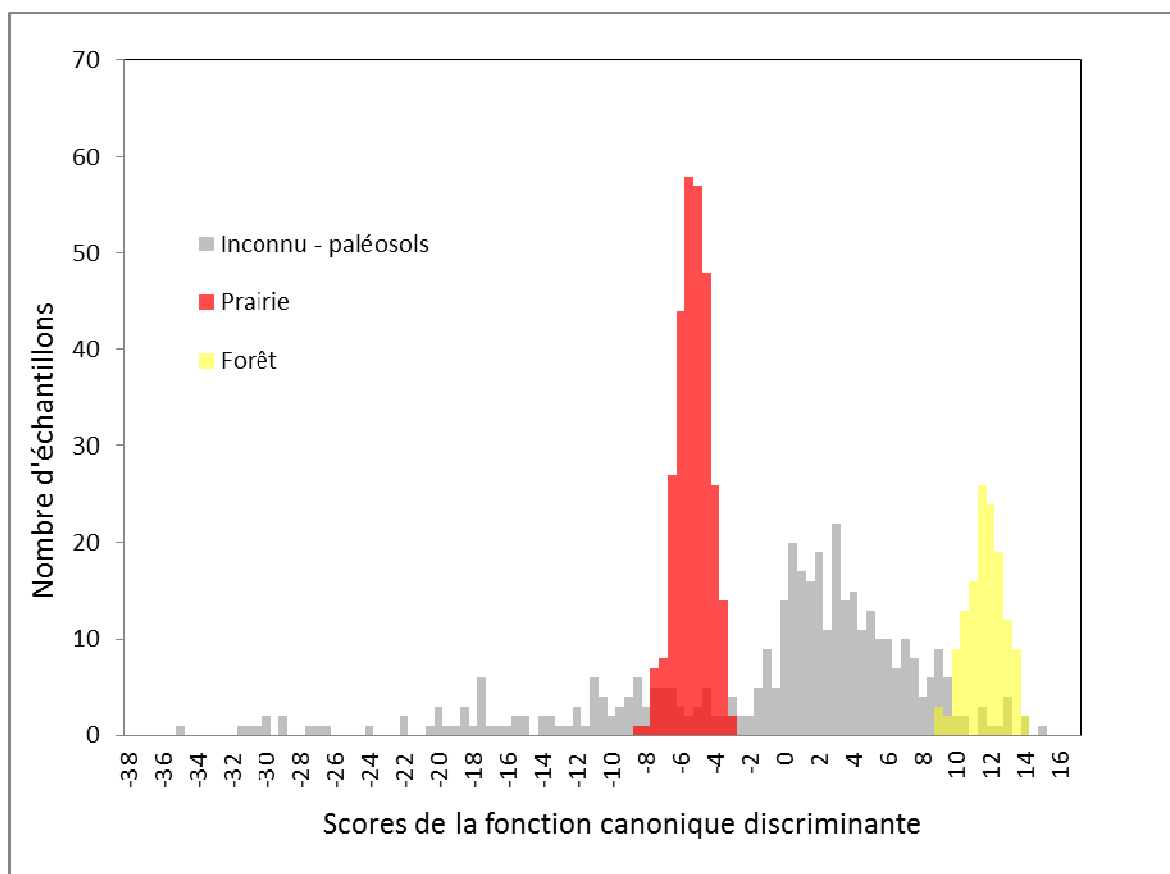


Figure 7.13. Valeurs des scores de la fonction canonique (modèle bi-partite spécifique aux chernozems) pour les échantillons de paléosols

De façon très similaire à l'analyse des sols fonctionnels, nous observons que la totalité des échantillons ne se classe pas dans les groupes de référence. La plupart des échantillons se concentrent entre les deux classes de référence. En revanche, 57 échantillons ont une valeur de la fonction canonique inférieure à -10 ce qui rend l'interprétation impossible. Dans ce groupe, nous trouvons des échantillons de CPB, POL, BRE et SCC, ce qui est dû probablement à la grande quantité de CaCO_3 dans les profils (cf. annexe). Par contre, il n'y a aucun échantillon avec des valeurs au-delà de 14 la borne supérieure des références sous forêt.

La figure 7.14 présente la totalité des paléosols analysés. Nous observons sept types d'évolution :

- Un profil avec des scores qui reflètent une histoire uniquement prairiale : SCD ;
- Un profil avec des scores qui reflètent une histoire uniquement forestière : ZMC ;
- Trois profils avec des scores qui reflètent une histoire prairiale, mais avec une partie du profil ayant des scores difficilement interprétables : BRE, CPB2, POL ;
- Six profils avec des scores relativement stables avec la profondeur et entièrement compris dans les valeurs intermédiaires : BRK, KOL1, KOL2, KOL3, ZMK, WIW ;
- Un profil avec des scores dans les valeurs intermédiaires avec une tendance vers la végétation forestière en profondeur : MOR ;
- A l'inverse, un profil présente des scores dans les valeurs intermédiaires avec tendance vers la végétation prairiale en profondeur : BUB ;
- Deux profils sont impossibles à interpréter : CPB1, SCC.

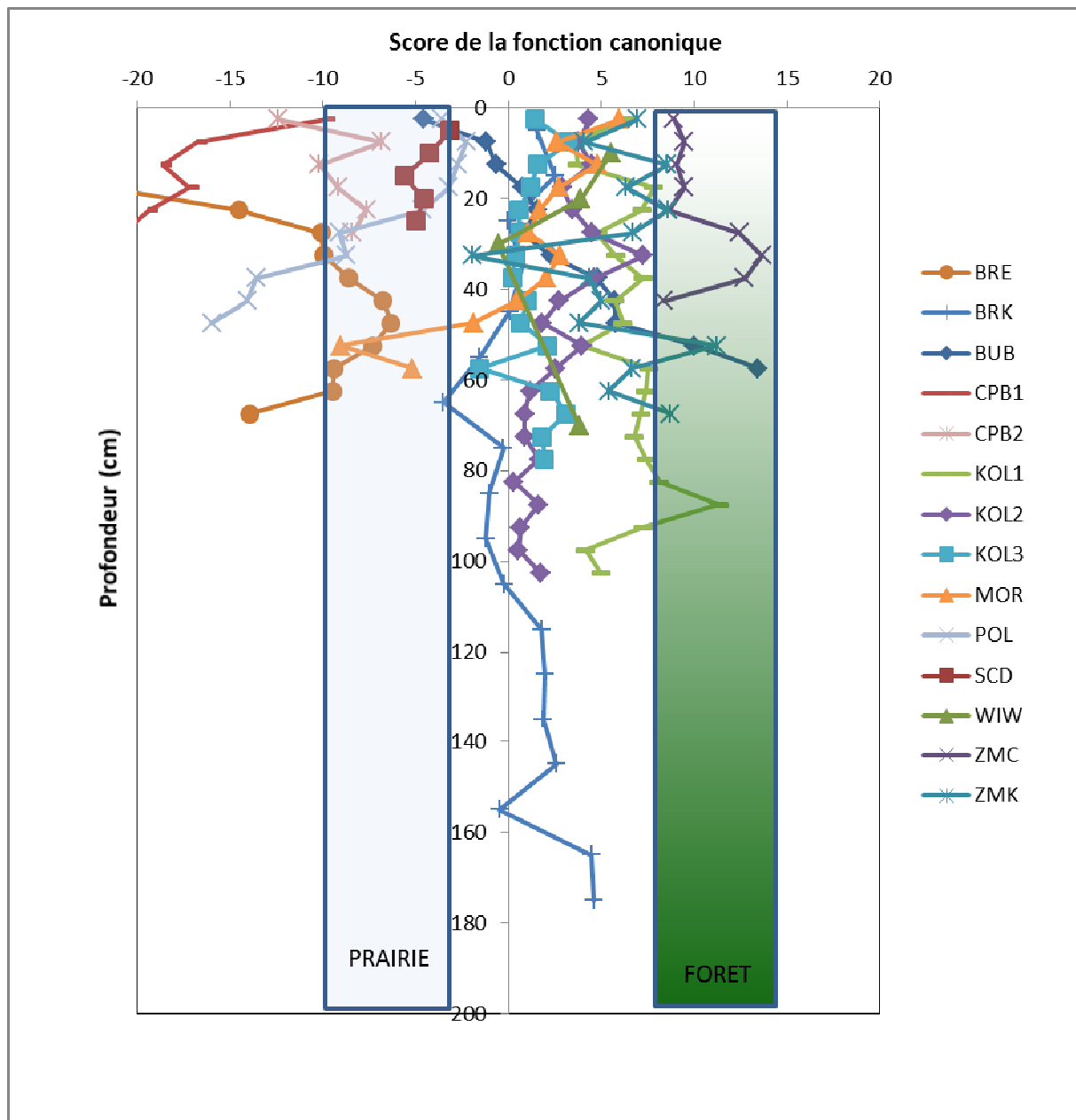


Figure 7.14. Les valeurs de la moyenne de scores de la fonction canonique (modèle bipartite spécifique aux chernozems) en fonction de profondeur pour les 14 profils de paléosols.

7.4. Application du modèle tripartite (prairie, forêt, culture) : généralités

Après avoir élaboré la librairie spectrale tripartite sur les sols de prairie, forêts et culture, nous avons appliqué ce référentiel sur 1815 échantillons dont l'origine de la MO est inconnue. Parmi ces échantillons 29,08 % sont classés « sous prairie », 4,47 % sont classés « sous forêt » et 66,44 % sont classés « sous culture ».

Nous pouvons observer la répartition des échantillons sur la figure 7.15. La répartition des valeurs obtenues rend la classification difficile, lorsque des nombreuses observations sont situées à distance égale de trois barycentres. Néanmoins, nous apercevons que la plupart des observations est située entre les sols sous prairies et sous cultures et très peu d'entre eux sur la classe sous forêts. De la représentation des deux fonctions discriminantes nous pouvons déduire que la première fonction discrimine les sols cultivés des sols non cultivés et que la seconde fonction discrimine les sols sous forêts des sols sous prairies. Nous observons qu'un nombre élevé des échantillons est éloigné des barycentres. Les scores inférieurs à -13 sur la fonction 1 ou inférieurs à -4 sur la fonction 2 sont impossible à interpréter. Parmi ces échantillons se trouvent surtout les sites BRE, KUC, POL, POP et ZMC. Ce sont des sols avec une teneur CaCO_3 élevé.

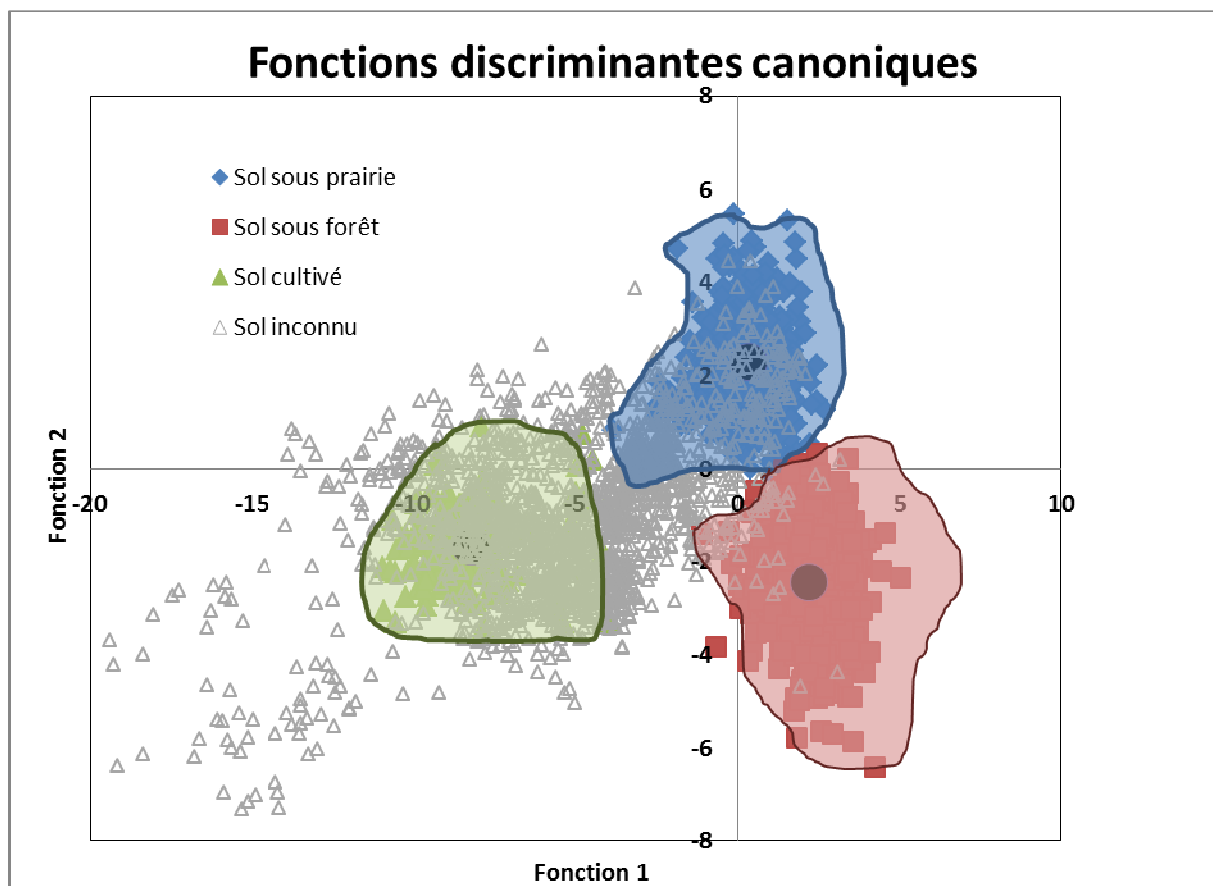


Figure 7.15. Scores des fonctions discriminantes 1 et 2 du modèle tripartite (modèle forêt-prairie-culture) pour la totalité des échantillons.

7.4.1. Application du modèle tripartite (prairie, forêt, culture) aux profils de sols fonctionnels

Au total nous avons examiné 664 échantillons de sols fonctionnels soit 26 profils de sols. Nous avons exclu de cette matrice les sols de la catena de Hrušov, (6 profils, 292 échantillons) afin de ne pas surreprésenter ce site qui a fait l'objet d'un échantillonnage plus intensif et qui sera présenté dans le chapitre 9. Nous observons que le nuage des échantillons « inconnus » est réparti surtout entre les classes de sols sous prairie (classe 1) et des sols sous cultures (classe 3) (fig. 7.16). Nous apercevons qu'un nombre important est placé dans le centre de gravité du triangle formé par les barycentres des trois groupes.

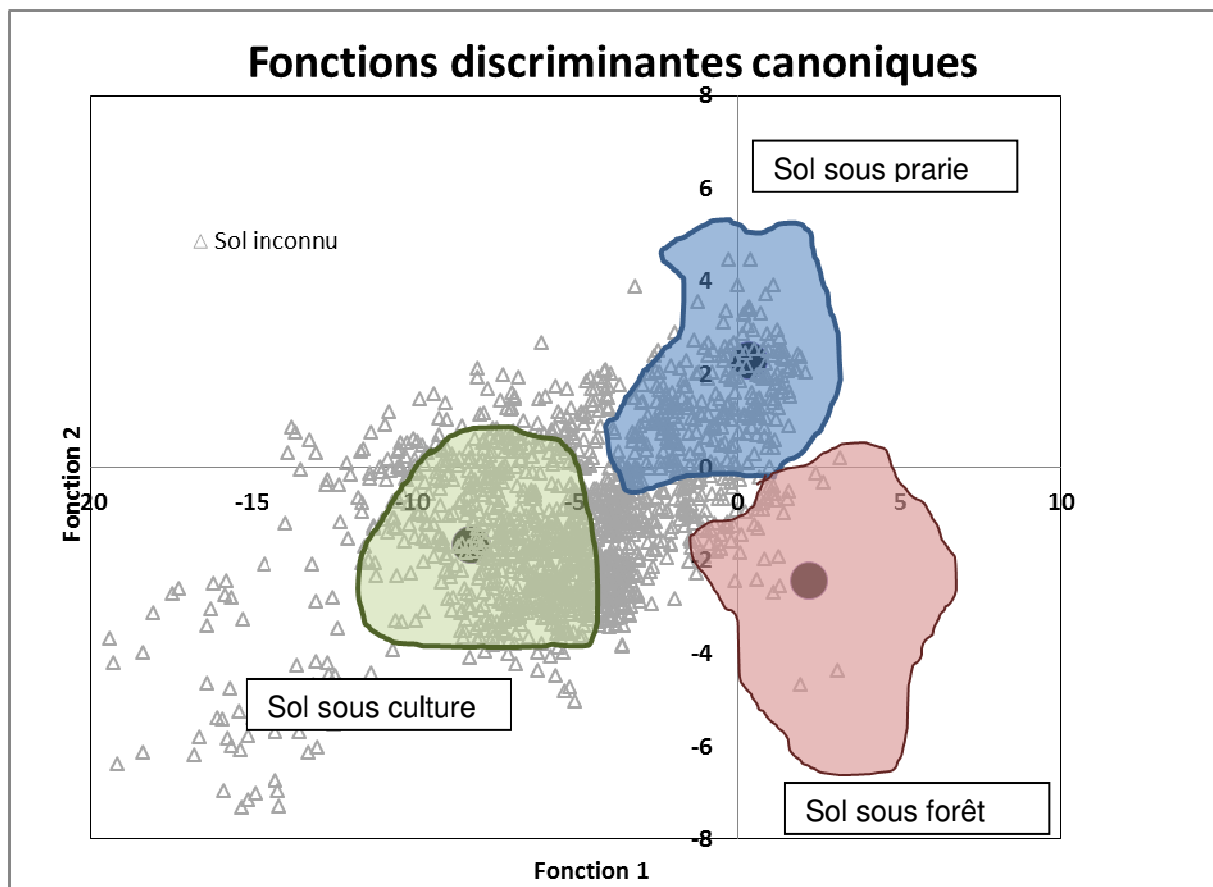


Figure 7.16. Scores des fonctions discriminantes 1 et 2 du modèle tripartite (modèle forêt-prairie-culture) sur les échantillons de sols fonctionnels (sans Hrušov)

La fonction 1 nous permet l'interprétation de changement de la végétation entre les sols cultivés et non-cultivés. La dispersion des données sur les fonctions 1 et 2 est parfois élevée (voir annexes), ce qui posera des problèmes pour l'interprétation ultérieure. Pour les profils analysés, nous observons une évolution (7.17) générale des sols cultivés en profondeur vers des sols non cultivés en surface.

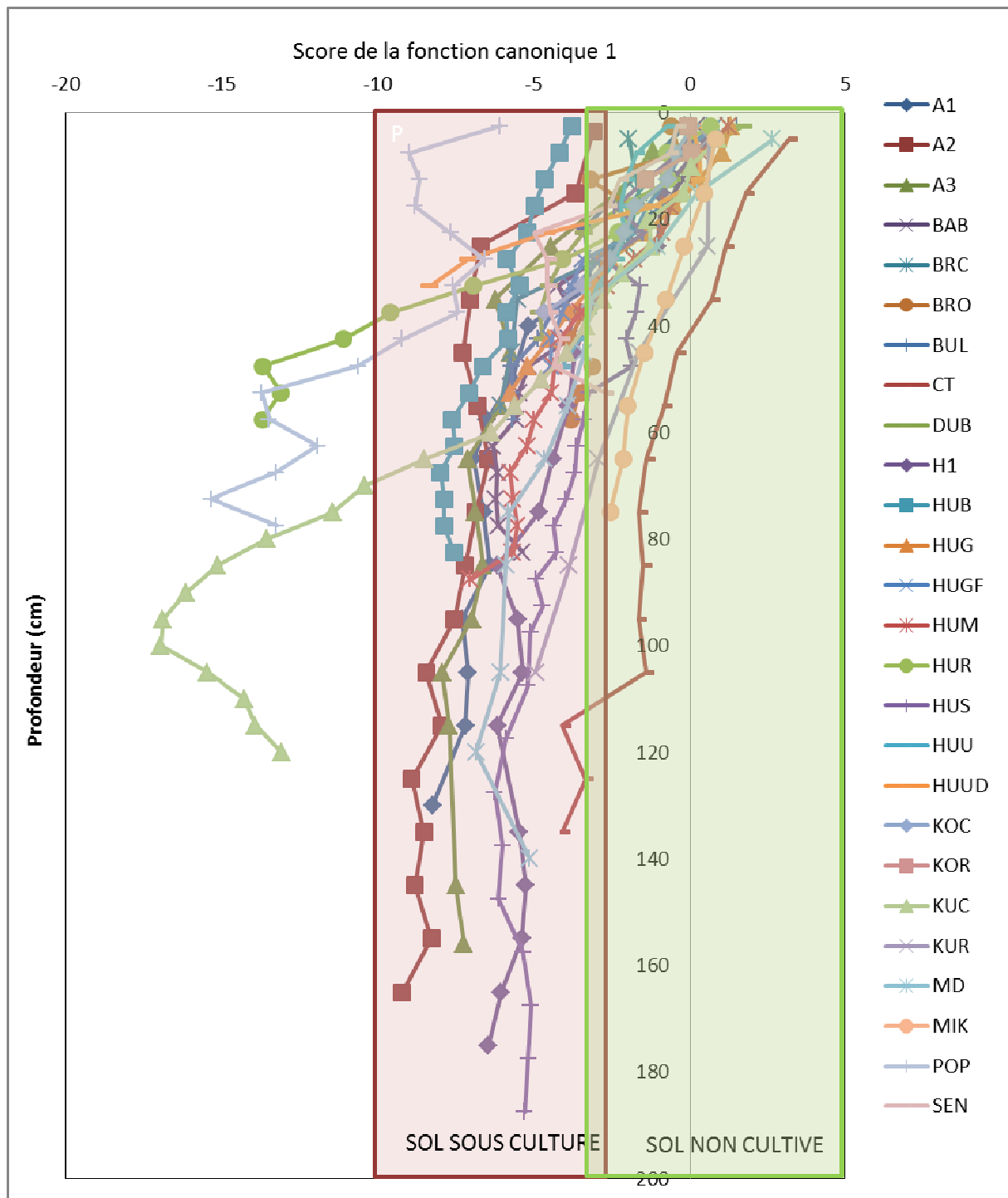


Figure 7.17. Scores de la fonction discriminante 1 du modèle tripartite (modèle forêt-prairie-culture) en relation avec la profondeur pour les 26 profils de sols étudiés (sans le site de Hrušov).

La fonction 2 n'est pas interprétée ici parce qu'elle est redondante avec les résultats du référentiel bipartite présenté ci-dessus.

7.4.2. Application du modèle tripartite (prairie, forêt, culture) aux paléosols

Au total nous avons examiné 398 échantillons de 15 profils de paléosols. Nous observons que les échantillons de paléosols s'accumulent vers la classe de sols cultivés (fig. 7.18). Ces résultats sont inattendus voir incohérents pour les paléosols pleistocènes. Ceci confirme la faiblesse de la démarche pour les sols avec des teneurs faibles ou très faible en Corg. De même, la teneur en CaCO_3 élevée pour nos paléosols suite à des processus de recarbonatation rend la détection de l'origine végétale de la MO difficile (Froehlicher, 2013). Pour certains paléosols holocènes prélevés à proximité de sites archéologiques (e.g. KOL) l'hypothèse d'un sol cultivé est plausible mais les résultats incohérents pour d'autres sols nous invitent à une grande prudence dans l'interprétation sous un angle paléo-environnemental.

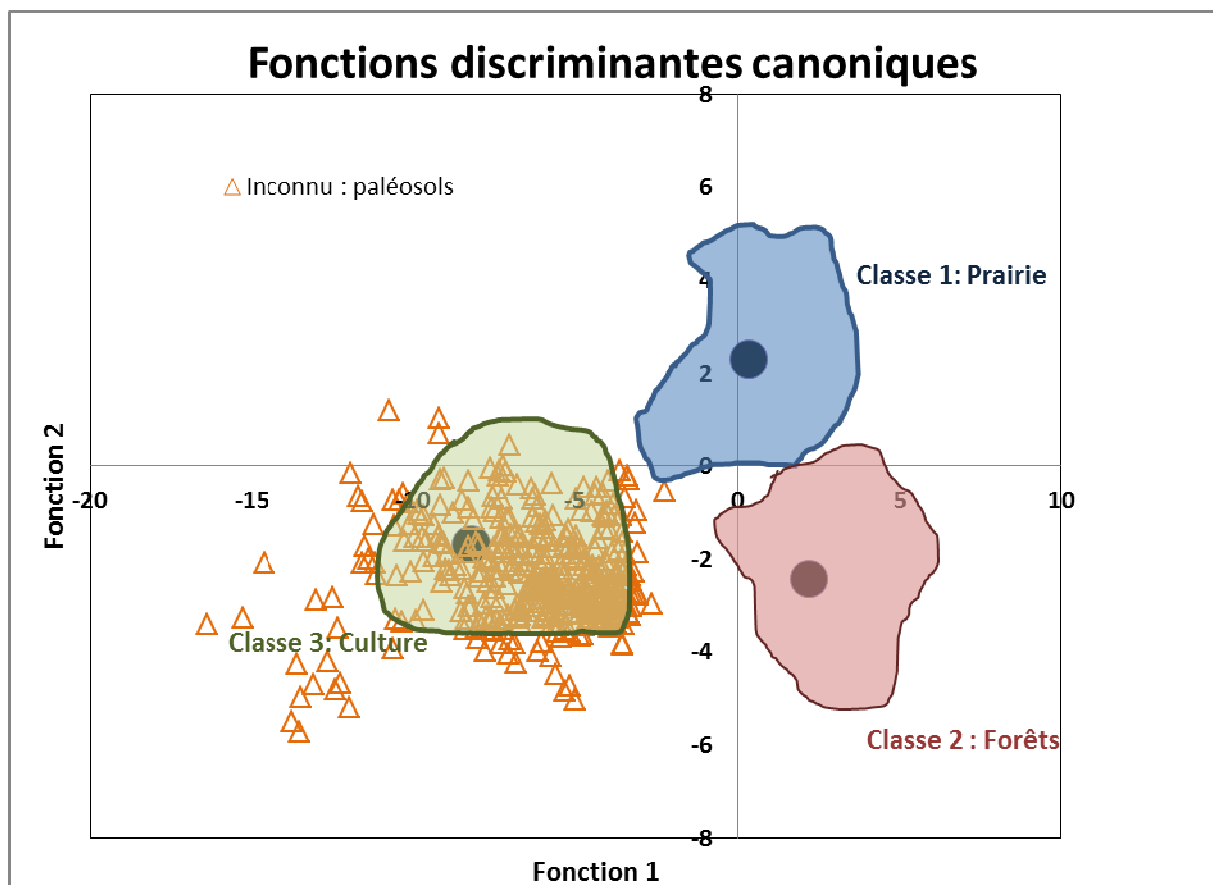


Figure 7.18. Scores des fonctions discriminantes 1 et 2 du modèle tripartite (modèle forêt-prairie-culture) sur les échantillons de paléosols

7.5. Application de la librairie spectrale tripartite (forêts de feuillues de conifères et mixte) aux profils de sols fonctionnels

Après avoir élaboré un modèle tripartite sur les sols sous types de forêts variées (chapitre 6), nous avons appliqué le référentiel sur 382 échantillons de sols classé comme forestier par le modèle bipartite (forêt-prairie, cf § 7.3 ; fig. 7.19). Pour certains profils de sols ayant connu des évolutions seuls quelques échantillons sont concernés Parmi les 382 échantillons 332 sont classés comme sols sous forêt de feuillus, 30 sont classés comme sols sous forêts de conifères et 20 comme sols sous forêts mixte (fig. 7.20).

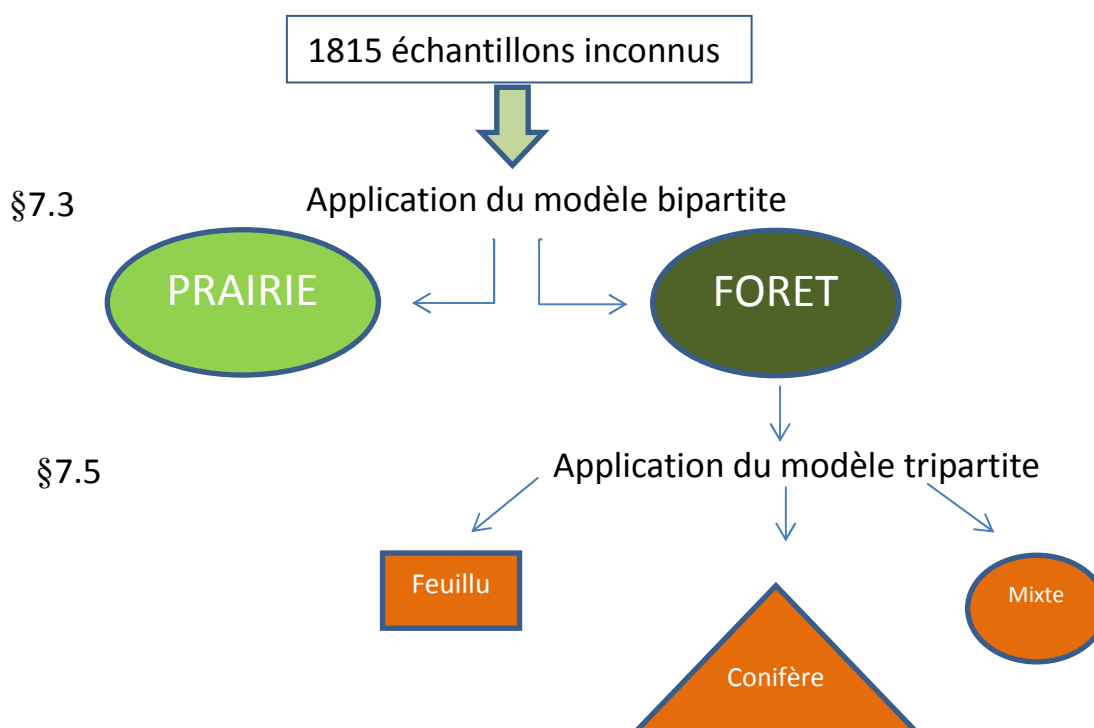


Figure 7.19. Schéma récapitulatif de la démarche pour le classement des échantillons dont la matière organique est d'origine forestière.

Les profils se classant comme des sols sous forêts de feuillus sont BAB, BUB, BUL, DUB, H1, HUGF, HRU, KOL1, KOL2, KUC, MD, MOR, SEN, WIW, ZMC et ZMK. Quelques échantillons provenant KUC, KOL, MOR et BUB se classent parmi les sols sous forêts de conifères. Quelques échantillons des profils BRO, BUL MOR, KUC et SEN se classent parmi les sols sous forêt mixte (voir annexes).

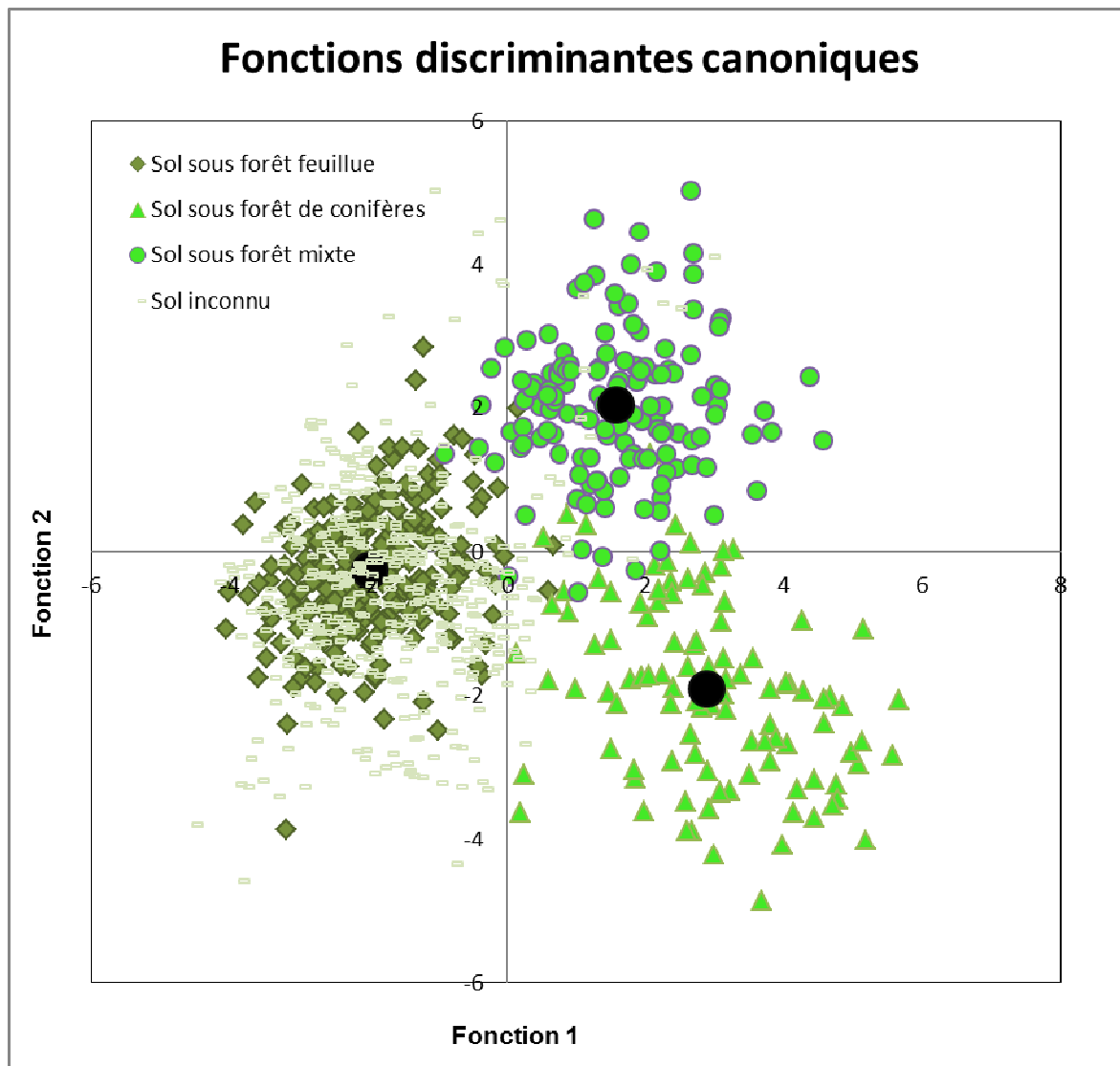


Figure 7.20. Scores des fonctions discriminantes 1 et 2 du modèle tripartite (modèle feuillu-conifère-mixte).

7.6. Interprétations et discussions des résultats de la SPIR

7.6.1. Validité des différentes approches

Le référentiel bipartite (forêt-prairie) établi par Ertlen *et al.* (2010) et son application à des profils de sols dans le but de reconstituer l'histoire de la végétation. Ertlen (2009) avait déjà montré la robustesse de cette approche. Les premiers tests réalisés dans le cadre de cette thèse avaient montré des faiblesses concernant les sols développés sur lœss. C'est pourquoi un référentiel spécifique aux sols sur lœss et centré sur les chernozems a été développé. Nous avons vu dans le chapitre 6 la robustesse de ce référentiel. L'application du modèle qui en découle à des profils de sol confirme cette robustesse. En effet, les premiers centimètres voir les premiers décimètres des profils sont toujours classés correctement en comparaison avec la végétation observée sur les sites lors des campagnes de terrain.

L'application du modèle à des paléosols a également permis de tester pour trois sites la validité de l'approche par comparaison avec d'autres données paléoenvironnementales. Le paléosol BRE a été scellé au Boréal vers 8700BP d'après une datation de la matière organique et est indiqué comme steppique à la base par la SPIR. Cette période est caractéristique d'un climat sec qui favorise le développement de steppes en Europe Centrale (Lorz et Saile, 2011) De plus, Ložek (1974) d'après des analyses stratigraphiques et malacologiques décrit l'environnement de ce site comme steppique et gagné par une forêt thermophile au sommet du paléosol. Sur le site de KOL, ZMC et ZMK les résultats de la SPIR (forêt) sont également en accord avec l'étude pédoanthracologique (Vysloužilová *et al.*, 2014, résultats détaillé dans le chapitre 8). Sur le site CPB, seules des données palynologiques dans le bassin versant sont disponibles (Macaire *et al.*, 2010) avec l'inconvénient que ces données ne peuvent pas être extrapolées à l'échelle stationnelle de notre coupe. Le diagramme pollinique indique pour la période de développement du chernozem (Atlantique et Sub-Boréal) une végétation dominée par la forêt avec une proportion de milieux ouverts de 20%. La végétation prairiale suggérée par la SPIR n'est donc pas incompatible avec ce résultat et rappelle que ce proxy pédologique nous fournit des informations aux échelles locales et stationnelle à la différence des marqueurs sédimentologiques.

Le référentiel tripartite (forêt-prairie-culture) suscite plus d'interrogations. Comme l'a montré Froehlicher (2013) les échantillons des trois groupes de référence sont correctement discriminés. La première limite réside dans le nombre de références (165 échantillons provenant de 8 sites) très inférieur au nombre de références sous forêt et sous prairie. Par ailleurs, la nature de ces échantillons prélevés dans des séries de colluvions diffère fortement des autres références. En particulier, ils sont bien plus pauvres en carbone organique que les références de prairie et de forêts prélevés dans des horizons superficiels de sols fonctionnels. De plus, l'échantillonnage est tel que la plupart de ces colluvions sont fortement carbonatés. Ainsi, les propriétés physico-chimiques de base sont largement suffisantes pour opérer une discrimination avec les autres références. La discrimination se fait ainsi sur la première fonction (celle qui a le poids le plus important) avec une distance de Mahalanobis importante.

L'application de ce modèle aux profils de sols fonctionnels et aux paléosols confirme ces inquiétudes en révélant plusieurs incohérences. La principale incohérence réside dans le classement de paléosols pléistocènes (ZMC par exemple) comme sols sous culture. Cette incohérence est très certainement due à la très faible quantité de carbone dans ces paléosols. Ainsi, la signature de la matière organique est très difficile à décrypter et le modèle propose un classement des échantillons les plus proches du point de vue physico-chimique, c'est-à-dire les colluvions à faible teneur en carbone organique. Les autres classements suspects sont moins flagrants, mais l'on peut tout de même remarquer que plusieurs profils de sols se classent comme sol sous culture en profondeur. Tout comme pour les paléosols, ce classement est, sans doute, fortement influencé par les faibles teneurs en carbone et l'analogie avec les colluvions.

Le référentiel tripartite (forêt de feuillus, mixte et de conifère) est appliqué à une faible quantité d'échantillons. La discussion est par conséquent limitée. La quasi-totalité des profils sous forêt sont classés comme sous forêt de feuillus. A la différence des référentiels

précédents, ce dernier n'est pas spécifique aux sols développés sur lœss. Au contraire, il ne contient que quelques références sur lœss et une grande majorité de sols acides. En particulier, les forêts de conifères et forêts mixtes ont toutes été échantillonnées sur des sols acides. Par conséquent, l'influence des propriétés physico-chimiques peut expliquer un classement presque systématique en forêt de feuillus. Cependant ce résultat n'est pas incohérent puisque tous les chernozems sous forêt prélevés et observés dans le cadre de ce travail de thèse étaient préservés sous des forêts de feuillus. En revanche, il existe en Asie centrale des chernozems sous forêts ou sous forêts-steppe dont l'essence principale est le mélèze. Dans les paléosols du site de Zeměchy des charbons de mélèze et de pin ont également été trouvés (Vysloužilová *et al.*, 2014).

7.6.2. Apports de la SPIR aux questions paléo-environnementales

Le référentiel bipartite (forêt-prairie) établi par Ertlen *et al.* (2010) et son application à des profils de sol dans le but de reconstituer l'histoire de la végétation (Ertlen 2009) avait déjà montré la robustesse de cette approche. Les premiers tests réalisés dans le cadre de cette thèse avaient montré des faiblesses concernant les sols développés sur lœss. C'est pourquoi un référentiel spécifique aux sols sur lœss et centrés sur les chernozems a été développé. Nous avons vu dans le chapitre 6 la robustesse de ce référentiel. L'application du modèle qui en découle à des profils de sol confirme cette robustesse. En effet, les premiers centimètres voir les premiers décimètres des profils sont toujours classés correctement en comparaison avec la végétation observée sur les sites lors des campagnes de terrain. Les évolutions des scores avec la profondeur suggère que :

- La majorité des chernozems actuellement sous prairie ont un passé exclusivement prairial.
- Certains chernozems actuellement sous prairies ont subi une légère influence forestière.
- La totalité des chernozems actuellement sous forêt à un passé prairial.

Ceci renforce l'idée que les chernozems sont des sols prairiaux et que leur développement se fait nécessairement sous une végétation ouverte (Němeček *et al.*, 2001, FAO/ISRIC/ISSS, 2006 ; Altermann *et al.*, 2005). En revanche, la préservation de chernozems sous une végétation forestière n'est pas exclue et la dégradation de ces derniers vers d'autre type de sol pourraient prendre plusieurs millénaires comme suggéré par Alexandrovskyi (2000).

Concernant les paléosols, les résultats de la SPIR nous renseignent surtout sur la végétation présente directement avant l'enfouissement du paléosol et éventuellement sur les quelques siècles ou décennies qui l'on précédées. Cette végétation n'est pas nécessairement celle de la genèse et du développement du chernozem. Toutefois ces résultats confirment que dans la première moitié de l'Holocène certains chernozem se sont maintenus sous une végétation forestière. Cette signature est parfois celle enregistrée au moment de l'enfouissement ou est parfois plus ancienne. Pour les profils pléistocènes du site de Zeměchy, c'est plutôt une signature intermédiaire continue qui est enregistrée qui signifie

plutôt la présence d'une végétation intermédiaire stable de type forêt steppe. Ceci est en accord avec la présence de charbons de bois de conifères et rappelle les forêts steppe d'Asie Centrale (fig. 8.2).

7.7. Conclusion

Nous avons appliqué les librairies spectrales décrites dans le chapitre 6 sur l'ensemble des échantillons prélevés et déterminé l'origine végétale de la MO des profils analysés. Les résultats montrent que la librairie spectrale bipartite a une bonne capacité de distinguer l'origine de la MO soit prairiale, soit forestière. Du point de vue écosystémique, notre librairie spectrale de référence bipartite est encore limitée. Les distinctions entre différents types de prairie et de steppes boisées ou non n'est pas possible pour l'instant pour des raisons d'échantillonnage ou de définition de ces écosystèmes. Cependant, la SPIR permet déjà de distinguer avec une certaine confiance les écosystèmes ouverts des écosystèmes fermés ce qui constitue un point clef pour répondre aux questions de ce travail de thèse sur les conditions environnementales de la pédogénèse des chernozems. Par contre, l'application de la librairie spectrale tripartite (prairie-forêt-culture) n'a pas apporté un résultat fiable. L'application de la librairie spectrale tripartite (forêts feuillues, mixtes et de conifère) a montré un résultat fiable, néanmoins cette librairie exigera un élargissement de la population de référence.

Chapitre 8

L'analyse pédoanthracologique des paléosols

Nous présenterons ici le résultat des analyses de charbons de bois extraits des sols et les interprétations qui peuvent en être faites. Les sols analysés sont les paléochernozems holocènes de Kolín et de Poplze, et les sols pléistocènes de la série de loess de Zeměchy, à savoir un luvisol et trois paléochernozems (Danková, 2012 ; Vysloužilová *et al.*, 2014).

8.1. Analyse quantitative : les anthracomasses spécifiques

Les charbons sont relativement abondants dans les sols analysés, avec toutefois des variations importantes d'un sol à l'autre. Les données quantitatives, nombre de charbons identifiés et anthracomasses sont présentées dans le tableau 8.1.

Le nombre de charbons n'est pas un très bon indice de l'abondance des charbons. En effet, avec le temps et selon l'espèce, les conditions de conservation ou encore le degré de carbonisation, les charbons se fragmentent en morceaux de plus en plus petits... et abondants. On ne donnera ici le nombre de charbons qu'à titre indicatif. La mesure de l'anthracomasse est plus fiable pour estimer l'abondance des charbons dans les sols. On notera toutefois que dans notre cas le nombre de charbons identifiés varie exactement dans le même sens que l'anthracomasse (tabl. 8.1). L'anthracomasse spécifique est le rapport entre la masse totale des charbons de bois extraits et la masse totale des particules de taille inférieure à 5 mm (Thinon, 1992). En autres termes, cette valeur correspond à la richesse en charbons de bois des niveaux analysés (Carcaillet et Thinon, 1996).

Sol	Kolín	Poplze	Zeměchy	Zeměchy	Zeměchy	Zeměchy
			C3	C2	C1	L
Masse de sol échantillonné (kg)	23,4	14,3	6,9	5,2	6,6	4,7
Nombre de charbons identifiés	24	27	93	289	86	4
Anthracomasse spécifique (mg.kg ⁻¹)	7	12	93	354	93	2

Tableau 8.1. Le contenu en charbon de bois des sols analysés

La plus grande anthracomasse a été relevée dans les trois chernozems fossiles du Pléistocène de Zeměchy. Elle est particulièrement élevée dans le paléosol C2 (354 mg.kg⁻¹). A l'inverse, l'anthracomasse la plus faible a été observée dans le luvisol du même site. Les paléochernozems holocènes sont un cas intermédiaire. Il est possible de comparer cette anthracomasse à celle relevée par d'autres auteurs. Dans les Vosges, les anthracomasses spécifiques de différents sols du Rossberg et du massif du Hohneck sont comprises entre 4 et 350 mg.kg⁻¹ (Goepp, 2007). Ce n'est que dans les horizons d'altération qu'elle baissent à 0,3-1 mg.kg⁻¹ de sol. En règle générale, elles sont comprises entre 10 et 120 mg.kg⁻¹ de sol. Ces valeurs sont considérées comme très élevées. Dans les Alpes, Talon (1997) observe des valeurs inférieures à 1 mg.kg⁻¹ dans des sols de pelouses défrichés à l'Age du Bronze et situés entre 2400 et 2700 m. Par comparaison, la valeur des anthracomasses spécifiques est très élevée pour les trois paléochernozems de Zeměchy. Bien que plus faibles, celles des chernozems holocènes demeurent conséquentes. Il n'y a guère que le luvisol de Zeměchy dont les valeurs soient faibles dans l'absolu.

8.2. Identification des taxons végétaux des charbons de bois

8.2.1. Introduction

Les charbons collectés dans les échantillons de sol ont été analysés sous microscope dans le but d'en identifier les taxons végétaux. Si la simple présence de charbons renseigne sur la présence des plantes ligneuses dans le paysage local (voir par exemple Théry-Parisot *et al.*, 2010; Novák *et al.* ; 2012) leur identification permet quelquefois d'arriver à des conclusions paléoenvironnementales plus précises, ou d'aborder le rôle de l'homme. Ainsi, dans les Vosges, la plupart des charbons présentés par Schwartz *et al.* (2005) appartiennent à des essences tout à fait banales, n'apportant guère de connaissances nouvelles. Mais la présence vers 2100 BP de charbons de *Juniperus communis* témoigne, dans le contexte local, d'une phase de fermeture de milieux ouverts, l'espèce étant dans les Vosges une pionnière. Deux enseignements importants en ressortent : la présence antérieure de pâturages gagnés sur la forêt, et l'existence d'une phase de déprise agricole marquée par du sous-pâturage ou par l'abandon complet du milieu.

Les résultats de l'étude anatomique des charbons collectés dans les paléosols sont présentés sous forme de graphes (fig. 8.1. et 8.3.) et dans le tableau 8.2. Précisons que les pourcentages de fréquence des espèces donnés par ces graphes ne sont qu'indicatifs, en raison du faible nombre de charbons de certains sols et des risques de biais liés à une fragmentation préférentielle. Ils montrent toutefois qu'il y a deux groupes de sols. Les paléosols pléistocènes se caractérisent principalement par la présence de charbons de conifères, tandis que ceux des paléochernozems holocènes appartiennent en majorité à des espèces feuillues.

Site	Kolín	Poplze	Zeměchy C1	Zeměchy C2	Zeměchy C3	Zeměchy L
<i>Pinus</i> sp.	-	-	7	7	15	4
<i>Pinus</i> cf. <i>cembra</i>	-	-	70	0	0	0
<i>Larix</i> (<i>Picea</i>)	-	-	0	282	78	0
<i>Juniperus</i>	-	-	7	0	0	0
<i>Vaccinium</i>	-	-	2	0	0	0
<i>Alnus</i> sp./ <i>Corylus avellana</i>	1	0	-	-	-	-
<i>Betulaceae/Corylaceae</i>	1	0	-	-	-	-
<i>Pinus t. sylvestris</i>	2	0	-	-	-	-
<i>Malodideae</i>	1	2	-	-	-	-
<i>Quercus</i> sp. (décidu)	10	20	-	-	-	-
cf. <i>Quercus</i>	0	1	-	-	-	-
<i>Ulmus</i> sp.	2	0	-	-	-	-
Une espèce feuillue non identifiable	2	0	-	-	-	-
Nombre total de charbons identifiés	20	24	86	289	93	4
Non identifiables	4	3	-	-	-	-

Tableau 8.2. Identification des charbons de bois des différents paléosols

8.2.2. Les paléosols pléistocènes (Zeměchy)

A Zeměchy, les taxons de plantes ligneuses identifiés dans les quatre sols étudiés sont les suivants : *Pinus* sp., *Pinus* cf. *cembra*, *Larix/Picea*, *Juniperus* et *Vaccinium*. Le terme de *Pinus* cf. *cembra* signifie que l'appartenance à l'espèce *Pinus cembra* (Pin cembro) est probable, mais pas certaine. Celui de *Pinus* sp. signifie que les caractères anatomiques ne permettent pas de rapporter le charbon à une espèce précise du genre *Pinus*. Il est possible qu'il s'agisse dans certains cas de *P. cembra*, mais lorsque les charbons sont petits, l'anatomie ne permet pas toujours de trancher. Le taxon de *Larix/Picea* est utilisé parce que la différenciation de ces deux genres est difficile sur une base anatomique.

Les charbons de conifères sont présents dans tous les niveaux de Zeměchy examinés (figure 8.1.). *Larix/Picea* est dominant dans les paléochernozems C2 et C3. Dans le

paléochernozem C1 et le luvisol L, ce sont essentiellement des charbons de *Pinus* qui ont été identifiés. Les autres familles représentées sont les Ericacées avec *Vaccinium* et les Cupressacées avec *Juniperus*, mais ces taxons sont plus rares. L'ensemble de ces taxons a des caractères de pionniers héliophiles très tolérants aux climats froids. C'est le cas de nombreuses espèces du genre *Pinus* (Novák, 2009). *Larix/Picea* et *Juniperus* sont des taxons, généralement héliophiles, tolérant les climats froids et humides. Actuellement, ces espèces ligneuses prévalent dans les régions montagneuses et dans la taïga, mais elles se présentent également dans les zones de steppe. Par exemple, *Larix Sibirica* en Sibérie Occidentale ou *L. gmelinii* en Sibérie orientale et dans les écosystèmes de forêt-steppe en Mongolie (fig. 8.2.). *Pinus cembra* est tolérant à l'ombre (Carcaillet et Thinon, 1996). Plusieurs espèces du genre *Vaccinium* sont des sous-arbrisseaux ligneux associés aux espèces arborées décrites ci-dessus, notamment dans les clairières et en lisière. Pour sa part, *Juniperus* est typique des stades initiaux de reconquête forestière, notamment après une phase de déprise agricole, ce qui n'est évidemment pas le cas au Pléistocène.

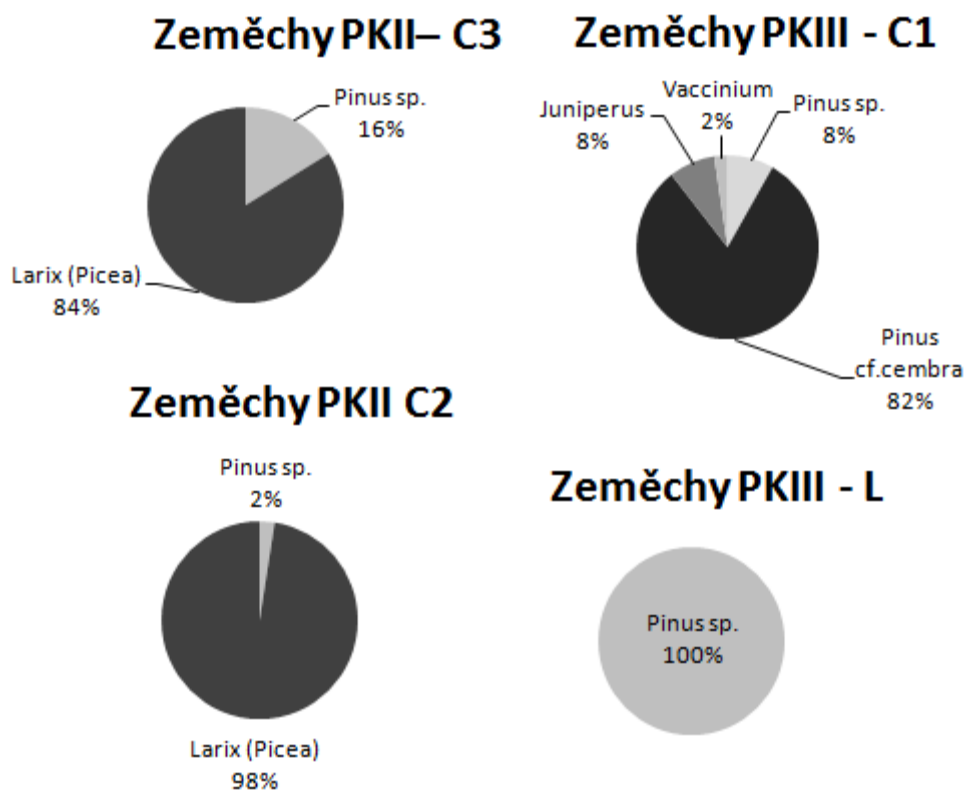


Figure 8.1. La représentation des espèces ligneuses dans les paléosols de la séquence de loess de Zeměchy



Figure 8.2. La steppe boisée à *Larix (gmelinii ?)* en Mongolie. Photo : D. Schwartz

8.2.3. Les paléosols holocènes (Kolín et Poplze)

A Kolín, les charbons appartiennent à six taxons (figure 8.3.) : *Alnus* sp./*Corylus avellana*, Bétulacées/Corylaceae indéterminée, *Pinus* t. *sylvestris*, Malodidaeae (= Pomoideae), *Quercus* sp. (décidu) et *Ulmus* sp. Les âges radiocarbone de deux fragments de charbons de bois trouvés dans le paléochernozem montrent que le sol a dû être fonctionnel au moins jusqu'au 5ème siècle après J.C. : un charbon de *Corylus* a été daté de 533 ± 102 cal. AD, et un charbon de Malodidaeae de 324 ± 85 cal. AD. Les plus abondants sont les charbons de *Quercus*.

La diversité des espèces est plus faible dans le sol de Poplze où seuls *Quercus* et des Malodidaeae ont été identifiés. Certains charbons n'ont pas été identifiables à cause de leur fragilité et de leur taille minuscule.

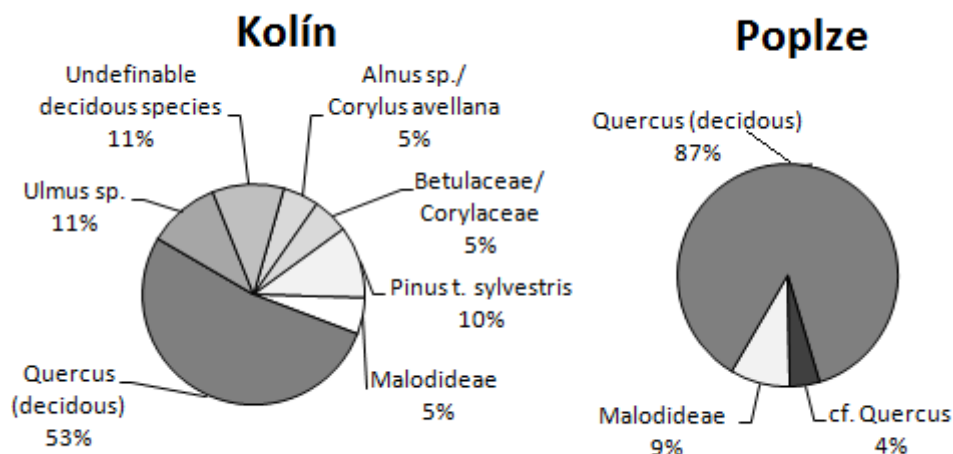


Figure 8.3. La représentation des espèces ligneuses dans les paléosols de l'Holocène

8.3. Discussion

8.3.1. Les paléosols pléistocènes

La présence systématique de charbons dans les quatre paléosols de Zeměchy est une preuve que le couvert végétal local n'a pas été de la steppe pure. Si on compare ces résultats avec les ensembles de données anthracologiques d'autres régions d'Europe Centrale et d'Europe de l'Est à l'Interglaciaire Eemien, celles-ci montrent une dominante de Gymnospermes, en particulier des taxons de Conifères comme *Pinus*, *Larix* ou *Picea*, mais aussi *Juniperus* et *Taxus*, et moins souvent *Abies*. Parfois, des charbons de bois de feuillus comme *Acer*, *Betula*, *Carpinus*, *Corylus*, *Fagus*, *Fraxinus*, *Hippophae*, *Populus*, *Quercus*, *Rhamnus*, *Salix*, *Sorbus*, *Tilia* ou *Ulmus* ont également été identifiés (Jankovská et Pokorný, 2008 ; Rybníčková et Rybníček, 1991 ; Slavíková-Veselá, 1951 ; Willis *et al.*, 2000 ; Willis et van Andel, 2004 ; Nývtová Fišáková *et al.*, 2008 ; Kuneš *et al.*, 2008). Globalement, la représentation des taxons végétaux de Zeměchy au cours des derniers Interglaciaires et Glaciaires correspond aux résultats provenant d'autres sites d'Europe centrale, à l'exception de *Vaccinium* sp. qui n'apparaît nulle part ailleurs.

On peut fournir une interprétation plus détaillée, paléosol par paléosol. Les données anthracologiques du luvisol L du PKIII ne sont pas statistiquement significatives avec seulement 4 fragments de charbon de bois identifiés, qui montrent toutefois la présence d'un *Pinus* sp. Il peut sembler paradoxal que le luvisol, censé s'être formé sous forêt soit moins riche en charbons que les chernozems, supposés caractéristiques des steppes. La faible occurrence de charbons dans cette couche peut avoir pour origine de nombreuses raisons : le type de végétation brûlée, l'érosion ou la pédoturbation (Figueriral et Mosbrugger, 2000 ; Carcaillet et Vernet, 2001). On peut aussi faire l'hypothèse qu'une végétation plus tempérée est moins sensible aux incendies que, par exemple, les forêts boréales dont semblent se

rapprocher les formations ligneuses des paléochernozems. Celles-ci sont en effet connues pour être sujet périodiquement à des incendies naturels allumés par des éclairs, comme cela a été montré en Suède (Carcaillet *et al.*, 2007) ou au Canada (Carcaillet et Richard, 2000).

Le chernozem du PKIII (C1) qui le recouvre s'est vraisemblablement développé au début du dernier Glaciaire. Dans un tel climat, les plantes exigeantes ont reculé au profit de conifères résistant aux froids tels que *Pinus*, *Picea* et *Abies*, lesquels ont également reculé à la fin de l'Interglaciaire au bénéfice des steppes et des toundras froides (Ložek, 1973). La présence abondante dans le paléochernozem C1 de charbons de bois de *Pinus* sp, *Pinus* cf. *cembra*, *Juniperus* et *Vaccinium* est cohérente avec ce schéma. Ces espèces photophiles sont en effet tolérantes à des conditions froides et sèches. On peut faire l'hypothèse raisonnable que le chernozem se soit développé, ou ait évolué, dans un paysage de taïga clairsemée où la steppe a alterné avec des zones de forêt plus dense (Nývltová Fišáková *et al.*, 2008).

Les paléochernozems C2 et C3 du PK II se sont développés au cours des deux derniers interstades du dernier Glaciaire lorsque la végétation forestière, une taïga composée surtout de *Pinus*, *Picea* et *Larix*, s'est développée (Kuneš, 2008). L'analyse des charbons de bois de deux chernozems de PK II n'a révélé la présence que de *Picea/Larix* et *Pinus* sp. Les charbons de bois de *Larix* sont hyper-dominants dans la couche C2, un peu moins dans le niveau C3. Cette domination de *Larix* indique des conditions fraîches. Le paysage pourrait avoir été assez proche de celui présenté sur la figure 8.2., à savoir des forêts-steppes. Ces conclusions sont cependant en contradiction avec les données malacologiques. En effet, la couche C2 contient des coquilles de *Chondrula tridens*, qui est une espèce typique d'un environnement steppique (Ložek, 1995). Peut-être les deux types de végétation, steppe pure et forêt-steppe étaient-elles présentes à des échelles très locales, comme sur la photo de la figure 8.2. Dans ce cas, la contradiction ne serait qu'apparente.

8.3.2. Les paléosols holocènes

Les analyses pédoanthracologiques sur les deux sites de Kolín et Poplze sont plus difficiles à interpréter. La logique voudrait que les charbons appartiennent à des végétations de l'Holocène inférieur ou moyen, mais les deux datations effectuées nous renvoient au début de notre ère. Il est donc difficile de caler chronologiquement les identifications, même si les espèces identifiées collent bien avec l'image donnée par d'autres sites holocènes. Il est vraisemblable qu'une partie des charbons date de l'Holocène moyen ou inférieur et que d'autres soient arrivés plus tardivement dans le sol, jusqu'à son enfouissement par des colluvions aux époques historiques. Il n'est pas possible d'aller plus loin dans les interprétations, d'autant plus que les taxons identifiés sont encore très présents de nos jours.

Les résultats montrent toutefois que des arbres à feuilles caduques ont été présents sur les chernozems, mais la question de la densité du couvert végétal arboré reste incertaine. D'autres analyses anthracologiques sur des chernozems à l'Holocène sont très rares en Bohême. Une grande étude réalisée à Bylany, dans le cadre de recherches archéologiques sur un site LBK à proximité de Kolín, suggère la présence d'un bois de chêne à proximité. La composition des charbons est dominée par *Quercus* avec une partie de *Salix*,

Sorbus, Tilia, Ulmus, Abies, Acer, Alnus, Betula, Carpinus, Cornus, Corylus, Fagus, Fraxinus, Juniperus, Malus, Pinus, Populus, Prunus et *Pyrus*. Cette composition ne traduit pas une influence humaine importante dans le couvert végétal de Bylany (Peške *et al.*, 1998). Les compositions floristiques des charbons de bois de Kolín et de Poplze correspondent aussi à la synthèse de résultats pédoanthracologiques autour des stations LBK en Allemagne (Kreuz, 2008) et en Hongrie (Moskal del Hayo, 2013) qui ont également montré la prépondérance de diverses espèces feuillues, mais spécialement de *Quercus*. Par contre, nous n'avons identifié aucun charbon de *Fraxinus*. Parmi les espèces de conifères, nous n'avons identifié que *Pinus*. Kreuz (2008) souligne la présence très faible de *Picea*. Aucune information fiable ne peut être obtenue à partir de données palynologiques qui sont basées sur des marécages ou environnement humide isolés des régions chernozemiques. Néanmoins Gaillard *et al.* (2010) reconstruisent la végétation en République tchèque en rassemblant toutes les données palynologiques. Selon ces auteurs, les régions chernozemiques étaient principalement couvertes vers 6000 BP par des prairies avec une représentation faible de *Picea, Pinus, Juniperus, Abies, Carpinus, Fagus, Tilia, Ulmus, Quercus* et *Salix*. La reconstruction de la végétation sur la base de preuves malacologiques montre que les régions d'extension de chernozems ont été couvertes par une steppe boisée (Ložek et Smolíková, 1978 ; Ložek, 2004).

8.4. Conclusion

Les résultats des analyses pédoanthracologiques témoignent de la présence d'arbres ou arbustes sur les chernozems dans le passé. Clairement, ces sols se sont formés ou ont évolué à un moment donné de leur histoire sous un couvert végétal qui n'était pas constitué d'une steppe pure. Cela implique que la présence de paléochernozems dans des séries stratigraphiques n'est pas automatiquement la preuve d'un environnement steppique. Il est toutefois impossible de reconstituer la densité du couvert végétal sur la base des seules analyses pédoanthracologiques. Entre une taïga (ou équivalent montagnard) dense et des forêts-steppes telles que celle présentée sur la figure 8.2., il est impossible de trancher, d'autant que le nombre de sols analysés est pour l'instant faible.

Chapitre 9

Analyse de la catena chernozem – luvisol de Hrušov

L'objectif du chapitre 9 est de présenter les données acquises sur le site de Hrušov, où une catena chernozem - luvisol a été étudiée à l'échelle spatiale élémentaire de quelques centaines de mètres. Cette catena a été présentée en détail au chapitre 4.7. Nous reprenons ci-dessous la figure 4.18 (sous le nom de figure 9.1) qui permet de visualiser la localisation des profils les uns par rapport aux autres. Notons que la topographie est considérablement exagérée. Dans la réalité, la pente maximale, entre le profil HRU 24 et HRU 25, est de 0,6 %, presque imperceptible à l'oeil. A l'aide d'approches pédologiques variées, nous essayerons de comprendre les raisons de la coexistence entre chernozem et luvisol, sols dont les processus de pédogenèse diffèrent considérablement, alors que les facteurs de milieu sont ici identiques : roche-mère formée de loess, topographie, climat. D'abord nous présenterons le résultat des analyses pédologiques. Puis, l'analyse SPIR qualitative des MO du sol sera appliquée pour expliquer l'évolution de la végétation dans le passé. L'étude micromorphologique a ensuite été appliquée pour appréhender la transformation éventuelle d'un des types de sol vers l'autre.

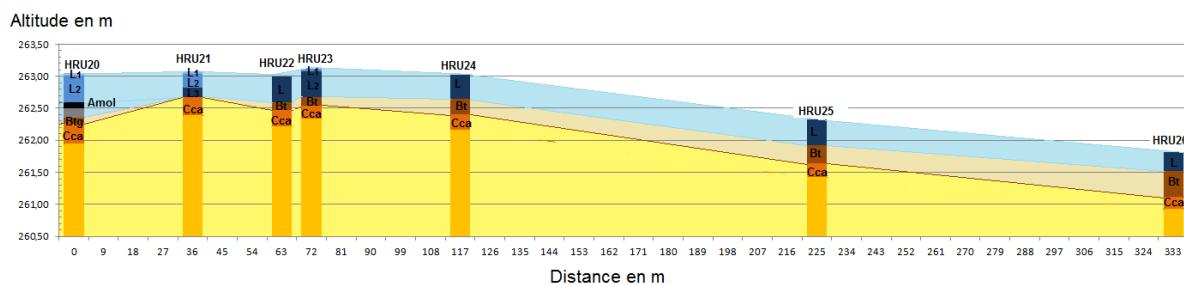


Figure 9.1. La catena de Hrušov

9.1. Caractéristiques physico-chimiques des sols de la catena chernozem-luvisol

L'ensemble des sols prélevés sur le site de Hrušov a fait l'objet d'analyses physico-chimiques. Nous avons mesuré systématiquement, le pH, la teneur en CaCO₃ et la composition granulométrique. Les teneurs en carbone n'ont pas été mesurées, mais prédites en SPIR quantitative (cf. paragraphe 7.1.2). Seules les valeurs significatives ont été conservées. L'ensemble des résultats est présenté dans le tableau 9.1. Pour les interprétations des analyses physico-chimiques, nous devons tenir compte du fait que les sols se trouvent sous culture. Ils sont exploités de manière intensive ; les techniques culturales comprennent l'application d'amendements agricoles fréquents et des labours profonds, jusqu'à 45 cm, les années où est cultivée la betterave sucrière.

Sol	Prof. (cm)	Granulométrie (%)					Propriétés chimiques			
		A	LF	LG	SF	SG	CaCO ₃ (%)	pH	Corg (%)	MO (%)
HRU20	5	24,30	31,80	31,40	12,50	0,00	1,39	7,41	1,44*	4,97
HRU20	35	24,50	33,50	32,00	10,00	0,00	1,69	7,60	0,91*	4,17
HRU20	47,5	23,70	35,60	32,10	8,60	0,00	1,67	7,56	0,15*	4,22
HRU20	52,5	22,90	34,90	32,30	9,90	0,00	1,67	7,56	0,14*	3,83
HRU20	57,5	22,60	34,40	32,40	10,60	0,00	1,67	7,51	0,22*	4,13
HRU20	62,5	23,00	35,70	31,40	9,90	0,00	1,60	7,66	0,30*	3,20
HRU20	72,5	21,90	35,00	33,20	9,90	0,00	1,64	7,61	-*	2,70
HRU20	82,5	20,40	33,40	33,60	12,60	0,00	1,60	7,59	-*	2,49
HRU20	92,5	19,10	33,50	33,80	13,60	0,00	1,38	7,83	-*	2,22
HRU21	5	15,80	32,70	35,50	14,60	1,40	1,40	7,63	1,39*	4,21
HRU21	35	25,40	35,00	28,80	10,80	0,00	3,00	7,89	1,17*	3,20
HRU21	47,5	25,00	35,20	28,50	11,30	0,00	20,15	7,94	-*	1,85
HRU21	57,5	25,30	36,40	28,30	10,00	0,00	30,85	7,99	-*	1,57
HRU23	5	22,80	33,20	31,10	10,80	2,10	2,37	7,87	1,39*	3,91
HRU23	35	21,30	29,50	28,60	11,00	9,60	2,58	8,06	1,16*	3,14
HRU23	47,5	23,70	33,00	31,10	12,20	0,00	1,37	8,00	-*	2,72
HRU23	52,5	22,60	32,60	32,30	12,50	0,00	1,39	7,76	-*	2,53
HRU23	62,5	23,00	35,20	31,10	10,70	0,00	16,18	7,93	-*	1,79
HRU23	72,5	20,20	32,70	33,90	13,20	0,00	15,46	8,07	-*	1,49
HRU24	5	20,80	28,80	30,30	14,30	5,80	0,84	7,62	1,89*	4,10
HRU24	30	20,00	32,10	29,10	13,20	5,60	0,96	8,05	1,85*	3,82
HRU24	42,5	26,00	33,30	31,80	8,90	0,00	2,02	8,18	0,45*	2,84
HRU24	47,5	26,40	32,30	30,70	10,60	0,00	1,93	8,05	-*	2,81
HRU24	52,5	24,90	33,10	32,10	9,90	0,00	1,13	8,11	-*	2,74
HRU24	57,5	23,00	32,00	32,80	12,20	0,00	1,18	8,17	-*	2,58
HRU24	67,5	15,40	35,40	34,70	14,50	0,00	14,45	8,23	-*	3,57

Sol	Prof. (cm)	Granulométrie (%)					Propriétés chimiques			
		A	LF	LG	SF	SG	CaCO ₃ (%)	pH	Corg (%)	MO (%)
HRU24	77,5	23,80	33,80	30,30	12,10	0,00	21,18	8,31	-*	1,46
HRU25	5	21,10	31,10	32,60	13,20	2,00	1,25	6,71	1,95*	3,68
HRU25	27,5	21,40	32,00	33,80	12,80	0,00	0,97	7,20	1,89*	3,80
HRU25	42,5	21,90	31,70	34,10	12,30	0,00	1,15	7,47	-*	3,30
HRU25	52,5	24,50	32,20	33,40	9,90	0,00	1,38	7,30	-*	3,32
HRU25	62,5	19,10	30,70	35,10	15,10	0,00	1,47	7,88	-*	2,61
HRU25	72,5	22,30	33,50	31,20	13,00	0,00	23,66	8,32	-*	1,92
HRU26	5	24,20	30,00	29,80	12,60	3,40	1,62	6,74	1,53*	3,84
HRU26	25	21,50	31,50	34,00	13,00	0,00	1,19	7,00	0,46*	3,70
HRU26	32,5	23,00	31,80	32,80	12,40	0,00	1,40	7,16	0*	3,44
HRU26	42,5	22,20	29,90	35,10	12,80	0,00	1,17	7,21	-*	3,59
HRU26	52,5	21,30	32,30	35,30	11,10	0,00	1,53	7,47	-*	3,19
HRU26	62,5	21,20	30,80	34,80	13,20	0,00	1,18	7,18	-*	3,03
HRU26	72,5	23,30	33,00	32,20	11,50	0,00	16,28	8,27	-*	1,61

Tableau 9.1. Principales caractéristiques physico-chimiques de la catena de Hrušov. N.B. : Corg sont des valeurs prédites en SPIR quantitative. Lorsque la valeur est remplacée par les symboles « -* », la prédiction est rejetée car l'erreur-standard est supérieure à 1,5 ; la MO a été mesurée par la méthode de la perte au feu, qui surestime le taux réel.

9.1.1. La prédiction des teneurs en carbone

La teneur prédite en carbone organique est comprise pour les sols étudiés entre 0 et 2 % (fig. 9.2). Nous observons que la teneur en Corg est relativement stable dans les horizons de labour des profils étudiés. Le chernozem « à Bt » montre une tendance à la décroissance lente de la teneur en Corg avec la profondeur. Dans les luvisols, les teneurs en Corg chutent brutalement sous l'horizon de labour, c'est-à-dire dans l'horizon BT.

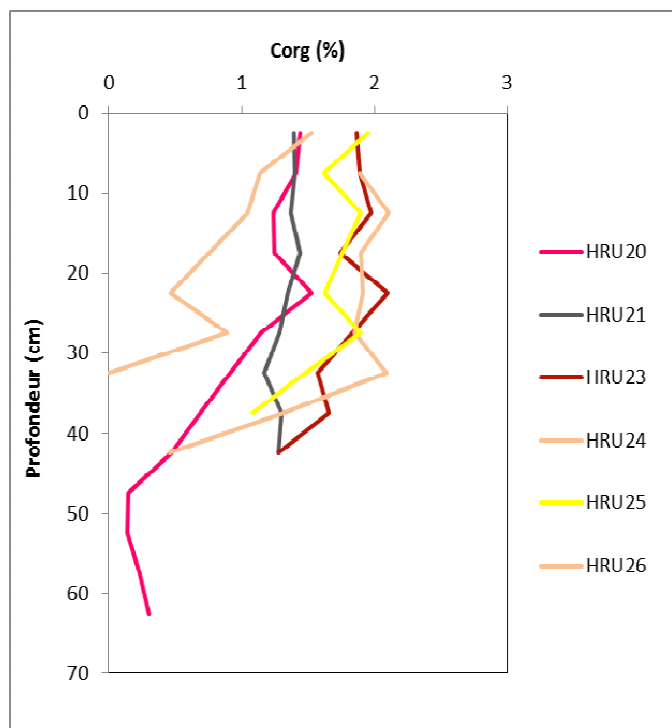


Figure 9.2. Teneur en carbone organique (prédite par la SPIR quantitative) pour les sols de Hrušov.

En comparant les données de carbone prédites aux mesures directes de la teneur en matière organique par la méthode de la perte au feu (PAF), nous observons des différences dans les résultats. Les teneurs en matière organique sont en principe 1,7 à 2 fois (selon le coefficient appliqué) les teneurs en carbone organique. Il est clair que la PAF sur-estime les teneurs en matière organique. C'est particulièrement net dans les horizons BT, où la PAF annonce des valeurs de l'ordre de 2 %.

9.1.2. Les valeurs du pH

Dans les sols de Hrušov, les valeurs extrêmes du pH sont comprises entre 6,7 et 8,4 (fig. 9.3). En fait, en dehors de trois valeurs inférieures à 7 dans les horizons de surface des luvisols HRU 25 et 26, et des valeurs de l'ordre de 8,3-8,4 dans les horizons C loessiques, la plupart des valeurs est comprise entre 7,3 et 7,8. Les différences entre chernozems et luvisols (HRU 24 à 26) et les chernozems (HRU 20 à 23) sont peu marquées en raison des amendements calcimagnésiques agricoles (nous avons observé des fragments de chaux sur le terrain et en micromorphologie) épandus sur les sols. En règle générale, le pH augmente avec la profondeur dans tous les sols.

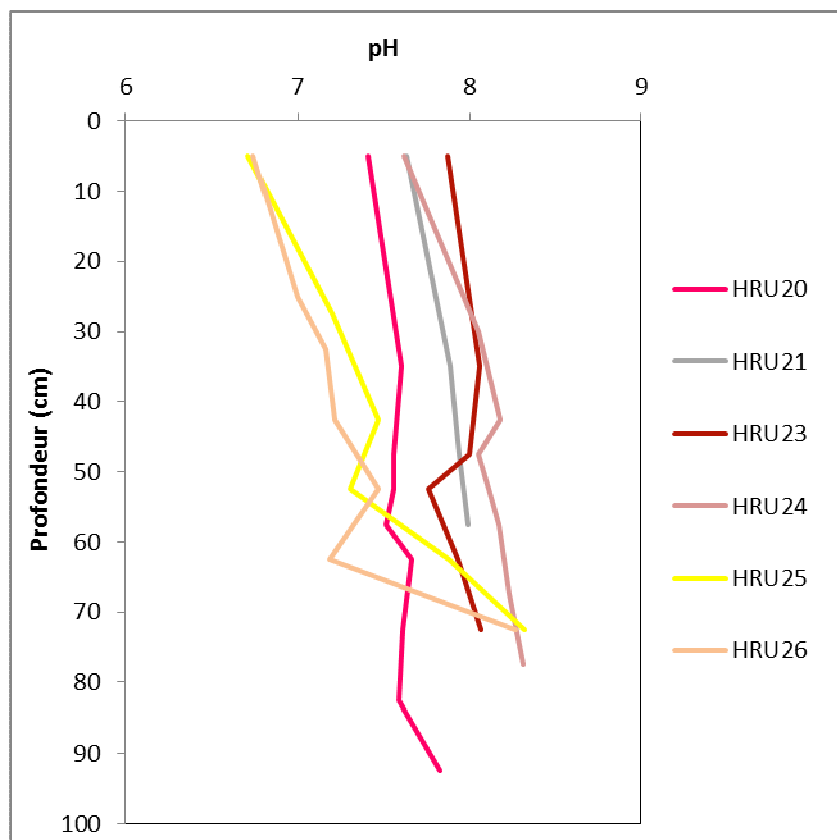


Figure 9.3. Valeurs de pH dans les sols de Hrušov

9.1.3. Teneurs en carbonates

Tous les sols étudiés contiennent du CaCO_3 . Dans les horizons de surface, la teneur en CaCO_3 est faible, comprise entre 0 et 3 %. Elle augmente à des profondeurs variables selon le sol, mais toujours très brutalement (fig. 9.4). Son maximum est atteint dans l'horizon C lœssique. Un sol fait exception : le chernozem à BT HRU 20, dans lequel la teneur en carbonates reste faible en profondeur, ce qui a été aussi observé sur le terrain, lors des tests HCl. A cette exception près, c'est, de façon tout à fait normale, dans les luvisols que les teneurs en carbonates restent les plus faibles jusqu'en profondeur.

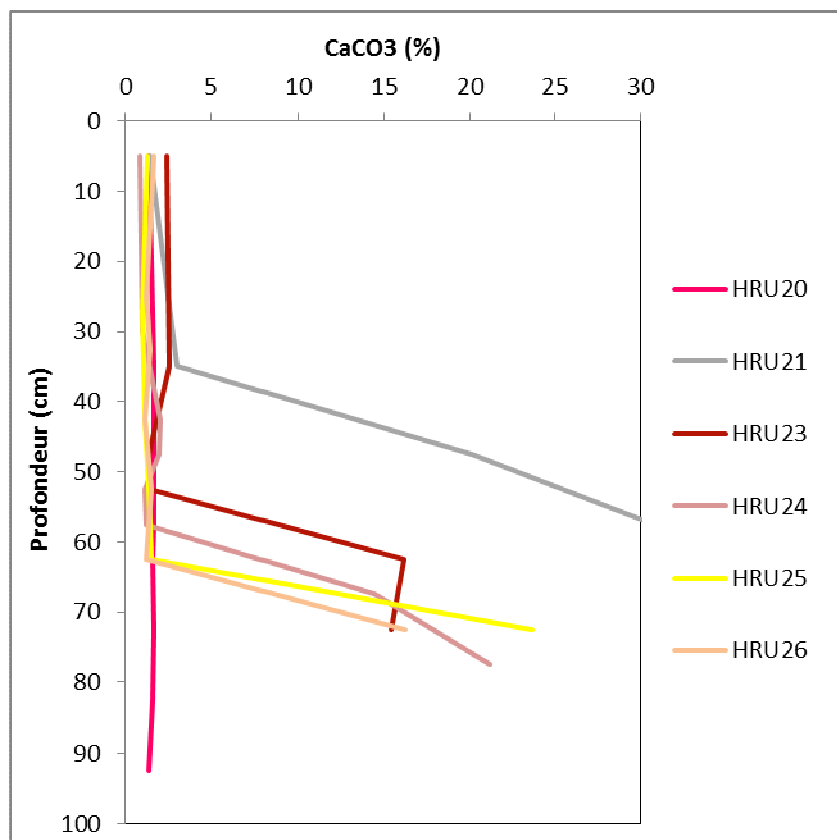


Figure 9.4. Teneur en carbonates des sols de la catena de Hrušov

9.1.4. Composition granulométrique

Les granulométries ont été faites sans décarbonatation. Nous observons que la fraction prépondérante dans tous les sols étudiés est la fraction limoneuse. Elle représente en général entre 63 et 68 % de la fraction minérale, les teneurs étant relativement constantes au sein d'un sol. La fraction argileuse représente entre 15 et 26 % selon les sols (fig. 9.5). Curieusement, cette teneur est relativement constante, à l'exception du luvisol HRU 24, dans lequel un ventre d'argile apparaît nettement dans l'horizon BT. Cette tendance est nettement moins marquée dans le luvisol HRU25 et pas du tout dans le HRU 26, alors que morphologiquement, sur le terrain (et en micromorphologie), ces deux profils sont clairement des luvisols. On notera aussi que la teneur en argile des loess est importante. Elle est du même ordre de grandeur que dans les horizons supérieurs, 20 à 23 %. La teneur en sables fins est de l'ordre de 10 à 14 %, celle en sables grossiers est nulle ou presque. Il semble que les quelques sables grossiers soient en fait des résidus d'éléments anthropiques (briques, grains de chaux,...).

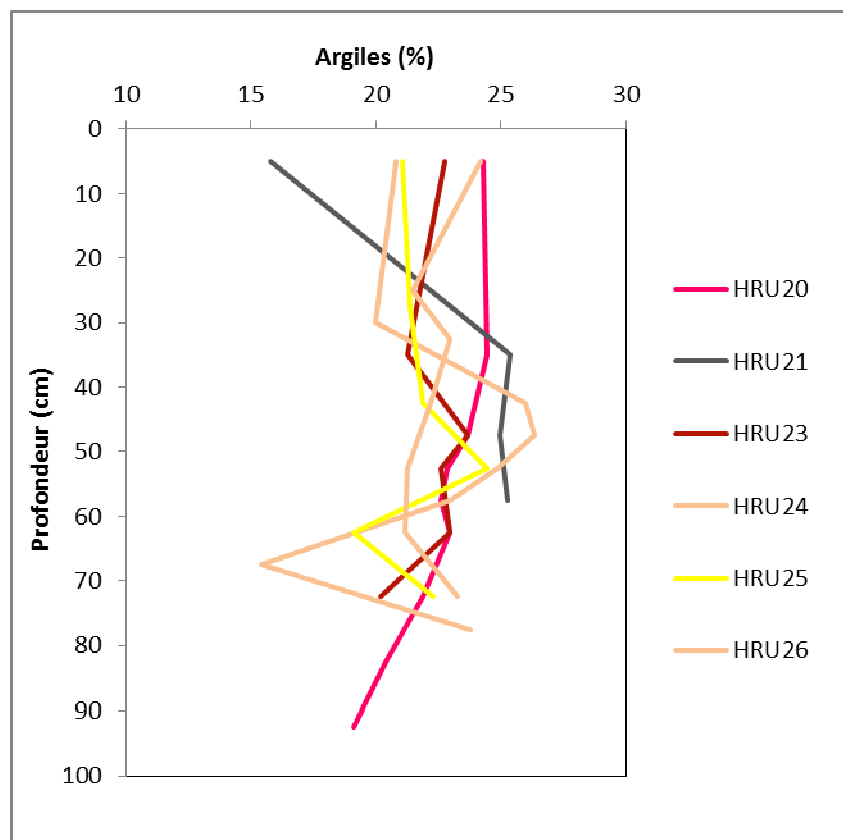


Figure 9.5. Teneurs en argiles des sols de Hrušov

9.2. Les données de la SPIRqual

En continuité des chapitres 7.3 et 7.4 où nous avons présenté l'application de la librairie spectrale bipartite (prairies et forêts) et la librairie spectrale tripartite (prairie, forêts, culture), nous montrerons les résultats de la même démarche pour les sols de Hrušov.

9.2.1. Application de la librairie spectrale bipartite

Sur la figure 7.7 (chap. 7) nous avons présenté l'histogramme des scores de la fonction canonique qui concernait l'analyse de la totalité des échantillons inconnus. Si nous extrayons les scores pour les seuls sols de Hrušov (fig. 9.6), nous observons un pic vers -2 , c'est-à-dire dans la gamme de la végétation intermédiaire entre forêts et prairies. Une partie des échantillons se place toutefois directement dans la gamme de scores de référence définis pour les prairies. L'ensemble des scores est plus proche de la référence « prairie » que de la référence « forêt ».

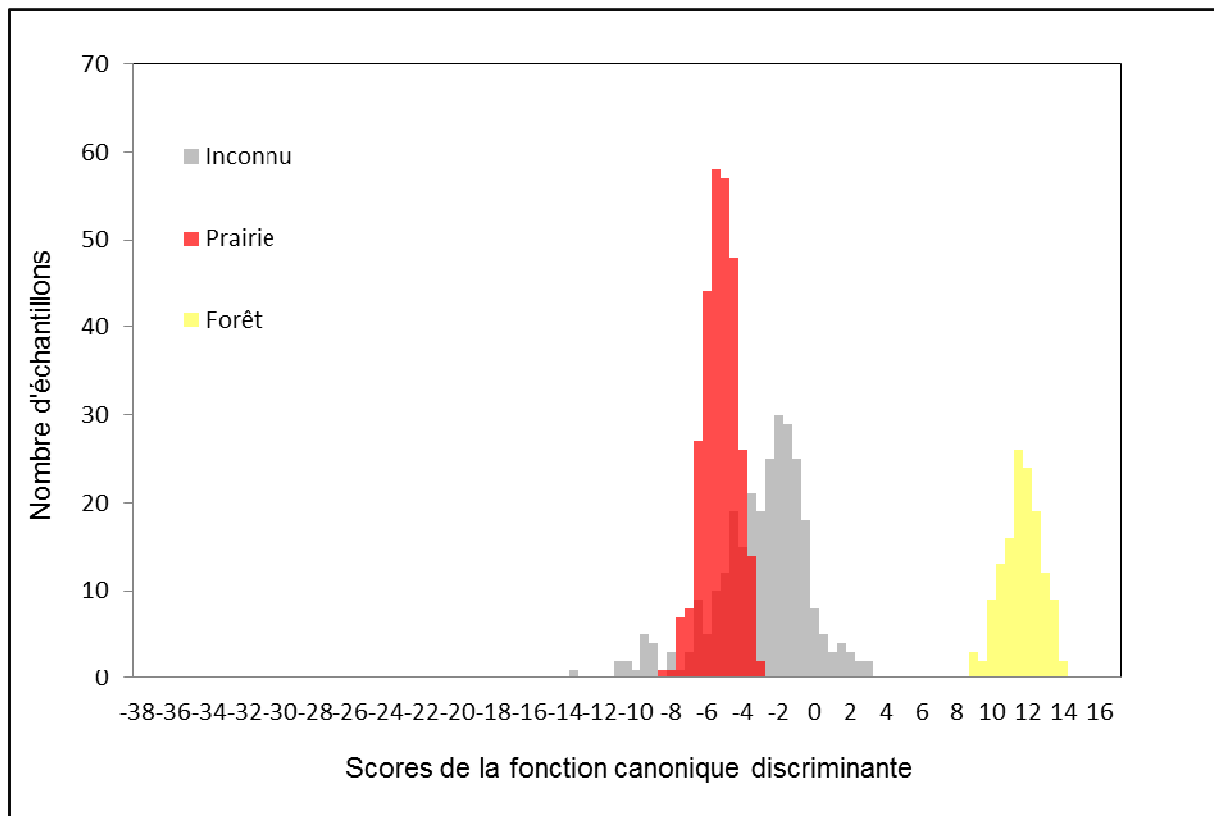


Figure 9.6. Les valeurs de scores de la fonction canonique pour la totalité des échantillons « inconnus » de Hrušov, superposés à la librairie spectrale bipartite.

Lorsque l'on analyse les scores par profil, on observe que le score moyen discriminant varie très peu avec la profondeur (fig. 9.7). nous observons que la végétation sur tous les profils montre une relative stabilité. Les profils HRU20, HRU23 et HRU24 sont entièrement situés dans les gammes de prairie ; HRU21, HRU 25 et HRU 26 sont en limite des valeurs prairiales, avec certains échantillons situés dans la gamme et d'autre juste en marge. Les écarts-types des scores discriminants moyens ont été représentés pour la totalité des échantillons dans le tableau 7.4.

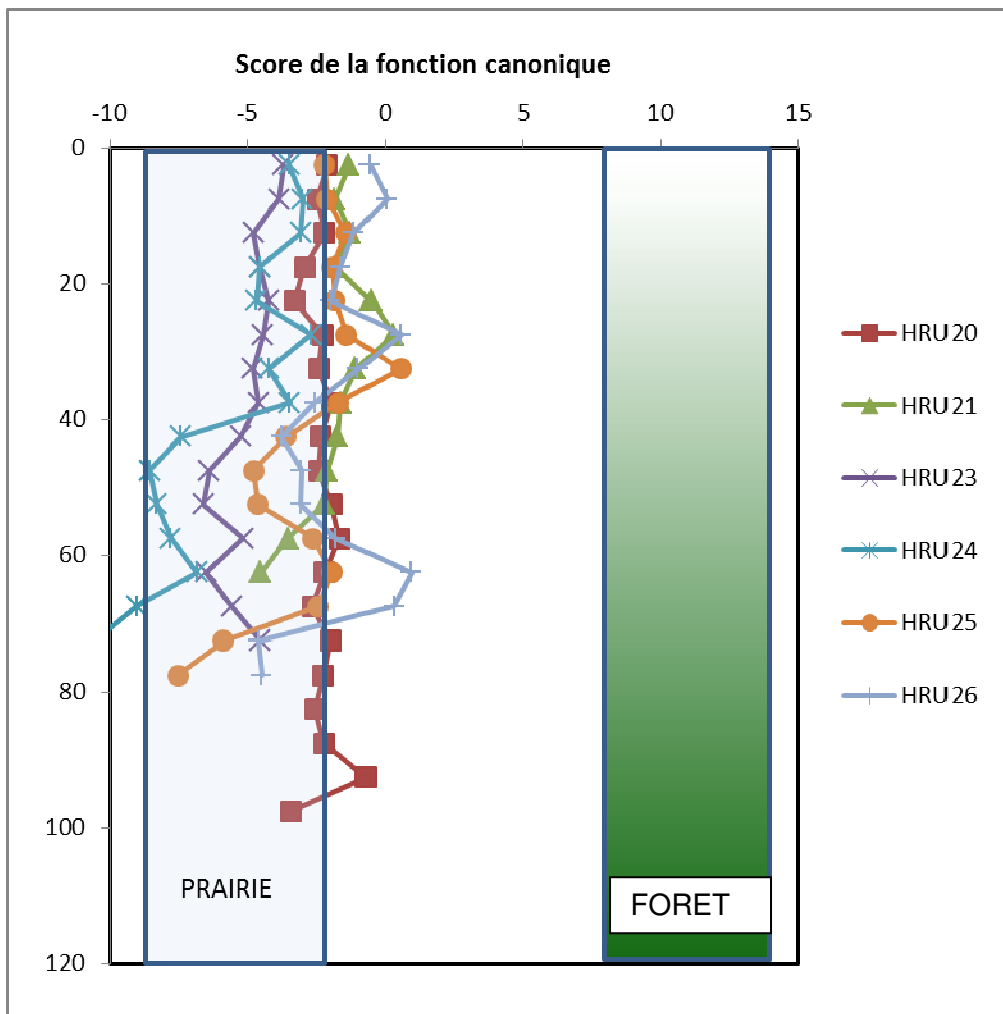


Figure 9.7. Valeurs de la moyenne des scores de la fonction canonique 1 en fonction de la profondeur pour les profils des sols de Hrušov analysés.

9.2.2. Application de la librairie spectrale tripartite

Nous avons appliqué la librairie spectrale tripartite à l'ensemble des échantillons de Hrušov (fig. 9.8). Nous observons que les échantillons se divisent en deux groupes : un groupe est concentré autour du barycentre des sols cultivés, l'autre, quasi-équidistant des trois barycentres, se trouve dans le domaine des sols prairiaux. Une observation plus fine montre que cette différenciation ne se fait pas entre profils, mais au sein d'un même sol.

Ce fait nous a poussé à analyser l'évolution des scores profil par profil (fig. 9.9a à 9.9d). Les horizons de labour sont systématiquement regroupés dans la classe prairie, mais à équidistance entre les trois classes. Tous les horizons situés sous les horizons de labour se concentrent dans la classe des sols cultivés.

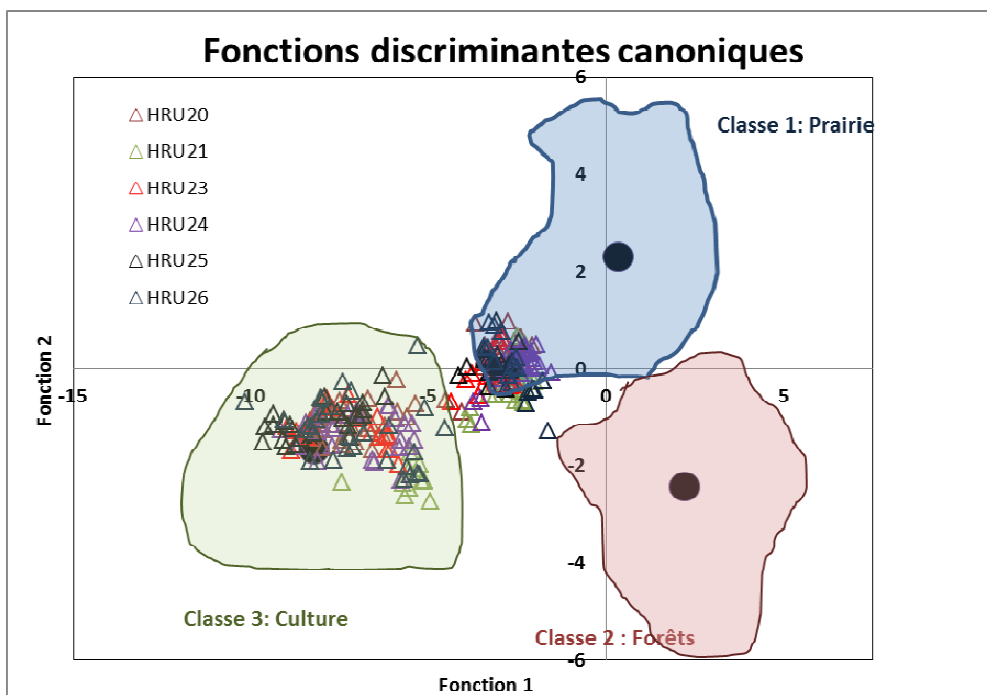


Figure 9.8. Résultat du classement des échantillons de la catena de Hrušov dans la librairie spectrale tripartite (prairie, forêts, culture)

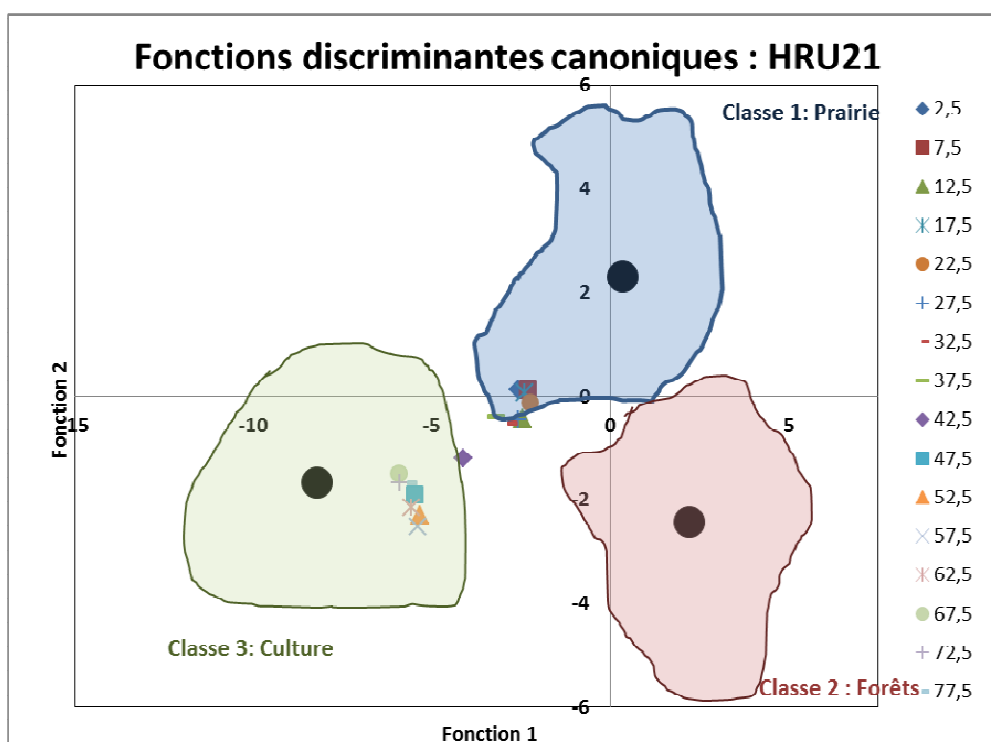
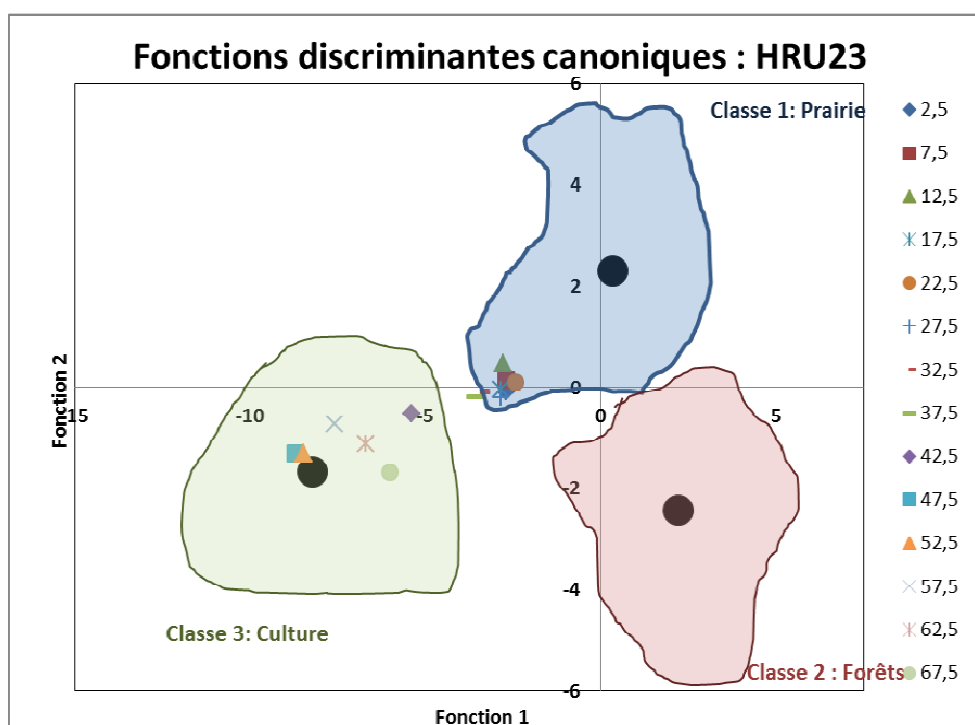
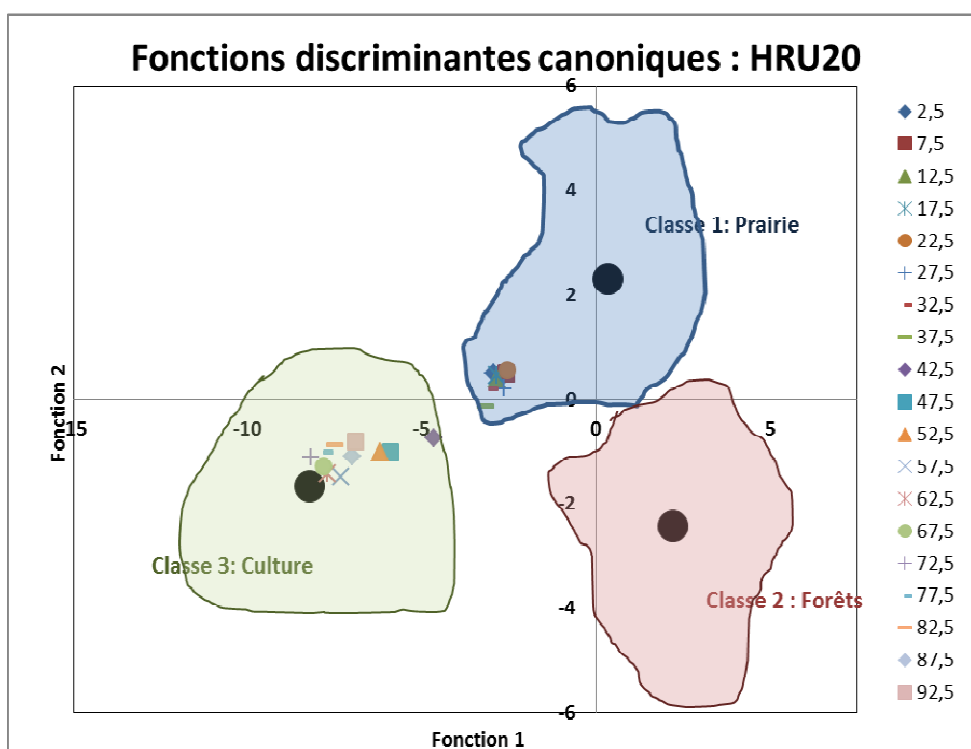


Figure 9.9a. Résultat du classement des échantillons du profil HRU21 (chernozem typique) dans librairie spectrale tripartite (prairie, forêts, culture) ; seul le score moyen de chaque horizon est représenté.



Figures 9.9b et 9.9.c. Résultat du classement des échantillons des profils HRU20 et HRU 23 (chernozem à BT) dans librairie spectrale tripartite (prairie, forêts, culture) ; seul le score moyen de chaque horizon est représenté.

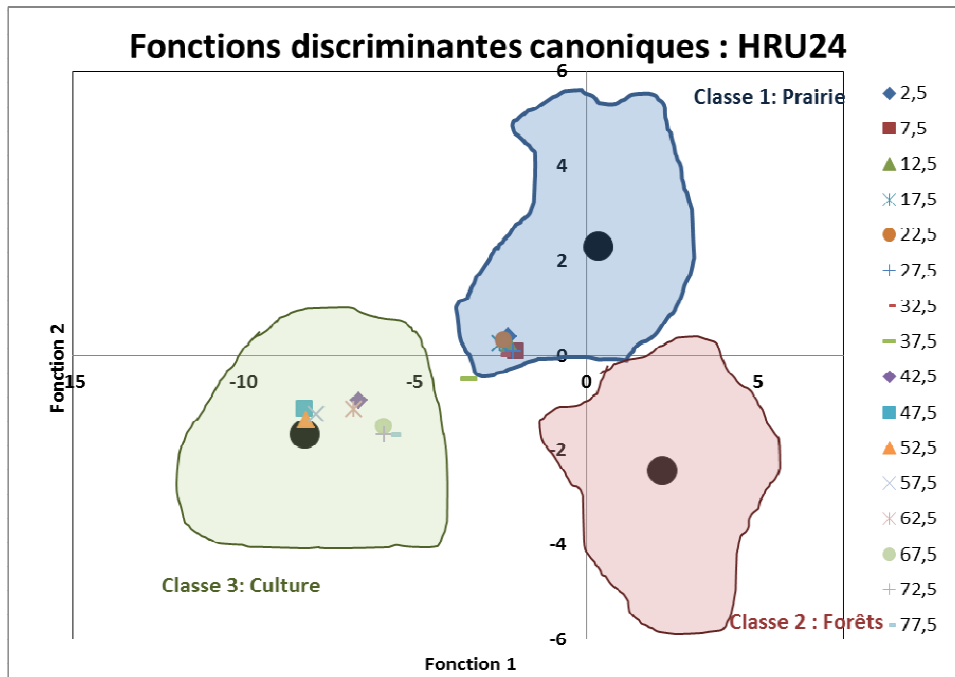


Figure 9.9d. Résultat du classement des échantillons du profil HRU24 (luvisol) dans librairie spectrale tripartite (prairie, forêts, culture), sur le score moyen de chaque horizon.

9.2.3. Discussion

L'interprétation des résultats de la SPIR qualitative nécessite une réflexion poussée. Si l'on analyse les résultats du référentiel bipartite, on observe que la population de sols étudiée est homogène. En particulier, on n'observe pas de différences entre luvisol et chernozems. De plus, aucun échantillon ne vient se placer sur le pôle « forestier » : une éventuelle influence de matières organiques très anciennes, héritée d'un éventuel épisode forestier est à exclure, même dans des luvisols censés s'être formés sous forêt. Il ne semble pas que des matières organiques héritées de ces épisodes subsistent en quantité suffisante pour marquer de leur empreinte le spectre SPIR.

Pour le reste, ce référentiel bipartite est nécessairement limité, car il ne prend pas en compte l'influence des matières organiques d'origine agricole. C'est la raison pour laquelle on a appliqué le référentiel tripartite. On constate, après ce traitement, qu'aucun échantillon ne revient se placer dans le pôle forestier, ce qui confirme la première interprétation. L'ensemble de la matière organique des échantillons des horizons profonds a un signal « culture ». Au vu de l'augmentation générale des TMR avec la profondeur, ceci signifierait que la zone est cultivée de très longue date, quasiment en continu.

Plus surprenant *a priori* est le fait que la matière organique des horizons de surface ne se place pas dans le référentiel « sol cultivé » mais plutôt en « prairie ». Ceci résulte sans doute de la construction même du référentiel « sol cultivé ». Celui-ci est établi sur la base d'horizons ayant connu des cultures « historiques », c'est-à-dire marquées par des assolements, des rotations, et une grande diversité de plantes cultivées. Le signal est donc

« moyenné » entre des matières organiques d'origine très différentes. Il n'est donc pas forcément surprenant que l'empreinte des cultures actuelles, très peu diversifiées, pour ne pas dire monoculturelles (blé, betterave) ne puisse pas être bien référencée. En clair, le référentiel actuel manque de références monoculturelles. En absence de référence, le modèle classe statistiquement les échantillons dans le groupe qui lui semble être le moins éloigné.

9.3. Etude micromorphologique

L'approche micromorphologique est fondée sur l'étude de 15 lames des profils HRU 24 (luvisol), 21 (chernozem typique) 20 et 23 (chernozem à BT). Nous n'avons pas analysé de lames dans l'horizon L. En revanche, une lame a été systématiquement prélevée à la limite entre l'horizon L et l'horizon sous-jacent, A, BT ou C.

9.3.1. Les termes extrêmes de la catena (luvisol et chernozem typique)

9.3.1.1. Le luvisol HRU 24

Trois lames ont été étudiées sur ce profil, à 36-45 cm de profondeur (HRU24-7 = limite L/BT), 48-57 cm (HRU24-9 = BT) et 60-69 cm (HRU 24-11 = limite BT/C). Dans la lame 24-07, on observe de nombreuses bio-galeries, remplies de limons. Des revêtements dits « poussiéreux » sont très visibles. Ces revêtements sont caractéristiques des sols cultivés (Gebhardt, 1990, 1993 ; MacPhail *et al.*, 1990 ; Becze-Deák *et al.*, soumis). Dans la partie inférieure de la lame apparaissent également des revêtements jaune-orange, translucides, considérés comme des argilanes caractéristiques du lessivage en évolution naturelle du sol, sous forêt (Gebhardt, 1990, 1993 ; MacPhail *et al.*, 1990 ; Becze-Deák *et al.*, soumis). Des traces de bioturbation sont également visibles. L'horizon BT apparaît bien développé dès son sommet, ce qui suggère que les labours profonds en ont effacé les niveaux supérieurs, homogénéisés avec les horizons A et E au sein de l'horizon L. La photo de la figure 9.10, prise à la limite L/BT, illustre ces points. Sur la lame HRU24-9, on observe des revêtements calcaires sur les illuviations (fig. 9.11). Ceci indique clairement que des épisodes de recarbonatation ont succédé aux phases de lessivage. Cette recarbonatation pourrait être d'origine agricole, liée aux amendements. L'observation est en tout cas conforme avec les données analytiques, qui indiquent la présence, en faible proportion, de carbonates dans l'horizon BT (tabl. 9.1).

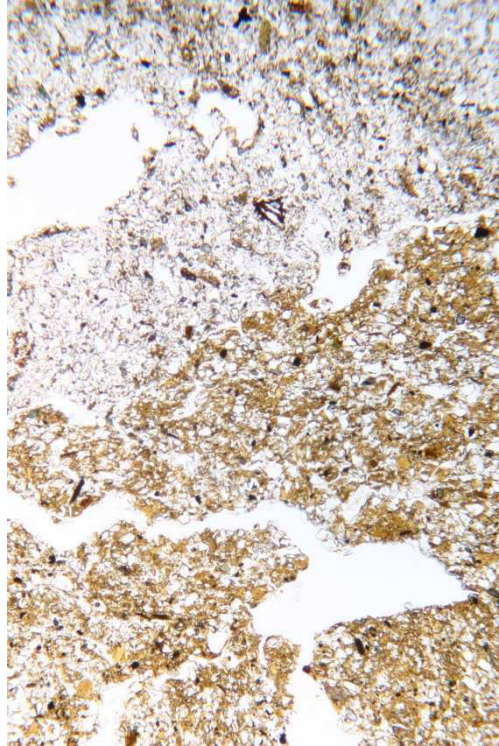


Figure 9.10. Observations micromorphologiques à la limite des horizons L (en haut) et BT (en bas) du luvisol HRU24. Les revêtements translucides caractéristiques des BT sont nettement visibles.

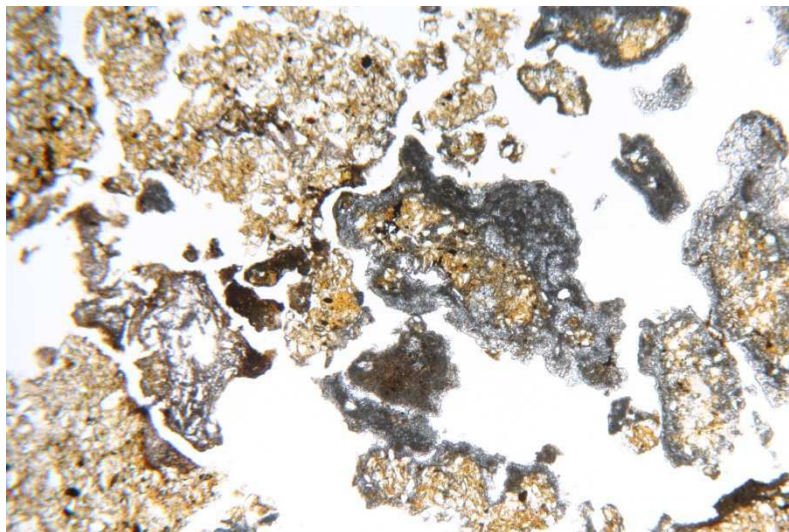


Figure 9.11. Observations micromorphologiques dans l'horizon BT du luvisol HRU24. Noter la présence de revêtements carbonatés (en gris, au centre) sur les argilanes.

9.3.1.2. Le chernozem typique HRU 21

Trois lames ont également été étudiées sur ce profil : à 30-39 cm de profondeur (HRU21-1 = horizon L3), 36-45 cm (HRU 21-2 = limite L/Cca) et 42-51 cm (HRU 21-3 = sommet Cca). Dans l'horizon L3, les limons sont bien triés, homogènes, sous forme de masse porphyrique. La matrice fine est très organique, bioturbée. On peut observer des fragments de coquilles de mollusques, des phytolithes, des charbons, des concrétions ferrugineuses, des fragments de chaux. L'élément le plus important est l'observation, dans les lames HRU21-1 et HRU21-2, d'argilanes jaunes ou orangées, limpides, complètement remaniées par bioturbation qui sont les témoins de l'existence ancienne d'un horizon BT aujourd'hui disparu (fig. 9.12). Dans l'horizon C, on observe tout comme dans le profil HRU 24, des réprécipitations de carbonates.

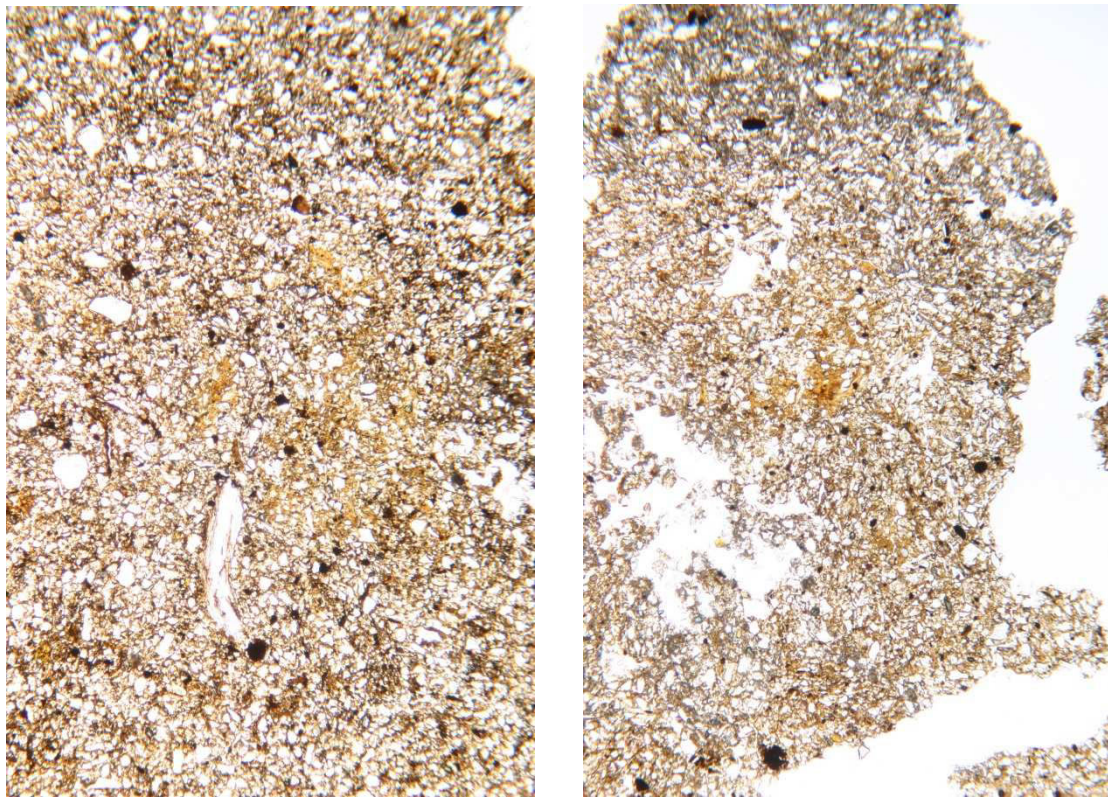


Figure 9.12. Chernozem typique HRU21. Argilanes jaune-orangé, limpides, remaniés, témoignant de l'ancienne existence d'un horizon BT, dans l'horizon L3 (à gauche) et à la limite L/Cca (à droite).

9.3.2. Les termes intermédiaires de la catena (chernozem à BT)

Les trois profils de chernozem à BT (HRU 20, 22, 23) sont très semblables. Nous nous focaliserons donc ici sur le profil HRU 20, qui est le plus épais. Cinq lames ont été étudiées sur ce profil, à 41-50 cm de profondeur (HRU20-2 = base de l'horizon L et sommet de l'horizon A non perturbé par le labour), 47-56 cm (HRU20-3 = horizon A non perturbé par le labour et sommet du BT), 53-62 cm (HRU20-4 = limite BT), 65-74 cm (HRU20-6 = limite BT/C) et 77-86 cm (HRU20-8 = sommet C). Les principaux traits observés sont ceux que l'on

retrouve dans les précédents profils : présence de revêtements poussiéreux (HRU 20-2) phytolithes (HRU20-2 et 20-3), forte bioturbation (HRU20-2 à 20-4), présence simultanée de revêtements limpides, souvent remaniés par la bioturbation et de revêtements poussiéreux dans le BT (HRU20-4 à 20-8), ce qui est l'observation la plus importante (fig. 9.13).

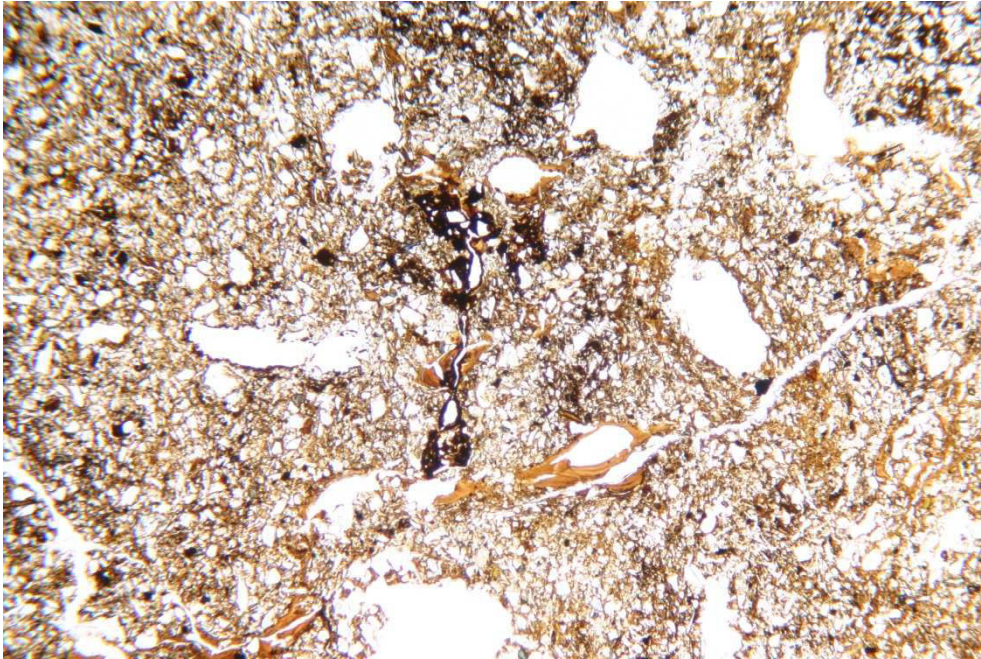


Figure 9.13. Chernozem à BT (HRU20). Argilanes jaune-orangé, limpides, en partie remaniées, et revêtements poussiéreux (en brun sombre) dans le BT.

9.3.3. Interprétation et discussion

L'ensemble des traits observés permet de mettre en évidence la succession de plusieurs phases de pédogenèse.

- la succession de deux phases d'illuviation. La première est caractérisée par des revêtements limpides, translucides, de couleur jaune-orangé ; la seconde par des revêtements bruns, poussiéreux, opaques. Cette succession est observée classiquement dans les BT, et attribuée pour la première phase à un lessivage en condition naturelle, sous forêt, précédant l'agriculture, et à du lessivage dans des sols destabilisés par l'agriculture pour la deuxième (Gebhardt, 1990, 1993 ; MacPhail *et al.*, 1990 ; Becze-Deák *et al.*, soumis).
- Une phase de destructuration, voire de destruction du BT, observable aussi bien dans les chernozems à BT que dans le chernozem typique. La présence de revêtements translucides jaune-orangé dans ces sols témoigne de l'existence d'un BT formé en condition naturelle, sous forêt.
- L'existence d'une phase de recarbonatation des sols, marquée par des précipitations de carbonates sur les revêtements des horizons BT. Cette phase est sans aucun doute liée à l'agriculture et très probablement à l'effet des amendements.

La catena observée est un système de transformation d'un type de sol à un autre. Mais l'ensemble de ces traits permet de conclure que ce ne sont pas les chernozems qui se transforment en luvisol, mais bien l'inverse. Le plateau étudié devait être à l'origine couvert de luvisols, et ce sont ceux-ci qui se transforment en chernozems. Ceci va à l'encontre d'opinions parfois émises (Alexandrovskiy, 2000 ; Lorz et Saile, 2011). D'autres auteurs ont émis l'hypothèse que l'agriculture arrive à préserver les chernozems de leur transformation en luvisols (Ložek, 2004). La réalité va plus loin. Il semble que l'agriculture arrive à créer des sols de type chernozem. Pour surprenantes qu'elles soient, ces conclusions ne sont pas entièrement isolées. Des analyses micromorphologiques effectuées dans les années 1970 par Smolíková aboutissaient déjà à des conclusions identiques, peu diffusées dans le monde scientifique (Němeček *et al.*, 1990 ; Smolíková et Ložek, 1973). Ces derniers auteurs baptisaient du nom de « pseudo-chernozems » les sols ainsi formés. Nos travaux vont dans le même sens. C'est tout un ensemble de pratiques agricoles qui pourraient être impliquées dans ce processus : les amendements calcimagnésiques bloquent le lessivage ; les racines de céréales recréeraient des conditions steppiques ; les labours profonds homogénéisent le sol et la répartition de la matière organique sur une grande épaisseur.

9.4. Conclusion

Les deux approches employées ici sont très différentes, mais s'avèrent complémentaires. Malgré les limites de l'approche par la SPIR liées à l'absence de référentiel monocultural, il est clair que la matière organique des horizons profonds, a une signature « sols cultivés ». Au vu de l'élévation générale des TMR avec la profondeur (cf. fig. 1.5, chap. 1), cette matière organique a en moyenne un âge pluriséculaire à plurimillénaire, ce qui suggère que la zone est cultivée depuis très longtemps. Ceci est en accord avec les découvertes archéologiques, qui montrent des occupations importantes des cultures Lusacienne et Hallstatt (1000 à 400 BC). On ne trouve pas trace – tout au moins en quantité suffisante pour modifier l'empreinte écosystémique SPIRqual - de matières organiques d'origine forestière.

La forêt a toutefois dû être présente de façon généralisée sur le site il y a très longtemps, comme en témoigne la présence systématique, que ce soit dans les luvisols ou les chernozems, d'argilanes translucides, limpides, jaune-orangé, typique du lessivage sous forêt, indiquant que des luvisols ont occupé le secteur avant les chernozems.

La catena analysée est donc un exemple de système pédologique transformant, dans lequel des luvisols initiaux sont transformés en chernozems, ou « pseudo-chernozems ». Les conditions de milieux étant les mêmes, et compte tenu des observations effectuées, il semble que ce système de transformation soit d'origine anthropique, et lié à la culture, en continu et de longue date des sols. Ces résultats intéressants confirment une des hypothèses émises dans le passé concernant le fonctionnement des chernozems. En revanche, ils n'apportent pas d'éléments permettant de conclure quant à l'environnement végétal qui prévaut au fonctionnement et à la dynamique des chernozems en condition naturelle.

DISCUSSION GENERALE ET CONCLUSIONS

Au terme de ce travail, le moment est venu de dresser un bilan concernant les développements méthodologiques et les connaissances acquises sur les conditions environnementales qui ont accompagné la formation de chernozems en Europe Centrale.

1. Performance de la SPIR qualitative

Comparaison avec les données historiques

Nous observons que les profils de sols fonctionnels qui montrent une stabilité de la végétation sont les profils sous prairies. A ce cas correspondent les chernozems d'Ukraine, de Russie (CT, KUR, MIK) et la plupart des chernozems hongrois (HUB, HUG, HUM, HUR, HUS, HUUD, KOC, KOR). Les chernozems tchèques BRC et BRO montrent un léger mélange avec de la MO d'origine forestière. Pour ces sols, il existe des archives historiques qui attestent d'une histoire steppique (11^{ème} cartographie militaire, cf. chapitre 4) et qui valident les résultats de la SPIR pour les périodes récentes. Une seule exception concerne le site HUR cartographié en tant que prairie depuis au moins 150 ans (11^{ème} cartographie militaire), mais dont les relevés botaniques indiquent un passé forestier.

Le résultat le plus surprenant concerne le site de Godolo Hills (fig. 10.1.) qui, d'après Fekete *et al.* (1998), a été forestier jusqu'au début du 20^{ème} siècle. Puis, le versant a été défriché et pâturé. Le reboisement spontané où nous avons prélevé le profil HUGF est parsemé d'îlots de steppe, dans lesquels nous avons prélevé le profil HUG. Pourtant, le résultat montre une stabilité de la végétation pour les deux fosses, ce qui est contradictoire avec la dynamique de la végétation proposée par Fekete *et al.* (1998). Le profil HUGF est cohérent avec les travaux de Fekete *et al.* En revanche la stabilité du profil prairial (HUG) est difficile à interpréter si le versant a été autrefois forestier. Il faudrait envisager, sans certitude, qu'une partie du versant a évolué sur une longue période en prairie.

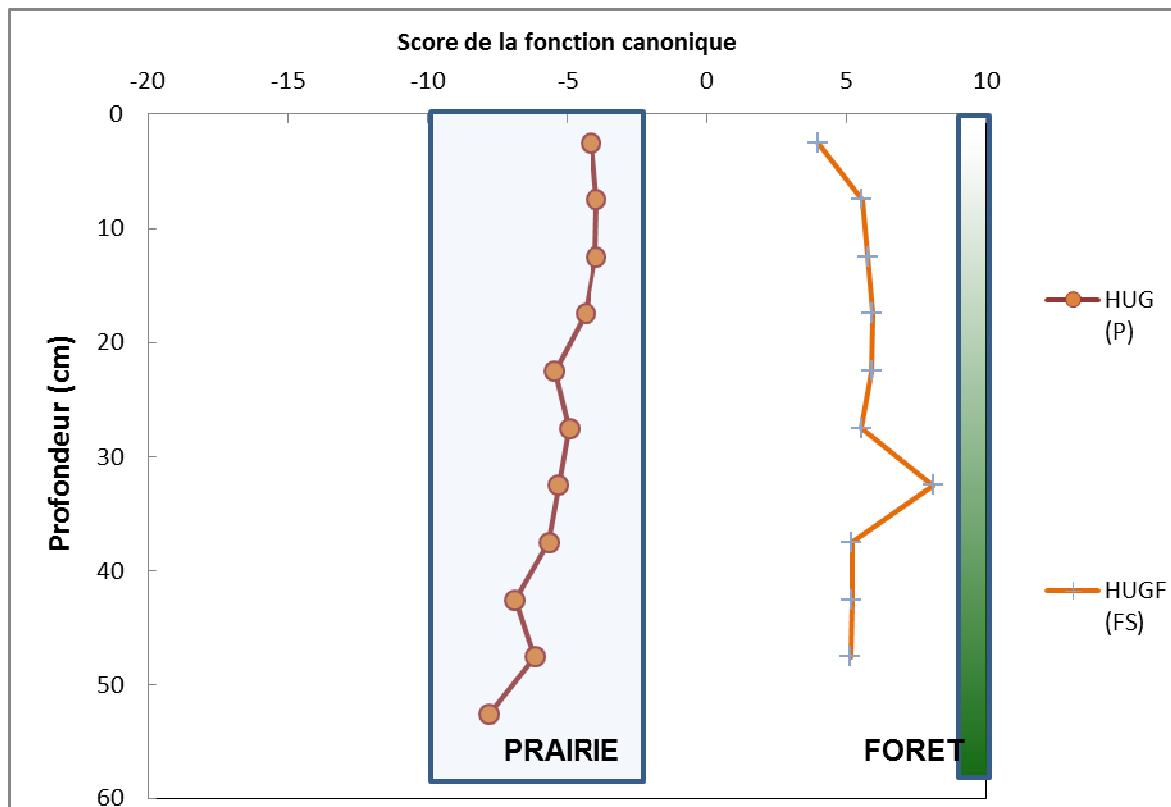


Figure 10.1. Les score de la fonction canonique bipartite (l'approche prairie et forêt) sur le site Godollo Hillis : HUG et HUGF

Comparaison avec les données paléo environnementales

Lorsqu'une comparaison est possible, on observe la cohérence des résultats de la SPIR avec d'autres proxys. L'enfouissement du chernozem de BRE a été daté par radiocarbone du Boréal (8700 BP). Sur la base d'études stratigraphiques et malacologiques, Ložek (1974) a décrit la végétation de ce sol comme une steppe avec une expansion progressive de la forêt thermophile. Les résultats de l'analyse SPIR confirment ce scénario : la MOS au bas du profil provient de prairies ; dans la partie supérieure du profil, la signature spectrale enregistre des modifications vers des valeurs qui sont difficiles à interpréter car sortant des gammes de référence. Un nombre abondant de charbons a également été trouvé à environ 15 cm sous la surface de ce paléochernozem.

Les trois chernozems étudiés à Kolin (KOL1, KOL2 et KOL3) sont interprétés comme des sols forestiers. Les résultats de la SPIR sont soutenus par une étude pédoanthracologique des mêmes sols (Vysloužilová *et al.*, 2014). Cette étude montre l'apparition de charbons de bois de diverses espèces d'arbres à feuilles caduques à *Quercus* sp. De même, les paléochernozems de Zeměchy montrent des scores forestiers (ZMC) et des scores intermédiaires (ZMK). Ces données font écho aux analyses pédoanthracologiques (chap. 8). Le paléochernozem de POL est classé par la SPIR comme un sol prairial avec une évolution de score d'un pôle extrême de la classe de prairie à l'autre extrême. Le paléosol a fait objet de l'étude pédoanthracologique qui a démontré la présence

de quelques espèces arbustives. Ložek et Smolíková (1978) ont montré par l'étude sédimento-malacologique que c'était un chernozem avec une tendance à la dégradation vers un luvisol avant enfouissement.

Ainsi, les résultats de la SPIR ne sont pas toujours complètement identiques aux autres proxys, mais ils sont très rarement contradictoires. Ceci confirme le potentiel et la complémentarité de la méthode

2. Apports aux conditions de pédogénèse des chernozems

Facteurs climatiques

Le chernozem est considéré comme se formant au cours des périodes de réchauffement du Pleistocène, soit lors d'interglaciaire soit lors d'interstades. L'Holocène répond par ses caractéristiques à un interglaciaire. Pourtant, les paléosols qui sont datés des interglaciaires précédents sont le plus souvent des luvisols (Ložek, 2004). Ce dernier souligne également que l'évolution des sols sur lœss avec des stades de dégradation aux interstades comme décrit par Lorz et Saile, (2011), Schaffer et Meyer, (1963) et Leser et Masqud, (1975) n'a pas pu de dérouler à cause de l'action anthropique.

Certains auteurs ont aussi suggéré que l'humidification accrue en Europe occidentale depuis le milieu de l'Holocène moyen aurait favorisé la dégradation des chernozems vers des sols lessivés (luvisols, phaeozems) (Schalich 1988, Gerlach *et al.* 2006, Eckmeier *et al.* 2007, Lorz and Saile 2011). Le climat plus humide n'est pas, d'après ces travaux, favorable à l'accumulation de la matière organique. Sur nos sites, nous n'observons pas les changements de végétation liés au impacts climatiques au cours de l'Holocène observés par Jäger (2002, in Ložek 2004).

Facteurs biologiques (végétation)

Parmi les chernozems qui ont connu un changement de végétation, nous trouvons systématiquement les chernozems, qui se trouvent actuellement sous forêts (BAB, BUL, DUB, SEN) et forêt-steppe (KUC). Lors de nos observations de terrain, nous avons détecté sur les sols forestiers de SEN et BAB des signes de dégradation et d'acidification de type cambique.

L'histoire steppique des sites hongrois est en accord avec Magyari *et al.* (2010) et Barczy *et al.* (2009) qui suggèrent d'après des études paléobotaniques que la steppe boisée a perduré pendant une grande partie de l'Holocène. La persistance de la végétation steppique à l'Holocène est également proposée en Bohême par Pokorný (2005) et Ložek (2004). Ce dernier argumente que la végétation forestière au cours de la deuxième moitié de l'Holocène n'a pas pu se développer à cause des influences anthropiques.

Contrairement à l'opinion courante, les chernozems ne sont pas des sols systématiquement dévolus à évoluer sous steppe. L'observation des chernozems actuellement couverts de forêt peut être étendue au passé. Les résultats obtenus sur des paléosols holocènes (e.g. BUB, MOR) suggèrent des tendances forestières pour la première moitié de l'Holocène. Toutefois, les caractéristiques écologiques des sites sous forêt restent incertaines. Nous ne pouvons pas estimer s'il s'agit de forêts typiques ou de forêts ouvertes à sous-bois herbacé. Nos conclusions sont toutefois compatibles avec l'avis de Fischer-Zujkov (2000), selon qui le chernozem peut exister sous forêt à condition qu'y existe une strate herbacée dense. En revanche, Ložek (2004) rejette de façon générale l'hypothèse de phases forestières en se référant aux enregistrements paléontologiques.

Facteurs anthropiques

Le facteur anthropique influence considérablement l'évolution de sols (Lungu, 2012). Les chernozems ont été particulièrement concernés par les influences anthropiques (défrichements, mise en culture, pâturage). Toutefois, le système racinaire des graminées cultivées, les céréales, peut participer à la formation d'horizon chernique et influencer le pédoclimat d'une manière proche de celui des graminées sauvages.

Parmi les facteurs anthropiques, Schmidt *et al.* (1999) ont aussi suggéré pour les chernozems du Nord de l'Allemagne, que la pratique répétée de brûlis entraînerait des proportions importantes de « black carbon », atteignant 45 % du carbone organique total dans les horizons A de chernozems. Dans ce travail, nous n'avons pas eu l'opportunité de mesurer cette variable. Cependant, nous avons mesuré les proportions de carbone organique et inorganique par le biais de plusieurs méthodes. Or, la méthode de Walkley et Black (1934) ne digère pas le « black carbone » d'après Kerven *et al.* (2000) tandis que la mesure du carbone total au CHN, à laquelle nous avons soustrait le carbone des carbonates (carbone inorganique), devrait inclure le « black carbone ». Comme nous ne constatons pas de différence entre ces deux mesures du carbone organique, nous pouvons en déduire que la contribution de « black carbon » est faible dans nos échantillons. Ceci n'exclut pas la pratique du feu lors des phases de défrichement, mais elle minore son rôle dans la genèse des chernozems en Europe Centrale. Bien entendu, des mesures directes du « black carbone » devront renforcer cette hypothèse.

Facteur temps

La durée absolue que nécessite la formation d'un chernozem n'a pas été déterminée. Néanmoins, selon les mesures du TMR nous pouvons dire que l'évolution d'un chernozem nécessite plusieurs millénaires. En règle générale, la mesure des processus de la pédogénèse n'est pas évidente. Alexandrovskyi (2000) a estimé la durée nécessaire pour la dégradation d'un chernozem vers un luvisol à 3000 ans sous forêt. Or, selon les TMR 14C du profil KUC (figure 10.2) qui se trouve actuellement sous une végétation de type forêt-steppe, a évolué sous ce type de végétation (la stabilité du profil SPIR en témoigne) depuis au moins 4000 ans. Ainsi, les chernozems calciques semblent relativement stables par rapport à une évolution vers les luvisols.

A l'Holocène, la formation de chernozems est classiquement datée du Préboréal et Boréal d'après (Eckmeier *et al.*, 2007 ; Lorz et Saile, 2011 ; Němeček, 1981). D'après les découvertes de paléochernozems, nous pouvons affirmer que ce sol était entièrement développé au moment de l'arrivée des premiers agriculteurs. Ainsi, les chernozems que l'on observe actuellement connaissent au moins 7000 ans de passé fortement influencé par l'Homme.

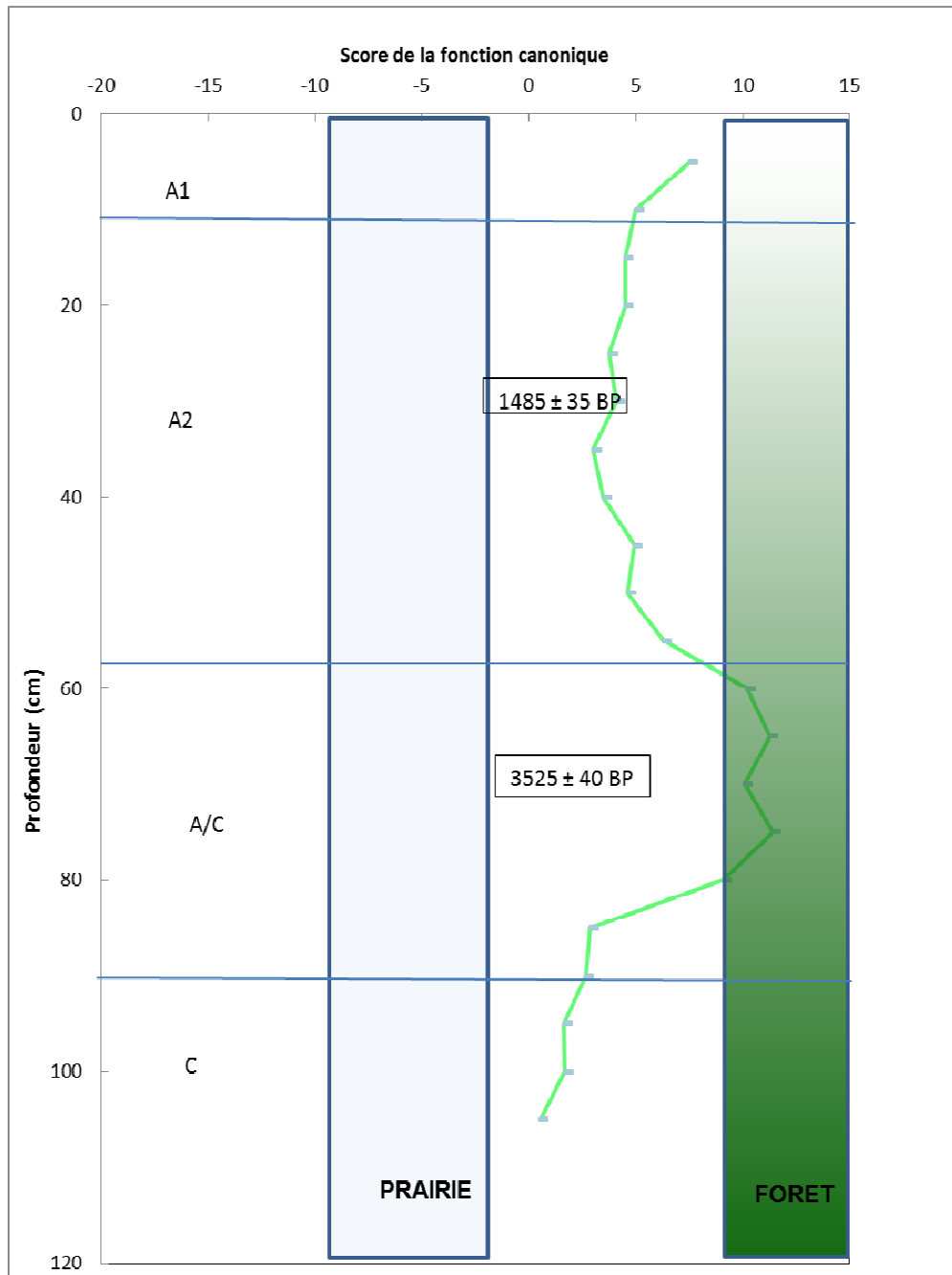


Figure 10.2. Scores de la fonction canonique pour le profil KUC en relation avec la profondeur, horizon et TMR

Interactions entre les facteurs

Ces différents facteurs ne sont pas indépendants, c'est pourquoi il est délicat d'attribuer la prépondérance à l'un ou à l'autre. Surtout, ces facteurs varient suivant des temporalités différentes. La végétation évolue avec le climat avec une résilience plus ou moins forte suivant les cycles et peut évoluer beaucoup plus vite sous l'action de l'Homme. Les facteurs anthropiques sont considérés comme négligeables ou nuls avant le Néolithique puis suivent également des cycles dès l'apparition de l'agriculture. L'évolution des pratiques (brûlis, labour, rotations) et des techniques (bâton à four, araire, charrue, mécanisation) influence diversement les processus d'érosion et de pédogénèse.

3. Le chernozem : un sol zonal ?

Le chernozem est classiquement défini comme un sol zonal associé à un climat continental prononcé et une végétation steppique. Plusieurs travaux antérieurs, des observations simples de la répartition des chernozems et les résultats développés dans ce manuscrit permettent de remettre en question cette définition pour l'Europe Centrale.

Premièrement, la notion de climat continental est certes associée à l'Europe Centrale, mais durant l'Holocène le climat n'a pas été suffisamment sec pour favoriser le développement de steppes, en tout cas pas dans une extension aussi large que celle des chernozems. Par ailleurs, les temporalités différentes de la pédogénèse (plusieurs millénaires) et du climat (avec certains cycles beaucoup plus courts) rendent difficiles l'association entre un tel type de sol et un climat bien déterminé. Ainsi, la plupart des chernozems ou paléochernozems se sont développés au cours de plusieurs cycles climatiques. Ceci est vrai si l'on considère leur genèse au Tardiglaciaire et leur préservation à l'Holocène mais aussi si l'on considère les variations climatiques à l'intérieur de l'Holocène (e.g. Walker *et al.*, 2012 ; Jäger 2002 *in* Ložek, 2004 ; Dreslerová , 2012 ; Gaillard *et al.*, 2012). Ainsi, les propositions de périodes favorables au développement des chernozems (Lorz et Saile, 2011 ; Němeček, 1981) sont souvent incohérentes avec la durée nécessaire pour le développement de ces sols. Il existe sans doute des bornes climatiques et donc une zonation en-dehors desquelles les chernozems n'ont pu se développer ou se préserver au Quaternaire mais ces bornes ne peuvent être réduites strictement au climat qui domine actuellement les steppes ukrainiennes et russes. En parallèle, ces considérations remettent en cause la notion de sol climax (Jenny, 1941 ; FAO/ISRIC/ISSS, 1998) qui sous-entend un équilibre entre des variables qui n'existe pas aux échelles de temps de la pédogénèse des chernozems.

Deuxièmement, la végétation steppique, dans le sillage du climat n'a pas couvert l'Europe Centrale tout au long de l'Holocène. En-dehors des facteurs climatiques peu favorables, c'est surtout l'influence grandissante de l'Homme à l'Holocène qui a influencé la couverture végétale. Notre zone d'étude est le berceau de la culture Rubanée et a été, à ce titre, le premier secteur en Europe tempérée influencé par les agriculteurs. L'appétence des agriculteurs pour les chernozems amplifie sans doute leur influence dans notre secteur d'étude, tandis que cet effet est beaucoup plus discret dans des secteurs de sols ou

d'environnements moins favorables. Paradoxalement, la mise en culture souvent systématique et quasi continue des chernozems depuis le Néolithique semble être un facteur de préservation de ces derniers tandis que les secteurs couverts par la forêt soumis à un pédoclimat plus humide et à des apports de litière auraient subi une acidification et un lessivage entraînant une transformation vers des sols de type luvisol (Lorz et Saile, 2001). Cette évolution des chernozems vers les luvisols constitue un schéma classique de la pédologie (Němeček *et al.*, 1990 ; Alexandrovskiy, 2000). Pourtant, l'étude micromorphologique d'une catena entre ces deux sols a montré que la transformation inverse était également possible. Ainsi, des luvisols, formés sous forêt au début de l'Holocène, auraient pu se transformer en chernozems après l'ouverture du paysage par l'Homme. Ces résultats vont dans le sens de quelques travaux antérieurs (Němeček *et al.*, 1990, Ložek et Smolíková, 1973).

Ainsi, nous pouvons conclure que si les chernozems sont des sols zonaux, la définition de leur zone de répartition est à nuancer au regard des évolutions climatiques depuis les derniers maximum glaciaire. Enfin, si la végétation de type steppe est bien favorable à la formation de chernozems, cette condition n'est pas exclusive. Autrement, les modifications radicales de la végétation par l'Homme depuis le Néolithique n'auraient pas permis la préservation d'une couverture chernozémique aussi vaste. Ainsi, les facteurs anthropiques, et plus particulièrement la mise en culture des chernozems a permis de préserver les chernozems en compensant artificiellement un climat plus humide.

Perspectives méthodologiques

Nous avons vu que l'approche paléo-environnementaliste de la SPIR a certaines limites pour la reconstruction des milieux. Mais nous avons vu qu'une librairie spectrale de référence bien construite mène vers des résultats robustes. Nous pouvons donc envisager le renforcement de la librairie spectrale de sols cultivés. Parmi les pistes possibles, nous pouvons citer des séries de colluvions non carbonatées, si possible plus riches en carbone organique et des références autres que colluviales : les structures agraires telles que les crêtes de labour, ou les murgers (tas d'épierrement) sont également susceptibles de sceller et préserver d'anciens sols cultivés. Une plus grande diversité de situations devrait permettre de mieux extraire la signature spécifique de sol cultivés en s'affranchissant de variables physico-chimiques qui pour l'instant semblent masquer le signal recherché. De plus, des références de sols cultivés actuels sous monoculture ou sous rotation de culture avec apport d'engrais minéraux pourraient être constituées afin de mesurer les différences avec les références de sol cultivés historiques et de mieux prendre en compte les profils de sols échantillonnés dans des secteurs actuellement cultivés ou cultivés depuis la révolution agricole.

L'étude pédoanthracologique de quelques paléochernozems a prouvé la présence d'espèces arborées. Cela renforce les résultats de la SPIR sur la couverture végétale diversifiée des chernozems. L'extension de cette étude et son couplage avec un nombre de datations significatif devrait permettre de conforter les résultats de la SPIR sur la chronologie et les successions de végétations.

Lors de notre étude de la catena de Hrušov, nous avons observé un chernozem qui porte des propriétés hérités d'un luvisol. Même si le cas des « pseudochernozems » a été déjà décrit dans la littérature (Němeček *et al.*, 1990 ; Ložek et Smolíková, 1973), les références sont peu nombreuses et les explications encore partielles. Il faudrait envisager l'étude d'autres catenas avec des datations de fractions spécifiques de la matière organique pour mieux comprendre le mécanisme et la chronologie de cette transition.

Conclusion

En premier lieu, il faut rappeler que conformément aux objectifs de ce travail, nous nous sommes servis surtout d'une nouvelle méthode paléo-environnementale qui repose sur l'analyse de la matière organique conservée dans le sol par la SPIR. En particulier dans les chernozems, le temps de résidence de la matière organique atteint plusieurs milliers d'années. La SPIR est capable de révéler cette information grâce à la comparaison avec une librairie spectrale de référence de MO connues.

La construction de la librairie spectrale de référence bipartite prairie-forêt a été un véritable challenge. La plupart des surfaces couvertes par des chernozems étant cultivées, il était très difficile de trouver des chernozems qui fonctionnent sous végétation steppique en Europe Centrale. Nous avons tout de même réussi à trouver quelques reliques de végétation de type « steppe » au sein des réserves naturelles en République Tchèque et en Hongrie. En Europe Centrale, les conditions steppiques sont très rares ; en revanche, la mise en culture des chernozems influence le pédoclimat et tend à accentuer la continentalité au point de simuler des conditions steppiques. Il s'est avéré encore plus difficile de retrouver des chernozems sous forêt qui sont une vraie rareté dans le paysage actuel. Finalement, nous avons réussi à détecter un nombre représentatif de sites de surface qui ont servi de base à la librairie spectrale de référence.

En deuxième lieu, nous avons analysé la MO par la SPIR et validé la robustesse de la librairie de référence. Nous avons réussi à discriminer les deux populations (forêt et prairie) des échantillons avec un degré de confiance important ce qui confirme le potentiel de l'application qualitative de la SPIR. Nous pouvons confirmer que la mise en place de la librairie spectrale bipartite spécifique aux chernozems et aux sols formés sur loess est mieux appropriée à l'application aux chernozems que la librairie bipartite établie par Ertlen (2009). Par exemple, les paléosols ZMC et ZMK étaient impossibles à classer selon Ertlen (2009) mais nous arrivons à les classer sans complication majeure avec le nouveau référentiel. Plusieurs sites étudiés ont fourni, grâce à des études précédentes ou à des études réalisées dans le cadre de ce travail, une comparaison avec d'autres proxys permettant de valider la méthode.

En comparaison avec les autres données paléoécologiques, les résultats de l'analyse SPIR sont cohérents. Il est confirmé que l'application de la SPIR qualitative est une alternative valable et un outil complémentaire pour la reconstruction paléoenvironnementale de paléosols.

L'analyse SPIR montre que la couverture végétale sur chernozems pouvait être la steppe ou prairie ouverte, la forêt ou une végétation intermédiaire de type forêt-steppe. Ces résultats apportent de nouvelles données à la discussion sur la pédogenèse des chernozems. Ils renforcent l'idée que les chernozems ne sont pas spécifiques des milieux steppiques, végétation ouverte à Graminées (Eckmeier *et al.*, 2007). Par ailleurs, il semble que tous les chernozems qui fonctionnent actuellement sous forêt sont caractérisés par un passé de milieu ouvert. Ils peuvent persister sous la végétation forestière pendant plusieurs centaines voire milliers années (Alexandrovskiy, 2000). Selon les résultats de la SPIR, il est

encore difficile de savoir si certains chernozems se seraient développés exclusivement sous forêt. Si oui, les caractéristiques de la forêt, dense ou semi-ouverte, restent incertaines.

Enfin, nous avons également suggéré tout comme Ložek et Smolíková (1973) et Němeček *et al.* (1990) que les chernozems, sous des conditions climatiques favorables, peuvent se développer à partir de luvisols ce qui ne correspond pas au schéma classique de genèse de ces sols.

BIBLIOGRAPHIE

- Aderichin, P.G., et al., 1964. Černozemy SSSR, in: Dokl. k VIII meždunarod. kongr. počvovedov. Presented at the Izd. Nauka, Moscow, pp. 41–57.
- Alexandre, A., Meunier, J.D., Colin, F., Koud, J.M., 1997. Plant impact on the biochemical cycle of silicon and related weathering processes. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61, 677–682.
- Alexandrovskiy, A.L., 2000. Holocene development of soils in response to environmental changes: the Novosvobodnaya archaeological site, North Caucasus. *CATENA* 41, 237–248. doi:10.1016/S0341-8162(00)00105-3
- Altermann, M., Rinklebe, J., Merbach, I., Körschens, M., Langer, U., Hofmann, B., 2005. Chernozem-Soil of the Year 2005. *J. Plant Nutr. Sci.* 2005 725–740.
- Andreeva, D.B., Leiber, K., Glaser, B., Hambach, U., Erbajeva, M., Chimitdorgieva, G.D., Tashak, V., Zech, W., 2011. Genesis and properties of black soils in Buryatia, southeastern Siberia, Russia. *Quaternary International* 243, 313–326. doi:10.1016/j.quaint.2010.12.017
- AOPK, 2005. Půdní mapa ČR 1: 50 000.
- Archeologický ústav Akademie Věd ČR, nepublikovano. Archeologické nálezy v katastru obce Hrušov (document interne).
- Arnaldo Carneiro, F., 2002. Evolution des paysages dans le bassin moyen du Rio Negro (Amazonie brésilienne) depuis Pléni-glaciaire moyen (Thèse de Doctorat de l'Université Louis Pasteur). Université Louis Pasteur - UFR de Géographie, Strasbourg.
- Atlas krajiny Slovenskej republiky, 2002. . Ministerstvo životného prostredia SR, Agentúra životného prostredia, Bratislava, Banská Bystrica.
- Aubert, G., 1965. La classification pédologique utilisée en France. *Pédologie (Gand). Symp. Internat.* 3. classif. Sols. 25–56.
- Aubert, G., Duchaufour, P., 1956. Projet de classification des sols. *C.R. 6e Cong. Intern. Sci. Sol (Paris) E*, 597–604.
- Austrian State Archive, 1806. Historical Maps of the Habsburg Empire [WWW Document]. URL <http://mapire.staatsarchiv.at/en/> (accessed 4.15.14).
- Baize, D., Girard, M.-C., 2008. Référentiel pédologique, QUAE. ed. AFES.
- Baldwin, M., Kellogg, C.E., Thorp, J., 1938. Soil Classification in "Soils and man". *Yearbook U.S.D.A.* 979–1001.
- Balesdent, J., 1982. Etude de la dynamique de l'humification de sols de prairies d'altitude (Haut-Jura) au moyen des datations ¹⁴C des matières organiques (Thèse). Université de Nancy I, Nancy.
- Balesdent, J., Guillet, B., 1982. Les datations par le ¹⁴C 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., Lister, S.J., 1989. Standard normal variate transformation and detrending of near infrared diffuse reflectance spectra. *Applied Spectroscopy* 43, 772–777.

- Barta, G., 2014. Paleoenvironmental reconstruction based on the morphology and distribution of secondary carbonates of the loess-paleosol sequence at Süttő, Hungary. *Quaternary International* 319, 64–75. doi:10.1016/j.quaint.2013.08.019
- Bartoli, F., Wilding, L.P., 1980. Dissolution of biogenic opal as a function of its physical and chemical properties. *Soil Science Society of America Journal* 44, 873–878.
- Becze-Deák, J., Gebhardt, A., Lewis, H., Lee, H., Usai, M.R., soumis. Micromorphology of soils disturbed by vegetation clearance and tillage (soumis). *Encyclopedia of archaeological soil and sediment micromorphology*.
- Becze-Deák, J., Langohr, R., Verrecchia, E.P., 1997. Small scale secondary CaCO₃ accumulations in selected sections of the European loess belt. Morphological forms and potential for paleoenvironmental reconstruction. *Geoderma* 76, 221–252. doi:10.1016/S0016-7061(96)00106-1
- Beneš, J., 2008. Environmentální archeologie a kultura s lineární keramikou v Čechách, in: *Archeologické výzkumy v severozápadních Čechách v letech 2003-2007. Ústav Archeologické Památkové Péče Severozápadních Čech, Most*, pp. 33–51.
- Bird, M., Santruckova, H., Lloyd, J., 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. doi:10.1046/j.1365-2389.2002.00444.x
- Blanck, J.-P., 1976. Analyse granulométrique par densimétrie des particules inférieures à 50 microns des sédiments meubles. *Revue de Géomorphologie dynamique* XXV, 93–105.
- Blanck, J.-P., Wacquant, J.-P., Paquet, H., Tricart, J., Usselman, P., Vogt, H., 1971. Contribution à l'étude des formations loessiques d'Eguisheim (Sud-Ouest de Colmar, Haut-Rhin, France). *Bull. Serv. Carte géol. Als. Lorr.* 24, 57–91.
- Boenigk, W., Frechen, M., 2001. The loess record in sections at Koblenz-Metternich and Tönchesberg in the Middle Rhine Area. *Quaternary International* 76/77, 201–209.
- Bogaard, A., 2002. Questioning the relevance of shifting cultivation to the Neolithic in the loess belt of Europe: the evidence from the Hambach forest experiment. *Vegetation History and Archaeobotany* 11, 155–168.
- Bonneau, M., Souchier, B., 1994. *Pédologie* (sous la direction de Ph. Duchaufour et B. Souchier). 2. Constituants et propriétés du sol. Masson, Paris, Milan, Barcelone.
- Bornand, M., Callot, G., Favrot, J.-C., 1968. Carte pédologique du Val d'Allier au 1 : 100 000. *Bulletin de l'Association française pour l'étude du sol* 20–29.
- Boulaine, J., 1984. L'héritage de Vassili Vassilievitch Dokuchaev. *Science du sol* 22, 93–104.
- Boulaine, J., 1989. *Histoire des pédologues et de la science des sols*. Institute national de la recherche agronomique, Paris.
- Boulaine, J., 2005. Les Chernozems chez les Français. *La lettre de l'association AFES* 11.
- Bridges, E.M., 1970. *World Soils*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Buček, A., Lacina, J., 2006. Severopanonské stepi. *Veronica* XX, 5–6.
- Canadian Institute of Ukrainian Studies, 2014. Internet Encyclopedia of Ukraine [WWW Document]. Internet Encyclopedia of Ukraine. URL www.encyclopediaofukraine.com
- Carcaillet, C., Bergman, I., Delorme, S., Hornberg, G., Zackrisson, O., 2007. Long-term fire frequency not linked to prehistoric occupations in Northern Swedish Boreal Forest. *Ecology* 88, 465–477.
- Carcaillet, C., Richard, P.J.H., 2000. Holocene changes in seasonal precipitation highlighted by fire incidence in eastern Canada. *Climate Dynamics*.
- Carcaillet, C., Thion, M., 1996. Pedoanthracological contribution to the study of the evolution of the upper treeline in the Maurienne Valley (North French Alps): methodology and preliminary data. *Review of Palaeobotany and Palynology* 91, 399–416.
- Carcaillet, C., Vernet, J.-L., 2001. Comments on “The Full-Glacial Forests of Central and Southeastern Europe” by Willis et al. *Quaternary Research* 55, 385–387. doi:10.1006/qres.2001.2226
- Cécillon, L., Barthès, B.G., Gomez, C., Ertlen, D., Genot, V., Hedde, M., Stevens, A., Brun,

- J.J., 2009. Assessment and monitoring of soil quality using near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS). *European Journal of Soil Science* 60, 770–784. doi:10.1111/j.1365-2389.2009.01178.x
- Česká geologická služba, 2013. Geologická mapa.
- Česká informační agentura životního prostředí, 2014. Kontaminovaná místa [WWW Document]. Kontaminovaná místa. URL <http://kontaminace.cenia.cz/> (accessed 4.15.14).
- Chang, C.W., Laird, D.A., Mausbach, M.J., 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.
- Chen, S., Huang, Y., Zou, J., Shi, Y., 2013. Mean residence time of global topsoil organic carbon depends on temperature, precipitation and soil nitrogen. *Global and Planetary Change* 100, 99–108. doi:10.1016/j.gloplacha.2012.10.006
- Chlupík, J., Zaujec, A., Szombathová, N., Tobiašová, E., 2003. Fyzikálne a hydrofyzikálne vlastnosti černoze a hnědozemí Podunajskej nížiny. Presented at the Funkcia energetickej a vodnej bilancie v biologických systémoch, Slovak University of Agriculture in Nitra, Račková dolina.
- Chytrý, M., Kučera, T., Kočí, M., 2001. Katalog biotopů České republiky. AOPK ČR, Praha.
- Cílek, V., 1996. Sprašová rokle v Zeměchách u Kralup nad Vltavou (12-21 Kralupy nad Vltavou). *Zprávy v geologických výzkumech v roce 1995* 31–33.
- Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols, 1967. Classification des sols. Edition 1967., Travaux CPCS 1963-1967. ed. CPCS.
- Commission Européene, 2005. Soil Atlas of Europe, European Soil Bureau Network, Office for Official Publications of the European Communities. ed. Luxembourg.
- Commission Européene, 2014. Soil Maps of Europe/ Maps per Country (European Digital Archive of Soil Maps) [WWW Document]. Soil Maps of Europe. URL http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/library/maps/country_maps/metadata.cfm?mycountry=HU
- Coûteaux, M.-M., Berg, B., 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, 1587–1600. doi:10.1016/j.soilbio.2003.08.003
- Culek, M., Grulich, V., Povolný, D., 1996. Biogeografické členění České republiky. Enigma s.r.o., Praha.
- Czóbel, S., Horváth, L., Szirmai, O., Balogh, J., Pintér, K., Németh, Z., Ürmös, Z., Grosz, B., Tuba, Z., 2010. Comparison of N₂O and CH₄ fluxes from Pannonian natural ecosystems. *European Journal of Soil Science* 61, 671–682. doi:10.1111/j.1365-2389.2010.01275.x
- Danková, L., 2012. Antrakologie a NMR spektroskopie v paleoekologickém výzkumu černoze. Přírodovědecká fakulta UK, Praha.
- Demoule, J.-P., Cottiaux, R., Dubouloz, J., Giligny, F., Jallot, L., Manolakakis, L., Sénépart, I., 2007. La révolution néolithique en France, *Archéologie de France*. Editions La Découverte, Paris.
- Deutscher Wetterdienst, 2014. Deutscher Klimaatlas.
- Dokuchaev, V.V., 1883. *Russkij Chernozem*. Sankt Petersburg.
- Dokuchaev, V.V., 1900. Collection pédologique - Zones verticales des sols - Zones agricoles - Sols du Caucase. Exposition universelle Paris 1900 Section russe - Saint Petersburg - Guide scientifique sommaire de la section pédologique russe à l'Exposition Universelle de 1900 à Paris. Ministère de l'Agriculture Saint-Petersbourg, Sankt Petersburg.
- Dreibrodt, S., Jarecki, H., Lubos, C., Khamnueva, S.V., Klamm, M., Bork, H.-R., 2013. Holocene soil formation and soil erosion at a slope beneath the Neolithic earthwork Salzmünde (Saxony-Anhalt, Germany). *CATENA* 107, 1–14. doi:10.1016/j.catena.2013.03.002

- Dreslerová, D., 2012a. Human Response to Potential Robust Climate Change around 5500 cal BP in the Territory of Bohemia (the Czech Republic). *Interdisciplinaria Archaeologica Natural Sciences in Archaeology* III, 43–55.
- Dreslerová, D., 2012b. Les v pravěké krajině II. *Archeologické rozhledy* LXIV, 199–236.
- Dúbravková, D., Chytrý, M., Willner, W., Illyés, E., Janišová, M., Kállayné Szerényi, J., 2010. Dry grasslands in the Western Carpathians and the northern Pannonian Basin: a numerical classification. *Preslia* 82, 165–221.
- Duchaufour, P., 1977. *Pédologie*. Sous direction de Ph. Duchaufour et B. Souchier. 1. Pédogénèse et classification. Masson, Paris.
- Duchaufour, P., 1998. *Handbook of Pedology*. A. A. Balkema, Rotterdam/Brookfield.
- Dudas, M.J., Pawluk, S., 1969. Chernozem soils of the Alberta Parklands. *Geoderma* 3, 19–36. doi:10.1016/0016-7061(69)90043-3
- Dupuis, J., 1966. Carte pédologique de la France à l'échelle du millionème.
- Eckmeier, E., Gerlach, R., Gehrt, E., Schmidt, M.W.I., 2007. Pedogenesis of Chernozems in Central Europe — A review. *Geoderma* 139, 288–299. doi:10.1016/j.geoderma.2007.01.009
- Eckmeier, E., Rosch, M., Ehrmann, O., Schmidt, M.W.I., Schier, W., Gerlach, R., 2007. Conversion of biomass to charcoal and the carbon mass balance from a slash-and-burn experiment in a temperate deciduous forest. *The Holocene* 17, 539–542. doi:10.1177/0959683607077041
- Ehwald, E., Jäger, K.-D., Lange, E., 1999. Das Problem Wald - Offenland im zirkumherzynen Trockengebiet vor der neolithischen Besiedlung sowie die Entstehung der zirkumherzynen Schwarzerden., in: *Frühe Nutzung Pflanzlicher Ressourcen. Internationales Symposium Duderstedt. Hamburger Werkstattreihe Zur Archäologie. Internationales Symposium Duderstedt., Lit, Hamburg*, pp. 12–34.
- Ertlen, D., 2009. *Archivage pédologique et dynamique environnementales*. Université de Strasbourg, Strasbourg.
- Ertlen, D., Schwartz, D., 2010. Utilisation d'archives géohistorique pour la mise au point d'une nouvelle méthode paléocéologique. *Géocarrefour* 85, 55–66.
- Ertlen, D., Schwartz, D., Brunet, D., Trendel, J.M., Adam, P., Schaeffer, P., soumis. Near infrared spectroscopy, a new tool to recognize past vegetation signature in soil organic matter.
- Ertlen, D., Schwartz, D., Trautmann, M., Webster, R., Brunet, D., 2010. Discriminating between organic matter in soil from grass and forest by near-infrared spectroscopy. *European Journal of Soil Science* 61, 207–216. doi:10.1111/j.1365-2389.2009.01219.x
- Eusterhues, K., Rumpel, C., Kögel-Knabner, I., 2007. Composition and radiocarbon age of HF-resistant soil organic matter in a Podzol and a Cambisol. *Organic Geochemistry* 38, 1356–1372. doi:10.1016/j.orggeochem.2007.04.001
- FAO, ISRIC, ISSS, 1998. *World reference base for soil resources*. World Soil Resources Reports. FAO, Rome.
- FAO, ISRIC, ISSS, 2006. *World reference base for soil resources 2006. A framework for international classification, correlation and communication*. Food and agriculture organization of the United nations, Rome.
- FAO, UNESCO, 1972. *FAO/ UNESCO Soil Map of the World*.
- Favrot, J.-C., 1971. Les brunizem de la "pampa ondulée" - Argentine. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.* IX., 205–237.
- Fedoroff, N., Bresson, L.M., Courty, M.A., 1987. *Micromorphologie des Sols - Soil Micromorphology*, Plaisir. ed. Association française pour l'étude du sol, Paris.
- Fedorowicz, S., Łanczont, M., Bogucki, A., Kusiak, J., Mroczek, P., Adamiec, G., Bluszcz, A., Moska, P., Tracz, M., 2013. Loess-paleosol sequence at Korshiv (Ukraine): Chronology based on complementary and parallel dating (TL, OSL), and lithopedosedimentary analyses. *Quaternary International* 296, 117–130. doi:10.1016/j.quaint.2012.06.001

- Fekete, G., Virágh, K., Aszalós, R., 1998. Landscape and coenological differentiation of *Brachypodium Pinnatum* grasslands. *Coenoses* 13, 39–53.
- Fekete, G., Virágh, K., Aszalós, R., Précsényi, I., 2000. Static and dynamic approaches to landscape heterogeneity in the Hungarian forest-steppe zone. *Journal of Vegetation Science* 11 11, 375–382.
- Figueiral, I., Mosbrugger, V., 2000. A review of charcoal analysis as a tool for assessing Quaternary and Tertiary environments: achievements and limits. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 164, 397–407.
- Fischer-Zujkov, U., 2000. Die Schwarzerden Nordostdeutschlands - ihre Stellung und Entwicklung im holozänen Landschaftswandel. Humbolt University, Berlin.
- Fishkis, O., Ingwersen, J., Lamers, M., Denysenko, D., Streck, T., 2010. Phytolith transport in soil: a laboratory study on intact soil cores. *European Journal of Soil Science* 61, 445–455. doi:10.1111/j.1365-2389.2010.01257.x
- Francioso, O., Montecchio, D., Giocchini, P., Cavani, L., Ciavatta, C., Trubetskoj, O., Trubetskaya, O., 2009. Structural differences of Chernozem soil humic acids SEC–PAGE fractions revealed by thermal (TG–DTA) and spectroscopic (DRIFT) analyses. *Geoderma* 152, 264–268. doi:10.1016/j.geoderma.2009.06.011
- Franz, H., 1955. Zur Kenntnis der "Steppenböden" im pannonischen Klimagebiet Österreichs. *Die Bodenkultur* 8, 125–132.
- Frechen, M., Zander, A., Cílek, V., Ložek, V., 1999. Loess chronology of the Last Interglacial/Glacial cycle in Bohemia and Moravia, Czech Republic. *Quaternary Science Reviews* 18, 1467–1493. doi:10.1016/S0277-3791(98)00087-0
- Froehlicher, L., 2013. L'apport des colluvions dans la reconstitution des dynamiques paysagères à partir de la méthode de la spectroscopie proche infrarouge (SPIR) (Mémoire de Master 2). Université de Strasbourg, Strasbourg.
- Froehlicher, L., Ertlen, D., Vysloužilová, B., Schwartz, D., 2014. L'apport des colluvions agricoles dans la reconstitution des dynamiques paysagères à partir de la méthode de la Spectroscopie dans le Proche InfraRouge (SPIR) qualitative, in: *Le sol en héritage. Presented at the 12e Journées d'Etude des sols*, Université de Savoie, Le Bourget de Lac, p. 350.
- Fuller, L., 2010. Chernozemic Soils of the Prairie Region of Western Canada. *Prairie Soils & Crops Journal* 3, 37–45.
- Gaillard, M.-J., Sugita, S., Mazier, F., Trondman, A.-K., Broström, A., Hickler, T., Kaplan, J.O., Kjellström, E., Kokfelt, U., Kuneš, P., Lemmen, C., Miller, P., Olofsson, J., Poska, A., Rundgren, M., Smith, B., Strandberg, G., Fyfe, R., Nielsen, A.B., Alenius, T., Balakauskas, L., Barnekow, L., Birks, H.J.B., Bjune, A., Björkman, L., Giesecke, T., Hjelle, K., Kalnina, L., Kangur, M., van der Knaap, W.O., Koff, T., Lagerås, P., Latałowa, M., Leydet, M., Lechterbeck, J., Lindbladh, M., Odgaard, B., Peglar, S., Segerström, U., von Stedingk, H., Seppä, H., 2010. Holocene land-cover reconstructions for studies on land cover-climate feedbacks. *Climate of the Past* 6, 483–499. doi:10.5194/cp-6-483-2010
- Ganssen, R., 1972. *Bodengeographie*. K. F. Koehler, Stuttgart.
- Garbulsky, M.F., Derebigus, V.A., 2006. Country Pasture/ Forage Resource Profiles. Argentina.
- Gebhardt, A., 1990. Evolution du paléopaysage agricole dans le nord-ouest de la France. Apport de la micromorphologie (Thèse de doctorat). Université de Rennes 1, Rennes.
- Gebhardt, A., 1993. Evolution du paléopaysage agricole dans le nord-ouest de la France. Apport de la micromorphologie. *The Holocene* 3, 333–341.
- Georg-August Universität - Soil Museum, n.d.
- Gerasimenko, N., 2006. Upper Pleistocene loess–palaeosol and vegetational successions in the Middle Dnieper Area, Ukraine. *Quaternary International* 149, 55–66. doi:10.1016/j.quaint.2005.11.018
- Gerlach, R., Baumewerd-Schmidt, H., van den Borg, K., Eckmeier, E., Schmidt, M.W.I., 2006. Prehistoric alteration of soil in the Lower Rhine Basin, Northwest Germany—

- archaeological, 14C and geochemical evidence. *Geoderma* 136, 38–50. doi:10.1016/j.geoderma.2006.01.011
- Gerlach, R., Eckmeier, E., 2012. Prehistoric land use and its impact on soil formation since Early Neolithic. Examples from the Lower Rhine area. *Journal for Ancient Studies* 3, 11–16.
- Głąb, T., Kulig, B., 2008. Effect of mulch and tillage system on soil porosity under wheat (*Triticum aestivum*). *Soil and Tillage Research* 99, 169–178. doi:10.1016/j.still.2008.02.004
- Glaser, B., Birk, J.J., 2012. State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (terra preta de Índio). *Geochimica et Cosmochimica Acta* 82, 39–51. doi:10.1016/j.gca.2010.11.029
- Goepp, S., 2007. Origine, histoire et dynamique des Hautes-Chaumes du massif vosgien. Déterminismes environnementaux et actions de l'Homme. Université Louis Pasteur, Strasbourg.
- Google, 2014. *Mapy Google* [WWW Document]. *Mapy Google*. URL <https://www.google.com/maps>
- Gorburov, I.I., 1974. Subzones of leached and typical chernozem soils, in: *Guidebook of the Soil Excursion. Eastern European Lowland*. Nauka Press, Moscow, pp. 14–31.
- Granec, M., Šurina, B., 1999. *Atlas pod SR. Vyskumny ustav podznalectva a ochrany pody*, Bratislava.
- Greenland, D.J., 1971. Interactions between humic and fulvic acids and clays. *Soil Science* 111, 34–41.
- Gregorich, E.G., Monreal, C.M., Carter, M.R., Angers, D.A., Ellert, B.H., 1994. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Canadian Journal of Soil Science* 74, 367–385. doi:10.4141/cjss94-051
- Grulich, V., Buček, A., Lacina, J., 2006. Významné lokality XX, 37–45.
- Guggenberger, G., 2005. Humification and Mineralization in Soils, in: *Microorganisms in Soils: Roles in Genesis and Functions*. Springer, Berlin Heidelberg NewYork, pp. 85–104.
- Guillet, B., 1979. Etudes du renouvellement des matières organiques des sols par les radioisotopes (14C), in: *Pédologie. 2. Constituants et propriétés du sols*. Masson, Paris, pp. 210–226.
- Haase, D., Fink, J., Haase, G., Ruske, R., Pécsi, M., Richter, H., Altermann, M., Jäger, K.-D., 2007. Loess in Europe—its spatial distribution based on a European Loess Map, scale 1:2,500,000. *Quaternary Science Reviews* 26, 1301–1312. doi:10.1016/j.quascirev.2007.02.003
- Haesaerts, P., 1985. Les loess du Pleistocène supérieur en Belgique; Comparaisons avec les séquences d'Europe Centrale. *Bulletin de l'Association française pour l'étude du Quaternaire* 2-3, 105–115.
- Harlfinger, O., Knees, G., 1999. *Klimahandbuch der Österreichischen Bodenschätzung*. Mitt. d. Österr. Bodenkundl. Ges., Wien.
- Hartemink, A.E., Krasilnikov, P., Bockheim, J.G., 2013. Soil maps of the world. *Geoderma* 207-208, 256–267. doi:10.1016/j.geoderma.2013.05.003
- Hauptman, I., Kukul, Z., Pošmourný, K., Němec, J., 2009. *Půda v České republice*, 1. vydání. ed. Ministerstvo životního prostředí a Ministerstvo zemědělství, Praha.
- Havinga, A.J., 1972. A palynological investigation in the pannonian climate region of lower Austria. *Review of Palaeobotany and Palynology* 14, 319–352. doi:10.1016/0034-6667(72)90025-5
- Heiss, A.G., 2006. *Anatomy of European and North American woods - an interactive identification key*.
- Henderson, T.L., Baumgardner, M.F., Franzmeier, D.P., Stott, D.E., Coster, D.C., 1992. High Dimensional Reflectance Analysis of Soil Organic Matter. *Soil Sci. Soc. Am. J* 56, 865–872.
- Herrmann, L., Ehrmann, O., Stein, C., Wermbter, N., Schulz, E., Rösch, M., Hall, M.,

- Bogenrieder, A., Page, H., Schier, W., 2007. The Forchtenberg project. An interdisciplinary experimental approach towards Neolithic agriculture. *Atti Soc. tosc. Sci. nat., Mem., Serie A*, 112 112.
- Hong, H.N., Rumpel, C., Henry des Tureaux, T., Bardoux, G., Billou, D., Tran Duc, T., Jouquet, P., 2011. How do earthworms influence organic matter quantity and quality in tropical soils? *Soil Biology and Biochemistry* 43, 223–230. doi:10.1016/j.soilbio.2010.09.033
- Horváth, A., 2010. Validation of description of the Xeromesophilous loess grassland association, Euphorbio Pannonicae-Brachypodietum Pinnati. *Acta Botanica Hungarica* 52, 103–122. doi:10.1556/ABot.52.2010.1–2.10
- Hrabovský, A., Balkovič, J., Kollar, J., 2010. Fytocenologická charakteristika lesnej vegetácie NPR Dubník, in: *Zborník Recenzovaných Príspevkov. Presented at the Študentská vedecká konferencia Prírodovedeckej fakulty UK v Bratislave 28.4.2010, Univerzita Komenského v Bratislave, Bratislava*, pp. 1380–1385.
- Hraško, J., Linkeš, V., Šály, R., Šurina, B., 1993. *Pôdna mapa Slovenska*.
- Illyés, E., Chytrý, M., Botta-Dukát, Z., Jandt, U., Škodová, I., Janišová, M., Willner, W., Hájek, O., 2007. Semi-dry grasslands along a climatic gradient across Central Europe: Vegetation classification with validation. *Journal of Vegetation Science* 18, 835–846. doi:10.1111/j.1654-1103.2007.tb02600.x
- Itan, Y., Powell, A., Beaumont, M.A., Burger, J., Thomas, M.G., 2009. The Origins of Lactase Persistence in Europe. *PLoS Computational Biology* 5, e1000491. doi:10.1371/journal.pcbi.1000491
- Ivanova, Y.N., 1956. Essai de classification générale de sols. *C. R. 6e Cong. Intern. Sci. Sol (Paris)* 5, 387–394.
- Jankovská, V., 1994. Pylové spektrum, synantropní vegetace a perspektivy využití pylových analýz v české archeologii, in: *Archeologie a krajinná ekologie. Nadace projekt sever, Most*, pp. 147–159.
- Jankovská, V., Pokorný, P., 2008. Forest vegetation of the last full-glacial period in the Western Carpathians (Slovakia and Czech Republic). *Preslia* 80, 307–324.
- Jelenska, M., Hasso-Agopsowicz, A., Kadzialko-Hofmokl, M., Sukhorada, A., Bondar, K., Matviishina, Z., 2008. Magnetic iron oxides occurring in the chernozem soil from Ukraine and Poland as indicators of pedogenic processes. *Stud. Geophys. Geod.* 52, 255–270.
- Jenkinson, D.S., Andrew, S.P.S., Lynch, J.M., Goss, M.J., Tinker, P.B., 1990. The Turnover of Organic Carbon and Nitrogen in Soil [and Discussion]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 329, 361–368. doi:10.1098/rstb.1990.0177
- Jenny, H., 1941. *Factors of soil formation. A system of Quantitative Pedology*. Dover Publications, Inc., New York.
- JRC EC, 2011. *The Soils of Hungary*.
- Khitrov, N.B., Gerasimova, M.I., Bronnikova, M., Zazovskaya, E.P., 2013. Chernozem of Kursk Biosphere Station of IG RAS, in: *Guid for Field Excursions XIIIth International Symposium and Field Seminar on Paleopedology. Moscow*, pp. 42–50.
- Khokhlova, O.S., Sedov, S.N., Golyeva, A.A., Khokhlov, A.A., 2001. Evolution of Chernozems in the Northern Caucasus, Russia during the second half of the Holocene: carbonate status of paleosols as a tool for paleoenvironmental reconstruction. *Geoderma* 104, 115–133. doi:10.1016/S0016-7061(01)00062-3
- Klíma, B., Kukla, J., Ložek, V., De Vries, H., 1961. Stratigraphie des Pleistozäns und Alter des paläolithischen Rastplatzes in der Ziegelei von Dolní Věstonice. *Anthropozoikum* 11, 93–145.
- Kögel-Knabner, I., 2002. The macromolecular organic composition of plant and microbial residues as inputs to soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry* 34, 139–162.
- Koller, R., Party, J.-P., 1994. *Guide des sols d'Alsace. Région Alsace, Strasbourg*.
- Körös-Maros Nemzeti Igazgatóság, 2014. *Körös-Maros Nemzeti Igazgatóság [WWW*

- Document]. Körös-Maros Nemzeti Igazgatóság.
- Kovda, V.A., Lobova, Y.V., Rozanov, B.G., 1967. Classification of the world's soils. General considerations. *Sov. Soil Sci.* 427–441; 851–863.
- Kreuz, A., 2007. Closed forest or open woodland as natural vegetation in the surroundings of Linearbandkeramik settlements? *Vegetation History and Archaeobotany* 17, 51–64. doi:10.1007/s00334-007-0110-1
- Kruk, J., 1980. The Neolithic settlement of southern Poland, illustrée. ed. *British Archaeological Reports. International Reports* 93., Oxford.
- Krupenikov, I.A., Boincean, B.P., Dent, D., 2011. *The Black Earth. Ecological Principles for Sustainable Agriculture on Chernozem Soils.* Springer.
- Kubiena, W.L., 1938. *Micropedology.* Collegiate Press, Ames Iowa.
- Kubiena, W.L., 1953. *Bestimmungsbuch und Systematik der Böden Europas.* Institut für Bodenkunde Madrid. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- Kuneš, P., Pelánková, B., Chytrý, M., Jankovská, V., Pokorný, P., Petr, L., 2008. Interpretation of the last-glacial vegetation of eastern-central Europe using modern analogues from southern Siberia. *Journal of Biogeography* 35, 2223–2236. doi:10.1111/j.1365-2699.2008.01974.x
- Kuntze, H., Niemann, J., Roeschmann, G., Schwerdtfeger, G., 1983. *Bodenkunde, Dritte, verbesserte Auflage.* ed. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- Laatsch, W., 1934. Die Bodentypen um Halle/Saale und ihre postdiluviale Entwicklung. *Jahrbuch des Halleschen Verbandes zur Erforschung Mitteldeutscher Bodenschätze.* N.F. XIII, 57–112.
- Laboratoř geoinformatiky, Univerzita J. E. Purkyně, 2012. Oldmaps - Staré mapy [WWW Document]. Oldmaps - Staré mapy. URL <http://oldmaps.geolab.cz>
- Lagacherie, P., Baret, F., Feret, J.-B., Madeira Netto, J., Robbez-Masson, J.M., 2008. Estimation of soil clay and calcium carbonate using laboratory, field and airborne hyperspectral measurements. *Remote Sensing of Environment* 112, 825–835.
- Lambkin, D.C., Gwilliam, K.H., Layton, C., Canti, M.G., Pearce, T.G., Hodson, M.E., 2011. Soil pH governs production rate of calcium carbonate secreted by the earthworm *Lumbricus terrestris*. *Applied Geochemistry* 26, S64–S66. doi:10.1016/j.apgeochem.2011.03.032
- Legros, J.-P., 2007. *Les grands sols du monde, Première.* ed. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne.
- Leser, H., Maqsud, N., 1975. Spätglaziale bis frühholozäne Steppenbodenbildung und Klimaentwicklung im südlichen Rheinhessischen Tafel- und Hügelland. *Eiszeitalter und Gegenwart* 26, 118–130.
- Litt, T., 1992. Fresh investigations into the natural and anthropogenically influenced vegetation of the Earlier Holocene in the Elbe-Saale Region, Central Germany. *Vegetation History and Archaeobotany* 69–74.
- Lorz, C., Saile, T., 2011. Anthropogenic pedogenesis of Chernozems in Germany? – A critical review. *Quaternary International* 243, 273–279. doi:10.1016/j.quaint.2010.11.022
- Ložek, V., 1973. *Příroda ve čtvrtohorách.* Academia, Praha.
- Ložek, V., 1974. *Příroda Českého krasu v nejmladší geologické minulosti.* *Bohemia Centralis* 3, 175–194.
- Ložek, V., 1995. Přírodní rezervace Sprašová rokle u Zeměch. *Nika* 15, 30.
- Ložek, V., 2004. Středoevropské bezlesí v čase a prostoru I–VI. *Ochrana přírody* 59.
- Ložek, V., 2007. *Zrcadlo minulosti.* Dokořán.
- Ložek, V., 2011. *Po stopách pravěkých dějů.* Dokořán, Praha.
- Ložek, V., Smolíková, L., 1973. Der Bodenkomplex von Velký Hubenov als Beispiel einer retrograden Bodenentwicklung im Laufe der Nacheiszeit. *Časopis pro mineralogii a geologii* 18, 365–383.
- Ložek, V., Smolíková, L., 1978. Die nacheiszeitlichen Bodenabfolgen von Poplze und Štětí als Beleg der Boden- und Landschaftsentwicklung im Böhmischem

- Tschernosemgebiet, in: Beiträge zur Quatär- und Landschaftsforschung Festschrift zum 60. Geburtstag von Julius Fink. Verlag F. Hirt, Wien, pp. 531–549.
- Lungu, M., 2012. Evolution of gray forest soil in agricultural use in Central part of Republic of Moldova. *Lucrări Științifice seria Agronomie* 55, 55–58.
- Lüning, J., Kalis, A., 1992. The influence of Early Neolithic settlers on the vegetation of the Lower Rhinlands and the determination of cleared areas based on archeological and palynological criteria. *Paläoklimaforschung* 8, 41–46.
- Machon, A., Horváth, L., Weidinger, T., Grosz, B., Pintér, K., Tuba, Z., Führer, E., 2010. Estimation of net nitrogen flux between the atmosphere and a semi-natural grassland ecosystem in Hungary. *European Journal of Soil Science* 61, 631–639. doi:10.1111/j.1365-2389.2010.01264.x
- Macphail, R.I., Courty, M.A., Gebhardt, A., 1990. Soil micromorphological evidence of early agriculture in North West Europe. *World Archaeology* 22, 53–69.
- Magyari, E.K., Chapman, J.C., Passmore, D.G., Allen, J.R.M., Huntley, J.P., Huntley, B., 2010. Holocene persistence of wooded steppe in the Great Hungarian Plain. *Journal of Biogeography* 37, 915–935. doi:10.1111/j.1365-2699.2009.02261.x
- Mapa generálního štábu čs. armády, 1980.
- Marbut, C.F., 1928. A schema of soil classification. *Proc. 1st Intern. Cong. Soil Sci. (USA)* IV., 1–31.
- Mathieu, C., 2009. *Les principaux sols du monde*, Editions TEC&DOC. ed. Lavoisier, Paris.
- Michéli, E., Fuchs, M., Hegymegi, P., Stefanovits, P., 2006. Classification of the Major Soils of Hungary and their Correlation with the World Reference for Soil Resources (WRB). *Agrokémia és talajtan* 55, 19–28.
- Molnar, Z., Biro, M., 1996. Vegetation history of the Kardoskut area (S.E. Hungary) I.: Regional versus local history, ancient versus recent habitats. *Tiscia* 15–25.
- Monnier, G., 1966. Le concept de sol et son évolution. *Science du sol* 1, 89–111.
- Moskal-del Hoyo, M., 2013. Mid-Holocene forests from Eastern Hungary: New anthracological data. *Review of Palaeobotany and Palynology* 193, 70–81. doi:10.1016/j.revpalbo.2013.01.007
- Nagy, Z., Pintér, K., Czóbel, S., Balogh, J., Horváth, L., Fóti, S., Barcza, Z., Weidinger, T., Csintalan, Z., Dinh, N.Q., Grosz, B., Tuba, Z., 2007. The carbon budget of semi-arid grassland in a wet and a dry year in Hungary. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 121, 21–29. doi:10.1016/j.agee.2006.12.003
- Němeček, J., 1981. Základní diagnostické znaky a klasifikace půd ČSR. *Studie ČSAV, Academia Praha* 8, 16–49.
- Němeček, J., Macků, J., Vokoun, J., Vavříček, D., Novák, P., 2001. Taxonomický klasifikační systém půd ČR. *ČZU Praha a VÚMOP Praha, Praha*.
- Němeček, J., Mühlhanslová, M., Macků, J., Vokoun, J., Vavříček, D., Novák, P., 2011. Taxonomický klasifikační systém půd. 2. upravené vydání. *Praha*.
- Němeček, J., Smolíková, L., Kutílek, M., 1990. *Pedologie a paleopedologie*. Academia, Praha.
- Nestroy, O., 2007. Classification of chernozems, Phaeozems and Calcisols in Austria according to the World Reference Base for Soil Resources (WRB).
- Neuhäuselová, Z., 1998. *Mapa potencionální přirozené vegetace České republiky - Map of potential Natural Vegetation of the Czech Republic*.
- NOAA National Weather Service, 2014. *Climate*.
- Novák, J., 2009. Antrakologická analýza vzorků z Moravského Krumlova IV, in: *Moravský Krumlov IV - Vícevrstevná lokalita ze středního a počátku mladého paleolitu na Moravě*. Anthropos, Brno, pp. 43–48.
- Novák, J., Lisá, L., Pokorný, P., Kuna, M., 2012. Charcoal analyses as an environmental tool for the study of Early Medieval sunken houses infills in Roztoky near Prague, Czech Republic. *Journal of Archaeological Science* 39, 808–817. doi:10.1016/j.jas.2011.06.026
- Nývltová Fišáková, M., Pokorný, P., Šída, P., 2008. *Nové poznatky o přírodním prostředí*

- českého gravettienu - bioarcheologie málo prozkoumaného území naší minulosti, in: Bioarcheologie v České Republice. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, České Budějovice, pp. 219–240.
- Palmborg, C., 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* 26, 711–720.
- Panagos, P., Jones, A., Bosco, C., Senthil Kumar, 2011. European digital archive on soil maps (EuDASM): Preserving important soil data for public free access. *International Journal of Digital Earth* 4, 434–443.
- Parfenova, E.I., Yarilova, E.A., 1967. Humus microforms in the soils of the U.S.S.R. *Geoderma* 1, 197–207. doi:10.1016/0016-7061(67)90027-4
- Pavlu, I., 2007. Neolit mírného evropského pásma (5600-4200BC) a jeho současníci.
- Pavlu, I., Zápotocká, M., 2007. Archeologie pravěkých Čech. Sv. 3 Neolit. Archeologický ústav AV ČR, Praha.
- Pedro, G., 1984. La pédologie cent ans après la parution du “Tchernoziem russe” de B. B. Dokouchaev (1883-1993). *Science du sol* 22, 81–92.
- Pécszi, M., 1982. The most typical loess profiles in Hungary. *Quaternary Studies in Hungary* 145–169.
- Peške, L., Rulf, J., Slavíková, J., 1998. Bylany - ekodata: Specifikace nálezů kostí a rostlinných makrozbytků. *Bylany Varia* 83–118.
- Pessenda, L.C.R., Boulet, R., Aravena, R., Rosolen, V., Gouveina, S.E.M., Ribeiro, A.S., 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.
- Pető, Á., 2013. Studying modern soil profiles of different landscape zones in Hungary: An attempt to establish a soil-phytolith identification key. *Quaternary International* 287, 149–161. doi:10.1016/j.quaint.2012.02.049
- Pietsch, D., 2013. Krotovinas — soil archives of steppe landscape history. *CATENA* 104, 257–264. doi:10.1016/j.catena.2012.12.003
- Piperno, D.R., 1988. Phytolith analysis. An archeological and geological perspective. Academic Press, New York.
- Pokorný, P., 2005. Role of man in the development of Holocene vegetation in Central Bohemia. *Preslia* 77, 113–128.
- Prokhorov, A., 1969. The Great Soviet Encyclopedia (English translation), 3rd ed. Bolšaja sovětskaja enciklopedija, Moscow.
- Reintam, L., 2001. Soil stories from Swedish time up to present., in: *Historiae Scientiarum Baltica*. Abstract of the XV Baltic Conference on the History of Science. Tartu, pp. 30–31, 141–144.
- REKLIP, Groupe de travail trinational, Fiedler, F., 1995. *Klimaatlas Oberhein Mitte-Süd: REKLIP, Regio-Klima-Projekt*. Vdf Hochschulverl.; IFG, Institut für angewandte Geowissenschaften; Éd. Coprur, Zürich; Offenbach; Strasbourg.
- Research Laboratory for Archaeology and the History of Art, 2013. Oxford Radiocarbon Accelerator Unit [WWW Document]. OxCal. URL <https://c14.arch.ox.ac.uk/embed.php?File=oxcal.html>
- Rodionov, A., Amelung, W., Haumaier, L., Urusevskaja, I., Zech, W., 2006. Black carbon in the zonal steppe soils of Russia. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 169, 363–369. doi:10.1002/jpln.200521813
- Rohdenburg, H., Meyer, B., 1968. Zur Datierung und Bodengeschichte mitteleuropäischer Oberflächenböden (Schwarzerde, Parabraunerde, Kalksteinbraunlehm): Spätglazial oder Holozän? *Göttinger Bodenkundliche Berichte* 6, 127–212.
- Rostain, S., 2008. Modèles et contre-modèles sociaux, Amérique latine. Éd. de l'École des hautes études en sciences sociales, [Paris].
- Rozov, N.N., Ivanova, Y.N., 1967. Classification of the soils of U.S.S.R. *Sov. Soil Sci.* 147–155.

- Rulf, J., 1983. Přírodní prostředí a kultury českého neolitu a eneolitu. Památky archeologické 74, 35–95.
- Rutter, N.W., Rokosh, D., Evans, M.E., Little, E.C., Chlachula, J., Velichko, A., 2003. Correlation and interpretation of paleosols and loess across European Russia and Asia over the last interglacial–glacial cycle. *Quaternary Research* 60, 101–109. doi:10.1016/S0033-5894(03)00069-3
- Rybníčková, E., Rybníček, K., 1991. The environment of the Pavlovian - palaeoecological results from Bulhary, South Moravia, in: *Palaeovegetational Development in Europe and Regions Relevant to Its Palaeofloristic Europe*. Museum of Natural History Vienna, p. 430.
- Schalich, J., 1981. Boden- und Landschaftsgeschichte in der westlichen Niederheinischen Bucht. *Fortschritte in der Geologie des Rheinlandes und Westfalens* 29, 505–518.
- Scharpenseel, H.W., Pietig, F., 1970. University of Bonn natural radiocarbon measurements III. *Radiocarbon* 12, 19–39.
- Scharpenseel, H.W., Pietig, F., 1971. University of Bonn natural radiocarbon measurements IV. *Radiocarbon* 13, 189–212.
- Scharpenseel, H.W., Pietig, F., 1973. University of Bonn natural radiocarbon measurements V. *Radiocarbon* 15, 13–41.
- Scharpenseel, H.W., Pietig, F., Tamers, M.A., 1968. Bonn Radiocarbon Measurements I. *Radiocarbon* 10, 8–28.
- Scharpenseel, H.W., Pietig, F., Tamers, M.A., 1969. University of Bonn Natural Radiocarbon Measurements II. *Radiocarbon* 11, 3–14.
- Schaufler, G., Kitzler, B., Schindlbacher, A., Skiba, U., Sutton, M.A., Zechmeister-Boltenstern, S., 2010. Greenhouse gas emissions from European soils under different land use: effects of soil moisture and temperature. *European Journal of Soil Science* 61, 683–696. doi:10.1111/j.1365-2389.2010.01277.x
- Scheffer, F., Meyer, B., 1963. Berührungspunkte der archäologischen und bodenkundlichen Forschung. *Neue Ausgrabungen und Forschungen in Niedersachsen* 1, 1–18.
- Schmidt, M.W.I., Skjemstad, J.O., Gehrt, E., Kögel-Knabner, I., 1999. Charred organic carbon in German chernozemic soils. *European Journal of Soil Science* 50, 351–365.
- Schmidt, M.W.I., Skjemstad, J.O., Jäger, C., 2002. Carbon isotope geochemistry and nanomorphology of soil black carbon: Black chernozemic soils in central Europe originate from ancient biomass burning: GEOCHEMISTRY AND NANOMORPHOLOGY OF SOIL BLACK CARBON. *Global Biogeochemical Cycles* 16, 70–1–70–8. doi:10.1029/2002GB001939
- Schneider, N., Ertlen, D., 2010. Diagnostic géoarchéologique : Rapport d synthèse, LGV EST Européenne.
- 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. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.* XXVI, 327–341.
- Schwartz, D., de Foresta, H., Mariotti, A., Balesdent, J., Massimba, J.P., Girardin, C., 1996. Present dynamics of the savanna-forest boundary in the Congolese Mayombe: a pedological, botanical and isotopic (^{13}C and ^{14}C) study. *Oecologia* 106, 516–524.
- Schwartz, D., Ertlen, D., Davtian, G., Vysloužilová, B., n.d. Les sols LBK et leur fertilité. Incidences sur le développement agricole et la répartition des populations rubanées (Rapport OBRESOC - Tache 7).
- Schwartz, D., Thinon, M., Goepf, S., Schmitt, C., Casner, J., Rosique, T., Wuscher, P., Alexandre, A., Dambrine, E., Martin, C., Guillet, B., 2005. Premières datations directes de défrichements protohistoriques sur les chaumes secondaires des Vosges (Rossberg, Haut-Rhin). *Approche pédoanthracologique*. *C.R. Geosciences* 337, 1250–1256.
- Schweingruber, F.H., 1990. *Microscopic wood anatomy*, third edition. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft.
- Segalen, P., 1978. *Les classifications des sols*. ORSTOM, Paris.

- Selvaradjou, S.-K., Montanarella, L., Spaargaren, O., Dent, D., 2005. European Digital Archive of Soil Maps (EuDASM) - Soil Maps of Asia DVD-ROM version. EUR 21823.
- Seznam.cz, 2014. Mapy.cz [WWW Document]. Mapy.cz. URL www.mapy.cz
- Shenk, J.S., Workman, J.J., Westerhaus, M.O., 2001. Application of NIR spectroscopy to agricultural products, in: *Handbook of Near-Infrared Analysis*, 2nd Edn. (eds D.A. Burns and E.W. Ciurczak). Marcel Dekker, New York, pp. 419–474.
- Skjemstad, J.O., Reicosky, D.C., Wilts, A.R., McGowan, J.A., 2002. Charcoal Carbon in U.S. Agricultural Soils. *Soil Science Society of America Journal* 66, 1249. doi:10.2136/sssaj2002.1249
- Slavíková-Veselá, J., 1951. Rekonstrukce sukcese lesních dřevin u nás na podkladě rozboru uhlíků z prehistorických sídlišť: srovnávací studie a výsledky pylových analýz. (Dissertation). Universita Karlova v Praze, Praha.
- Sobíšek, B., Bednář, J., Černava, S., Flux, J., Frühbauer, J., Gottwald, A., Hodan, L., Jurčovič, P., Kakos, V., Kalvová, J., Koldovský, M., Kopáček, J., Krejčí, J., Krška, K., Munzar, J., Nedelka, M., Otruba, A., Panenka, I., Papež, A., Pícha, J., Podhorský, D., Popolanský, F., Pretel, J., Pribiš, J., Rein, F., Setvák, M., Schoberová, E., Slabá, N., Sládek, I., Strachota, J., Štekl, J., Táborský, Z., Trefná, E., Trhlík, M., Vesecký, A., Zeman, M., Zikmunda, O., 1993. *Meteorologický slovník výkladový a terminologický*. Academia, Ministerstvo životního prostředí ČR, Praha.
- Sobocká, J., 2000. Morfogenetický klasifikačný systém pôd Slovenska: bazálna referenčná taxonómia. Výskumný ústav pôdozvedectva a ochrany pôdy v Bratislave, Societas pedologica slovacica, Bratislava.
- Soil Map Hungary - Genetikai Talajterkep, 2014.
- Sommer, R.S., Benecke, N., Lõugas, L., Nelle, O., Schmölcke, U., 2011. Holocene survival of the wild horse in Europe: a matter of open landscape? *Journal of Quaternary Science* 26, 805–812. doi:10.1002/jqs.1509
- Sprafke, T., Thiel, C., Terhorst, B., 2014. From micromorphology to palaeoenvironment: The MIS 10 to MIS 5 record in Paudorf (Lower Austria). *CATENA* 117, 60–72. doi:10.1016/j.catena.2013.06.024
- Stanová, V., Valachovič, M., 2002. Katalóg biotopů Slovenska. DAPHNE - Inštitút aplikovanej ekológie a Štátna ochrana prírody SR, Bratislava.
- Stenberg, B., Viscarra Rossel, R.A., Mouazen, A.M., Wetterlind, J., 2010. Visible and Near Infrared Spectroscopy in Soil Science, in: *Advances in Agronomy*. Elsevier, pp. 163–215.
- Stoops, G., Eswaran, H., 1986. *Soil - micromorphology*. Van Nostrand Reinhold Company Inc., New York.
- Stuiver, M., Kromer, B., Becker, B., Ferguson, C.W., 1986. Radiocarbon age calibration back to 13.300 years BP and the 14C age matching of the German oak and US Brislecone pine chronologies. *Radiocarbon* 28, 969–979.
- Stuiver, M., Pearson, G.W., 1986. High-precision calibration of the radiocarbon time scale, AD 1950-500 BC. *Radiocarbon* 28, 805–838.
- Stuiver, M., Polach, H., 1977. Discussion reporting of 14C data. *Radiocarbon* 19, 355–363.
- Suttie, J.M., Reynolds, S.G., Batello, C., Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2005. The Russian Steppe, in: *Grasslands of the World*. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome.
- Svobodová, H., 1997. Die Entwicklung der Vegetation in Südmähren (Tschechien) während des Spätglazials und Holozäns - eine palynologische Studie. *Verh. Zool.-Bot. Ges. Österreich* 134, 317–356.
- Szabó, P., 2010. Driving forces of stability and change in woodland structure: A case-study from the Czech lowlands. *Forest Ecology and Management* 259, 650–656. doi:10.1016/j.foreco.2009.11.026
- Szabolcs, I., 1966. *Handbook of genetic soil mapping of fields. Key to the Detailed Genetic Soil Classification used in Hungary*. OMMI, Budapest.
- Talon, B., 1997. Evolution des zones supra-forestières des Alpes sud-occidentales

- françaises au cours de l'Holocène : analyse pédoanthracologique. (Thèse). Université Aix-Marseille III, Marseille.
- Taxonomický klasifikační systém půd ČR, n.d.
- Théry-Parisot, I., Chabal, L., Chrzavzez, J., 2010. Anthracology and taphonomy, from wood gathering to charcoal analysis. A review of the taphonomic processes modifying charcoal assemblages, in archaeological contexts. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 291, 142–153. doi:10.1016/j.palaeo.2009.09.016
- Thinon, M., 1992. L'analyse pédoanthracologique. Aspect méthodologiques et applications. (Thèse Doct. Etat). Université Marseille, Marseille.
- Thirault, E., Charbouillot, S., Durand, F., Leconte, C., Parisot, N., Rivat, F., Rué, M., Vannieuwenhuysse, D., Vital, J., 2013. Petit Beaulieu à Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme) : du Campaniforme au Bronze ancien, habitat et nécropole. Présentation préliminaire. *APRAB* 89–93.
- Thorp, J., Smith, G.D., 1949. Higher categories of soil classification. Order, suborder, and great soil groups. *Soil Sci.* 67, 117–126.
- Tiurin, I.V., 1965. The system of soil classification in the U.S.S.R. Main stages in the development of the soil classification problems in the U.S.S.R. *Pédologie. Symp. Soil Classif.* 3, 7–24.
- Tolasz, R., 2007. Atlas podnebí ČR. Czech Hydrometeorological Institute, Palacky University, Praha, Olomouc.
- Tomášek, M., 2007. Půdy České republiky. Česká geologická služba, Praha.
- Topografická mapa ČSR., 1920.
- Tóth, G., Montanarella, L., Stolbovoy, V., Maté, F., Bodis, K., Jones, A., Panagos, P., Van Liedekerke, M., 2008. Soils of the European Union.
- Velasquez, E., Lavelle, P., Barrios, E., Joffre, R., Reversat, F., 2005. Evaluating soil quality in tropical agroecosystems of Colombia using NIRS. *Soil Biology and Biochemistry* 37, 889–898. doi:10.1016/j.soilbio.2004.09.009
- Vera, F.W.M., 2000. Grazing ecology and forest history. CABI Publishing, Oxford.
- Vergnaud, L., n.d. Morschwiller-le-bas. Ungeheuer Holzle, OA 6065. (non daté) (Rapport de fouilles). ANTEA, Habsheim.
- Verheye, W., de la Rosa, D., n.d. MEDITERRANEAN SOILS, in Land Use and Land Cover. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS).
- Vernet, J.-L., Ogereau, P., Figueiral, I., Machado Yanes, C., Uzquiano, P., 2001. Guide d'identification des charbons de bois préhistoriques et récents. Sud-Ouest de l'Europe : France, Péninsule Ibérique et îles Canaries. CNRS éditions, Paris.
- Virágh, K., al., 1-54. The Pannonian Loess Steppe.
- Virágh, K., Horváth, A., Bartha, S., Somodi, I., 2008. A multiscale methodological approach for monitoring the effectiveness of grassland management. *Community Ecology* 9, 237–246. doi:10.1556/ComEc.9.2008.2.13
- Virágh, K., Tóth, T., Somodi, I., 2011. Effect of slight vegetation degradation on soil properties in *Brachypodium pinnatum* grasslands. *Plant and Soil* 345, 303–313. doi:10.1007/s11104-011-0782-2
- Viscarra Rossel, R.A., Walvoort, D.J.J., McBratney, A.B., Janik, L.J., Skjemstad, J.O., 2006. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. 131, 59–75.
- Viscarra Rossel, R.A., Webster, R., 2011. Discrimination of Australian soil horizons and classes from their visible-near infrared spectra. *European Journal of Soil Science* 62, 637–647. doi:10.1111/j.1365-2389.2011.01356.x
- Vogt, H., Marocke, R., 1972-74. La genèse du poudingue calcaire de la Hardt (Haute-Alsace). *Bull. Soc. Hist. Nat. Colmar* 55, 161–170.
- Volobuyev, V.R., 1964. Principles of genetic classifications of soils. *Sov. Soil Sci.* 1237–1248.
- Von Lützw, M., Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Flessa, H., Guggenberger, G., Matzner, E., Marschner, B., 2007. SOM fractionation methods: Relevance to functional pools

- and to stabilization mechanisms. *Soil Biology and Biochemistry* 39, 2183–2207. doi:10.1016/j.soilbio.2007.03.007
- Vysloužilová, B., Danková, L., Ertlen, D., Novák, J., Schwartz, D., Šefrna, L., Delhon, C., Berger, J.-F., 2014. Vegetation history of chernozems in the Czech Republic. *Vegetation History and Archaeobotany* 23, 97–108. doi:10.1007/s00334-014-0441-7
- Vysloužilová, B., Ertlen, D., Šefrna, L., Rué, M., Campaner, A., Dreslerová, D., Novák, T., Virágh, K., Schwartz, D., n.d. Investigation of vegetation history of buried chernozem soils using near-infrared (NIRS) (accepted). *Quaternary International*. doi:10.1016/j.quaint.2014.07.035
- Výzkumný ústav meliorací a ochrany půd, 2014. WAKPP - Webový archiv Komplexního průzkumu půd [WWW Document]. WAKPP. URL <http://wakpp.vumop.cz/?/data-kpp/> (accessed 1.4.14).
- Walker, M.J.C., Berkelhammer, M., Björck, S., Cwynar, L.C., Fisher, D.A., Long, A.J., Lowe, J.J., Newnham, R.M., Rasmussen, S.O., Weiss, H., 2012. Formal subdivision of the Holocene Series/Epoch: a Discussion Paper by a Working Group of INTIMATE (Integration of ice-core, marine and terrestrial records) and the Subcommittee on Quaternary Stratigraphy (International Commission on Stratigraphy). *Journal of Quaternary Science* 27, 649–659. doi:10.1002/jqs.2565
- Walkey, A., Black, I.A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining organic carbon in soils: Effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Science* 63, 251–263.
- Westermann, P., 1999. Földrajzi atlasz (Geographical Atlas). Celldömölk.
- Wiesbauer, H., al., n.d. Slope steppes, loess steppes and forest steppe meadows in Hungary.
- Willis, K., van Andel, T., 2004. Trees or no trees? The environments of central and eastern Europe during the Last Glaciation. *Quaternary Science Reviews* 23, 2369–2387. doi:10.1016/j.quascirev.2004.06.002
- Willis, K.J., Rudner, E., Sümegi, P., 2000. The Full-glacial forests of central and southeastern Europe. *Quaternary Research* 53, 203–213. doi:10.1006/qres.1999.2119
- Yaloon, H.D., 1997. History of Soil Science in Context: International Perspective, in: *History of Soil Science - International Perspectives*. Catena Verlag, Reiskirchen, pp. 1–15.
- Zádorová, T., Penížek, V., 2011. Problems in correlation of Czech national soil classification and World Reference Base 2006. *Geoderma* 167-168, 54–60. doi:10.1016/j.geoderma.2011.09.014
- Zádorová, T., Penížek, V., Šefrna, L., Drábek, O., Mihaljevič, M., Volf, Š., Chuman, T., 2013. Identification of Neolithic to modern erosion–sedimentation phases using geochemical approach in a loess covered sub-catchment of South Moravia, Czech Republic. *Geoderma* 195-196, 56–69. doi:10.1016/j.geoderma.2012.11.012
- Zádorová, T., Penížek, V., Šefrna, L., Rohošková, M., Borůvka, L., 2011. Spatial delineation of organic carbon-rich Colluvial soils in Chernozem regions by Terrain analysis and fuzzy classification. *CATENA* 85, 22–33. doi:10.1016/j.catena.2010.11.006
- Zander, A., Duller, G.A.T., Wintle, A.G., 2000. Multiple and single aliquot luminescence dating techniques applied to quartz extracted from Middle and Upper Weichselian loess, Zemechy, Czech Republic. *Journal of Quaternary Science* 15, 51–60. doi:10.1002/(SICI)1099-1417(200001)15:1<51::AID-JQS468>3.0.CO;2-6
- Zolyomi, B., Fekete, G., 1994. The Pannonian loess steppe: the differentiation in space and time. *Abstracta Botanica* 18, 29–41.

ANNEXES

1. Liste des espèces botaniques des biotopes steppiques (1a) et forestiers (1b) en Europe Centrale	278
2. Atlas des sites de surface	283
3. Atlas des sites de sols fonctionnels	314
4. Atlas des sites de paléosols	357
5. Résultat de classement des échantillons dans la librairie spectrale bipartite (prairie et forêts) : scores de la fonction canonique	385
6. Résultat de classement des échantillons dans la librairie spectrale tripartite (prairie, forêts, culture) : scores de la fonction canonique	390
7. Résultat de classement des échantillons dans la librairie spectrale tripartite (forêts feuillues, de conifères, mixte) : scores de la fonction canonique	395

Annexe 1a

La liste des espèces botaniques de biotopes steppiques sur chernozems en Europe Centrale (Chytrý *et al.*, 2010 ; Stanová et Valachovič, 2007, Wiesbauer *et al.*, pas daté)

Famille	Strate herbacée
<i>Amaranthaceae</i>	<i>Bassia prostrata</i> (L.) Beck
<i>Amaryllidaceae</i>	<i>Allium flavum</i> L. <i>Allium paniculatum</i> L. subsp. <i>Paniculatum</i>
<i>Apiaceae</i>	<i>Eringium campestre</i> L. <i>Peucedanum alsaticum</i> L. <i>Seseli hippomarathonum</i> Jacq. <i>Seseli pallasii</i> Besser <i>Falcaria vulgaris</i> Bernh. <i>Peucedanum cervaria</i> (L.) Lapeyr <i>Peucedanum oreoselinum</i> (L.) Moench <i>Seseli osseum</i> Crantz <i>Seseli varium</i> Trevir.
<i>Asparagaceae</i>	<i>Anthericum liliago</i> L.
<i>Asteraceae</i>	<i>Achillea setacea</i> Waldst. & Kit <i>Aster amellus</i> L. <i>Centaurea micranthos</i> (Gugler) Hayek <i>Centaurea scabiosa</i> L. <i>Centaurea stoebe</i> L. <i>Inula ensifolia</i> L. <i>Inula germanica</i> L. <i>Inula oculus-christi</i> L. <i>Achillea pannonica</i> Scheele <i>Artemisia campestris</i> L. <i>Artemisia pontica</i> L. <i>Aster linosyris</i> (L.) Bernh. <i>Jurinea mollis</i> (L.) Rchb. <i>Hieracium echioides</i> Lumn. <i>Lactuca perennis</i> L.
<i>Boraginaceae</i>	<i>Echium russicum</i> J. F. Gmel <i>Echium vulgare</i> L. <i>Myosotis stricta</i> Link ex Roem & Schult
<i>Brassicaceae</i>	<i>Alyssum alyssoides</i> (L.) L. <i>Crambe tataria</i> Sebeok <i>Erophila verna</i> (L.) Chevall. <i>Thlaspi perfoliatum</i> L.

<i>Brassicaceae</i>	<i>Alyssum monatum</i> L. <i>Erysimum crepidifolium</i> Rchb. <i>Erysimum diffusum</i> Ehrh.
<i>Campanulaceae</i>	<i>Campanula sibirica</i> L.
<i>Caryophyllaceae</i>	<i>Arenaria serpyllifolia</i> L. agg. <i>Cerastinum brachypetalum</i> Desp. Ex Pers. <i>Dianthus carthusianorum</i> L. <i>Silene otites</i> L.
<i>Compositae</i>	<i>Taraxacum serotinum</i> (Waldst.& Kit.) Poir.
<i>Cyperaceae</i>	<i>Carex humilis</i> Leyss. <i>Carex supina</i> Wahlenb.
<i>Dipsacaceae</i>	<i>Scabiosa canescens</i> Waldst. & Kit <i>Scabiosa ochroleuca</i> L.
<i>Euphorbiaceae</i>	<i>Euphorbia glareosa</i> Pall. Ex M. Bieb <i>Tithymalus tommasianus</i> (Bertol) Soják <i>Euphorbia cyparissias</i> L.
<i>Fabaceae</i>	<i>Chamaecytisus austriacus</i> L. Link <i>Cytisus procumbens</i> (Willd.) Spreng. <i>Dorycnium germanicum</i> (Grenli) Rickli <i>Oxytropis pilosa</i> (L.) DC. <i>Astragalus austriacus</i> Jacq. <i>Astragalus exscapus</i> L. <i>Astragalus onobrychis</i> L.
<i>Hypericaceae</i>	<i>Hypericum elegans</i> Willd. <i>Hypericum perforatum</i> L.
<i>Iridaceae</i>	<i>Iris pumila</i> L.
<i>Lamiaceae</i>	<i>Acinos arvensis</i> (Lam.) Dandy <i>Phlomis tuberosa</i> L. <i>Salvia nemorosa</i> L. <i>Salvia pratensis</i> L. <i>Stachys recta</i> L. <i>Teucrium chamaedrys</i> L. <i>Thymus pannonicus</i> All. <i>Thymus</i> spp.
<i>Leguminosae</i>	<i>Onobrychis arenaria</i> (Kit.) DC
<i>Liliaceae</i>	<i>Gagea minima</i> (L.) Ker Gawl. <i>Gagea pusilla</i> (Schmidt) Schult. F.
<i>Linaceae</i>	<i>Linum austriacum</i> L. <i>Linum flavum</i> L.
<i>Orobanchaceae</i>	<i>Orobanche alsatica</i> Kirchl. <i>Phelipanche arenaria</i> (Borkh.) Pomel
<i>Plantaginaceae</i>	<i>Globularia bisnagarica</i> L. <i>Linaria genistifolia</i> (L.) Mill. <i>Pseudolysimachion spicatum</i> (L.) Opiz

<i>Plantaginaceae</i>	<i>Veronica prostrata</i> L.
<i>Poaceae</i>	<i>Bromus inermis</i> Leyss.
	<i>Elymus hispidus</i> (Opis) Melderis
	<i>Festuca pseudovina</i> Hack. ex Wiesb.
	<i>Festuca rupicola</i> Heuff.
	<i>Festuca valesiaca</i> Schleich. Ex Gaudin
	<i>Helictotrichon desertorum</i> (Less.)
	<i>Koeleria cristata</i> (L.) Celak
	<i>Koeleria macrantha</i> (Ledeb) Schult.
	<i>Melica transsilvanica</i> Schur
	<i>Pheleum phleodes</i> (L.) H. Karst.
	<i>Poa angustifolia</i> L.
	<i>Stipa capillata</i> L.
	<i>Stipa dasyphylla</i> (Lindem.)
	<i>Stipa eriocalis</i> Borbás
	<i>Stipa joannis</i> Celak.
	<i>Stipa pennata</i> L.
	<i>Stipa pucherrima</i> K.Koch
<i>Stipa smirnovii</i> Martinovský	
<i>Stipa tirsia</i> Steven	
<i>Stipa zalesskii</i> Wilensky	
<i>Bothriochloa ischaemum</i> (L.) Keng	
<i>Elytrigia intermedia</i> (Host) Nevski	
<i>Ranunculaceae</i>	<i>Adonis vernalis</i> L.
	<i>Pulsatilla grandis</i> Wender.
	<i>Pulsatilla pratensis</i> (L.) Mill. subsp. <i>Bohemica</i> Skalický
	<i>Ranunculus illyricus</i> L.
	<i>Thalictrum minus</i> L.
<i>Rosaceae</i>	<i>Filipendula vulgaris</i> Moench
	<i>Fragaria viridis</i> Weston
	<i>Potentilla arenaria</i> (Borkh.) Pomel
<i>Rubiaceae</i>	<i>Asperula cynanchica</i> L.
	<i>Galium glaucum</i> L.
	<i>Galium verum</i> L.
<i>Scrophulariaceae</i>	<i>Verbascum lychnitis</i> L.
	<i>Verbascum phoeniceum</i> L.
<i>Violaceae</i>	<i>Viola ambigua</i> Waldst. & Kit.
Strate d'arbre	
<i>Rosaceae</i>	<i>Ceracus fructiosa</i> Pall.
	<i>Prunus tenella</i> Batsch
	<i>Spiraea media</i> F. Schmidt
Mousses	
<i>Rhytidiaceae</i>	<i>Rhytidium rugosum</i> (Ehrh. Ex. Hedw.) Kindb.
	<i>Thuidium abietinum</i> (Hedw.) Schimp

Lichens	
<i>Cladoniaceae</i>	<i>Cladonia convulata</i> (Lampkey) Anders <i>Cladonia foliacea</i> (Huds.) Willd. <i>Cladonia furcata</i> (Huds.) Schrad. <i>Cladonia rangiformis</i> Hoffm. <i>Cladonia symphy carpia</i> (Flörke) Fr.
<i>Thuidiaceae</i>	<i>Fulgensia fulgens</i> (Sw.) Elenkin
<i>Peltigeraceae</i>	<i>Peltigera canina</i> (L.) Willd. <i>Peltigera rufescens</i> (Weiss) Humb.

Annexe 1b La liste des espèces botaniques de forêts sur chernozems en Europe Centrale (Chytrý *et al.*, 2010 ; Stanová et Valachovič, 2007 ?, Wiesbauer *et al.*, pas daté)

Famille	Arbres et arbustes
<i>Adoxaceae</i>	<i>Viburnum lantana</i> L.
<i>Caprifoliaceae</i>	<i>Lonicera xylosteum</i> L.
<i>Celastraceae</i>	<i>Euonymus verrucosa</i> Scop.
<i>Cornaceae</i>	<i>Cornus mas</i> L.
<i>Fagaceae</i>	<i>Quercus cerris</i> L. <i>Quercus petraea</i> agg. Liebl. <i>Quercus pubescens</i> Willd. <i>Quercus robur</i> L. <i>Quercus virgiliana</i> (Ten.) Ten
<i>Oleaceae</i>	<i>Ligustrum vulgare</i> L.
<i>Rosaceae</i>	<i>Crataegus monogyna</i> Jacq. <i>Sorbus domestica</i> L.
<i>Sapindaceae</i>	<i>Acer campestre</i> L. <i>Acer tataricum</i> L.
<i>Ulmaceae</i>	<i>Ulmus minor</i> Mill.
La strate herbacée	
<i>Apiaceae</i>	<i>Bupleurum falcatum</i> L. <i>Peucedanum alsaticum</i> L.
<i>Apocynaceae</i>	<i>Vincetoxicum hirundinaria</i> Medik.
<i>Asteraceae</i>	<i>Centaurea stenolepis</i> A. Kern <i>Hieracium sabaudum</i> L. <i>Inula salicina</i> L. <i>Pyrenthrum corymbosum</i> (L.) Scop. <i>Serratula tinctoria</i> L.
<i>Boraginaceae</i>	<i>Lithospermum purpureo caeruleum</i> L. <i>Pulmonaria mollis</i> Guépin

Campanulaceae	Campanula bononiensis L. Campanula falcatum L.
Caryophyllaceae	Silene nutans L.
Convallariaceae	Polygonatum multiflorum (L.) All.
Cyperaceae	Carex michelii Host Carex montana L.
Fabaceae	Lathyrus lacteus M. Bieb Lathyrus latifolius L. Lathyrus niger (L.) Bern
Iridaceae	Iris graminea L. Iris variegata L.
Lamiaceae	Teucrium chamaedrys L. Betonica officinalis L. Clinopodium vulgare L. Mellitis melissophyllum L.
Liliaceae	Convallaria majalis L.
Poaceae	Brachypodium pinnatum (L.) P. Beauv Brachypodium sylvaticum (Huds.) P. Beauv Dactylis polygama Horv. Festuca heterophylla Lam. Festuca rupicola Heuff. Melica picta C. Koch Melica uniflora Retz. Poa nemoralis L.
Rosaceae	Fragaria moschata Weston Geum urbanum L.
Rubiaceae	Cruciata laevipes Opiz Galium glaucum L. Galium sylvaticum L.
Scrophulariaceae	Veronica officinalis L. Veronica vindobonensis (M. A. Fisch)
Violaceae	Viola hirta L. Viola mirabilis L.
Mousse	
Brachytheciaceae	Brachythecium velutinum (Hedw.)

Annexe 2.

Liste des sites pour la construction de la librairie spectrale des chernozems (sites de surface)

Nom de site	Code de site	Formation végétale	Type de sol	Substrat	Référence
Babský les*	BAB 01-30	Forêt	Chernozem	Lœess	
Battonya-Gulya Gyep*	HUB	Prairie	Chernozem	Lœess	
Brozany*	BRO	Prairie	Chernozem	Lœess	
Bugac pusztá - dépression*	HUUD	Prairie	Chernozem arenic hydromorphe	Sable	Nagy <i>et al.</i> 2007
Bugac pusztá - dune*	HUU	Prairie	Chernozem arenique	Sable	Nagy <i>et al.</i> 2007
Bulhary*	BUL	Forêt	Chernozem	Lœess	Schko, 2006
Czikospusztá	HUC	Prairie	Chernozem	Lœess	
Gallenhölzchen	DID	Forêt	Sol brun calcaire	Lœess	Ertlen 2009
Dubník*	DUB	Forêt	Chernozem	Lœess	Hrabovský <i>et al.</i> , 2010
Hajdubagos	HUH	Prairie	Chernozem	Sable	
Breiholtz	HIR	Forest	Sol brun calcaire	Lœess	Ertlen 2009
Kopeč-rendzine*	KOR	Prairie	Rendzine	Lœess	
Kopeč-chernozem*	KOC	Prairie	Chernozem	Lœess	
Kursk*	KUR	Prairie	Chernozem	Lœess	Khitrov <i>et al.</i> , 2013
Mezofold - Belsobarand-valley*	HUM1 et HUM2	Prairie	Chernozem	Lœess	Horváth, 2009
Mikhajlovska celina MIK*	MIK	Prairie	Chernozem	Lœess	
Poscaj	HUP	Prairie	Chernozem	Lœess	
Sarand*	HUS	Prairie	Chernozem arenique	Sable	
Senec	SEN	Forêt	Chernozem	Lœess	
Stoeffelhag	CAR	Forêt	Sol brun calcaire	Lœess	Ertlen 2009
Streletsk	STR	Prairie	Chernozem	Lœess	Khitrov <i>et al.</i> 2013
Tard *	HUR	Prairie	Chernozem à BT	Lœess	
Tokaj	HUT	Prairie	Sol brun calcaire (?)	Lœess	

*profil associé

Commune	Localisation	Altitude
Báb (Slovaquie)	48°18'09''N 17°53'18''E	215 m

Babský les*

BAB (01-30)*

Type de sol

Chernozem

Historique

Forêt exploitée, certainement depuis 1769-1785

La forêt de Babský les : Première cartographie militaire 1769-1785

Google Maps 2013



Formation végétale

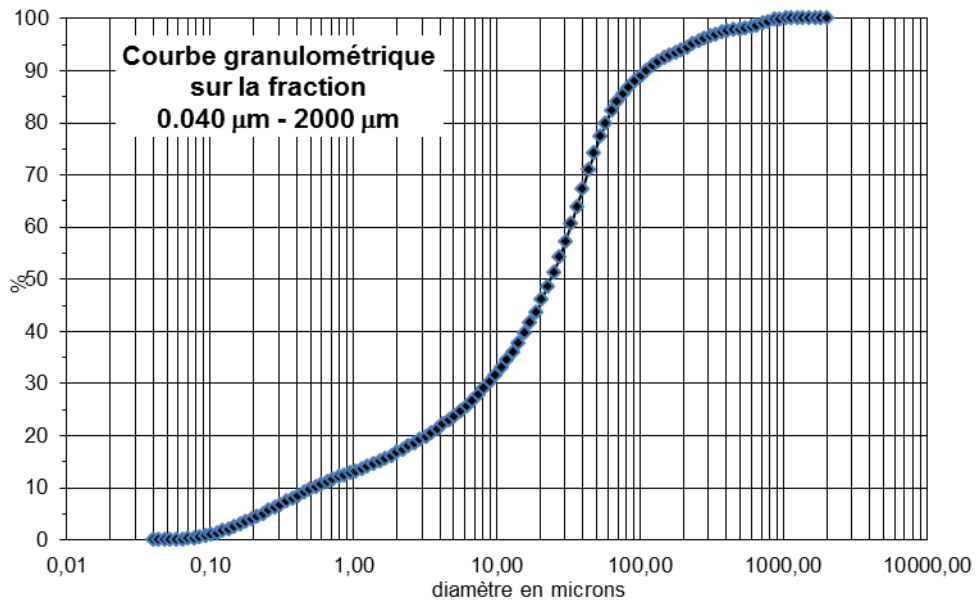
Forêt mature

Principales essences

Strate arborée : *Ailantus altissima*, *Quercus cerris*, *Acer campestre* (très abondant en sous-bois), *Ulmus laevis*, *Sorbus torminalis*, *Carpinus betulus*, *Cornus mas*, *Crataegus monogyna*, *Fraxinus excelsior* (peu abondant), une espèce indéterminée exotique ;

Strate herbacée : discontinue (30 à 70 % de couverture); *Hedera helix*, *Mercurialis perennis*, *Geum* sp., une Lamiacée inconnue.

Profondeur	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	MO (PAF) %	CO(WB) %	MO(WB) %	C %	N %	CO:N
0-4	5,06	1,24	11,02	4,97	8,58	4,83	0,39	12,41



Granulométrie

- %A**
16,1
- %LF**
27,6
- %LG**
30,5
- %SF**
19,7
- %SG**
6,1

Commune	Localisation	Altitude
Battonya (Hongrie)	46°17'58"N 21°1'25"E	96 m

Battonya – Gulya Gyep*

HUB*

Type de sol

Chernozem – d'après la classification hongroise « meadow chernozem »

Historique

Espace réservé pour le pâturage du village (2^{ème} cartographie militaire 1806-1869)

Formation végétale

Prairie

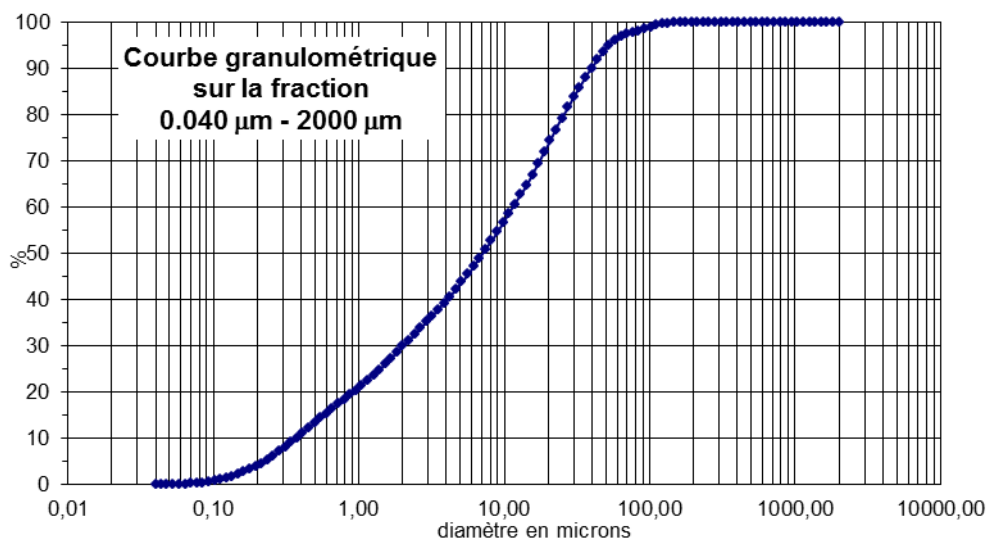


Photo : D. Schwarz

Principales essences

Galium verum L. (Rubiacées), *Phleum* ? (Poacées), *Ranunculus* sp. (Renonculacées), *Vicia* sp. (Fabacées), *Lathyrus* sp. (Fabacées), *Daucus carotta* L. (Apiacées), *Potentilla argentea* L. (Rosacées).

Profondeur	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	MO (PAF) %	CO(WB) %	MO(WB) %	C %	N %	CO:N
0-4	7,51	0,59	9,82	1,42	2,44	-	-	-



Granulométrie

% A
28,6
% LF
43,3
% LG
21,8
%SF
6,3
%SG
0

Commune	Localisation		Altitude
Brozany (Rép. Tchèque)	50°27'21"N	14°8'19"E	170 m

Brozany*

BRO*

Type de sol

Chernozem typique sur Loëss

Historique

La cartographie militaire (1842-1852) montre que le site a été au bord d'un escarpement qui n'était pas boisé.

Formation végétale

Bande de 20 à 40 m de prairie entre les champs et l'escarpement ; elle est fauchée régulièrement.

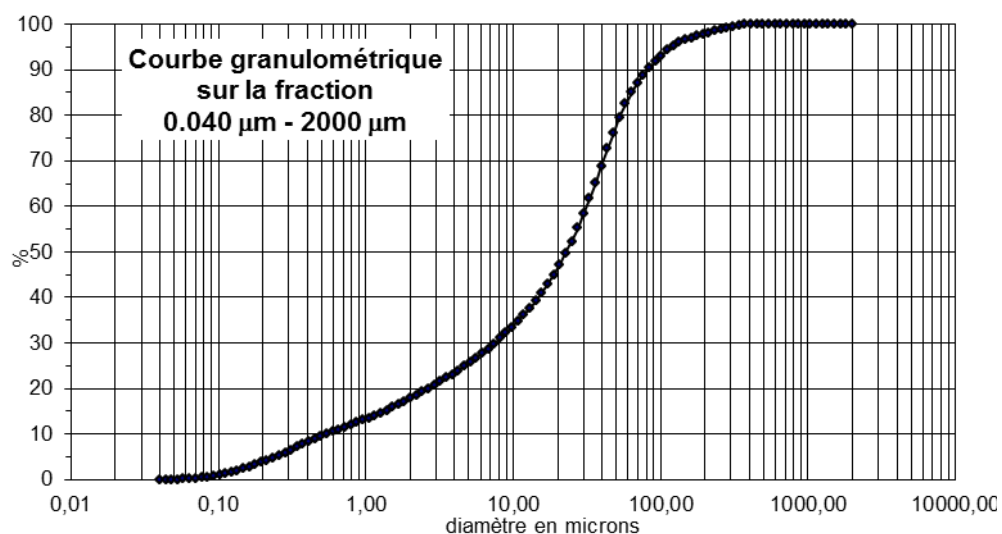
Principales essences

Graminées ; Astéracées.



Photo : B. Vysloužilová

Profondeur	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	MO (PAF) %	CO(WB) %	MO(WB) %	C %	N %	CO:N
0-4	7,67	15,01	6,44	2,20	3,79	4,40	0,26	8,48



Commune	Localisation		Altitude
Bugac (Hongrie)	46°41'27"N	19°36'4"E	106 m

Bugac puszta – dépression*

HUUD*

Type de sol

Regosol hydromorphe (?)

Historique

Puszta (prairie selon la 2^{ème} cartographie militaire 1806-1869)

Formation végétale

Prairie pâturée

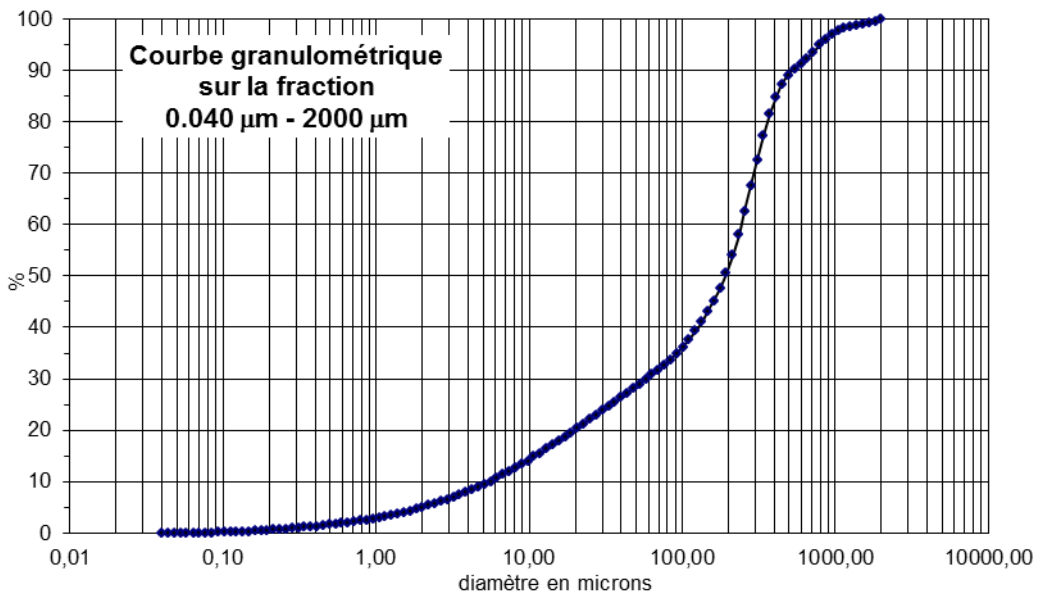


Photo : D. Schwartz

Principales essences

Achillea collina, *Alyssum alyssoides*, *Anthemis ruthenica*, *Arenaria serpyllifolia*, *Astragalus onobrychis*, *Ballota nigra*, *Berteroa incana*, *Brassica elongata*, *Bromus mollis*, *Capsella bursa-pastoris*, *Carduus acanthoides*, *Carex praecox*, *Carex stenophylla*, *Chenopodium album*, *Cirsium arvense*, *Convolvulus arvensis*, *Conyza canadensis*, *Cynodon dactylon*, *Dactylis glomerata*, *Daucus carotsqa*, *Dianthus pontederiae*, *Elymus hispidus*, *Elymus repens*, *Eryngium campestre*, *Erysimum diffusum*, *Euphorbia cyparissias*, *Falcaria vulgaris*, *Festuca pseudovina* (Poaceae), *Festuca rupicola* (Poaceae), *Festuca valesiaca* (Poaceae), *Galium verum*, *Koeleria cristata*, *Ranunculus polyanthemus*, *Lactuca serriola*, *Lathyrus tuberosus*, *Leontodon hispidus*, *Lepidium draba*, *Luzula campestris*, *Marrubium peregrinum*, *Matricaria inodora*, *Medicago falcata*, *Medicago lupulina*, *Melandrium album*, *Muscari comosa*, *Myosotis stricta*, *Nonea pulla*, *Ononis spinosa*, *Plantago lanceolata*, *Plantago media*, *Poa angustifolia*, *Poa pratensis*, *Potentilla arenaria*, *Potentilla argentea*, *Salvia pratensis*, *Silene vulgaris*, *Sisymbrium orientale*, *Stellaria media*, *Stipa borysthenica*, *Taraxacum officinale*, *Thlaspi perfoliatum*, *Thymus pannonicus*, *Tragopogon orientalis*, *Trifolium campestre*, *Trifolium montanum*, *Trifolium pratense*, *Verbascum lychnitis*, *Verbascum phoeniceum*, *Veronica prostrata*, *Vicia angustifolia*.

Profondeur	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	MO (PAF) %	CO(WB) %	MO(WB) %	C %	N %	Co:N
0-4	6,82	0,00	24,19	2,92	5,02	-	-	-



Commune	Localisation	Altitude
Bugac (Hongrie)	46°41'27"N 19°36'4"E	107 m

Bugac puszta – dune*

HUU*

Type de sol

Chernozem arénique

Historique

Puszta (prairie selon la 2^{ème} cartographie militaire 1806-1869)

Formation végétale

Prairie pâturée

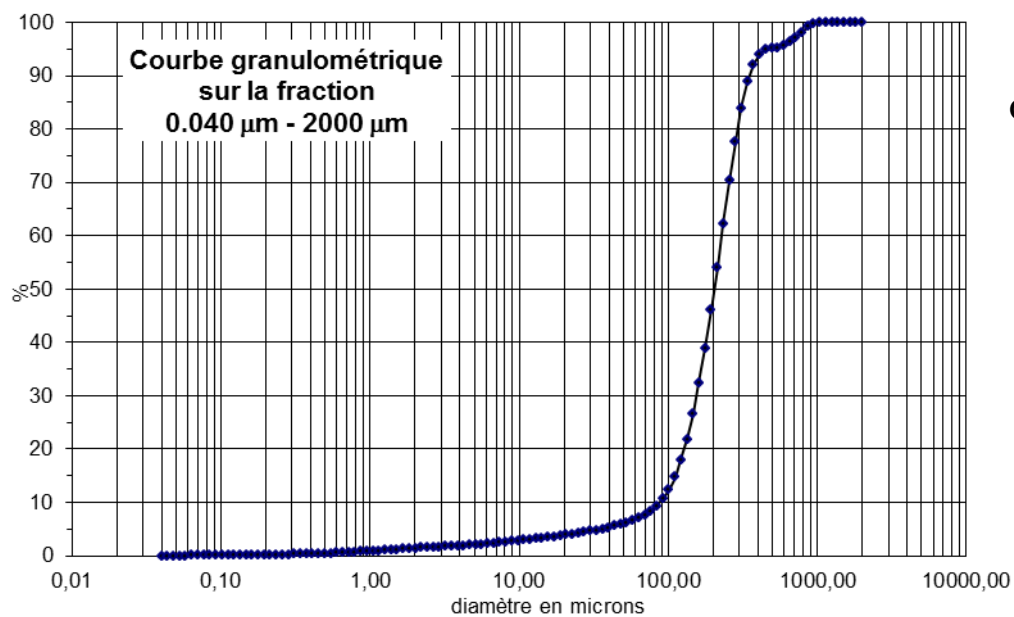
Principales essences

Liste identique à celle du site HUUD



Photo : D. Schwartz

Profondeur	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	MO (PAF) %	CO(WB) %	MO(WB) %	C %	N %	Co:N
0-4	5,9	0,00	6,24	2,92	5,02	-	-	-



Commune	Localisation		Altitude
Bulhary (Rép. Tchèque)	48°48'0"N	16°41'58"E	283 m

Bulhary*

BUL*

Type de sol

Chernozem

Historique

Forêt, la 2^{ème} cartographie militaire montre la forêt ; d'après Szabo (communication orale), la présence de la forêt est prouvée depuis le 13^{ème} siècle.



Photo : D. Schwartz

Formation végétale

Forêt ouverte (forêt-steppe)

Principales essences

Arbres majeurs (20 – 25 m) : *Fraxinus excelsior*, *Quercus* sp. (robur ?) ; Arbres intermédiaires (5-10 m) : *Acer campestre* ; Strate d'arbres en devenir (recru) et sous-bois arboré : *Acer campestre* (dominant), *Crataegus monogyna*, *Fraxinus excelsior*, *Quercus* sp. ; Strate herbacée : *Geum* sp., *Saxifraga* sp., *Hypericum* sp., *Mercurialis perennis*, Labiées (Melittis ?), *Carex* sp., plusieurs graminées dont *Dactylis glomerata*.

Profondeur	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	MO (PAF) %	CO(WB) %	MO(WB) %	C %	N %	CO:N
0-4	6,88	1,31	15,15	6,77	11,67	7,14	0,62	10,86

Commune	Localisation		Altitude
Czikospuszta (Hongrie)	46°17'42"N	20°38'36"E	86 m

Czikospuszta HUC

Type de sol

Chernozem, selon la classification hongroise « meadow chernozem »

Historique

Puszta (prairie selon la 2^{ème} cartographie militaire 1806-1869)

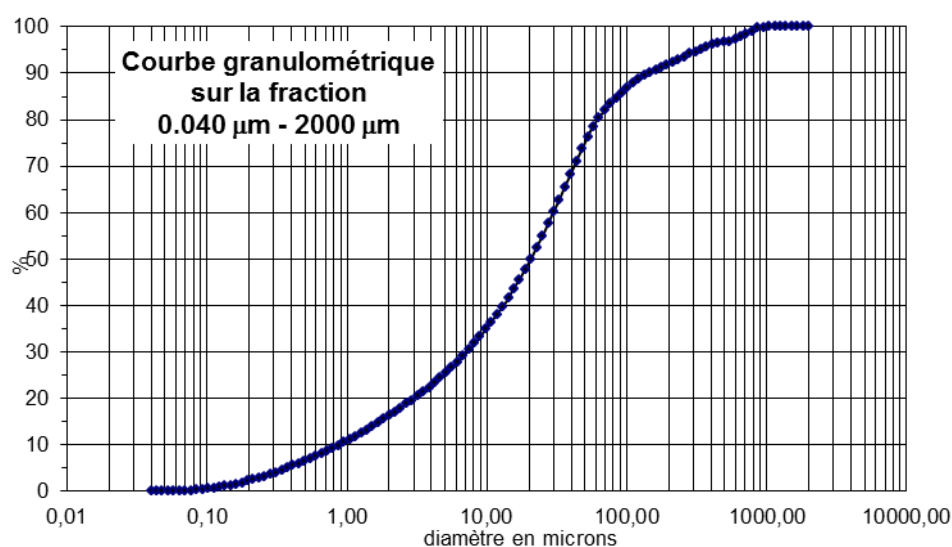
Formation végétale

Prairie

Principales essences

Halopecurus pratensis L. (Poacées); *Phleum cf. pratense* (Poacées); *Marubium sp.* (Lamiacées); *Bromus sterilis* L. (Poacées); *Bromus mollis* L. (Poacées); *Festuca rupicola* Heuff. (Poacées); *Galium verum* L. (Rubiacées); *Convolvulus sp.* (Convolvulacées); *Vicia sp.* (Fabacées); Poacée et Brassicacée indéterminées; *Dactylis glomerata* L. (Poacées).

Profondeur	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	MO (PAF) %	CO(WB) %	MO(WB) %	C %	N %	CO:N
0-4	7,84	4,87	9,65	1,41	2,43	-	-	-



Commune	Localisation	Altitude
Didenheim (France)	47°42'46"N 7°17'25"E	320 m

Gallenhölzchen

DID (Ertlen, 2009)

Type de sol

Sol brun calcaire / calcosol sur loess

Historique

Sous forêt au moins depuis 1760

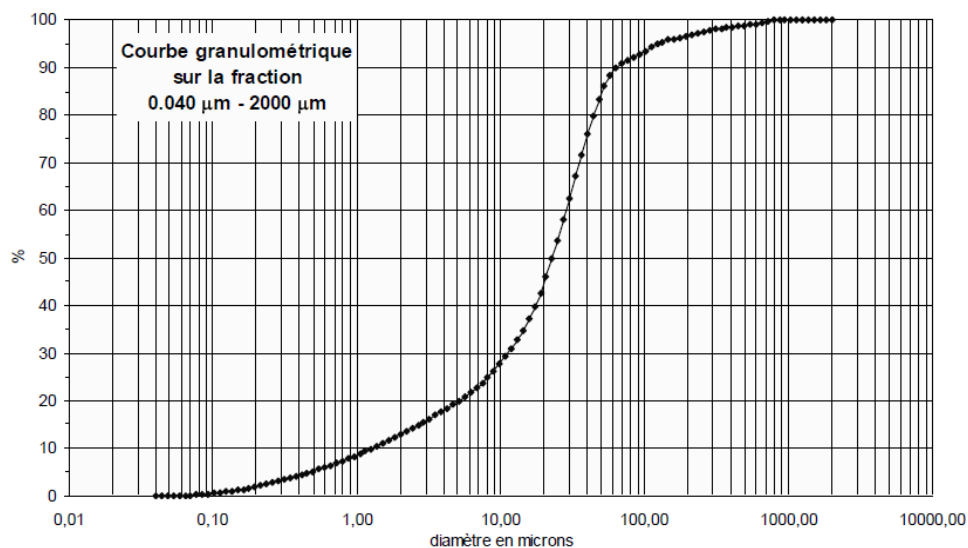
Formation végétale

Chênaie

Principales essences

Chêne, hêtre, charme, merisier, érable plane, noisetier, orme, lierre

Profondeur	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	MO (PAF) %	CO(WB) %	MO(WB) %	C %	N %	CO:N
0-4	5,32	0,00	8,16	3,05	5,25	-	-	-



Commune	Localisation	Altitude
Vinohrady nad Váhom (Slovaquie)	48°18'49"N 17°46'57"E	184 m

Dubník*

DUB*

Type de sol

Chernozem, humus de type moder

Historique

Forêt exploitée, sûrement depuis 1769-1785 (lère cartographie militaire)

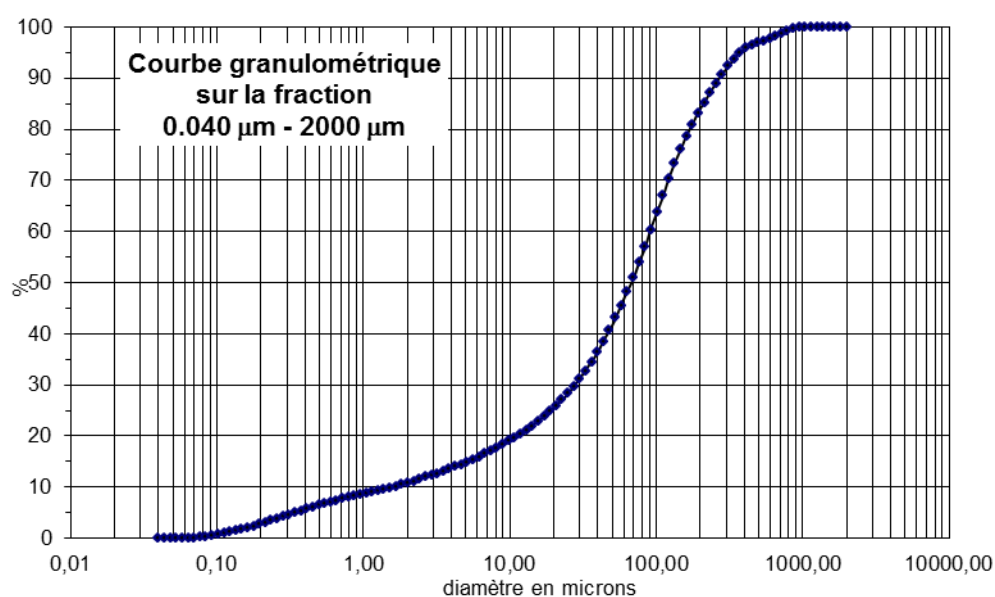
Formation végétale

Forêt mature

Principales essences

Strate arborée : *Quercus sp.*, *Cornus mas*, *Acer campestre*, *Tilia platyphillos*. Au sol, régénération Acer, Tilia, La strate herbacée est discontinue : *Convalaria maialis*

Profondeur	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	MO (PAF) %	CO(WB) %	MO(WB) %	C %	N %	CO:N
0-4	6,31	1,19	9,78	4,17	7,19	4,20	0,33	12,72



Granulométrie

%A
10,5
%LF
14,3
%LG
15,9
%SF
42,5
%SG
16,8

Commune	Localisation	Altitude
Hirsingue (France)	47°36'05"N 7°15'29"	385 m

Hêtraie de Breiholtz

HIR (Ertlen, 2009)

Type de sol

Sol brun calcaire sur loess

Historique

Le site est situé sous forêt au moins depuis 1760

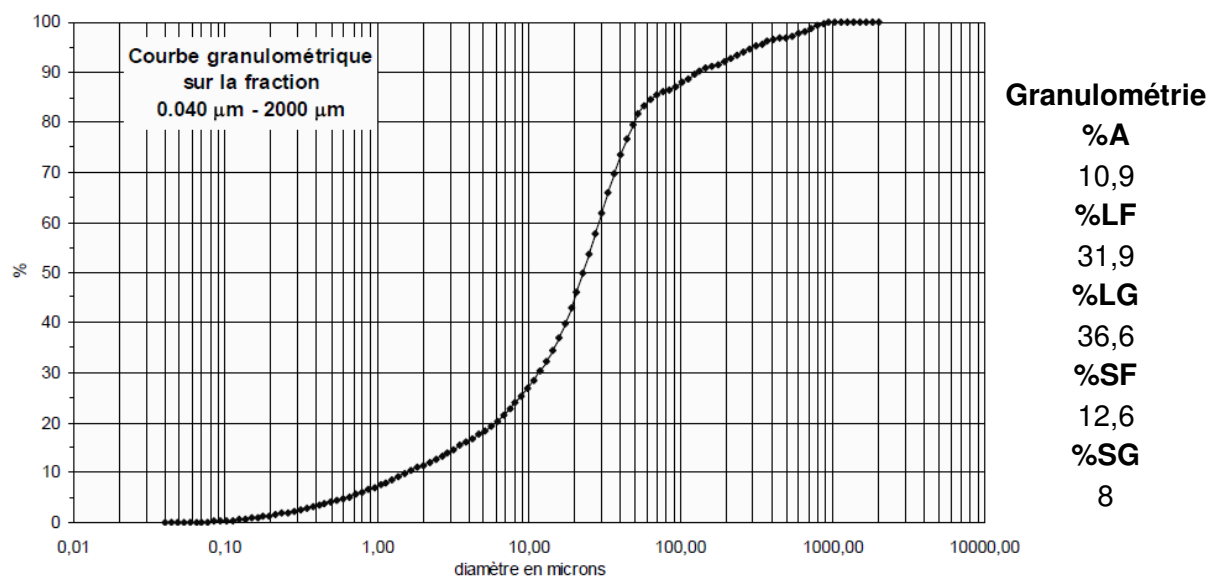
Formation végétale

Forêt

Principales essences

Hêtre, chêne, érable, sapin

Profondeur	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	MO (PAF) %	CO(WB) %	MO(WB) %	C %	N %	Co:N
0-4	4,42	0,00	9,39	3,56	6,12	-	-	-



Commune	Localisation	Altitude
Hajdubagos (Hongrie)	47°24'9"N 21°40'19"E	100 m

Hajdubagos

HUH

Type de sol

Chernozem arénique

Historique

Prairie (selon la 2^{ème} cartographie militaire 1806-1869), réserve naturelle

Formation végétale

Prairie pâturée, les zones sous-pâturées sont envahies par *Crataegus monogyna* et *Prunus spinosa*

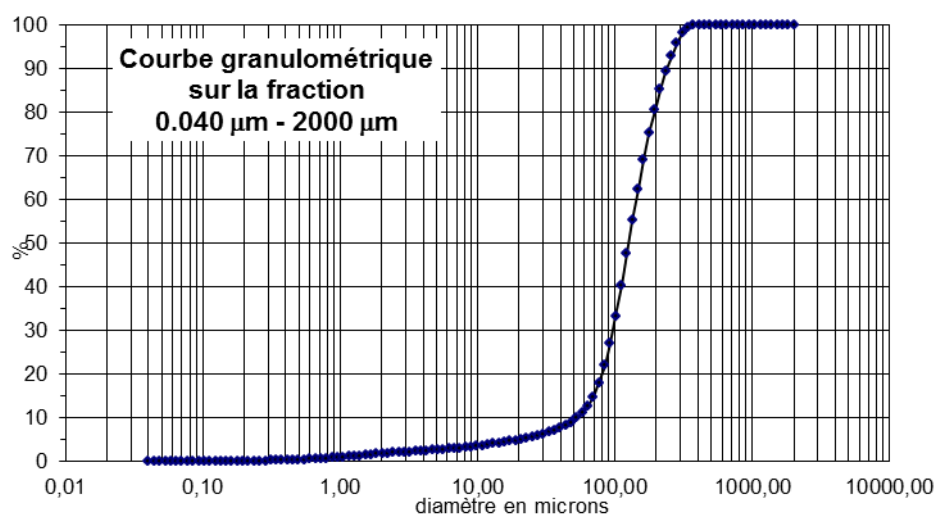


Photo : D. Schwartz

Principales essences

Festuca pseudovina Hack. ex Wiesb (Poacées); *Festuca rupicola* Heuff. (Poacées); *Eryngium campestre* L. (Apiacées); *Potentilla argentea* L. (Rosacées); *Achillea millefolium* L. (Astéracées); *Achillea setacea* Waldst. & Kit. (Astéracées); *Bromus mollis* L. (Poacées); *Trifolium* sp. (en saison pluvieuse) (Fabacées); *Cruciata glabra* (L.) Ehrend. (Rubiacées (= *Galium vernum*)); *Luzula* sp. (Joncacées); *Poa cf. annua* ? *pratensis* ? (Poacées); *Vicia* sp. (Fabacées); *Cynodon dactylon* L.

Profondeur	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	MO (PAF) %	CO(WB) %	MO(WB) %	C %	N %	CO:N
0-4	6,07	1,25	4,69	2,50	4,30	-	-	-



Commune	Localisation	Altitude
Úžice (Rép. Tchèque)	50°14'8"N 14°25'42"E	212 m

Kopeč rendzine KOR*et chernozem KOC*

Type de sol

La steppe comporte deux faciès de sols : un chernozem profond (40 à 60 cm au moins) avec une végétation prairiale appelée **KOC** et une rendzine peu profonde (15 cm au maximum) – appelée **KOR** avec une végétation steppique.



Photo : B. Vysloužilová

Historique

En raison de la protection de la flore steppique, la réserve naturelle « PR Kopeč » a été établie en 1946 sur les collines d'origine volcanique près de Úžice, dans la région des chernozem. Il s'agit d'un site protégé, fauché irrégulièrement. Le site n'est pas cultivé du fait de sa faible épaisseur. La carte de la 2^{ème} cartographie militaire montre une situation identique.

Formation végétale

Prairie

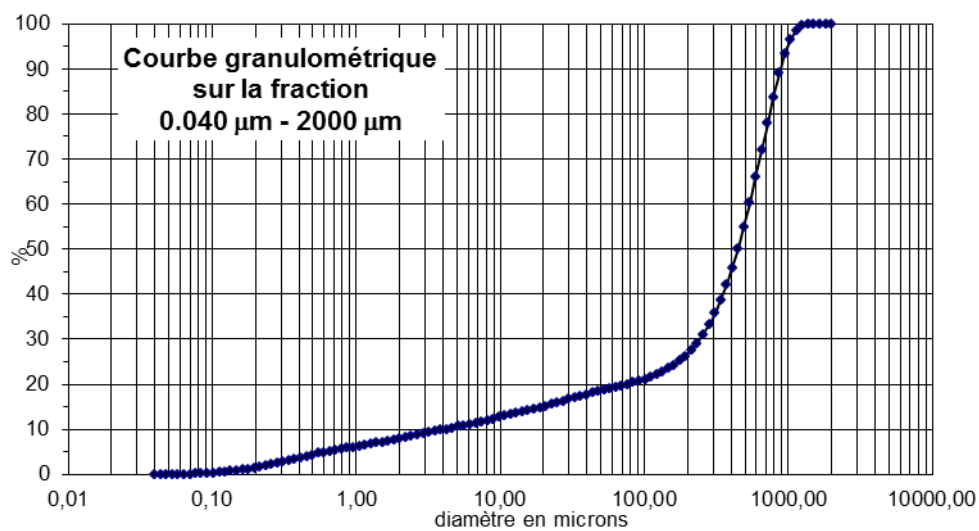
Principales essences

KOC - *Crataegus monogyna*, *Prunus spinosa*, *Rosa canina*, *Hypericum perforatum*, *Fragaria vesca*, *Dactylis glomerata*, *Convolvulus* sp., *Arrhenatherum elatius*, *Galium verum*, *Cirsium* sp.

KOR - *Echinops* sp., *Achillea millefolium*, *Melampyrum arvense*, *Fragaria* sp., *Festuca pallens*, Graminées

Profondeur	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	MO (PAF) %	CO(WB) %	MO(WB) %	C %	N %	CO:N
KOC 0-4	7,3	3,75	9,00	3,17	5,47	3,18	0,27	11,85
KOR 0-4	7,7	3,21	12,56	2,82	4,85	5,59	0,49	5,76

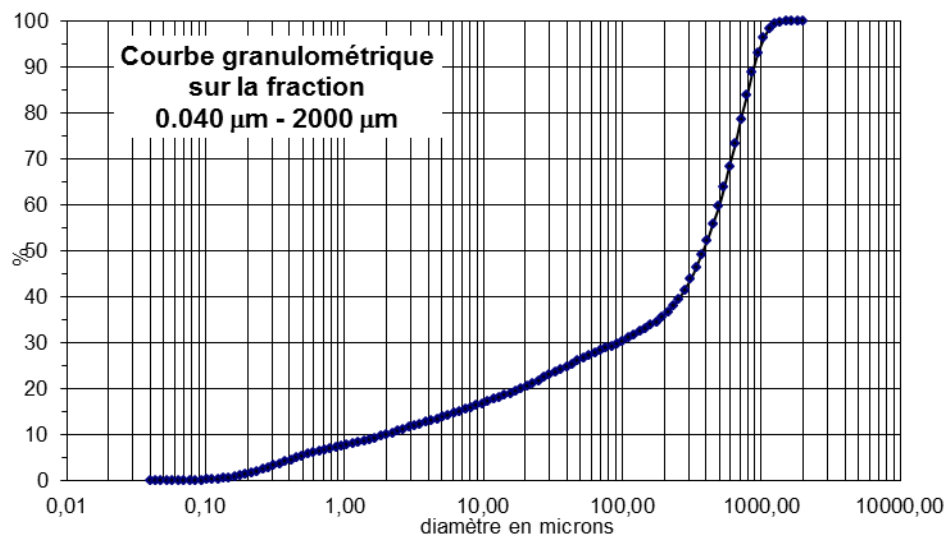
KOC



Granulométrie-KOC

% A	7,7
% LF	7,1
% LG	3,6
% SF	7,8
% SG	73,8

KOR



Granulométrie-KOR

% A	9,6
% LF	10,5
% LG	6
% SF	9,5
% SG	64,4

Commune	Localisation		Altitude
Kursk (Russie)	51°32'23"N	36°05'12"E	200 m

Kursk* KUR* (Khitrov *et al.*, 2013)

Type de sol

Chernozem

Historique

Le site est considéré comme une steppe naturelle (M. Bronnikova, communication orale)

Formation végétale

Prairie

Principales essences

Graminées



Photo : M. Bronnikova

Profondeur	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	MO (PAF) %	CO(WB) %	MO(WB) %	C %	N %	CO:N
0-4	6,7	0	-	4,58	7,88	-	-	-

Commune	Localisation		Altitude
Belsőbáránd (Hongrie)	47° 6'18"N	18°32'3"E	117m

Mezofold - Belsobarand-valley* HUM1* et HUM2

Type de sol

Chernozem

Historique

Présence d'un éperon barré, minuscule, de l'âge du Bronze sur une des collines entre deux vallons. Celui-ci a peut-être perturbé la végétation il y a 4000 ans. D'après la 2^{ème} cartographie militaire (1806-1869), il n'a pas été cultivé. Le site est protégé pour la flore steppique.



Photo : B. Vysloužilová

Formation végétale

Steppe à *Brachypodium pinnatum* sur le versant (trop sec pour le développement de la forêt)

Principales essences

<i>Achillea pannonica</i>	<i>Euphorbia pannonica</i>	<i>Peucedanum alsaticum</i>
<i>Allium paniculatum</i>	<i>Falcaria vulgaris</i>	<i>Peucedanum cervaria</i>
<i>Alopecurus pratensis</i>	<i>Festuca rupicola</i>	<i>Phleum phleoides</i>
<i>Asperula cynanchica</i>	<i>Filipendula vulgaris</i>	<i>Pimpinella saxifraga</i>
<i>Aster amellus</i>	<i>Galium glaucum</i>	<i>Poa angustifolia</i>
<i>Aster linosyris</i>	<i>Galium verum</i>	<i>Potentilla recta</i>
		<i>Ranunculus</i>
<i>Betonica officinalis</i>	<i>Genista tinctoria</i>	<i>polyanthemos</i>
<i>Brachypodium pinnatum</i>	<i>Helictotrichon pratense</i>	<i>Salvia pratensis</i>
<i>Briza media</i>	<i>Helictotrichon pubescens</i>	<i>Scabiosa ochroleuca</i>
<i>Bromus inermis</i>	<i>Hieracium umbellatum</i>	<i>Seseli annuum</i>
<i>Campanula bononiensis</i>	<i>Hypochoeris maculata</i>	<i>Stachys recta</i>
<i>Carex michelii</i>	<i>Hypericum elegans</i>	<i>Teuchrium chamaedrys</i>
<i>Carex tomentosa</i>	<i>Inula ensifolia</i>	<i>Thalictrum minus</i>
<i>Centaurea pannonica</i>	<i>Inula hirta</i>	<i>Thlaspi jankae</i>
<i>Centaurea sadleriana</i>	<i>Inula oculus-christi</i>	<i>Thlaspi perforiatum</i>
<i>Chamaecytisus austriacus</i>	<i>Iris variegata</i>	<i>Trifolium alpestre</i>
<i>Chrysanthemum</i>		
<i>corymbosum</i>	<i>Knautia arvensis</i>	<i>Trifolium montanum</i>

Coronilla varia = Securigera varia

Crataegus monogyna

Dactylis glomerata

Elymus hispidus

Eryngium campestre

Koeleria cristata

Lotus corniculatus

Medicago falcata

Onobrychis arenaria

Ononis spinosa

Veronica austriaca

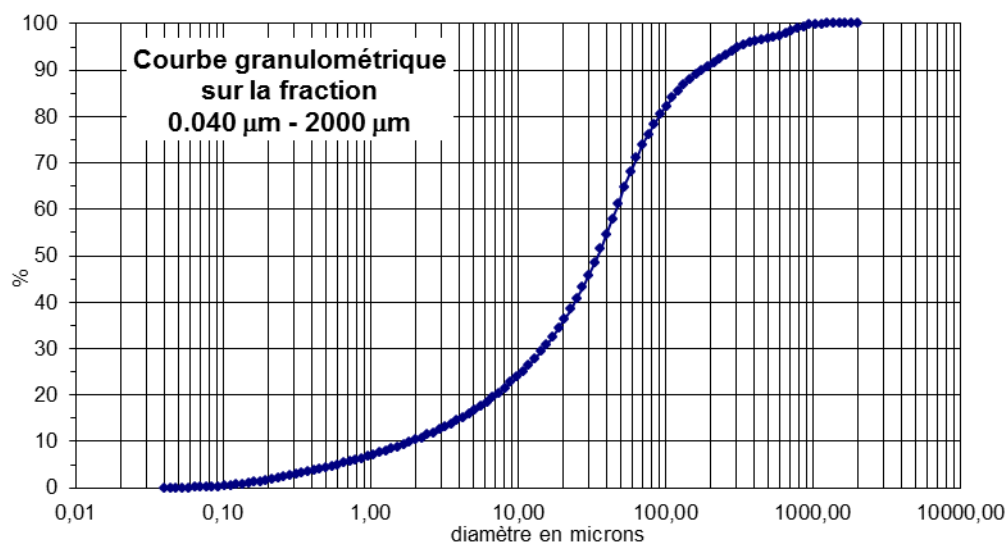
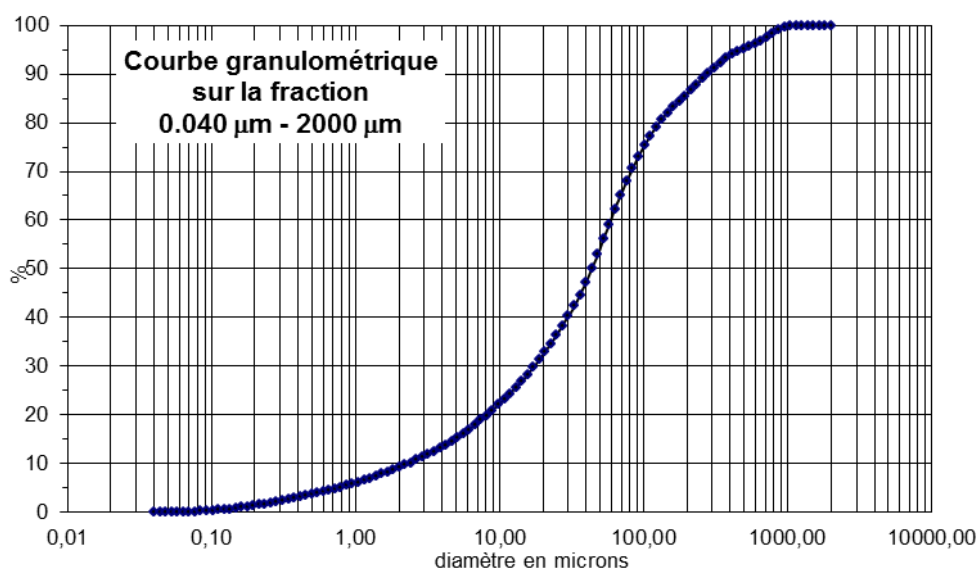
Veronica spicata

Vincetoxicum

hirundinaria

Viola ambigua

Profondeur	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	MO (PAF) %	CO(WB) %	MO(WB) %	C %	N %	CO:N
HUM2 0-4	7,84	12,17	12,06	1,92	3,30	-	-	-
HUM1 0-4	7,38	1,69	18,70	1,55	2,66	-	-	-



Commune	Localisation	Altitude
Zhovtneve, Sums'ka oblast (Ukraine)	50°44' 34°11'	117 m

Mikhajlovska celina MIK*

MIK*

Type de sol

Chernozem sur lœess

Historique

Steppe qui n'a jamais été cultivée. Une des six réserves steppiques de l'Est de l'Europe.

Formation végétale

Prairie, en partie non pâturée ; présence de petits arbustes



Photo : B. Vysloužilová

Principales essences

Stipa sp., *Galium* sp., cf. *Padus racemosa*, *Aquimonia eupatoria*, *Trifolium* sp., *Achillea millefolium*

Profondeur	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	MO (PAF) %	CO(WB) %	MO(WB) %	C %	N %	CO:N
0-4	6,8	0	-	4,90	8,43	-	-	-

Commune	Localisation		Altitude
Poscaj (Hongrie)	47°18'7"N	21°53'4"E	113 m

Poscaj

HUP

Type de sol

Chernozem

Historique

Le site est situé sur un versant dans une région d'extension des chernozems. Le versant n'a pas été cultivé (prairie selon la 2^{ème} cartographie militaire 1806-1869), il a certainement été pâturé dans le passé. Le site est protégé pour la flore steppique.



Photo : B. Vysloužilová

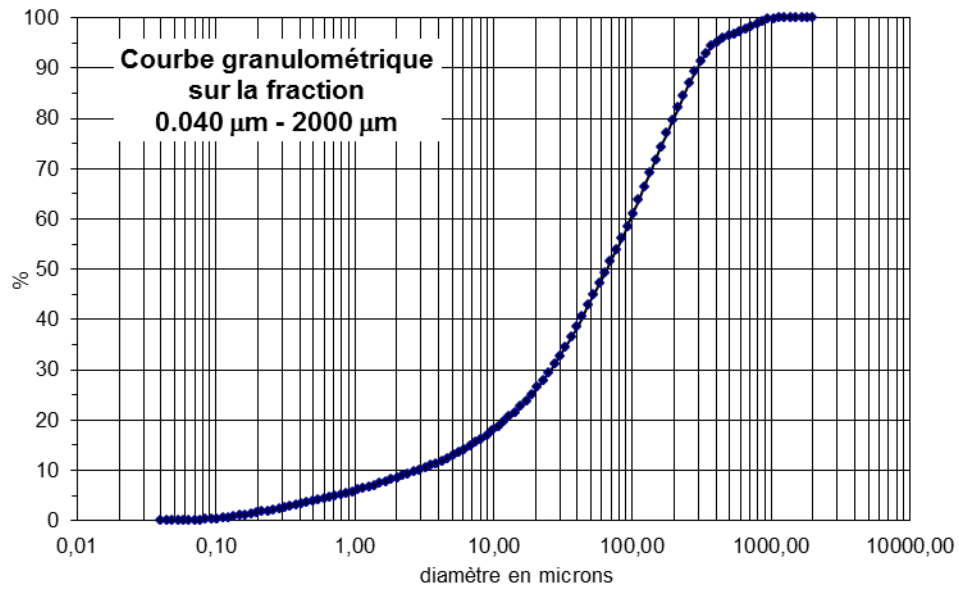
Formation végétale

Prairie envahie par des espèces ligneuses

Principales essences

Stipa capillata L. (Poacées - chaume de l'année passée) ; *Salvia nemorosa* L. (Lamiacées) ; *Festuca rupicola* Heuff. (Poacées) ; *Teucrium chamaedrys* L. (Lamiacées) ; *Eryngium campestre* L. (Apiacées) ; *Verbascum phoeniceum* L. (Scrofulariacées) ; *Galium verum* L. (Rubiacees) ; *Thymus* sp. (Lamiacées - *T. marschallianus* ou *T. pannonica*) ; *Marubium* sp. (Lamiacées) ; *Dianthus* sp. (Caryophyllacées) ; *Erysimum* sp. (Brassicacées) ; *Hypericum perforatum* L. (Clusiacees) ; *Chamaecytisus* cf. *albus* Rothm. (Fabacées) ; *Stachys annua* L. (Lamiacées) ; *Chrysopogon gryllus* (L.) Trin. (Poacées) ; *Seseli osseum* Crantz (Apiacées) ; *Tragopogon* sp. (Asteracées) ; *Thalictrum minus* L. (Renonculacées) ; *Asperula cynanchyca* L. (Rubiacees) ; *Achillea setacea* Waldst. & Kit. (Asteracées) ; *Campanula* cf. *sibirica* L. (Campanulacées) ; *Plantago media* subsp. *stepposa* (Kuprian.) Soo (Plantaginacées) ; *Allium* sp. (Liliacées).

Profondeur	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	MO (PAF) %	CO(WB) %	MO(WB) %	C %	N %	CO:N
0-4	6,2	1,95	10,56	1,90	3,27	-	-	-



Granulométrie

- % A**
8,2
- % LF**
17
- % LG**
17,7
- % SF**
36,8
- % SG**
20,4

Commune	Localisation		Altitude
Sarand (Hongrie)	47°24'13"N	21°37'25"E	100 m

Sarand*

HUS*

Type de sol

Chernozem arénique

Historique

Plaine avec des dunes de sables éoliens, occupée par des steppes sur chernozems. Par endroit, le substrat est un loess plus ou moins pur. Le site est une ancienne carrière de sable. Il est situé sur une décharge. Il n'a pas été cultivé sur la période connue (depuis la 2^{ème} cartographie militaire 1806-1869).



Photo : D. Schwartz

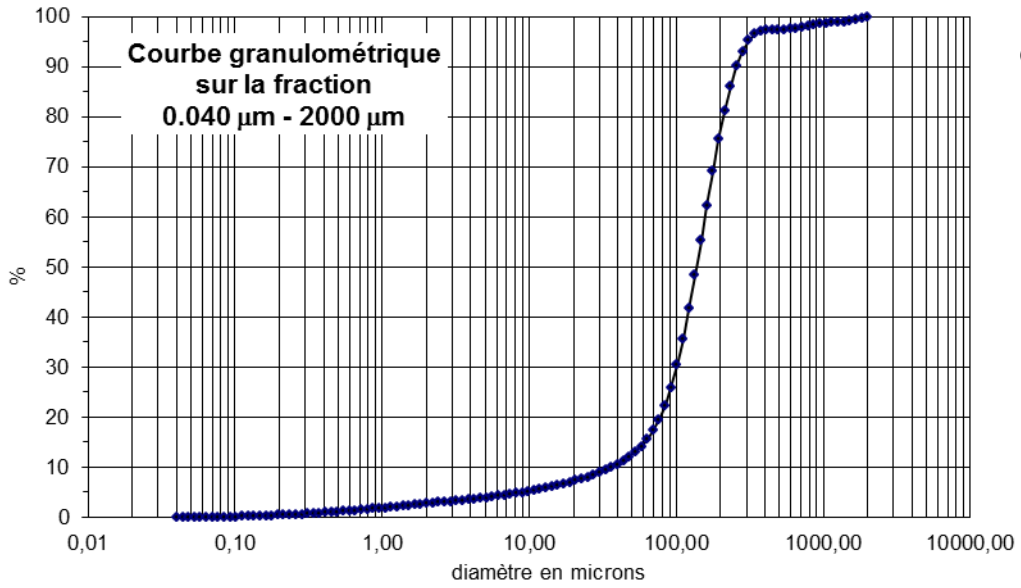
Formation végétale

Steppe

Principales essences

Festuca rupicola Heuff. (Poacées) ; *Elymus repens* (L.) Gould (Poacées) ; *Koeleria* sp. (Poacées) ; *Poa pratensis* L. (Poacées) ; *Bromus sterilis* L (Poacées) ; *Bromus mollis* L. (Poacées) ; *Marubium peregrinum* L. (Lamiacées) ; *Nonea pulla* (L.) DC (Borraginacées) ; *Carex stenophylla* Wahlenb. (Cypéracées).

Profondeur	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	MO (PAF) %	CO(WB) %	MO(WB) %	C %	N %	CO: N
0-4	5,46	0,00	12,92	2,01	3,46	-	-	-



Granulométrie

- % A 2,6
- % LF 4,4
- % LG 5,12
- % SF 63,4
- % SG 24,5

Commune	Localisation	Altitude
Senec (Slovaquie)	48°14'39"N 17°22'15"E	160 m

Senec (Martinský les)*

SEN*

Type de sol

Chernozem « cambique »

Historique

Forêt exploitée certainement depuis 1769 (1^{ère} enquête militaire).

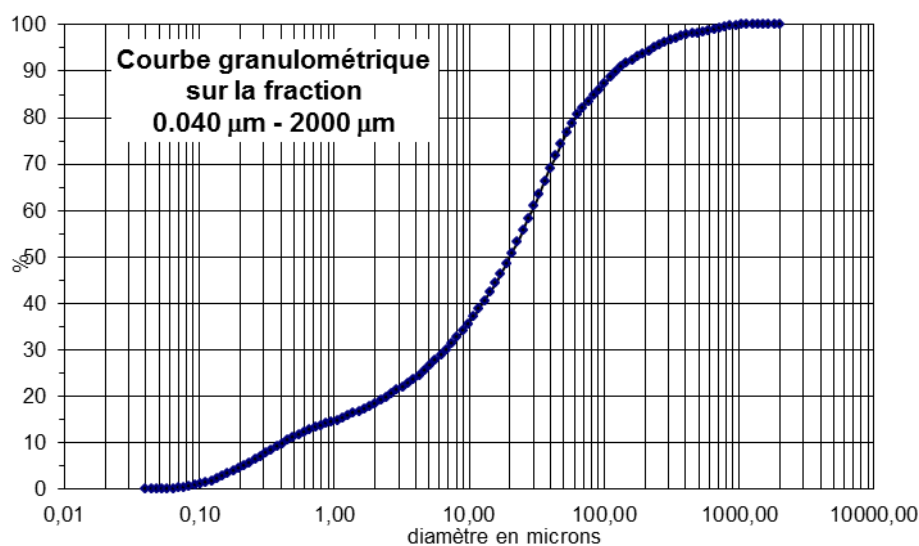
Formation végétale

Forêt de feuillus

Principales essences

Quercus sp. (*robur* ?), *Acer campestre*, *Ulmus* sp., *Crataegus monogyna*, *Fraxinus excelsior* (peu abondant). Strate herbacée : très discontinue.

Profondeur	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	MO (PAF) %	CO(WB) %	MO(WB) %	C %	N %	CO:N
0-4	5,65	0,99	10,44	4,30	7,41	4,42	0,34	12,83



Commune	Localisation	Altitude
Carspach (France)	47°36'00"N 7°09'39"E	390 m

Stoeffelhag CAR (Ertlen, 2009)

Type de sol

Sol brun calcaire

Historique

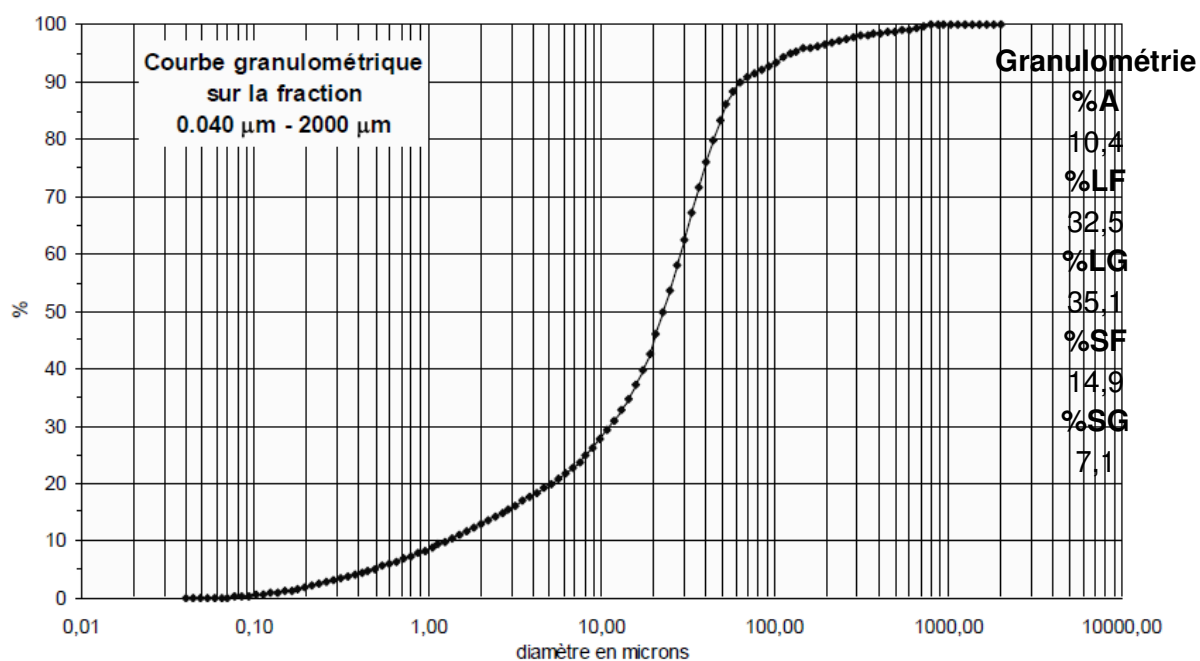
Sous forêt depuis 1760 au moins.

Formation végétale

Hêtraie

Principales essences

Profondeur	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	MO (PAF) %	CO(WB) %	MO(WB) %	C %	N %	CO:N
0-4	4,1	0	12,39	4,62	7,95	-	-	-



Commune	Localisation	Altitude
20 km au sud de Kursk (Russie)	51°34'17" N 36°05'40" E	225m

Streletsk STR (Khitrov *et al.*, 2013)

Type de sol

Chernozem

Historique

Le site n'a jamais été cultivé. C'est une réserve naturelle de la biosphère depuis 1935.

Formation végétale

Steppe vierge. Végétation herbacée envahie par des arbustes.



Photo : B. Vysloužilová

Principales essences

Bromus riparius Rehm., *Bromus inermis* Leyss., *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth., *Stipa pennata* L., *Elytrigia intermedia* (Host) Nevski, *Arrhenatheum elatius* (L.) J. et C. Presl, *Festucavalesiaca* Gaudin s. l., *Adonis vernalis* L., *Filipendula hexapetala* Gilib., *Iris aphylla* L., *Pulsatilla patens* Niles., *Salvia pratensis* L., *Trifolium montanum* L.

Profondeur	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	MO (PAF) %	CO(WB) %	MO(WB) %	C %	N %	CO:N
0-4	6,4	0	10,21	4,06	6,98	-	-	-

Commune	Localisation		Altitude
Tard (Hongrie)	47°53'48"N	20°34'23"E	160 m

Tard* HUR*

Type de sol

Chernozem à BT, « chernozem brown forest soil »

Historique

D'après la 2^{ème} enquête militaire c'était une prairie. Pâturage ?. Les nombreuses espèces forestières ou de steppe-forêt semblent indiquer la présence antérieure d'une forêt, il y a au moins 400 ans selon Klara Viragh (communication personnelle).



Photo : D. Schwartz

Formation végétale

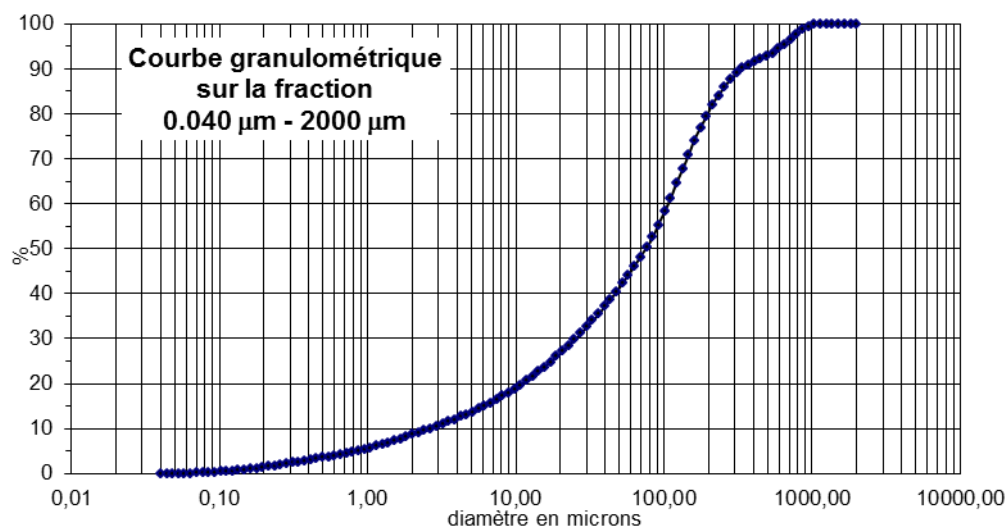
Steppe secondaire, steppe à *Festuca rupicola*. Végétation herbacée envahie plus ou moins par une fruticée.

Principales essences

<i>Acer tataricum</i>	<i>Euphorbia virgata</i>	<i>Pulsatilla nigricans</i>
<i>Achillea pannonica</i>	<i>Euphrasia tatarica</i>	<i>Pulsatilla zimmermannii</i>
<i>Adonis vernalis</i>	<i>Falcaria vulgaris</i>	<i>Quercus pubescens</i>
<i>Agrimonia eupatoria</i>	<i>Festuca rupicola</i>	<i>Ranunculus</i>
<i>Agrostis tenuis</i>	<i>Filipendula vulgaris</i>	<i>polyanthemos</i>
<i>Ajuga genevensis</i>	<i>Fragaria viridis</i>	<i>Rhinanthus minor</i>
<i>Allium sphaerocephalon</i>	<i>Gallium verum</i>	<i>Rosa callica</i>
<i>Alopecurus pratense</i>	<i>Genista tinctoria</i>	<i>Rosa canina</i>
<i>Anthericum ramosum</i>	<i>Helictotrichon pratense</i>	<i>Rumex acetosella</i>
<i>Arenaria graminifolia</i>	<i>Helictotrichon pubescens</i>	<i>Rumex thyrsoiflorus</i>
<i>Asparagus officinalis</i>	<i>Hieracium bauhini</i>	<i>Salvia pratensis</i>
<i>Asperula cynanchica</i>	<i>Hypericum perforatum</i>	<i>Scabiosa ochroleuca</i>
<i>Astragalus glycyphyllos</i>	<i>Inula britannica</i>	<i>Scorzonera purpurea</i>
<i>Betonica officinalis</i>	<i>Inula hirta</i>	<i>Senecio jakobea</i>
<i>Brachypodium pinnatum</i>	<i>Knautia arvensis</i>	<i>Seseli annuum</i>
<i>Briza media</i>	<i>Koeleria cristata</i>	<i>Seseli osseum</i>
<i>Calamagrostis epigejos</i>	<i>Leontodon hispidus</i>	<i>Seseli varium</i>
<i>Campanula rotundifolia</i>	<i>Linum catharticum</i>	<i>Silene parviflora</i>
<i>Carex caryophylla</i>	<i>Lotus corniculatus</i>	<i>Silene pseudotites</i>
<i>Carex tomentosa</i>	<i>Luzula campestris</i>	<i>Silene otites</i>
		<i>Stellaria graminea</i>

<i>Carlina vulgaris</i>	<i>Medicago falcata</i>	<i>Stipa tirsia</i>
<i>Centaurea pannonica</i>	<i>Ononis spinosa</i>	<i>Teuchrium chamaedrys</i>
<i>Cerastium brachypetalum</i>	<i>Phleum phleoides</i>	<i>Thalictrum minus</i>
<i>Chrysopogon gryllus</i>	<i>Pimpinella saxifraga</i>	<i>Thesium ramosum</i>
<i>Colchicum autumnale</i>	<i>Plantago lanceolata</i>	<i>Thymus marschallianus</i>
<i>Convolvulus arvensis</i>	<i>Plantago media /stepposa</i>	<i>Trifolium alpestre</i>
<i>Crataegus monogyna</i>	<i>Poa angustifolia</i>	<i>Trifolium arvense</i>
<i>Danthonia alpina</i>	<i>Poa pratensis</i>	<i>Trifolium montanum</i>
<i>Danthonia decumbens</i>	<i>Polygala comosa</i>	<i>Trifolium pratense</i>
<i>Daucus carota</i>	<i>Potentilla alba</i>	<i>Verbascum phoeniceum</i>
<i>Dianthus carthusianorum</i>	<i>Potentilla arenaria</i>	<i>Veronica prostrata</i>
<i>Dianthus pontederiae</i>	<i>Potentilla argentea</i>	<i>Veronica spicata</i>
<i>Dorycnium herbaceum</i>	<i>Primula veris</i>	<i>Vicia cassubica</i>
<i>Elymus hispidus</i>	<i>Prunella laciniata</i>	<i>Viola arenaria</i>
<i>Elymus repens</i>	<i>Prunus spinosa</i>	<i>Viola rupestre</i>
<i>Eryngium campestre</i>	<i>Pulmonaria mollis</i>	<i>Viscaria vulgaris</i>
<i>Euphorbia cyparissias</i>		

Profondeur	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	MO (PAF) %	CO(WB) %	MO(WB) %	C %	N %	CO:N
0-4	5,46	0	12,92	2,47	4,25	-	-	-



Granulométrie

- % A 8,16
- % LF 17,84
- % LG 14,5
- % SF 39
- % SG 20,5

Commune	Localisation		Altitude
Tokaj (Hongrie)	48°6'32"N	21°23'1"E	152 m

Tokaj HUT

Type de sol

Sol peu évolué

Historique

D'après la 2^{ème} enquête militaire, le versant n'est pas forestier. Pour des raisons de repérage, il n'est pas possible de préciser le type de végétation, vigne ou prairie.



Photo : D. Schwartz

Formation végétale

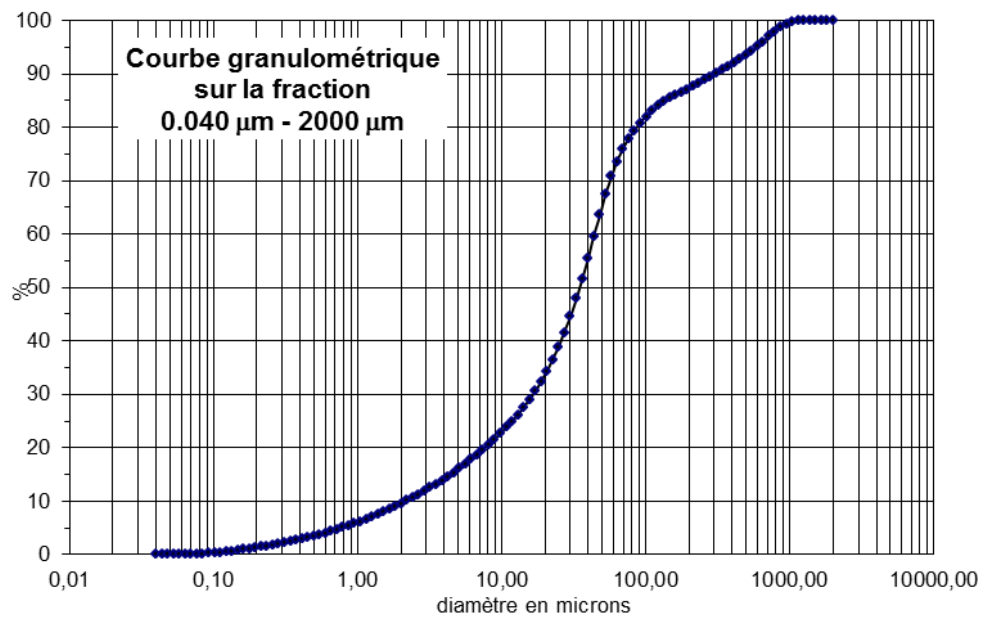
Réserve naturelle, steppe secondaire, fruticée, la composition est quasiment naturelle.

Principales essences

Festuca rupicola Heuff. (Poacées) ; *Festuca pseudovina* Hack. ex Wiesb (Poacées) ; *Stipa pulcherrima* K. Koch. (Poacées) ; Cf. *Cynodon dactylon* L.(Poacées) ; *Koeleria* sp. (Poacées) ; *Iris pumila* L. (Iridacées) ; *Inula ensifolia* L. (Astéracées) ; *Lathyrus lacteus* (M. Bieb.) E.D. Wissjul. (Fabacées) ; *Thesium* sp. (Santalacées) ; *Stachys recta* L. (Lamiacées) ; *Thymus pannonicus* All. (Lamiacées) ; *Thymus marschallianus* Willd. (Lamiacées) ; *Dorycnium germanicum* (Gremli) Rickli (Fabacées) ; *Salvia nemorosa* L. (Lamiacées) ; *Scabiosa* sp. (Dipsacées) ; *Euphorbia cyparissias* L. (Euphorbiacées) ; *Teucrium chamaedrys* L. (Lamiacées) ; *Seseli* sp. (Apiacées)

Espèces ligneuses de la fruticée proche : *Rosa* sp. (Rosacées) ; *Ligustrum vulgare* L. (Oléacées) ; *Cornus sanguinea* L. (Cornacées) ; *Fraxinus ornus* L. (Oléacées) ; *Quercus pubescens* Willd. (Fagacées) ; *Ulmus minor* Mill (Ulmacées)

Profondeur	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	MO (PAF) %	CO(WB) %	MO(WB) %	C %	N %	CO:N
0-4	7,42	1,38	7,40	1,05	1,81	-	-	-



Granulométrie

%A

8,9

% LF

23,4

% LG

31,2

% SF

23,5

% SG

12,9

Annexes 3 Liste des sites de sols fonctionnels (*placette de surface associée)

Nom de site	Code de site	Formation végétale	Type de sol	Substrat	Référence
Askania Nova 1	A1	Steppe	Kastanozem	Loëss	Jelenska <i>et al.</i> , 2008
Askania Nova 2	A2	Jardin d'arbres	Kastanozem	Loëss	Jelenska <i>et al.</i> , 2008
Askania Nova 3	A3	Champs abandonné, pâturé	Kastanozem	Loëss	Jelenska <i>et al.</i> , 2008
Babský les*	BAB	Forêt	Chernozem	Loëss	
Battonya-Gulya Gyep*	HUB	Prairie	Chernozem	Loëss	
Brozany*	BRO	Prairie	Chernozem	Loëss	
Brumovice	BRC	Culture	Chernozem	Loëss	
Bugac puszta - dépression*	HUUD	Prairie	Sol hydromorphe	Sable	Nagy <i>et al.</i> , 2007
Bugac puszta - dune*	HUU	Prairie	Chernozem arénique	Sable	Nagy <i>et al.</i> , 2007
Bulhary	BUL	Forêt	Chernozem	Loëss	
Dubnik*	DUB	Forêt	Chernozem	Loëss	
Godolo hills - Szarkaberki valley	HUGF	Forêt-steppe	Regosol limoneux	Loëss	Virágh <i>et al.</i> , 2008
Godolo hills - Szarkaberki valley	HUG	Prairie	Regosol limoneux	Loëss	Virágh <i>et al.</i> , 2008
Homutovsky steppe	H1	Prairie	Chernozem	Loëss	Jelenska <i>et al.</i> , 2008
Kopeč*	KOC	Prairie	Chernozem	Loëss	Jelenska <i>et al.</i> , 2008
Kopeč*	KOR	Prairie	Rendzine	Loëss	
Kuchyňka	KUC	Forêt-steppe	Chernozem	Loëss,	
Kursk*	KUR	Prairie	Chernozem	Loëss	Khitrov <i>et al.</i> , 2013
Mezofold - Belsobarand-valley*	HUM	Prairie	Chernozem	Loëss	
Mikhajlovska celina	CT	Prairie	Chernozem	Loëss	Jelenska <i>et al.</i> , 2008
Mikhajlovska celina*	MIK	Prairie	Chernozem	Loëss	
Młodzawy	MD	Champs abandonnés	Chernozem	Loëss	Jelenska <i>et al.</i> , 2008
Poplze	POP	Culture	Chernozem	Marnes calcaires	
Sarand*	HUS	Prairie	Chernozem arénique	Loëss sablé	
Senec*	SEN	Forêt	Chernozem	Loëss	
Tard*	HUR	Prairie	Chernozem à B _T	Loëss	

Commune	Site	Localisation		Altitude
Askania Nova (Ukraine)	A1	46°28'N	33°54'E	27 m
	A2	46°27'N	33°53'E	27 m
	A3	46°27'N	33°54'E	27 m

A 1, 2, 3 Askania Nova (Jelenska *et al.*, 2008)

Les échantillons ont été prélevés dans une réserve biosphérique située dans la zone sèche steppique en Ukraine, au départ pour l'étude des propriétés magnétiques de sols non-pollués. Le sol qui était déterminé comme « kastanozem saline » a été prélevé dans trois fosses, A1, A2 et A3.

Site	Formation végétale	Principales essences	Historique
A1	Steppe	<i>Stipa, Festuca</i>	Réserve steppique depuis 1898
A2	Steppe	<i>Stipa, Festuca</i>	Jardin d'arbre depuis au moins 100 ans
A3	Pâturage	<i>Stipa, Festuca</i>	Ne plus exploité pour l'agriculture depuis plus que 50 ans

A1 Brun kastanozem, résiduel moyen solonetz sur loess

A_d : 0-5 cm Horizon humique superficiel, beaucoup de racines, légèrement tassé
A_{htk} : 5-45 cm Horizon humique, gris foncé, fortement tassé, structure agrégée, carbonates de pseudomycelium, sec, de nombreuses racines, transition nette
B_{hckt} : 45-89 cm Légèrement humide, horizon luviqque carbonaté, poupées de loess, structure prismatique, transition graduelle, effervescence à partir de 52 cm
B_{Ckc} : 90-114 cm Similaire à B_{ckt}, les poupées de loess sont plus petites, tassé
C_{ck} : 114-150 cm Carbonaté, très limoneux, jaune paille
C_{cky} : ≥170 cm Loess carbonaté, dur, jaune paille, contient du gypse

Niveau/ horizon de A1	Profondeur	pH H2O	pH KCl	Fe %	MO (WB) %	CO(WB) %
Ad	A1 0-5	7,85	7,02	1,84	12,22	7,09
Ahtk	A1 10-18	7,15	6,16	2,12	7,40	4,29
Ahtk	A1 30-35	7,72	6,30	2,12	3,18	1,84
Bhtkc	A1 45-55	8,79	7,60	2,38	3,02	1,75
Bhtkc	A1 70-80	9,37	7,90	1,93	1,71	0,99

A2 Kastanozem brun, résiduel moyen solonetz sur lœss

- A_d : 0-7 cm Horizon humique, gris foncé, beaucoup de racines, tassé, sec
- Ah_q : 7-48 cm Gris foncé, sec, structure lumpy, racines, galeries de vers
- Btkc : 48-78 cm Horizon jaune paille, carbonaté, structure grumeleuse
- BCtk : 78-150 cm Lœss, très carbonaté, galeries de rongeurs et racines, taches grises
- Ccky : 150-180 cm Lœss massif carbonaté, concrétions de gypse de 3 cm de diamètre, jaune paille

A3 Kastanozem brun, résiduel moyen solonetz sur lœss

- Ah₁ : 0-20 cm Horizon humique, sec, tassé, nombreuses racines
- Ah₂ : 20-49 cm Horizon humique, poudre de SiO₂, couleur cannelle, localement granuleux, limoneux, nombreuses racines, structure grumeleuse
- Ah_{kc} : 49-52 cm identique à Ah₂, avec en outre des concrétions de carbonates
- Bhtkc : 52-90 cm Jaune paille, poupées de lœss de 0,5 à 1 cm, structure prismatique, très dense, transition nette avec l'horizon sous-jacent
- Ckc : 90-152 cm Lœss, couleur paille, carbonates
- Ckcy : ≥152 cm Comme Ckc, avec des concrétions de gypse

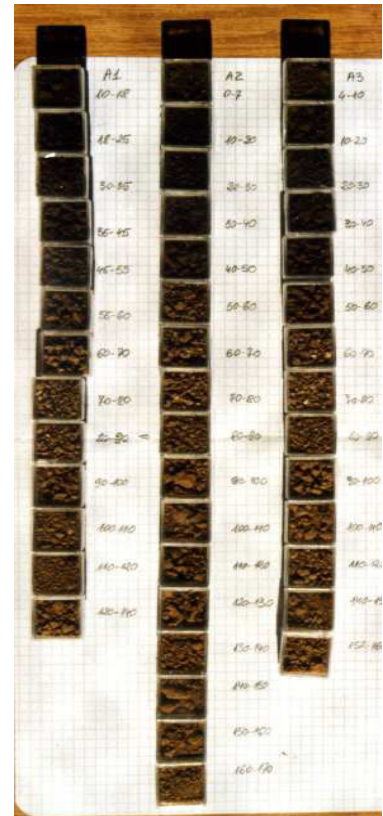


Photo : M. Jelenska

Commune	Localisation	Altitude
Báb (Slovaquie)	48°18'09''N 17°53'18''E	215 m

Babský les* BAB*

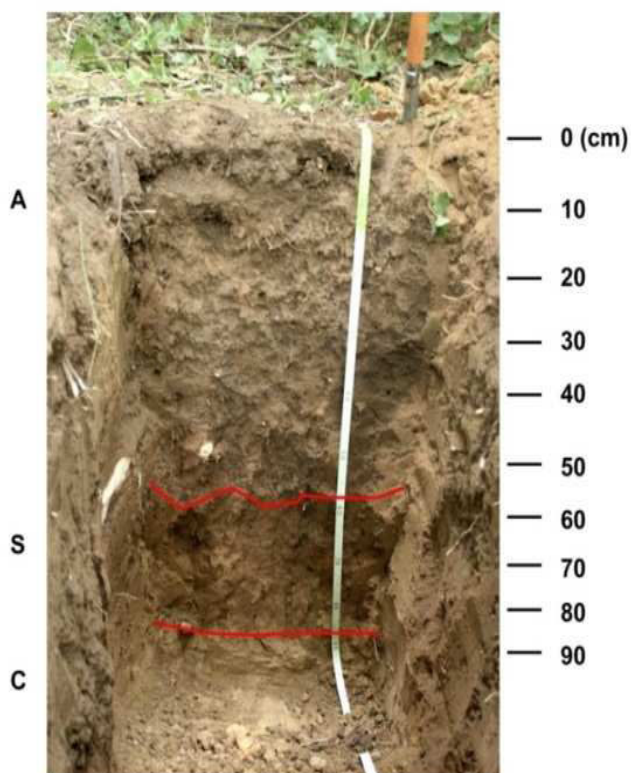
Chernozem cambique

Peu de litière (mull forestier), de plus discontinue (sol souvent nu). Activité importante de taupes.

0-57 cm : A 10YR3/2 – assez clair ; frais ; limoneux ; structure mélange de grenue fine (« fluffy ») et de polyédrique sub-anguleuse ; bonne porosité inter et intra-agrégat ; très meuble, léger ; nombreuses galeries de vers ; racines peu abondantes, fines ($\varnothing < 1$ mm), quelques moyennes (\varnothing env. 0,5 cm) et quelques grosses (\varnothing 2-3 cm), jusque vers 60 cm, réparties de façon homogène ; transition nette, régulière sur environ 5 cm avec l'horizon sous-jacent.

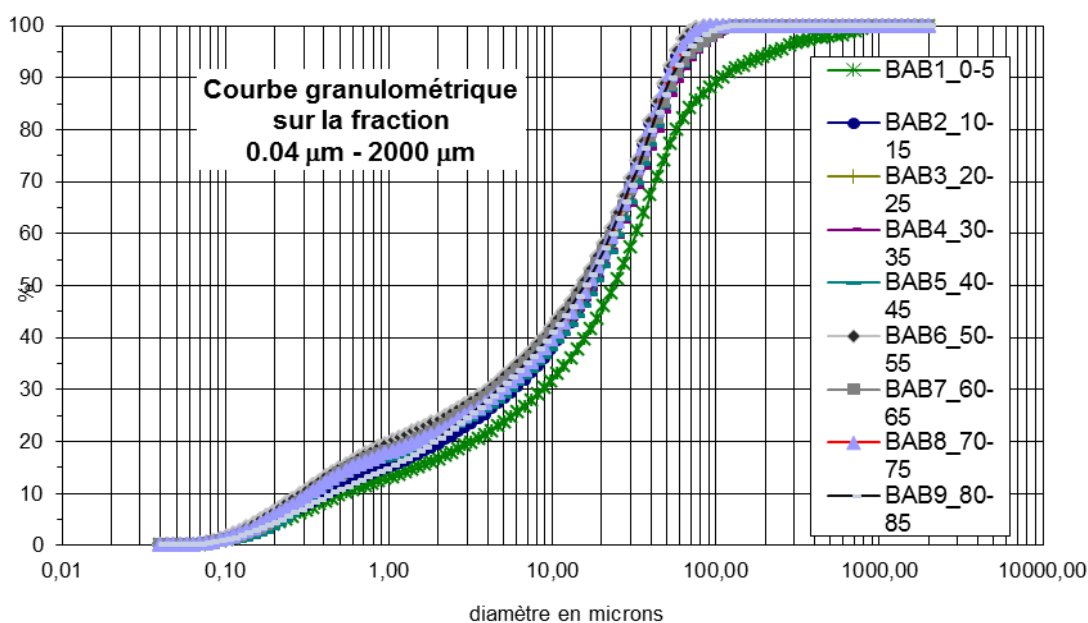
57-82/85 cm : S 10YR4,5/4 ; couleur jaune bien marquée (expression du fer) ; frais ; limoneux ; structure polyédrique sub-anguleuse ; racines fines et moyennes, peu abondantes ; bonne porosité ; cet horizon se distingue bien de l'horizon de transition A/C, formé par simple bioturbation transition nette, régulière avec l'horizon sous-jacent.

> 82/85 cm : C 2,5YR6/4 ; lœss carbonaté ; frais ; structure massive ; bonne microporosité ; rares racines ; taches de carbonates en pseudomycelium ;



Profil BAB (Bab Les, Slovaquie)

Niveau / horizon	Profondeur	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	MO (PAF) %	CO (WB) %	MO (WB) %	C %	N %	Co:N
A	0-5	5,06	1,24	11,02	4,97	8,58	4,83	0,39	12,41
A	10-15	5,02	0,99	7,97	2,59	4,47	2,98	0,26	11,3
A	20-25	5,43	1	5,72	2,91	5,02	1,99	0,18	11,01
A	30-35	6,23	1,1	5,28	1,57	2,7	1,57	0,15	10,34
A	40-45	6,51	1,1	4,54	0,98	1,69	1,07	0	-
A	50-55	6,89	1,1	4,02	0,52	0,98	0,73	0	-
S	60-65	6,61	0,99	4,05	0,52	0,9	0,58	0	-
S	70-75	6,79	0,9	3,62	0,29	0,5	0,45	0	-
S/C	80-85	7,55	10,98	2,94	0,47	0,8	2,47	0	-



Niveau/horizon	Profondeur	% Argile	% Limons fins	% Limons grossiers	% Sables fins	% Sables grossiers
A	0-5	16,1	27,6	30,5	19,7	6,1
A	10-15	18,9	33,4	36,4	11,3	0,0
A	20-25	20,7	31,0	33,4	14,9	0,0
A	30-35	21,5	30,0	31,9	16,6	0,0
A	40-45	20,0	30,9	33,4	15,7	0,0
A	50-55	23,6	32,1	33,2	11,1	0,0
S	60-65	21,8	32,3	31,4	14,5	0,0
S	70-75	21,3	32,4	33,6	12,7	0,0
S/C	80-85	19,7	34,8	32,2	13,3	0,0

Commune	Localisation	Altitude
Battonya (Hongrie)	46°17'58"N 21°1'25"E	96 m

Battonya – Gulya Gyep*

HUB*

Chernozem vertique

A : 0 – 65 cm ; 5 Y 2,5/1 ; argilo-limoneux ; frais ; nombreuses racines très fines ($\varnothing < 1$ mm) ; quelques racines de \varnothing entre 1 et 5 mm (toutes les racines sont moins abondantes à la base) ; structure polyédrique anguleuse, centimétrique, mais aspect massif ; compact ; nombreux pores très fins, d'origine radiculaire et galeries de lombrics anéciques très abondantes ; transition nette avec l'horizon sous-jacent.

A/C : 65 à ≥ 90 cm ; 5 Y 3/1 et 4/3 (verdâtre) ; légèrement humide ; argilo-limoneux ; activité biologique importante jusqu'à la base (nombreux lombrics) ; quelques racines fines jusqu'à la base ; poupées de loess abondantes, de petite taille (\varnothing environ 5 mm) ; structure polyédrique anguleuse, 0,5 cm + nombreux turricules mélangeant les deux horizons A et C.

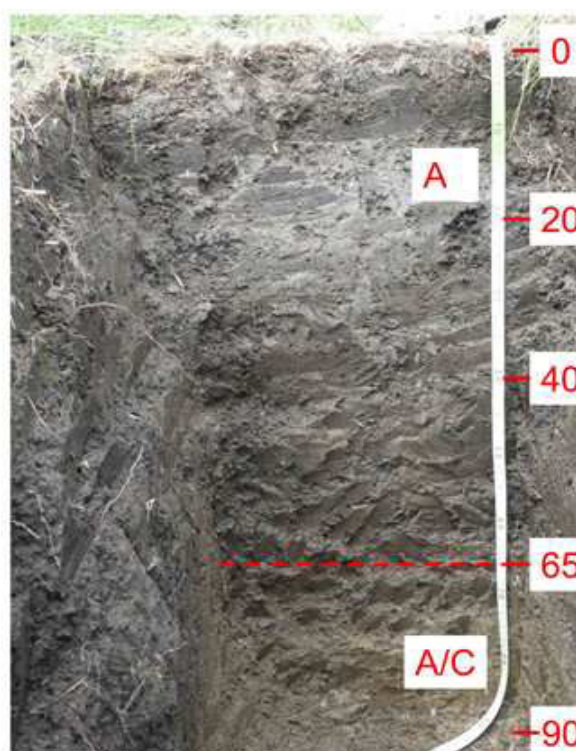
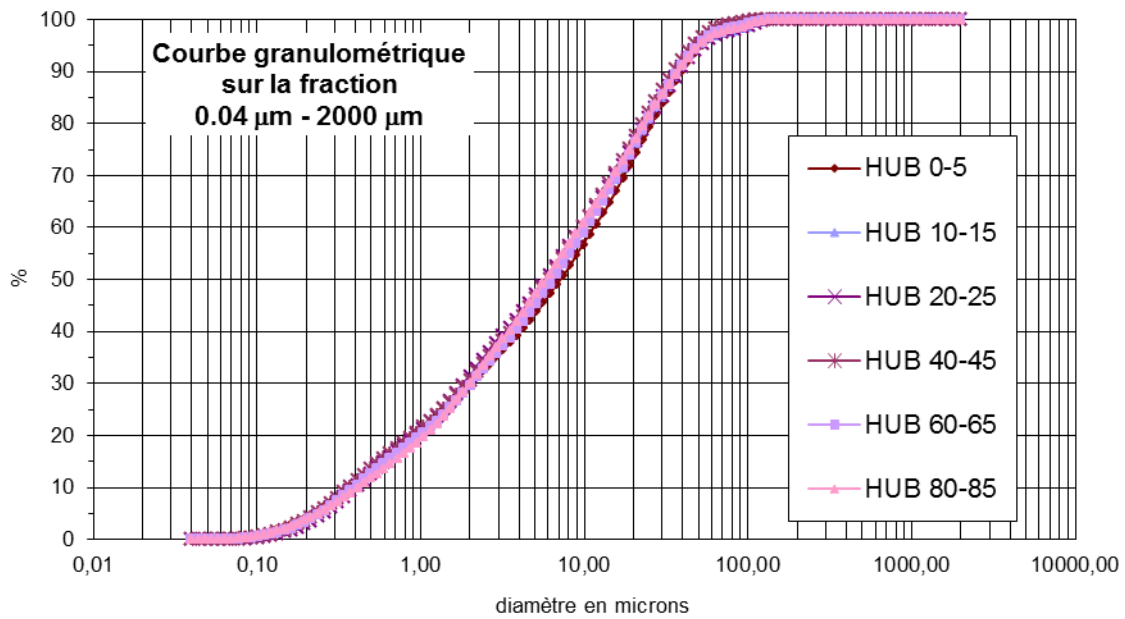


Photo : D. Schwartz

Niveau/ horizon	Profondeur	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	MO (PAF) %	CO(WB) %	MO(WB) %	C %	N %	Co:N
A	2,5	7,51	0,59	9,82	1,40	2,41	-	-	-
A	12,5	7,70	0,29	7,36	0,93	1,59	-	-	-
A	22,5	7,69	0,58	6,72	0,73	1,25	-	-	-
A	42,5	7,73	0,69	6,48	0,62	1,07	-	-	-
A	62,5	7,93	1,57	5,87	0,39	0,68	-	-	-
A/C	82,5	8,06	10,87	4,82	0,23	0,39	-	-	-



Niveau/ horizon	Profondeur	% Argile	% Limons fins	% Limons grossiers	% Sables fins	% Sables grossiers
A	2,5	28,6	43,3	21,8	6,3	0,0
A	12,5	29,0	44,8	20,3	5,9	0,0
A	22,5	29,7	44,6	19,7	6,0	0,0
A	42,5	29,3	45,8	20,2	4,7	0,0
A	62,5	28,2	45,8	20,4	5,6	0,0
A/C	82,5	28,4	46,6	19,2	5,8	0,0

Commune	Localisation		Altitude
Brozany (Rép. Tchèque)	50°27'21"N	14°8'19"E	170 m

Brozany*

BRO*

Chernozem typique

A₁ (0-12 cm) : 10YR 4/2, nombreuses racines, sec, limoneux, carbonaté, forte porosité d'origine racinaire

A₂ (12-30 cm) : 10YR 5/3, sec, carbonaté, structure polyédrique sub-anguleuse, poreux, pas de signes de labour

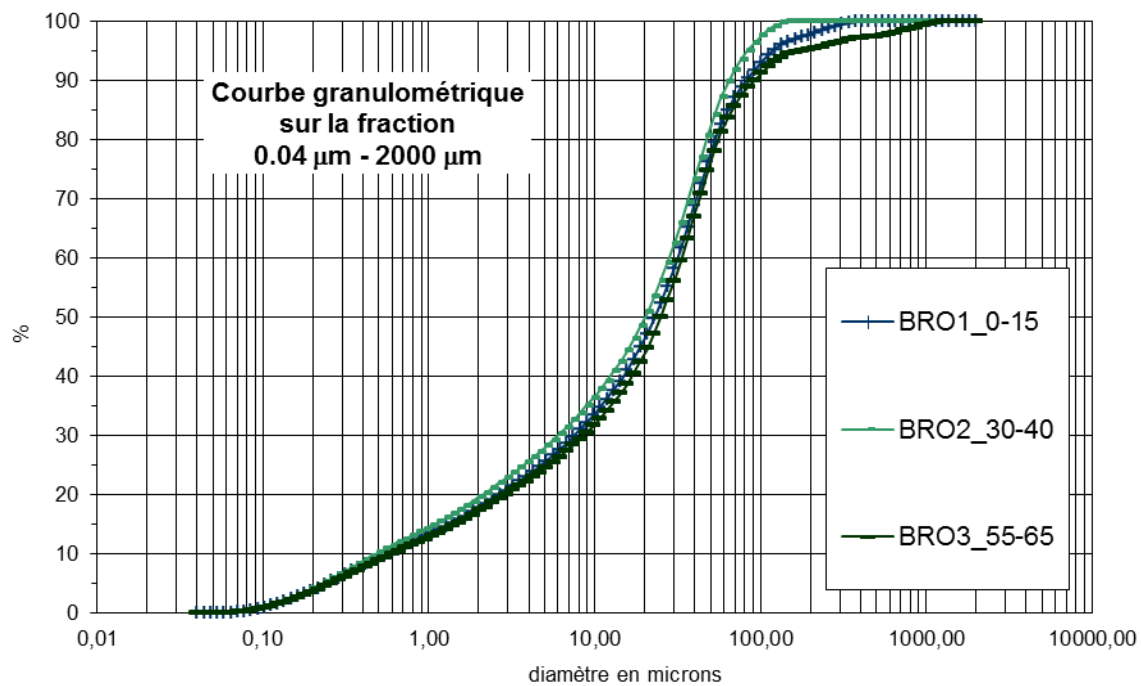
A/C (30-45 cm) : transition progressive entre A₊ et C, quelques charbons de bois

C (45-60 cm) : loëss massif, très sec, carbonaté – abondance de pseudomycelium



Photo : B. Vysloužilová

Niveau/ horizon	Profon- deur	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	MO (PAF) %	CO (WB) %	MO (WB) %	C %	N %	Co:N
A ₁	0-15	7,7	15,0	6,4	2,2	3,8	4,4	0,3	8,5
A/C	30-40	8,0	17,1	4,2	1,2	2,1	3,5	0,2	8,
C	55-65	8,0	17,1	3,6	0,8	1,3	3,2	0,1	6,6



Niveau/ horizon	Profondeur	% Argile	% Limons fins	% Limons grossiers	% Sables fins	% Sables grossiers
A	7,5	17,1	27,8	31,3	21,5	2,3
A	35,0	18,8	29,6	32,3	19,3	0,0
C	60,0	16,6	25,9	32,2	20,5	4,8

Commune	Localisation		Altitude
Brumovice (Rép. Tchèque)	48°58' N	16°53' E	250 m

Brumovice BRC (Zádorová *et al.*, 2013)

Formation végétale	Principales essences	Historique
Champ	Culture	Exploitation agricole probablement depuis Néolithique, sûrement depuis le Moyen Age

Les échantillons ont été prélevés sur une parcelle d'études des processus d'érosion et de colluvionnement. BRC représente la partie stable, plane en amont ; par contre BRK est situé sur la partie colluvionnée en aval.

Chernozem

L (0-30 cm) : 10YR 3/3, labouré, mollique, limoneux

A (30-40 cm) : 10YR 4/3, horizon mollique, limoneux ; structure polyédrique anguleu-se ; non effervescent

A/C (40-50 cm) : 10YR 5/3, transition progressive vers la roche mère, effervescent

C (50-60 cm) : 10YR 6/4, loess massif, effervescent



Source : Zádorová, non publié

Commune	Localisation	Altitude
Bugac (Hongrie)	46°41'27"N 19°36'4"E	106 m

Bugac puszta – dépression* HUUD*

Site de steppe protégée, pâturée, et faisant l'objet d'une étude sur le long terme, avec installation d'une station météorologique et suivi des émissions des gaz à effet de serre par les sols (Nagy *et al.*, 2007).

Sol hydromorphe

A : 0 – 25 cm : très noir, 10 YR 3/1 ; sableux ; légèrement humide ; structure microgrenue ; racines, très fines ; transition distincte avec l'horizon sous-jacent

A/E : 25 – 35 cm : mélange des deux horizons, sous forme de glosses, indiquant un battement de nappe ;

E : 35 à plus de 60 cm ; 10 YR 6/2 ; sableux ; particulaire ; quelques racines fines.

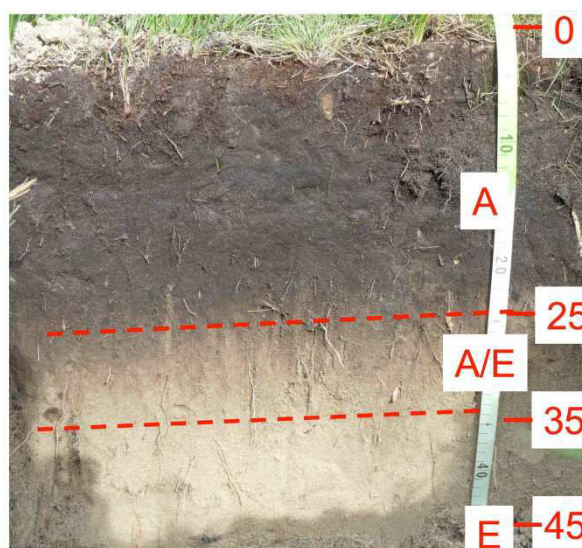
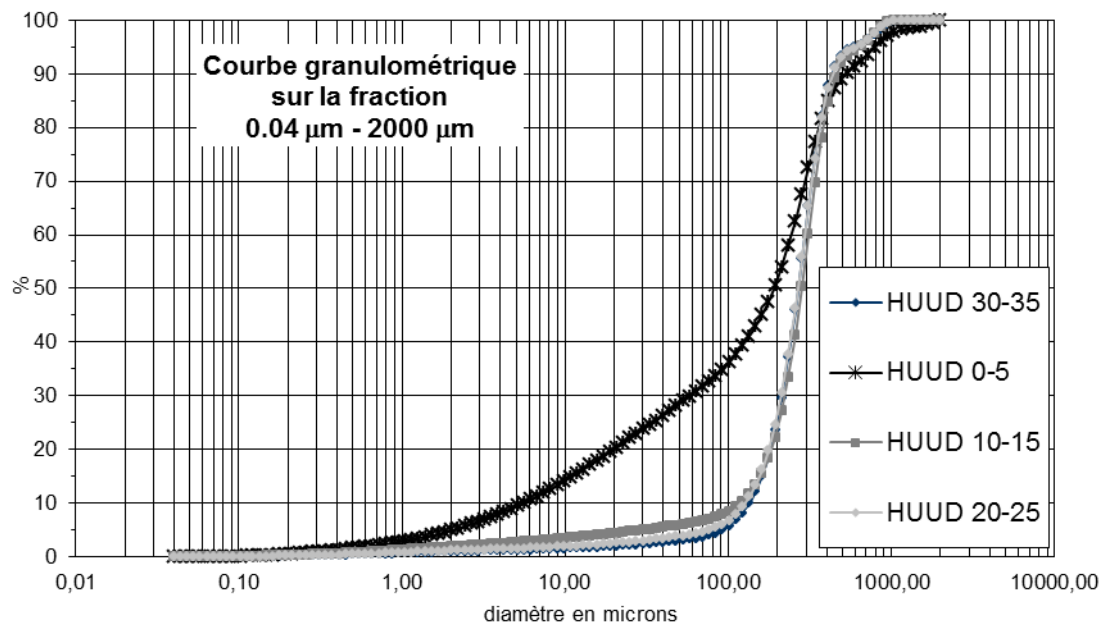


Photo : D. Schwartz

Niveau/ horizon	Profondeur	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	MO (PAF) %	CO(WB) %	MO(WB) %	C %	N %	Co:N
A	2,5	6,82	4,45	24,19	2,92	5,02	-	-	
A	12,5	7,71	1,19	6,15	1,27	2,19	-	-	
A	22,5	8,19	4,99	1,30	0,64	1,09	-	-	
A/E	32,5	8,63	6,76	0,50	0,22	0,38	-	-	



Niveau/ horizon	Profondeur	% Argile	% Limons fins	% Limons grossiers	% Sables fins	% Sables grossiers
A	2,5	4,6	14,9	8,6	22,4	49,5
A	12,5	1,8	2,5	1,6	16,4	77,8
A	22,5	1,1	1,4	1,3	20,9	75,4
A/E	32,5	0,9	1,0	1,0	20,7	76,4

Commune	Localisation	Altitude
Bugac (Hongrie)	46°41'27"N 19°36'4"E	107 m

Bugac puszta – dune*

HUU*

Site de steppe, protégée, pâturée, et faisant l'objet d'une étude sur le long terme, avec installation d'une station météorologique et suivi des émissions des gaz à effet de serre par les sols (Nagy *et al.*, 2007). Très différent du précédent HUUD, à 20 m de distance.

Regosol chernozemique ou chernozem sableux

A₀A₁ : +1 - 0 cm : petite litière prairiale ;

A₁₁ : 0 – 7 cm : 10 YR 3/2 ; sableux ; gris ; légèrement humide ; structure micro-agrégée peu développée ; racines, très fines ; transition nette avec l'horizon sous-jacent

A₁₂ : 7 – 42 cm : 10 YR 4/2 ; sableux ; légèrement humide ; particulaire ; racines, très fines ; transition nette (moins de 5 cm) avec l'horizon sous-jacent

C : 42 à plus de 70 cm ; 10 YR 5/3 ; sableux ; frais ; quelques racines, très fines ; crotovinas (∅ 12 cm).

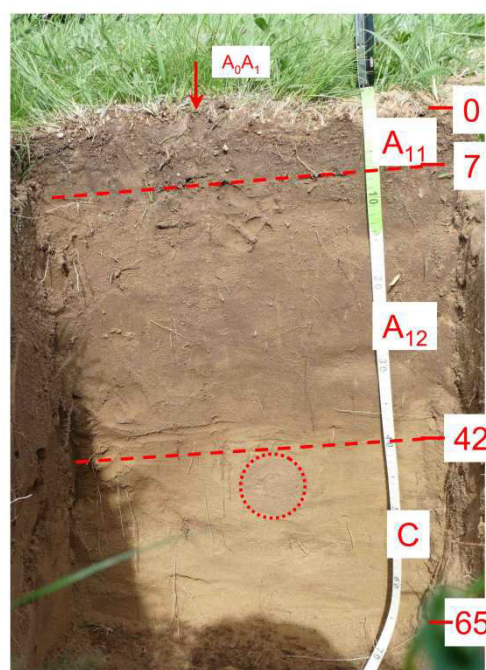
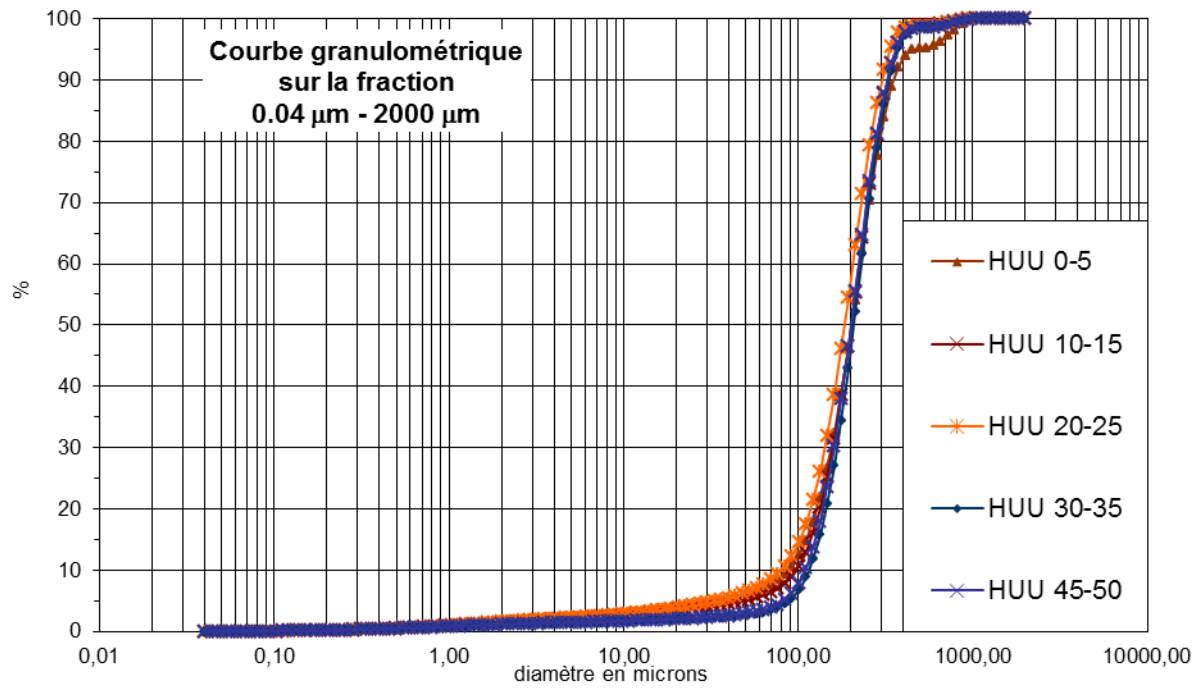


Photo : D. Schwartz

Niveau/ horizon	Profon- deur	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	MO (PAF) %	CO(WB) %	MO(WB) %	C %	N %	Co:N
A	2,5	5,90	0,00	6,24	2,98	5,13	-	-	-
A	12,5	6,05	0,00	1,21	1,21	2,09	-	-	-
A	22,5	6,55	0,00	1,19	1,25	2,15	-	-	-
A	32,5	6,70	1,18	1,04	1,29	2,22	-	-	-
C	47,5	7,91	1,48	0,73	0,94	1,61	-	-	-



Niveau/ horizon	Profondeur	% Argile	% Limons fins	% Limons grossiers	% Sables fins	% Sables grossiers
A	2,5	1,3	2,4	2,2	40,3	53,8
A	12,5	1,4	2,0	1,6	41,6	53,4
A	22,5	1,4	2,3	2,5	48,2	45,6
A	32,5	1,0	0,8	0,7	40,3	57,1
C	47,5	1,1	0,9	0,8	43,7	53,5

Commune	Localisation	Altitude
Bulhary (Rép. Tchèque)	48°48'0"N 16°41'58"E	283 m

Bulhary*

BUL*

Chernozem typique, carbonaté

A₁₁ : 0 -15 cm : 10YR2,5/2 ; sec ; limoneux ; grumeleux ; nombreuses racines fines (herbacées) de $\varnothing < 1$ mm vers 10-20 cm ; quelques racines d'arbres de \varnothing jusqu'à 3,5 cm ; forte porosité, surtout inter-agrégat ; transition nette avec l'horizon sous-jacent

A₁₂ : 15-50 cm : 10YR2,5/2 ; sec ; limoneux ; structure polyédrique subanguleuse ; peu de racines d'herbacées ; concentration de racines d'arbres vers 50 cm ; porosité moyenne, tubulaire, surtout intra-agrégat, d'origine racinaire et lombric ; transition nette avec l'horizon sous-jacent

A/C : 50-60 cm : mélanges par bioturbation de A et C

C : > 60 cm : loess ; sec à frais ; 10YR6, 5/4 ; sec ; structure massive ; porosité fine, racinaire

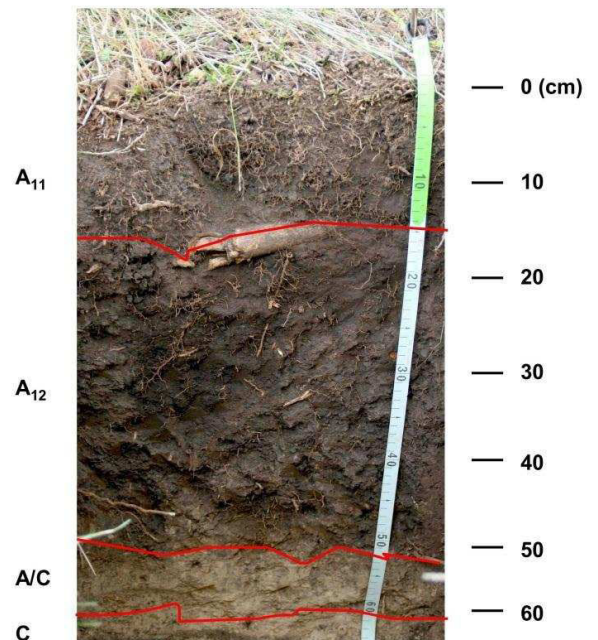
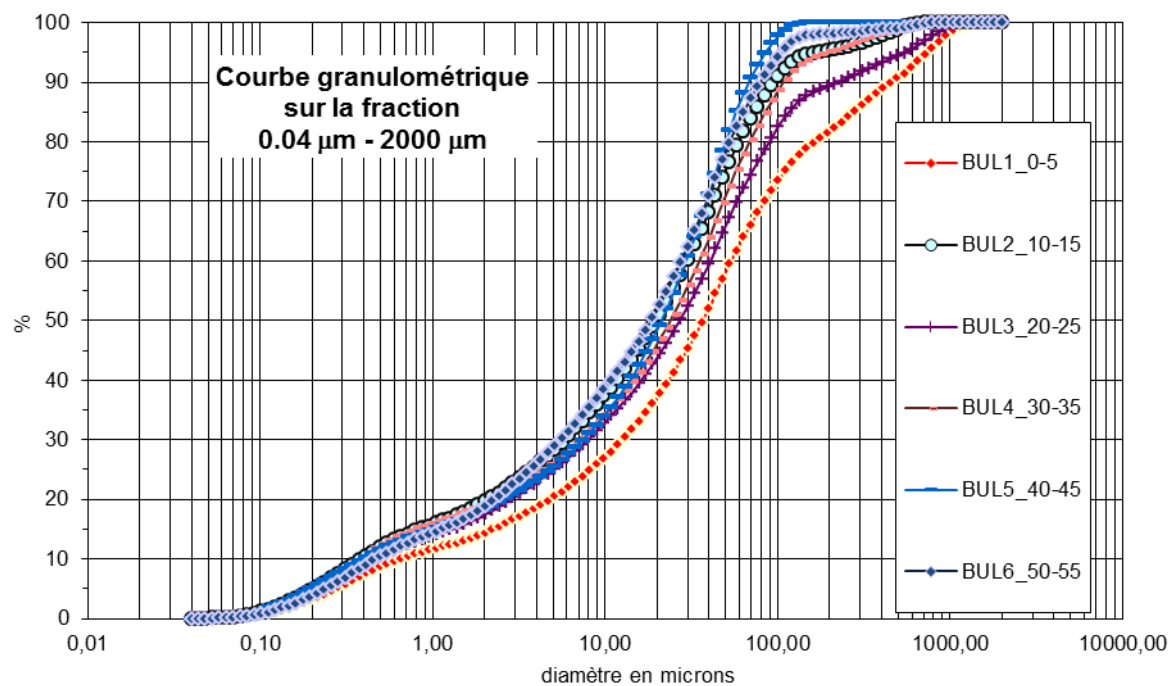


Photo : D. Schwartz

Niveau/ horizon	Profon- deur	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	MO (PAF) %	CO (WB) %	MO (WB) %	C %	N %	CO:N
A ₁₁	0-5	6,9	1,3	15,2	6,8	11,7	7,1	0,6	10,9
A ₁₁	10-15	6,7	1,1	8,9	3,5	6,0	3,5	0,3	11,0
A ₁₂	20-25	6,6	0,9	5,8	2,0	3,5	2,1	0,2	11,0
A ₁₂	30-35	6,4	0,9	4,9	1,5	2,5	1,5	0,1	10,7
A ₁₂	40-45	5,4	0,9	4,4	1,2	1,9	1,3	0,1	8,9
A/C	50-55	7,2	3,3	4,2	1,1	2,0	2,0	0,1	9,5



Niveau/ horizon	Profondeur	% Argile	% Limons fins	% Limons grossiers	% Sables fins	% Sables grossiers
A ₁₁	2,5	14,0	22,0	21,0	24,5	18,5
A ₁₁	12,5	19,0	29,9	25,0	21,3	4,8
A ₁₂	22,5	16,9	25,8	22,0	24,6	10,7
A ₁₂	32,5	18,9	25,9	24,8	25,4	5,0
A ₁₂	42,5	17,8	29,1	31,5	21,6	0,0
A/C	52,5	18,1	32,3	26,5	21,1	2,0

Commune	Localisation		Altitude
Vinohrady nad Váhom (Slovaquie)	48°18'49"N	17°46'57"E	184 m

Dubník DUB

Chernozem typique

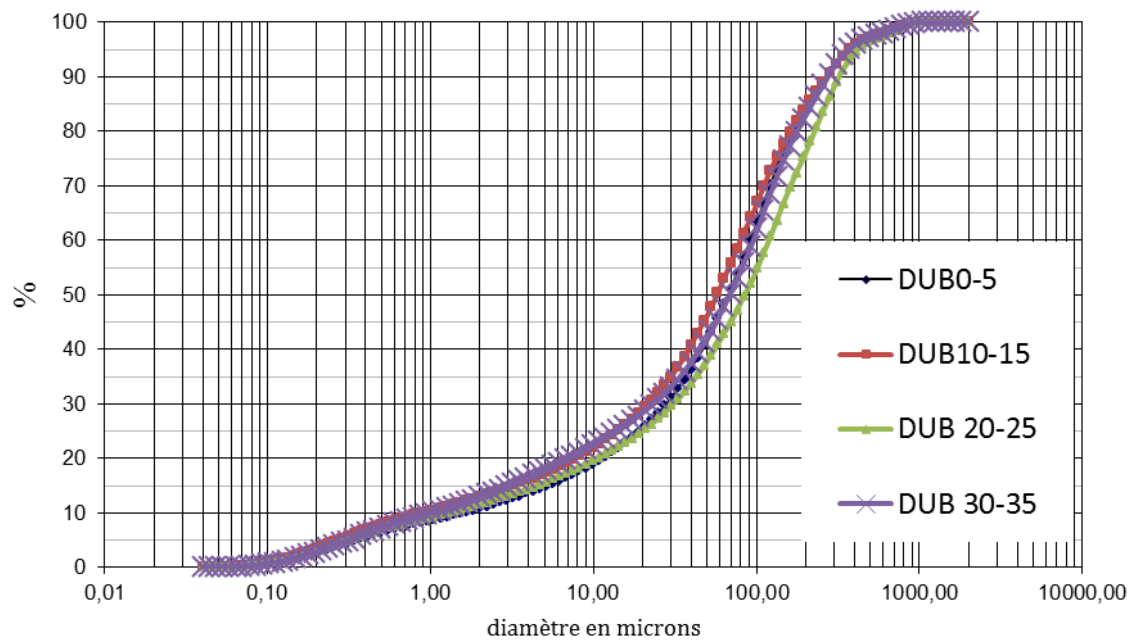
Humus de type moder

A épais de 45 cm, carbonaté.

A/C de 45 à 50 cm ;

C à partir de 50 cm

Niveau/ horizon	Prof.	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	MO (PAF) %	CO(WB) %	MO(WB) %	C %	N %	Co:N
A	2,5	-	1,19	9,78	4,17	7,19	4,2	0,33	12,79
A	12,5	-	1,19	4,8	1,46	2,52	1,55	0,15	10,19
A	22,5	-	1,1	3,95	1,28	2,2	1,79	0,14	12,79
A	32,5	-	1,11	4,19	1,05	1,8	1,85	0,11	16,59
A/C	47,5	-	1,09	5,21	-	-	-	-	-



Niveau/ horizon	Profon- deur	% Argile	% Limons fins	% Limons grossier s	% Sables fins	% Sables grossie rs
A	2,5	10,5	14,3	15,9	42,5	16,8
A	12,5	12,6	15,6	17,1	38,5	16,2
A	22,5	11,2	13,3	12,6	38,2	24,7
A	32,5	12,4	15,3	13,6	40,9	17,8

Commune	Localisation	Altitude
Isaszeg (Hongrie)	47°32'33"N 19°21'29"E	217 m

Godolo hills - Szarkaberki valley HUGF

Versants non cultivés, en raison de la pente. La végétation y suit une dynamique naturelle. Les versants sont strictement protégés, mais il n'y a aucune gestion conservatoire. La végétation de steppe est en train d'être complètement grignotée par une fruticée, voire une forêt pionnière à chêne pubescent. Deux profils ont été prélevés, l'un sous steppe (HUG), l'autre sous forêt/steppe (HUGF).

Regosol limoneux

A₁₁ : 0 – 5 cm ; 10 YR 4/2 ; sec ; limono-sableux ; structure grenue ; bonne porosité ; racines, très fines ; transition nette avec l'horizon sous-jacent

A₁₂ : 5 – 27 cm ; 10 YR 4/3 ; sec ; limono-sableux ; structure grenue, peu développée ; quelques racines très fines et quelques grosses racines (plus de 3 cm) ; transition distincte avec l'horizon sous-jacent

AC : 27 – 40/45 cm ; frais ; limono-sableux ; racines, grosses ; transition nette avec l'horizon sous-jacent

C : > 40/45 cm ; 10 YR 5/5 frais

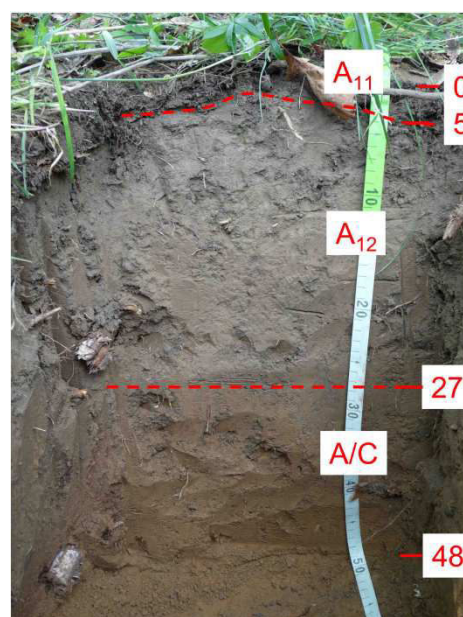
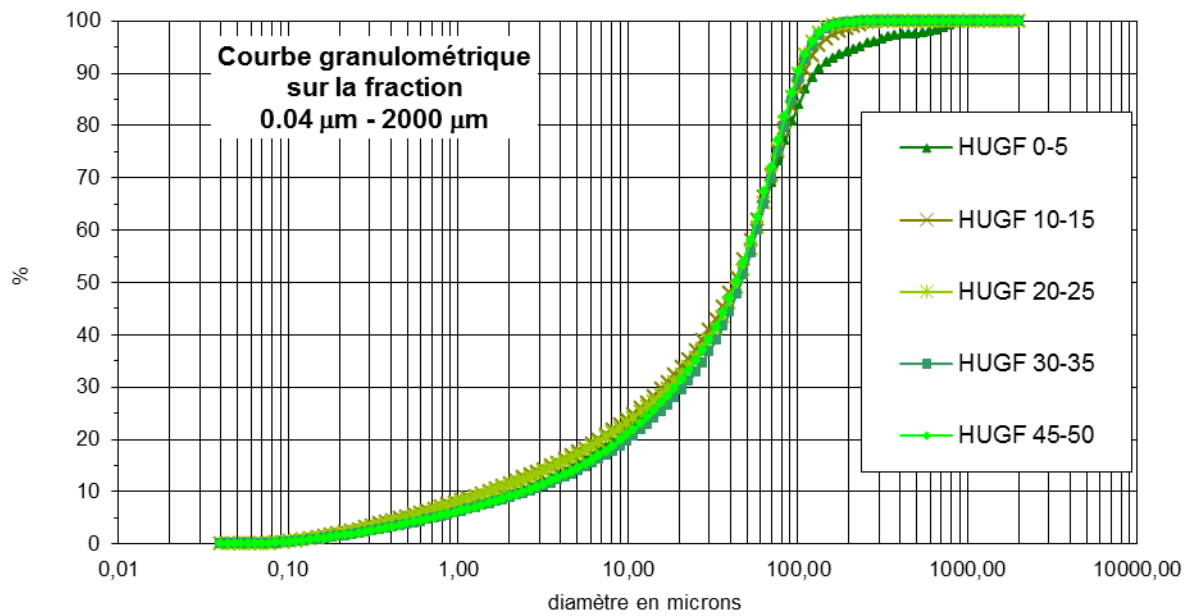


Photo : D. Schwartz

Niveau/ horizon	Profon- deur	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	MO (PAF) %	CO(WB) %	MO (WB) %	C %	N %	Co:N
A ₁₁	2,5	5,64	1,18	11,34	2,08	3,57	-	-	-
A ₁₂	12,5	5,44	1,28	5,08	1,22	2,10	-	-	-
A ₁₂	22,5	5,71	1,65	3,86	0,82	1,40	-	-	-
A/C	32,5	5,65	2,37	2,73	0,42	0,72	-	-	-
C	47,5	5,54	1,49	2,41	0,24	0,41	-	-	-



Niveau/ horizon	Profondeur	% Argile	% Limons fins	% Limons grossiers	% Sables fins	% Sables grossiers
A ₁₁	2,5	9,1	21,7	22,7	40,6	5,9
A ₁₂	12,5	11,1	21,2	22,1	44,1	1,5
A ₁₂	22,5	10,9	20,1	21,5	47,0	0,5
A/C	32,5	8,5	19,5	23,5	48,2	0,3
C	47,5	8,6	21,2	24,2	45,7	0,3

Commune	Localisation	Altitude
Isaszeg (Hongrie)	47°32'33"N 19°21'29"E	217 m

Godolo hills - Szarkaberki valley

HUG

Regosol limoneux

A : 0 – 28 cm : 10 YR 3/3 ; sec ; limono-sableux ; structure grenue, peu développée ; excellente porosité ; racines très fines ($\varnothing < 1$ mm) moyennement abondantes ; transition nette, subhorizontale, avec l'horizon sous-jacent

AC : 28 – 46 cm ; 10 YR 4/3 ; sec ; limono-sableux ; aspect massif ; quelques racines ; transition nette avec l'horizon sous-jacent

C : > 46 cm ; 10 YR 6/4 ; sec ; limono-sableux ; pas de racines ; crotovinas

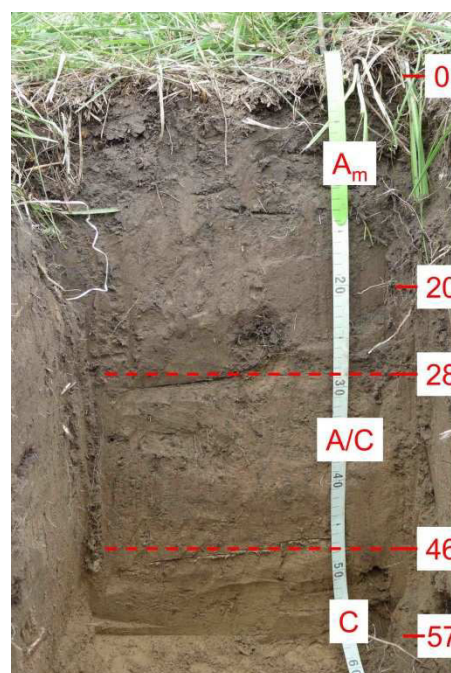
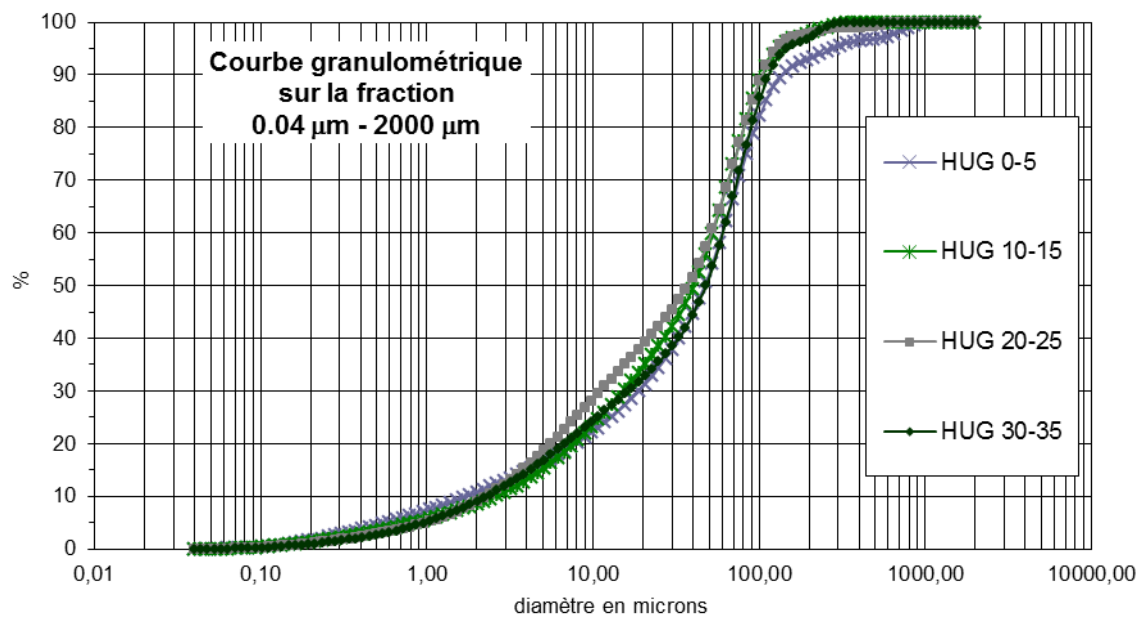


Photo : D. Schwartz

Niveau/ horizon	Profon- deur	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	MO (PAF) %	CO (WB) %	MO (WB) %	C %	N %	Co: N
A	2,5	7,36	2,07	19,78	2,15	3,69	-	-	-
A	12,5	7,81	7,37	9,54	1,45	2,49	-	-	-
A	22,5	7,99	13,79	1,80	1,25	2,15	-	-	-
A/C	32,5	8,03	18,64	3,92	1,01	1,73	-	-	-
C	47,5	8,19	25,17	2,38	0,27	0,47	-	-	-



Niveau/ horizon	Profondeur	% Argile	% Limons fins	% Limons grossiers	% Sables fins	% Sables grossiers
A	2,5	10,2	19,7	20,8	42,2	7,1
A	12,5	8,1	25,3	22,6	41,7	2,3
A	22,5	8,3	29,5	19,5	40,4	2,3
A/C	32,5	8,4	23,3	18,3	46,8	3,2

Commune	Localisation	Altitude
Samsonove (Ukraine)	47°17'N 38°11'E	57 m

Homutovsky steppe H1 (Jelenska *et al.*, 2008)

Formation végétale	Principales essences	Historique
Steppe	<i>Stipa</i> , <i>Festuca</i> , Graminées	Réserve steppique depuis 1961

Chernozem typique

A : 0-45 cm : Horizon humique, gris foncé, structure grumuleuse, structure de petits grains, légèrement argileux, limons, racines, transition graduelle

Ahk : 45-61 cm : Horizon de transition brun-gris, structure grumeleuse, tassé, racines, pseudomycelium, transition nette

Bhwck : 61-83 cm : Horizon avec illuviation des carbonates, clair, couleur paille, à partir de 83 cm carbonates en poupées de loess, galeries de rongeurs, transition nette

Cck : ≥ 83 cm : Loess, paille clair, carbonates en poupées de loess jusqu'à 160 cm de profondeur

Niveau/horizon	Profondeur	pH H ₂ O	pH KCl	Fe %	CO(WB) %	MO (WB) %
A	0-10	7,59	-	3,33	3,99	6,87
A	20-30	7,74	-	3,34	2,94	5,08
Ahk	50-60	7,97	7,21	3,27	2,03	3,5
Bhwck	70-80	8,57	7,71	2,69	0,71	1,22
Cck	130-140	9,04	7,87	2,74	0,32	0,55

Source : Jelenska, non publié



Commune	Localisation		Altitude
Úžice (Rép. Tchèque)	50°14'8"N	14°25'42"E	212 m

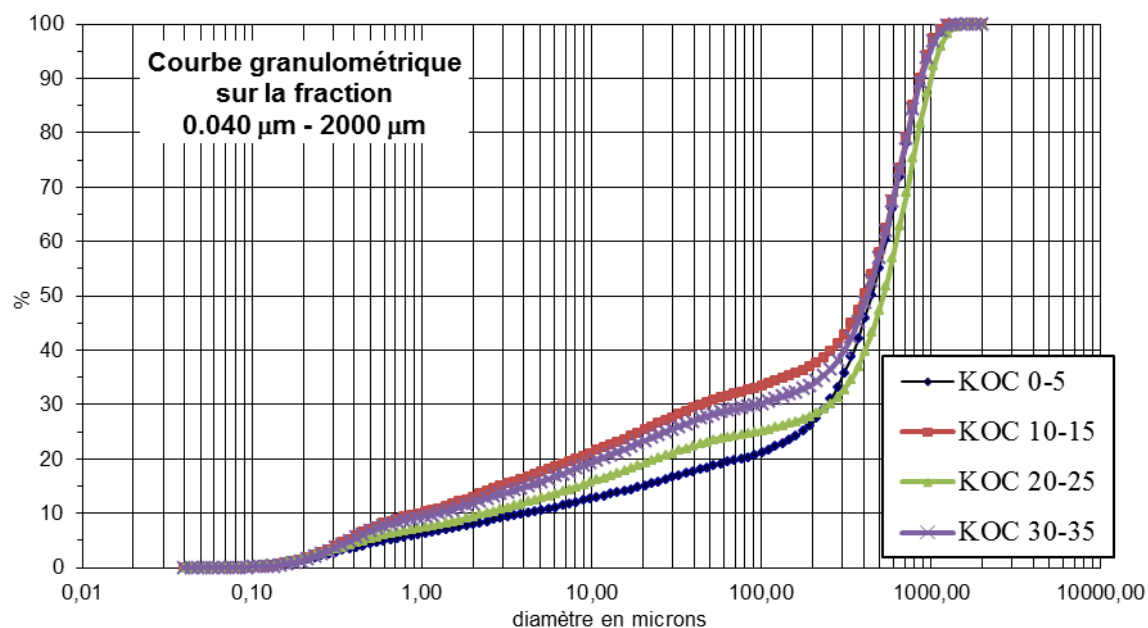
Kopeč rendzine KOR*et chernozem KOC*

« Steppe » sur chernozems, avec deux faciès :

- sur chernozem profond (40 à 60 cm au moins), végétation prairiale
- sur sol peu profond (rendzine ?), végétation steppique

KOC

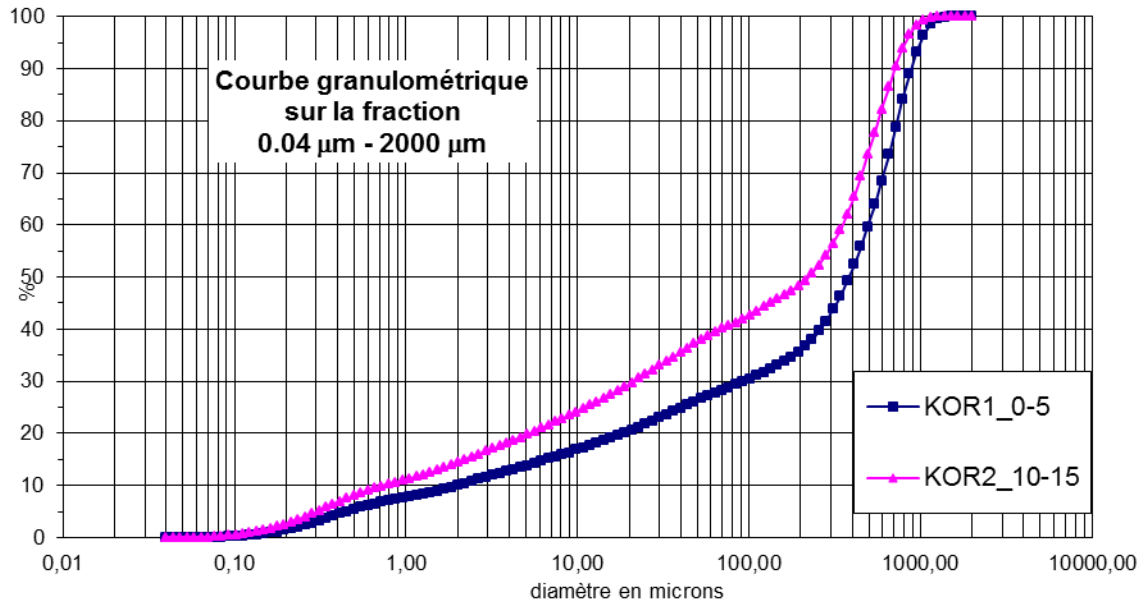
Niveau/ horizon	Profon- deur	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	MO (PAF) %	CO (WB) %	MO(WB) %	C %	N %	Co:N
A	2,5	7,3	3,75	9,00	3,17	5,47	3,18	0,27	11,87
A	12,5	7,7	1,56	8,94	2,65	4,56	2,73	0,24	11,42
A	22,5	7,7	0,89	7,58	2,73	4,70	2,15	0,19	11,48
A	32,5	7,7	0,89	7,22	2,21	3,81	1,75	0,15	11,33



Niveau/ horizon	Profondeur	% Argile	% Limons fins	% Limons grossiers	% Sables fins	% Sables grossiers
A	2,5	7,7	7,1	3,6	7,8	73,8
A	12,5	12,5	12,2	5,6	6,6	63,1
A	22,5	9,0	9,7	4,4	4,7	72,2
A	32,5	11,4	11,4	5,0	5,7	66,5

KOR

Niveau/ horizon	Prof.	pH (H ₂ O)	CaC O ₃ %	MO (PAF) %	CO(W B) %	MO(WB) %	C %	N %	Co: N
A	2,5	-	3,21	12,56	1,62	2,79	5,59	0,49	11,42
A	12,5	-	2,91	8,56	1,21	2,08	3,78	0,33	11,35



Niveau/ horizon	Profondeur	% Argile	% Limons fins	% Limons grossiers	% Sables fins	% Sables grossiers
A	2,5	9,65	10,45	6,00	9,50	64,40
A	12,5	13,90	15,00	8,30	11,10	51,70

Commune	Localisation	Altitude
Brázdím (Rép. Tchèque)	50°10' 54" N 14°35' 43"E	240 m

Kuchyňka KUC (Rép. Tchèque)

Chernozem typique

A1 – 0-10 cm : Horizon humique, très foncé 10YR 2/2 sec, structure granulaire, beaucoup de racines, limoneux, transition nette avec

A2 – 10-58 cm : Horizon humique, très foncé 10YR 2/2 sec, structure granulaire, moins de racines, limono-sableux, en bas présence de grands pièces- cailloux de silice de 6 cm de diamètre, transition graduelle vers

A/C – 58-90 cm : Horizon de transition, couleur brune claire, une ligne de cailloux entre 70-80 cm de profondeurs,

transition graduelle vers

C - ≤90 cm : Roche mère, limons loessique, petits morceaux de silice



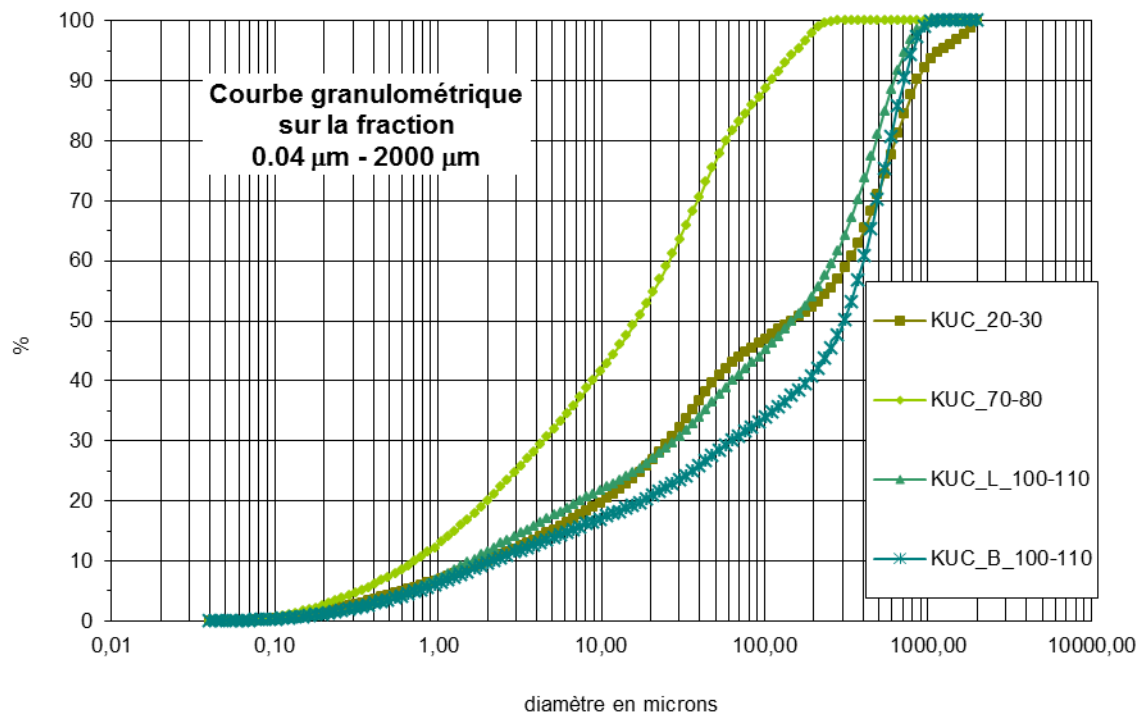
Photo : B. Vvsloužilová

Profondeur	TMR (ans BP)	Numéro de laboratoire
30	1485 ± 35	SacA 25548
50	3525 ± 40	SacA 25549
80	5825 ± 45	SacA 25550



Photo : B. Vysloužilová

Niveau/horizon	Prof.	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	MO (PAF) %	CO (WB) %	MO (WB) %	C %	N %	Co:N
A	20-30	7,31	1,03	7,2	2,04	3,51	2,17	0,2	10,84
A	70-80	8,03	1,03	5,54	0,46	0,79	0,64	0	-
C (loess pur)	100-110	8,83	0,92	2,85	0,29	0,5	4,58	0	-
C (loess foncé)	100-110	8,51	1,14	4,97 340	0,28	0,49	2,47	0	-



Niveau/ horizon	Profondeur	% Argile	% Limons fins	% Limons grossiers	% Sables fins	% Sables grossiers
A	20-30	9,7	16,1	13,8	12,6	47,8
A	70-80	19,0	33,8	22,8	22,4	2,0
C	100-110b	9,1	11,2	7,2	13,2	59,3
C	100-110l	11,0	15,2	10,2	17,6	46,0

Commune	Localisation		Altitude
Kursk (Russie)	51°32'23"N	36°05'12"E	200 m

Kursk* KUR* (Khitrov et al., 2013)

AUrz (A) 0-5/14 cm : 10YR 2.5/2 humide, 10YR 3/1 sec, argilo-limoneux, structure granulaire ; nombreuses racines – transition nette dans la densité de racines avec l'horizon sous-jacent

AU (A) 5/14-21/53 cm : 10YR 2.5/2 humide, 10YR 3/2 sec, argilo-limoneux, agrégats granulaires stables, beaucoup de vides, activité biologique: racines, galeries de vers de terre, de rongeurs. Présence de coprolithes, qui parfois forment des « éponges » poreuses. Présence de micro-charbons de bois. Transition graduelle – apparition de peds bruns. Limite ondulée avec l'horizon sous-jacent

AUb (AB) 21/53-33/84 cm : 10YR 2.5/2 humide,. Forte activité biologique. Coprolithes. Structure prismatique. Transition graduelle à krotovinas abondantes



Photo : M. Bronnikova

AUb (AB), zoo (AB) 33/84-62/103 cm : Hétérogène, la matrice 10YR 2.5/2 humide, 10YR 3.5/2 sec avec des taches brunes 10YR 3.5/3 sec. Structure prismatique. Horizon perturbé – mélange avec le matériel des autres horizons du fait d'une forte activité biologique. krotovinas. Transition graduelle marqué par l'abondance de krotovinas, limite ondulée avec l'horizon sous-jacent

AUb (AB), zoo I 62/103-81/108 cm : Argile pâle. Structure prismatique. Perturbé par les galeries d'animaux.

BCAzoo (Bk), m 81/108 – 95/131 cm : Très hétérogène en couleur : 10YR 3/1-5/1 sec, 10YR 6/3 – 10YR 7/4 humide. Très perturbé par l'activité biologique. Structure prismatique. Argile pâle, compacte, imprégnée par les carbonates, effervescent avec HCl. Racines fines peu abondantes. Galeries de la pédofaune verticales. Des carbonates secondaires apparaissent comme imprégnations et cutanées de galeries de chambres zoogéniques.

Transition nette marquée par l'homogénéité de la couleur, limite très irrégulière avec l'horizon sous-jacent

BCAmc, Ic 95/131-170/180 cm : Horizon d'accumulation des carbonates (10YR 5/3 humide, 10YR5.5/4 sec). Pâle. Krotovinas et galeries très rares.

Au-dessous du profil récent, on observe une séquence de paléosol sur lœss est. Le paléosol n'a pas été échantillonné, Khitrov *et al.* (2013) en donne une description détaillée

Niveau/ horizon	Profondeur	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	C _{org} %	% Sable (0,063-2 mm)	% Limons (0,002- 0,063 mm)	% Argile (≤0,002 mm)
A	0-10	-	-	-	1	60	38
A	10-26	6,7	0	3,6	1	58	41
A	30-50	7,1	0	2,5	1	61	38
AB	60-75	7,3	0	1,9	2	59	39
AB	84-95	8	0,45	1,9	1	60	39
Bk	106-120	8,7	9,3	1	1	58	41
Bk	125-140	8,7	14,07	0,8	1	56	43
Bk	145-175	8,7	11,12	0,5	2	52	45

Khitrov *et al.*, 2013

Niveau/ horizon	Profondeur	Type de matériel daté	¹⁴ C-age BP (ans)	Lab. Index
A	10-20	acide humique	1370 ± 70	IGAN-4235
A	30-40	acide humique	2000 ± 80	IGAN-4236
A	45-60	acide humique	3340 ± 80	IGAN-4238
AB	79-83	acide humique	5640 ± 70	IGAN-4237

Khitrov *et al.*, 2013

Commune	Localisation		Altitude
Belsőbáránd (Hongrie)	47°6'18"N	18°32'3"E	117 m

Mezofold - Belsobarand-valley*

HUM1*

Sol isohumique : chernozem ou colluviosol chernique

A₁₁ : 0 – 28 cm : 10 YR 2/1 sec, 10 YR 2/2 humide ; sec ; structure grumeleuse à grenue ; limoneux, avec un peu de sables très fins ; quelques racines (Ø 1 10 mm) ; belle activité biologique ; transition nette avec l'horizon sous-jacent

A₁₂ : 28 – 50 cm : 10 YR 3/1 sec, 10 YR 3/2 humide ; mêmes caractéristiques, globalement, que A₁₁, mais avec moins de racines ; transition nette avec l'horizon sous-jacent

A₁₃ : 50 – 70 cm : idem que A₁₂, mais carbonaté ; transition distincte avec l'horizon sous-jacent

A/C : 70 à plus de 90 cm : 10 YR 6/3 et 10 YR 5/3 (3/3 humide) ; limoneux ; structure grenue à grumeleuse développée ; crotovinas ; carbonaté

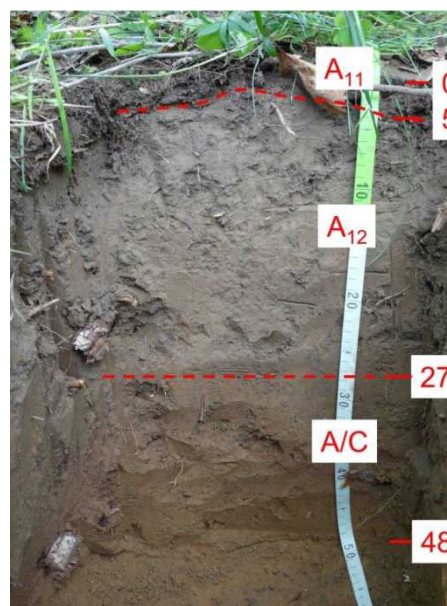
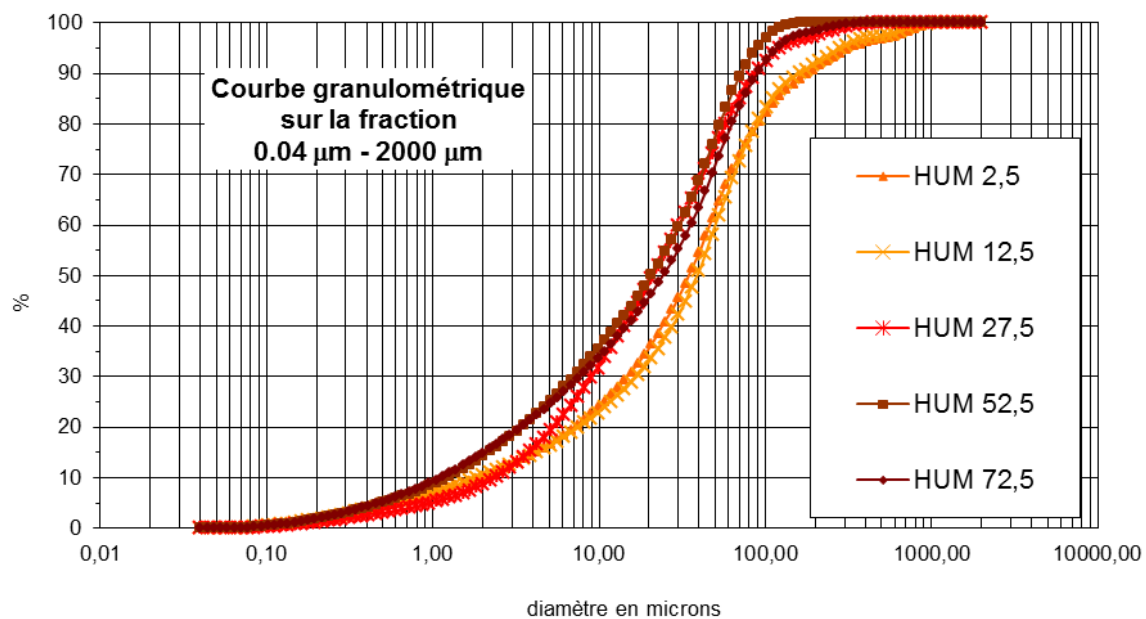


Photo : D. Schwartz

Niveau/ horizon	Profondeur	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	MO (PAF) %	CO(WB) %	MO(WB) %	C %	N %	Co: N
A ₁₁	2,5	7,38	1,69	18,70	1,55	2,66	-	-	-
A ₁₁	12,5	7,73	5,44	12,06	1,57	2,70	-	-	-
A ₁₁	27,5	7,98	10,77	8,76	1,11	1,92	-	-	-
A ₁₃	52,5	8,19	15,82	5,01	0,60	1,04	-	-	-
A/C	72,5	8,27	20,09	3,35	0,37	0,64	-	-	-



Niveau/ horizon	Profondeur	% Argile	% Limons fins	% Limons grossiers	% Sables fins	% Sables grossiers
A ₁₁	2,5	9,8	24,7	26,8	29,5	9,2
A ₁₁	12,5	10,0	21,9	26,2	33,5	8,4
A ₁₁	27,5	8,1	39,0	27,1	23,2	2,6
A ₁₃	52,5	13,4	34,5	28,0	24,1	0,0
A/C	72,5	14,0	30,6	25,6	28,2	1,6

Commune	Localisation	Altitude
Zhovtneve Sums'ka oblast (Ukraine)	50°45'N 34°11'E	172 m

Mikhajlovska celina CT (Jelenska *et al.*, 2008)

Chernozem typique sur lœss

Ah₁k : 0-41 cm : Horizon humique, gris-foncé, limoneux, meuble, carbonaté, transition graduelle

Ah₂k : 41-75 cm : Horizon de transition supérieur, gris-foncé, très humique, beaucoup de carbonates en poudre dans les galeries de lombriques et de taupes, frais, transition graduelle

Chk : 75-106 cm : Horizon de transition inférieur, brun-gris, légèrement et irrégulièrement humique, pseudomycéliums, galeries de rongeurs, transition graduelle,

Ck : ≥107 cm : Lœss, clair-brun, galeries de rongeurs, carbonates en poudre et en pseudomycélium

Horizon	Prof.	pH	CaCO ₃ %	C org. %	N %
Ad	0-10	6.8	0	4.58	0.30
A	25-35	7.4	0.38	4.26	0.24
Abhk	45-55	7.4	3.54	3.55	0.20
Bhk	80-90	7.8	5.22	2.26	0.14
Bhk	110-120	7.9	8.00	1.63	0.10
Ck	140-150	8.0	8.82	0.94	0.07
Ck	210-220	8.3	7.09	-	0.02

Source : Jelenska, non publié

Granulométrie : fractions (mm)						
1-0.25	0.25-0.05	0.05-0.01	0.01-0.005	0.005-0.001	<0.001	<0.01
0.26	4.69	52.88	7.28	9.98	24.91	42.17
0.16	16.07	46.44	9.20	6.03	22.10	37.33
0.14	19.80	45.67	6.15	7.27	20.97	34.39
0.12	27.63	41.63	6.21	5.05	19.36	30.62
0.10	29.31	39.81	6.89	4.55	19.34	30.78
0.20	28.71	41.15	5.03	4.95	19.96	29.94
0.14	23.78	40.38	5.41	5.41	19.88	30.70

Source : Jelenska, non publié

Commune	Localisation		Altitude
Zhovtneve, Sums'ka oblast (Ukraine)	50°44'	34°11'	117 m

Mikhajlovska celina MIK*

MIK*

Chernozem typique

Ah 0-5 cm : Très foncé, 10YR 3.2. Frais. Horizon humique, structure granulaire beaucoup de racines fines. Transition nette dans la densité de racines avec l'horizon sous-jacent

A 5-80 cm (limite de prélèvement) : Très foncé, 10YR 3.2., structure friable, légère, très facile à creuser, structure angulaire. Le sol est frais, légèrement humide – même si l'environnement est sec. Effervescent.

A/C ≤ 80 cm : Clair pâle, loess ; abondance de crotovinas et de galeries de vers de terre.

Commune	Localisation		Altitude
Młodzawy (Pologne)	50°40'N	20°11'	262 m

Młodzawy MD (Jelenska *et al.*, 2008)

Le sol était cultivé, mais il est abandonné depuis très longtemps (la date précise n'est pas connue).

Chernozem non-dégradé

A :0-55 cm Horizon humique

A/C : 55-80 cm Horizon de transition

C : ≥81 cm Loess

Horizon	Profondeur cm	pH	C_{org} %	Fe total %
A	5	7,3	7,5	1
A	35	8,6	1,8	1,35
C	135	8,9	0,1	1,35

Jelenska, non publié

Commune	Localisation		Altitude
Libochovice-Poplze (Rép. Tchèque)	50°23'44"N	14°2'45"E	183 m

Poplze

POP*

Chernozem

L 0-30 cm : Horizon de labour; structure polyédrique avec beaucoup d'éléments grossiers ; très organique 10YR 4/1 ; racines fines ; effervescent ; limite nette de structure avec A

A 30-55/60 cm : A mollique, 10YR 4/1, structure grenue; racines fines, abondance d'éléments grossiers et de tessons déterminés par une archéologue comme étant de l'âge de bronze, pseudomyceliums

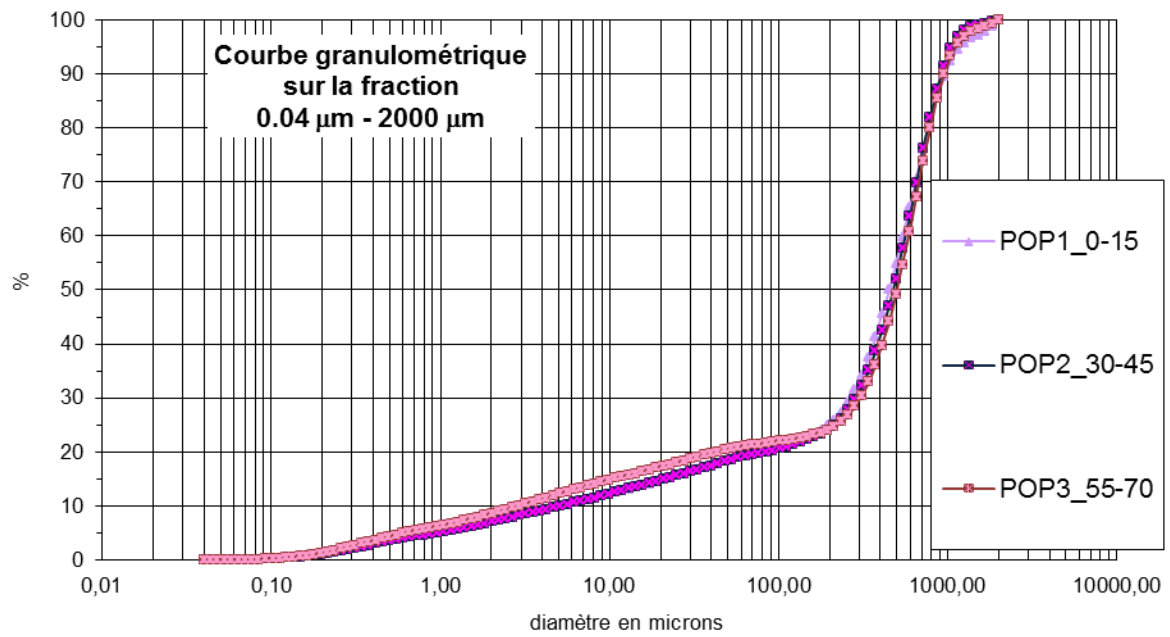
A/C 55/60-75 cm : horizon de transition

C ≥75 cm : marnes calcaires



Photo : B. Vysloužilová

Niveau/ horizon	Profondeur	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	MO (PAF) %	CO(WB) %	MO(WB)) %	C %	N %	Co:N
L	0-15	7,8	15,4	6,2	3,1	5,3	4,2	0,2	18,2
A	30-45	7,8	14,6	5,4	2,1	3,6	3,5	0,2	19,3
A/C	55-70	7,8	29,1	4,4	0,8	1,4	4,6	0,1	36,0



Niveau/ horizon	Profondeur	% Argile	% Limons fins	% Limons grossiers	% Sables fins	% Sables grossiers
L	7,5	7,1	7,4	3,8	6,6	75,1
A	37,5	6,8	7,7	3,7	5,9	75,9
A/C	62,5	8,3	8,7	3,4	3,6	76,0

Commune	Localisation		Altitude
Sarand (Hongrie)	47°24'13"N	21°37'25"E	100 m

Sarand*

HUS*

Le sol isohumique est un chernozem arénique ou un regozem

A : 0 – 125 cm : 10 YR 3/2 sec (2/2 humide) ; sec ; sablo-limoneux ; structure grumeleuse peu développée – aspect massif ; microporosité élevée ; racines très fines (< 1 mm) abondantes jusque vers 60 cm, plus rares ensuite ; transition très progressive avec l'horizon sous-jacent

Horizon 2 : 125 – 160 cm : sec ; 10 YR 3/4 ; sablo-limoneux ; aspect massif ; peu de racines ; à crotovinas ;

Horizon 3 : 160 à + de 220 cm : sec ; 10 YR 4/4 ; mêmes caractéristiques que le précédent, et tout aussi hétérogène (crotovinas à 180 cm, constituée de matériau remonté, limono-sableux 10 YR 5/4) ;

Niveau/ horizon	Prof.	pH (H ₂ O)	CaC O ₃ %	MO (PAF) %	CO (WB) %	MO (WB) %	C %	N %	Co:N
A	2,5	6,17	0	10,23	1,89	3,24	-	-	-
A	7,5	6,43	0	3,70	1,07	1,83	-	-	-
A	12,5	5,90	0	2,70	0,97	1,67	-	-	-
A	22,5	5,86	0	1,97	0,70	1,21	-	-	-
A	37,5	5,36	0	3,12	0,91	1,57	-	-	-
A	52,5	5,67	0	2,29	0,66	1,14	-	-	-
A	72,5	6,38	0	1,72	0,24	0,42	-	-	-
A	92,5	6,51	0	1,65	0,16	0,27	-	-	-
A	117,5	6,78	0	1,50	0,01	0,02	-	-	-
Horizon 2	147,5	6,98	0	1,28	0,00	0,00	-	-	-
Horizon 3	177,5	7,14	0,69	1,01	0,09	0,16	-	-	-

Niveau/ horizon	Profondeur	% Argile	% Limons fins	% Limons grossiers	% Sables fins	% Sables grossiers
A	2,5	2,6	4,4	5,1	63,4	24,5
A	7,5	1,8	2,8	3,7	69,0	22,7
A	12,5	2,3	3,9	4,9	65,2	23,7
A	22,5	2,4	3,6	3,8	63,9	26,3
A	37,5	2,7	4,7	5,6	64,4	22,6
A	52,5	2,0	3,7	4,4	66,7	23,2
A	72,5	1,7	2,5	3,1	64,2	28,5
A	92,5	2,6	3,8	4,1	62,0	27,5
A	117,5	2,1	3,6	4,2	62,8	27,3
Horizon 2	147,5	2,2	3,9	4,7	63,4	25,9
Horizon 3	177,5	2,1	3,6	4,3	62,1	27,9

Commune	Localisation	Altitude
Senec (Slovaquie)	48°14'39"N 17°22'15"E	160 m

Senec (Martinský les)*

SEN*

Chernozem

Humus de type mull forestier, à couche L.

0-25 cm : A : 10YR3/3 ; sec ; limoneux ; structure polyédrique subanguleuse dominante, mais avec un peu grumelleuse dans les 7 cm supérieurs, et polyédrique anguleuse en dessous de 15 cm ; racines fines et moyennes d'arbres, assez abondantes ; porosité moyenne, racinaire fine avec quelques tubulures de vers anéciques inter-agrégats ; décarbonaté ; transition nette, irrégulière avec l'horizon sous-jacent

25-50 cm : S : 10YR3, 5/4 à 4/4 ; couleur jaune bien marquée (expression du fer) ; sec ; limoneux ; structure polyédrique subanguleuse ; racines fines et moyennes, peu abondantes ; porosité faible, surtout intra-agrégat, d'origine racinaire fine et de lombrics ; décarbonaté ; transition nette, régulière avec l'horizon sous-jacent

> 50 cm : C : loess décarbonaté ; sec à frais ; 10YR6,5/4 ; sec ; structure massive ; porosité fine, racinaire

Niveau/ horizon	Profondeur	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	MO (PAF) %	CO (WB) %	MO (WB) %	C %	N %	Co:N
A	2,5	5,65	0,99	10,44	4,3	7,41	4,42	0,34	12,8
A	7,5	5,17	1,09	5,58	1,97	3,4	1,59	0,15	10,7
A	12,5	5,79	0,9	4,17	0,92	1,59	0,59	0	-
S	22,5	5,63	1,09	3,93	0,87	1,5	0,52	0	-
S	37,5	5,96	0,9	4,11	0,85	1,47	0,8	0	-
C	52,5	7,82	9,98	2,89	0,57	0,99	2,05	0	-

Niveau/ horizon	Profondeur	% Argile	% Limons fins	% Limons grossiers	% Sables fins	% Sables grossiers
A	2,5	17,9	30,6	25,9	19,3	6,3
A	12,5	20,1	31,4	25,8	17,6	5,1
A	22,5	20,8	31,1	27,0	18,4	2,7
S	32,5	21,3	40,3	33,6	4,8	0,0
S	42,5	17,4	31,0	28,8	19,1	3,7
C	52,5	16,2	31,6	29,5	20,4	2,3

Commune	Localisation		Altitude
Tard (Hongrie)	47°53'48"N	20°34'23"E	160 m

Tard* HUR*

Chernozem à BT, « chernozem brown forest soil »

Am : 0 – 30 cm : 10 YR 3/2 ; limoneux ; sec ; structure microagrégée à grenue, mais aspect massif ; bonne microporosité ; racines fines, quelques racines plus grosses ; à partir de 25 cm de profondeur, quelques taches de Bt remonté par bioturbation ; transition progressive avec l'horizon sous-jacent

A/B : 30 – 40 cm : horizon de transition

BT (?) : 40 à plus de 60 cm : 7,5 YR 4/6 ; limono-argileux ; structure polyédrique subanguleuse, mais aspect massif ; racines < 2mm

Niveau/ horizon	Profon- deur	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	MO (PAF) %	CO- (WB) %	MO- (WB) %	C %	N %	C:N
A	2,5	5,46	0	12,92	1,95	3,35	-	-	-
A	12,5	5,20	0	5,67	1,26	2,17	-	-	-
A	22,5	5,53	0	4,57	0,83	1,42	-	-	-
A/B	32,5	5,53	0	3,96	0,42	0,72	-	-	-
BT	42,5	5,50	0	4,02	0,00	0,00	-	-	-
BT	52,5	5,52	0	3,22	0,00	0,00	-	-	-

Niveau/ horizon	Profondeur	% Argile	% Limons fins	% Limons grossiers	% Sables fins	% Sables grossiers
A	2,5	8,2	17,8	14,5	39,0	20,5
A	12,5	10,3	21,7	20,4	46,9	0,7
A	22,5	3,8	6,3	4,9	35,4	49,6
A/B	32,5	7,8	14,9	12,0	38,0	27,4
BT	42,5	8,5	15,2	11,8	33,4	31,1
BT	52,5	5,6	11,0	9,1	35,3	39,1

Annexes 4. Liste de paléosols

Nom du site	Code de site	Type de sol - context	Référence
Břesnice	BRE	Chernozem dans une séquence sédimentaire - Holocène	Ložek, 1974
Brumovice	BRK	Chernozem scellé sous les colluvions - Holocène	Zádorová <i>et al.</i> , 2013
Bubeneč	BUB	Chernozem scellé sous les colluvions - Holocène	
Clermont-Ferrand, Petit Beaulieu	CPB1 11-2	Chernozem scellé sous les colluvions - Holocène	
Clermont-Ferrand, Petit Beaulieu	CPB2 1-8	Chernozem scellé sous les colluvions - Holocène	
Clermont-Ferrand, Petit Beaulieu	CPB3 1072	Fosse comblé à l'âge du Bronze ancien	
Gougenheim	GOU	Paléosol isohumique scellé sous les colluvions	Ertlen, 2009
Morschwiller-le-Bas	MOR	Sol mollique scellé sous les colluvions	
Kolín 1	KOL1	Chernozem sous les colluvions - Holocène	Vysloužilová <i>et al.</i> , 2014
Kolín 2	KOL2	Chernozem sous les colluvions - Holocène	
Kolín 3	KOL3	Chernozem sous les colluvions - Holocène	
Sainte-Croix-en-Plaine	SCD	Paléosol isohumique scellé sous des alluvions	
Poplze	POL	Chernozem scellé sous les colluvions - Holocène	Smolíková, Ložek ; 1978 ; Vysloužilova <i>et al.</i> , 2014
Wiwersheim	WIW	Paléosol isohumique - Pleistocène	
Zeměchy	ZMC	Paléochernozem de Pleistocène	Ertlen, 2009 ; Cilek, 1996
Zeměchy	ZMK	Paléochernozem de Pleistocène	Vysloužilová <i>et al.</i> , 2014 ; Ložek, 1995 ; Zander, 2000

Commune	Localisation	Altitude
Srbsko u Karlštejna (Rép. Tchèque)	49°56'44"N 14°9'22"E	291 m

Břesnice BRE

Formation végétale	Principales essences	Référence
Forêt	<i>Tilia platiphyllos</i> ; <i>Carpinus</i> ; soubois : <i>Apiaceae</i> ; <i>Urtica dioica</i> ; <i>Chelidonium</i> ; <i>Asarum</i>	Ložek, 1974

Unité I (colluvions)

A (0-15 cm) : 10 YR 3/2 ; limoneux ; très poreux ; structure polyédrique, anguleuse, fine. Quelques racines ; transition nette avec l'horizon sous-jacent

SC (15-60 cm) : colluvions pédogénisés ; 10 YR 3/3 ; limoneux ; éléments grossiers (> 3 cm de diamètre) à partir de 30 cm ; structure polyédrique angulaire ; rares racines ; relativement organique encore ; transition nette avec l'horizon sous-jacent

C (?) : 60-66 cm 10 YR4/3 ; peu caillouteux ;

C (?) : 66-72 cm 10 YR 5/4



Photo D. Ertlen

Unité II (niveaux marécageux)

Niveau IIa : 72-85 cm : très limonocalcaire (loess remanié ?), sans cohérence ; 10 YR 6/4 ; massif mais pulvérulent

Niveau IIb : 85-105 cm : Niveau à blocs en provenance du versant (pas de déconnexion à l'époque). Considéré comme niveau de marécage.

Unité III (chernozem)

Horizon « 1 », 105-120 cm : transition entre II et III ; 10 YR 5/3 ; très riches en taches carbonatées ; massif ; riche en MO ; présence de charbons de bois ; millimétriques ; transition nette avec l'horizon sous-jacent

Horizon « 2 » : 120- 170 cm : A chernique classique ; 10 YR 3/2 ; massif ; limono-argileux ; nombreux pseudomycéliums ; certains de très grande taille (plus de 20 cm de diam), alimentation par le versant ; quelques charbons de bois, notamment vers 135 cm de profondeur, taille millimétrique ; transition progressive avec l'horizon sous-jacent

C : 170 cm : C caillouteux gris beige 10YR5/3.

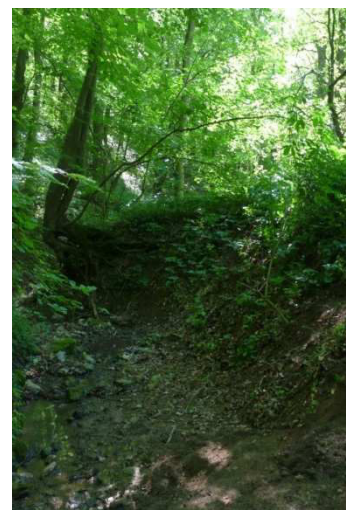
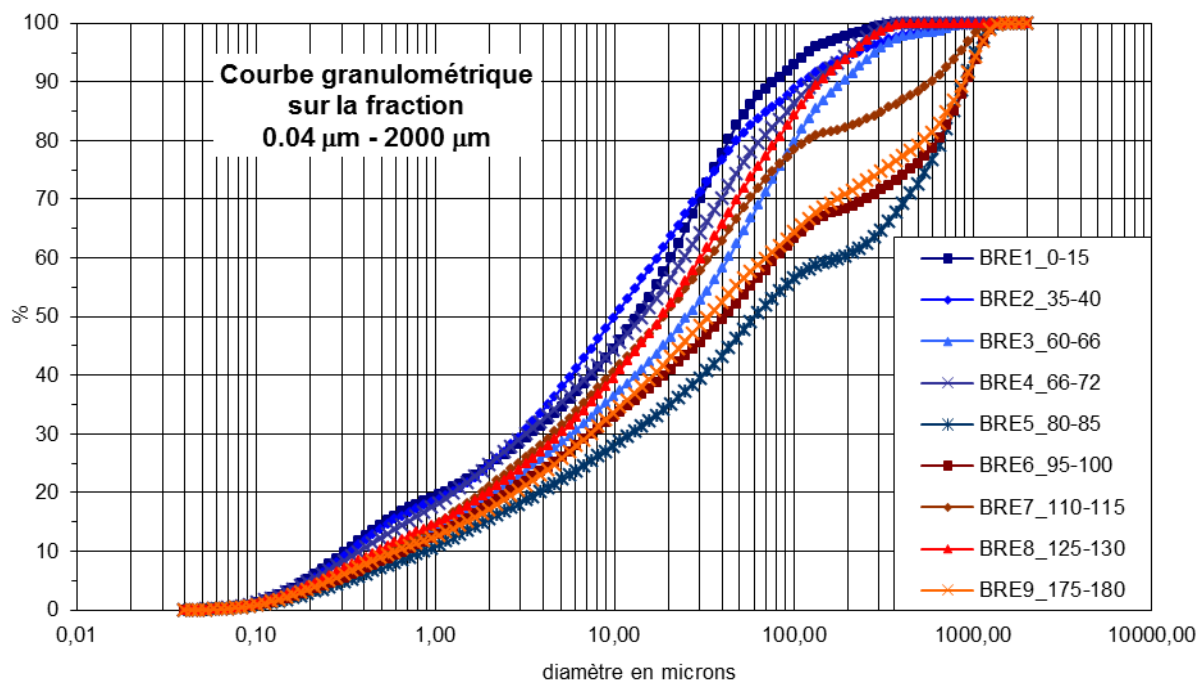


Photo D. Ertlen

Numéro du laboratoire	Site/ type de matériel	Profondeur (cm)	TMR (ans BP)
SacA 32352	Břesnice/ SOM	122,5	8370 ±35
SacA 32351	Břesnice/ SOM	147,5	9045 ±40

Niveau/ horizon	Profondeur	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	MO (PAF) %	CO (WB) %	MO (WB) %	C	N	C:N
I.	0-15	7,4	2,6	9,3	2,9	4,9	3,5	0,3	11,1
I.	35-40	8,0	6,0	5,2	1,1	1,9	2,0	0,2	12,7
I.	60-66	8,1	38,9	3,9	0,9	1,5	5,8	0,1	47,0
I.	66-72	8,2	46,2	3,7	0,9	1,5	-	-	-
II.	80-85	8,3	54,6	2,2	0,5	0,9	16,6	0,2	86,9
II.	95-100	8,3	64,8	2,1	0,3	0,6	9,3	0,1	135,7
III.	110-115	7,8	66,6	2,3	0,5	0,9	9,4	0,1	118,0
III.	125-130	7,9	37,3	3,4	0,8	1,4	5,6	0,1	55,2
III.	175-180	7,9	37,9	3,2	0,7	1,2	5,5	0,1	58,6



Niveau/ horizon	Profondeur	% Argiles	% Limons fins	% Limons grossiers	% Sables fins	% Sables grossiers
I.	7,5	23,8	33,8	24,9	15,2	2,3
I.	37,5	23,5	38,3	18,1	14,2	5,9
I.	63,0	18,5	26,5	17,4	27,9	9,7
I.	69,0	23,7	31,0	19,6	19,9	5,8
II.	82,5	14,8	19,3	12,0	14,1	39,8
II.	97,5	17,2	22,7	12,3	16,2	31,6
III.	112,5	20,1	29,9	16,7	15,4	17,9
III.	127,5	19,4	31,1	19,3	24,1	6,1
III.	177,5	16,4	25,3	13,5	15,6	29,2

Commune	Localisation	Altitude
Brumovice (Rép. Tchèque)	48°57'36"N 16°52'51"E	250 m

Brumovice BRC (Zádorová et al. 2013)

Chernozem scellé sous les colluvions

L (0-30 cm) : 10YR 4/3, labouré, très effervescent

A1 (30-90 cm) : 10YR 4/3, colluvions (répondent à la phase d'érosion 3), très effervescent, transition nette vers l'horizon sous-jacent

A2 (90-140 ? cm) : effervescent, transition pas claire avec l'horizon sous-jacent

fAc (? 140-250 cm) : horizon Ac du chernozem

fA/C (250-280 cm) : transition progressive vers la roche mère

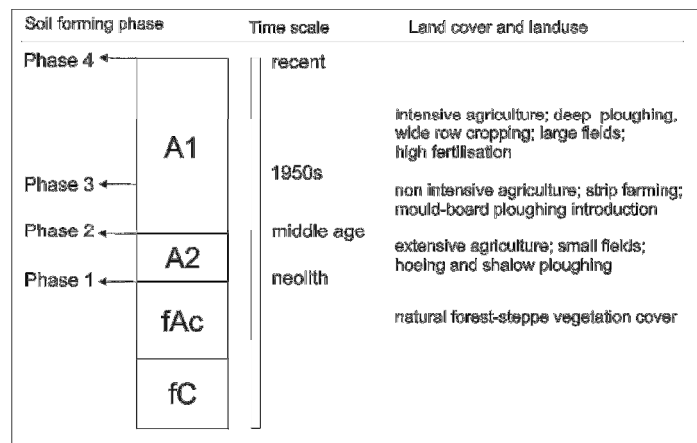
fC (280-330 cm) : 10YR 6/4, loëss calcaire



Zádorová, non publié



Photo : L.
x .



Les phases de pédogénèse (1) et de colluvionnement (2-4) (Zádorová *et al.*, 2013)

Commune	Localisation		Altitude
Praha-Bubeneč	50°6'30"N	14°24'4"E	196 m

Bubeneč

BUB

Paléochernozem scellé sous les colluvions

C 0-150 cm : colluvions variés, transition très nette avec l'horizon sous-jacent

A1 150-155cm : « la surface » du chernozem, ondulée – traces de labour ancien (?), peut-être néolithique ou âge du bronze (?); on distingue deux types de couleur – les sillons foncés 10YR 3/2, et des sillons claires 10YR 5/3; effervescent; les petits charbons de bois abondants, structure micro agrégé, limoneux

A2 155-200 cm : 10 YR 4/2, horizon chernique, sombre gris, structure micro agrégé, limoneux

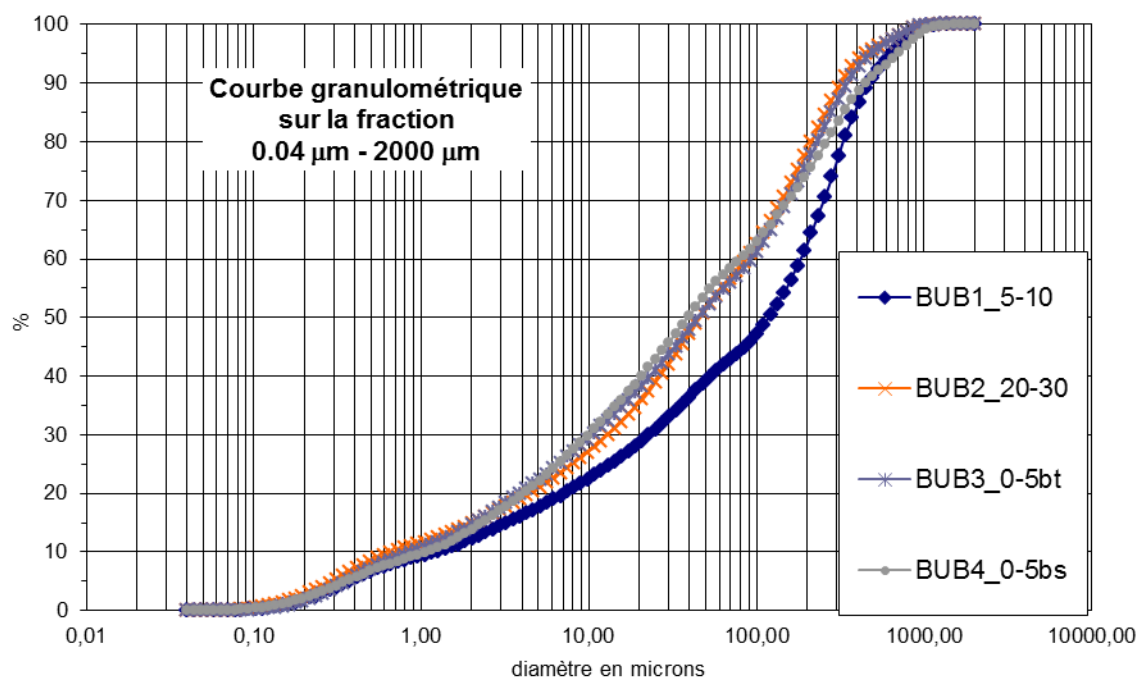
A/C 200-205 cm : transition progressive vers l'horizon C, quelques krotovinas

C : ≥55 cm loess massive



Photo : B. Vysloužilová

Niveau/ horizon	Profon- deur	pH (H ₂ O)	CaC O ₃ %	MO (PAF) %	CO (WB) %	MO (WB) %	C %	N %	C:N
A1 - foncé	150-155	7,8	1,8	3,9	1,0	1,7	1,4	0,1	10,7
A1 - claire	150-155	7,9	6,2	4,4	1,2	2,1	2,0	0,1	15,7
A2	155-160	7,9	1,0	4,5	1,4	2,4	1,5	0,1	11,2
A2	170-180	8,0	1,0	3,4	0,7	1,2	1,0	0,1	10,7



Niveau/horizon	Profondeur	% Argile	% Limons fins	% Limons grossiers	% Sables fins	% Sables grossiers
A1 - foncé	150-155	13,2	25,4	14,8	20,5	26,1
A1 - claire	150-155	13,9	23,2	13,8	24,6	24,5
A2	155-160	11,8	16,2	10,8	22,7	38,5
A2	170-180	14,3	20,3	16,1	26,9	22,4

Numéro du laboratoire	Site/ type de matériel	Profondeur (cm)	TMR (ans BP)
SacA 32348	Bubeneč/ SOM	155	4950 ± 30
SacA 32349	Bubeneč/ SOM	202,5	7630 ± 35

Commune	Localisation	Altitude
Clermont-Ferrand (France)	45°45'52"N 03°09'30"E	352 m

Clermont-Ferrand – Petit Beaulieu CPB

Chernozem scellé sous les colluvions

UPS 7-2 (0-20 cm) : Colluvions à structure polyédrique anguleuse, très nette et développée. Présence d'éléments grossiers. Limite (de labour ?) nette avec l'horizon sous-jacent

UPS 7-1 (20-36 cm) : Colluvions, à structure polyédrique anguleuse plus fine et peu développée ; niveau riche en éléments grossiers ; limite nette avec l'horizon sous-jacent

UPS 5-5 (36 à 60 cm) : Colluvions à pseudomycélium très développé ; limite nette avec l'horizon sous-jacent

UPS 5-4 (60 à 67 cm) : Colluvions très grossiers ; un tesson historique (nb : l'ensemble de l'UPS 5 contient des céramiques historiques) :

UPS 5-3 (67-75 cm) : Colluvions riches en matière organique ; un peu de pseudomycélium, sans excès

UPS 5-2 (75-103 cm) : Assez semblable au précédent, mais avec un peu moins de MO et plus de pseudomycélium ; limite nette avec l'horizon sous-jacent

UPS 5-1 (103-130/133 cm) : Colluvions avec quelques pseudomycéliums. Pourrait être le niveau de base des colluvions, mais aussi un niveau de chernozem très remanié, légèrement colluvionné.

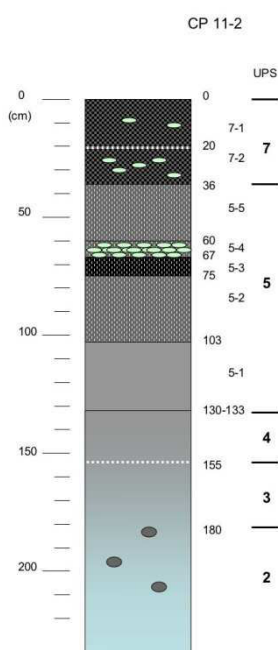
UPS 4 (130/134-155 cm) : Chernozem remanié par le labour. Serait donc un paléohorizon de labour, post Bronze (antiquité ?). En effet, on n'y trouve pas les structures du Bronze en place.

UPS 3 (155-180 cm) : Base de l'horizon A du chernozem, en place. On y trouve en effet les structures archéologiques du Bronze, non remaniées. Transition progressive avec l'horizon sous-jacent

UPS 2 (> 180 cm) : Horizon C du chernozem ; formation de pente de limons calcaires, développée à partir de matériaux oligocènes ; présence de crotovinas. Contient la base des structures du Bronze en place.



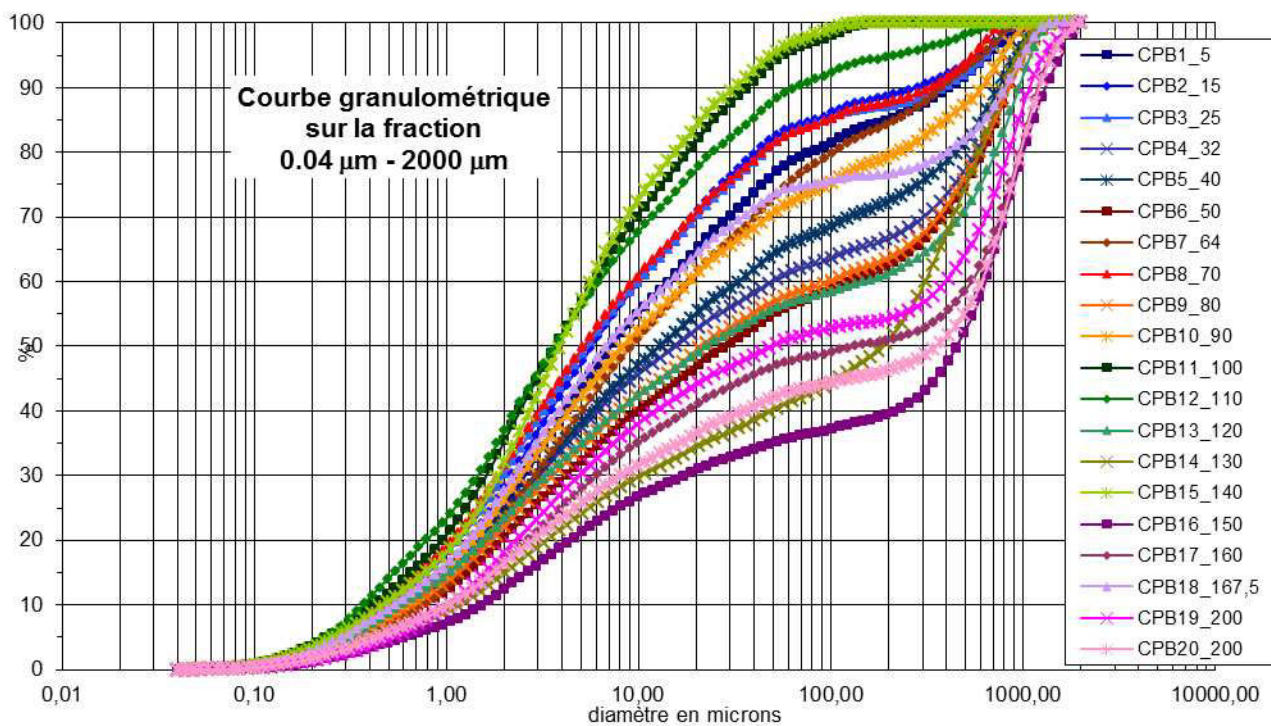
Photo : M. Rué



Niveau/ horizon	Profon- deur	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	MO (PAF) %	CO (WB) %	MO (WB) %	C %	N %	Co:N
UPS 7-2	5	8,3	28,0	10,2	1,9	3,3	4,6	0,2	19,7
UPS 7-2	15	8,2	32,5	9,6	1,5	2,5	4,3	0,2	20,5
UPR 7-1	25	8,2	33,2	8,9	1,4	2,5	4,2	0,2	21,7
UPS 7-1	32	8,3	34,0	8,2	0,8	1,4	3,6	0,1	25,6
UPS 5-5	40	8,3	16,5	8,2	0,8	1,5	3,6	0,0	-
UPS 5-5	50	8,4	32,5	8,0	0,9	1,5	3,6	0,1	33,0
UPS 5-5	64	8,5	33,3	6,9	0,8	1,4	4,3	0,0	-
UPS 5-3	70	8,3	31,7	8,2	0,8	1,4	3,3	0,0	-
UPS 5-2	80	8,4	32,2	8,2	0,7	1,3	3,5	0,0	-
UPS 5-2	90	8,4	20,5	8,2	0,6	1,0	3,3	0,1	31,5
UPS 5-2	100	8,1	27,5	8,2	0,5	0,9	3,2	0,1	27,7
UPS 5-1	110,0	8,0	31,2	9,1	0,8	1,3	2,8	0,1	24,9
UPS 5-1	120,0	8,0	26,3	9,0	0,4	0,7	2,7	0,1	23,8
UPS 5-1	130	7,9	32,3	7,9	0,4	0,7	2,5	0,0	-
UPS 4	140	8,2	30,3	7,2	0,7	1,2	3,6	0,1	25,4
UPS 4	150	8,0	28,1	7,0	0,5	0,9	3,7	0,1	29,6
UPS 3	160	8,0	31,0	6,8	1,1	1,9	3,8	0,0	-
UPS 3	167,5	8,0	36,0	6,8	0,5	0,9	4,0	0,1	33,2
UPS 2	200	8,1	34,9	4,8	0,2	0,3	5,3	0,0	-
UPS 2	200,0	8,1	31,8	6,2	0,3	0,6	4,4	0,0	-

Numéro du laboratoire	Site/ type de matériel	Profondeur (cm)	TMR (ans BP)
Poz-46306	Clermont-Ferrand 7- 8	64	3975 ± 30
Poz-46305	Clermont-Ferrand 7- 8	84	3780 ± 30

Les datations C14 proviennent d'une autre coupe à proximité. Les datations sont inversées et en décalage avec les données de l'archéologie.



S445 - F/11/63/CLERMONT FERRAND/Petit Beaulieu/1-

Niveau/ horizon	Profondeur	% Argile	% Limons fins	% Limons grossiers	% Sables fins	% Sables grossiers
UPS 7-2	5	23,1	40,9	11,9	9,0	15,1
UPS 7-2	15	26,2	43,5	12,2	6,6	11,5
UPR 7-1	25	28,3	40,7	11,6	6,4	13,0
UPS 7-1	32	22,1	29,8	7,8	6,8	33,5
UPS 5-5	40	22,6	31,7	9,4	8,5	27,8
UPS 5-5	50	19,2	27,0	8,3	7,8	37,7
UPS 5-5	64	21,9	38,4	12,0	12,0	15,7
UPS 5-3	70	29,6	40,3	10,9	6,8	12,4
UPS 5-2	80	20,8	27,8	7,9	6,8	36,7
UPS 5-2	90	24,6	35,8	9,7	9,0	20,9
UPS 5-2	100	33,2	47,6	12,5	6,7	0,0
UPS 5-1	110,0	35,0	41,6	10,8	7,3	5,3
UPS 5-1	120,0	22,0	26,3	7,2	5,6	38,9
UPS 5-1	130	13,9	20,1	5,8	10,7	49,5
UPS 4	140	29,6	53,5	11,6	5,3	0,0
UPS 4	150	11,5	19,0	4,4	4,4	60,7
UPS 3	160	15,5	24,9	6,2	4,2	49,2
UPS 3	167,5	25,8	37,6	9,6	3,5	23,5
UPS 2	200	16,7	26,8	6,2	4,4	45,9
UPS 2	200,0	15,4	20,6	5,7	4,4	53,9

Commune	Localisation	Altitude
Clermont-Ferrand (France)	45°45'52"N 3°09'30"E	352 m

Clermont-Ferrand – Petit Beaulieu CPB

Fosse comblée volontairement à l'âge du Bronze ancien autour de 3500 BP. L'hypothèse est que le comblement correspond à des horizons de surface du Bronze ancien, manquant dans les séquences de sols. Les prélèvements ont donc exclusivement été faits dans les niveaux sombres de la fosse.



Photo : M. Rué

Commune	Localisation	Altitude
Gougenheim (France)	48°42'35" N 7°33'56" E	201 m

Gougenheim

GOU (S8SD294, Ertlen, 2009)

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

Commune	Localisation	Altitude
Didenheim (France)	47°43'50" N 7°16'58" E	275 m

Morschwiller-Didenheim MOR

Morphologiquement, aucun trait pédologique ne permet de rattacher le sol à un paléosol hydromorphe (absence d'horizon G et de taches de rouilles ou de déferrification). Il s'agit plutôt d'un sol iso-humique, de type chernozem, ce qui ramènerait la formation au Pléistocène. La structure grumeleuse typique des chernozems fonctionnels n'est pas conservée, mais ceci est fréquent dans les chernozems enfouis. Aucun vestige archéologique n'a été repéré dans ce sol. Quelques tessons néolithiques apparaissent dans les colluvions qui le surmontent. Ceci ne permet pas de ramener l'âge des colluvions au Néolithique, les tessons pouvant être en dépôt secondaire.

Description du sol :

0-25 cm : horizon L (labour) : 10 YR 4/4 ; frais à légèrement humide ; limoneux ; structure grumeleuse fragile (L1 : jusqu'à 17 cm) puis polyédrique anguleuse (L2, de 17 à 25 cm, sans doute par compaction lié au labour) ; quelques fragments de briques, de diamètre 2-3 mm ; racines fines ; bonne porosité dans le L1, plus compact ensuite avec une porosité fissurale inter-agrégat ; limite nette avec l'horizon sous-jacent

25-60 cm : horizon S (h. structural) : 10 YR 5/4 ; frais ; limoneux ; structure polyédrique sub-anguleuse fragile, avec une sur-structure prismatique peu développée ; quelques racines très fines (diamètre < 1 mm) ; couleur brune, liée à la présence d'un peu de matière organique ; aspect marbré (petites taches de MO, de Mn et taches blanches de déferrification) ; quelques fragments de tessons (Néo ?) et de briques (diamètre 2 – 3 mm) ; transition ondulée, progressive, avec l'horizon sous-jacent



Photo : D. Schwartz

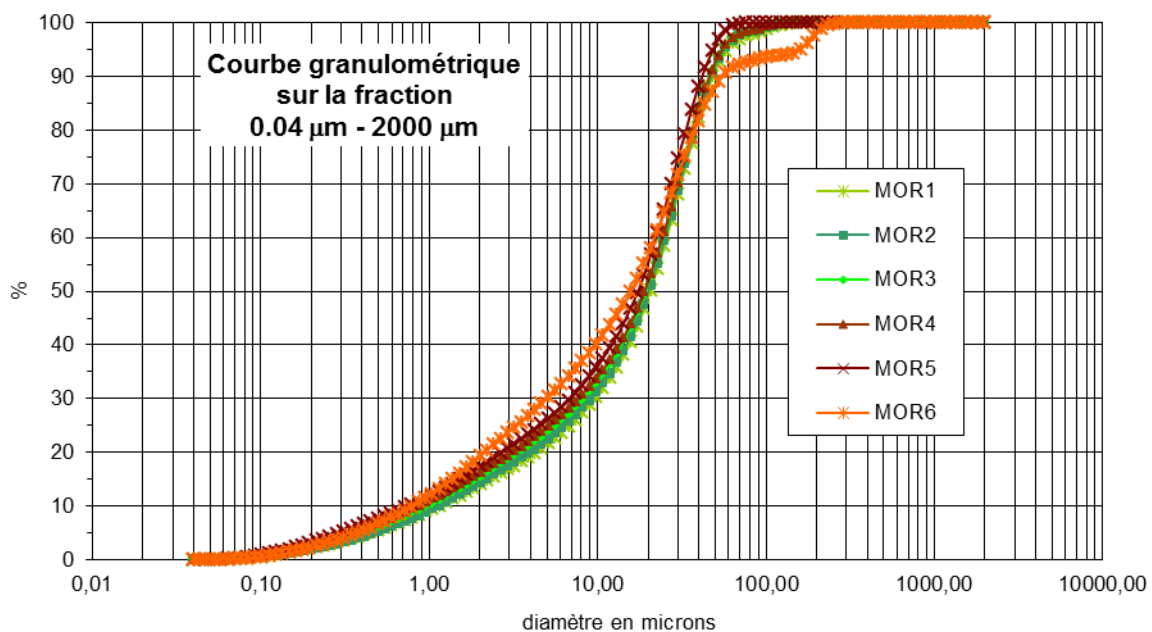
60-95 cm : C (colluvions en cours d'altération) : 10 YR 5/4 et 10 YR 6/4 ; frais ; limoneux ; un peu plus marbré que le précédent (taches MO, Mn, blanches de déferrification, mais aussi quelques taches rouilles) ; rares racines, fines, jusque vers 60 cm ; rares tessons ; transition nette, horizontale, avec l'horizon sous-jacent

95-110 cm CA (horizon de transition, mélange C et A) : Ancien A mêlé au C lors des premières phases de colluvionnement ; 10 YR 4,5/4 ; frais ; limoneux, présence de MO un peu plus importante que dans le C. Transition nette avec l'horizon sous-jacent

110-155 cm : IIA (horizon humifère du paléosol) : 10 YR 4/3 ; sans doute carbonaté (à vérifier) ; légèrement humide ; limoneux ; nombreuses esquilles de mollusques, avec une répartition variable : sur le profil étudié, seule la partie inférieure en contient, à 2 m de distance, tout l'horizon est riche en coquilles ; structure massive ; pas d'éléments grossiers autres que les mollusques ; quelques très rares racines très fines (diamètre < 0,1 mm) ; quelques taches de Mn ; un gros charbon de bois très fragile et pulvérulent, allongé, posé à plat vers 110 cm (prélevé) ; un autre gros charbon, parfaitement identifiable à 138 cm (prélevé aussi et transféré à Noémie pour identification). Transition nette avec l'horizon sous-jacent

155 cm : IIC (h. d'altération des loëss) : 10 YR 5/3,5 ; humide ; limoneux ; massif ; nombreuses esquilles de mollusques ; sans doute carbonaté.

Niveau/ horizon	Profondeur	% Argile	% Limons fins	% Limons grossiers	% Sables fins	% Sables grossiers
MOR1 - L	5,0	13,3	33,4	43,3	10,0	0,0
MOR2 - S	40,0	13,6	34,0	43,0	9,4	0,0
MOR3 - C	70,0	14,8	34,5	41,8	8,9	0,0
MOR4 - C+A	105,0	15,5	34,3	41,5	8,7	0,0
MOR5- IIA	120,0	16,5	36,6	41,7	5,2	0,0
MOR6- IIC	165,0	18,1	37,0	32,1	10,4	2,4



Niveau/ horizon	Profondeur	pH	CaCO ₃ %	MO (PAF) %	CO (WB) %	MO (WB) %	C %	N %	Co:N
MOR1 - L	5	7,8	1,4	3,6	1,0	1,7	-	-	-
MOR2 - S	40	7,7	1,0	2,2	0,5	0,9	-	-	-
MOR3 - C	70	7,7	1,3	2,4	0,5	0,8	-	-	-
MOR4 - C+A	105	7,7	1,0	2,5	0,3	0,6	-	-	-
MOR5- IIA	120	7,7	1,0	3,3	0,3	0,6	-	-	-
MOR6- IIC	165	8,1	25,3	2,3	0,1	0,2	-	-	-

Numéro du laboratoire	Site	Profondeur (cm)	TMR (ans BP)
SacA 32353	Morschwiller	117,5	4275 ± 30 BP
SacA 32347	Morschwiller	142,5	4975 ± 30

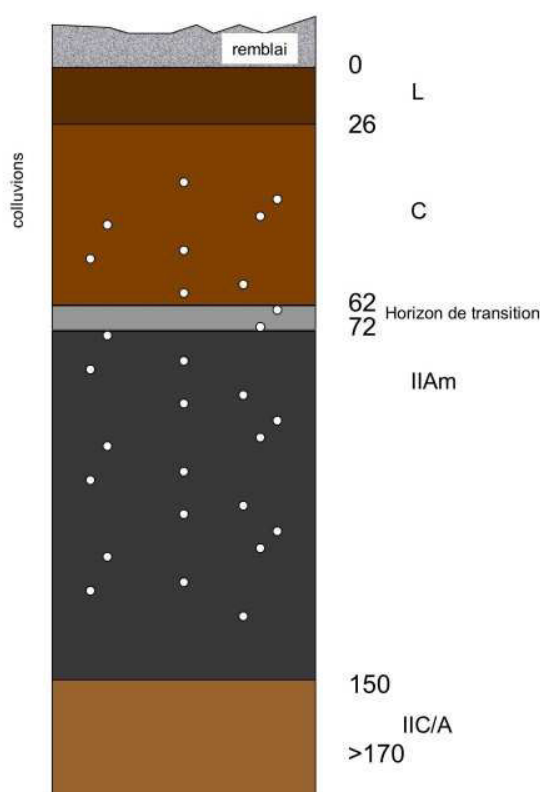
Commune	Site	Localisation		Altitude
Kolín (Rép. Tchèque)	KOL1	50°0'17"N	15°14'2"E	205 m
	KOL2	50°0'20"N	15°14'7"E	205 m
	KOL3	50°0'16"N	15°14'04"E	205 m

Kolín KOL 1, 2, 3

Le site de Kolín est situé au tiers inférieur de pente, excavé par des fouilles de sauvetage avant construction de la route. Vestiges de plusieurs époques : important habitat du Rubané (maisons collectives, fosses d'extraction) ; Âge du fer ; Âge des Slaves (6^{ème} - 8^{ème} siècles). Trois profils de sols échantillonnés avec le même développement : chernozems recouverts de colluvions.



Formation végétale	Principales essences	Historique
Culture	Blé, maïs, colza	Peuplé et cultivé depuis Néolithique



○ accumulation de carbonates

KOL1 : Chernozem scellé sous les colluvions

L : 0 – 26 cm : 10YR 5/3 ; limoneux ; sec ; structure grenue et structure polyédrique anguleuse. Nombreuses galeries lombrics ; racines fines ($\varnothing < 1$ mm) ; quelques éléments carbonatés, charbons, briques ; transition abrupte, horizontale (semelle de labour) avec l'horizon sous-jacent

C : 26 – 67 ± 5 cm : 10YR 5/4 ; limoneux ; sec ; structure micro agrégée à substructure polyédrique sub-anguleuse ; aspect massif ; racines, très fines ; reprécipitations de carbonates à partir de 35 cm, en pseudomycélium et tâches ; porosité fine ; pas de grands pores fissurés ; par endroits, lamines colluviales visibles ; transition diffuse (10 cm) avec l'horizon sous-jacent

IIAm : 67 ± 5– 150 cm : chernozémique (?) ; limoneux ; 10 YR 3/3 à 3/4 ; frais ; quelques racines et galeries de lombrics ; nombreuses

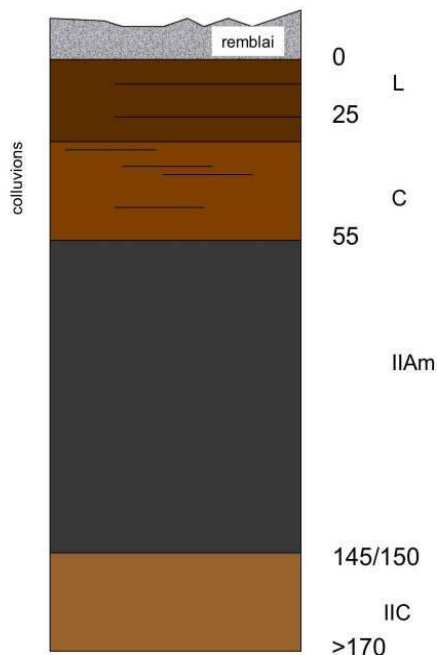
372

précipitations de carbonate jusque vers 130cm, en pseudomycelium et taches, plus grosses et plus abondantes que dans C – s’interrompant vers 140 cm ; quelques galets : loess remanié ; structure microagrégée ; passe progressivement vers 150 cm à un mélange par bioturbation avec C (horizon C/A) ;

IIC/A : de 150 cm à plus de 170 cm : 10 YR 4/4 ; limono-sableux à sablo-limoneux ; frais à légèrement humide.

KOL2 : Chernozem scellé sous les colluvions : Très semblable à KOL 3, avec quelques nuances :

- présence de trois semelles de labour (11, 17 et 25 cm)



- localement, structure lamellaire d’origine colluviale dans le C : le matériau n’a pas encore été complètement bio-turbé.

- entre 55 et 82 cm, la partie sommitale du Am est un peu plus claire ;



Photo : B. Vysloužilová

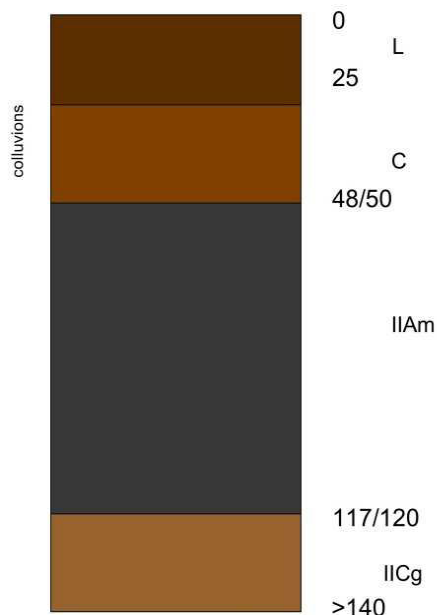
KOL3 : Chernozem scellé sous les colluvions

L : 0 – 25 cm : 10YR 3/3 ; limoneux ; sec ; structure polyédrique anguleuse millimétrique à sur-structure polyédrique anguleuse centimétrique ; racines fines ($\varnothing < 1$ mm) ; transition nette, subhorizontale (semelle de labour) avec l’horizon C

C : 25 – 48/50 cm : colluvions riches en matière organique ; 10 YR 4/2 ; sec ; limoneux ; quelques racines fines ; structure micro-agrégée à sur-structure massive ; transition subhorizontale progressive avec l’horizon sous-jacent

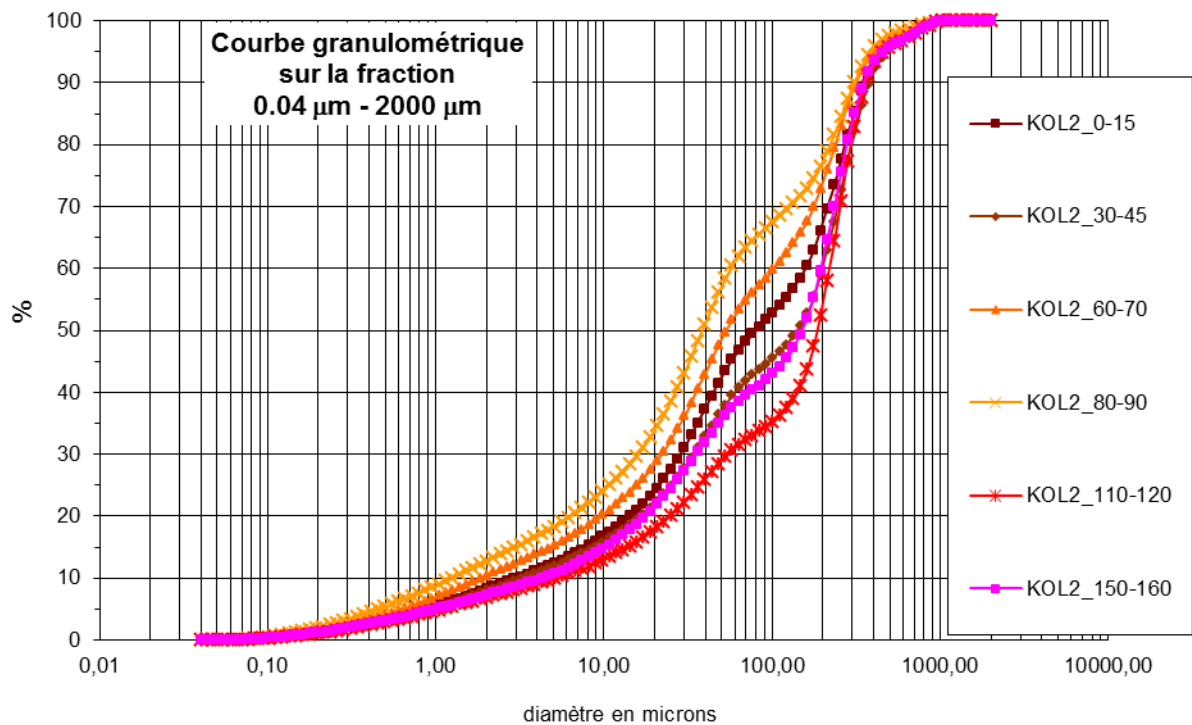
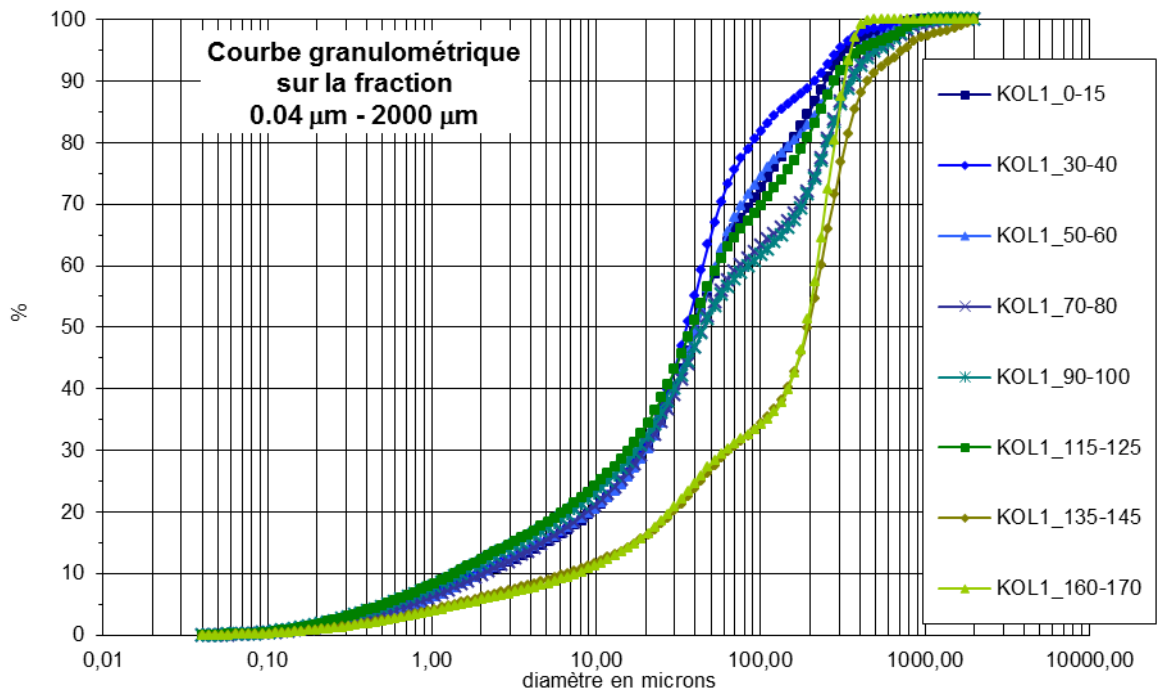
IIAm : 48/50 – 117 cm : gris sombre 10 YR 3/2 entre 50 et 70 cm et 3/1 entre 70 et 90 cm, puis 2/1 en dessous : cette différence semble n’être qu’en partie liée à une différence d’humidité ; intrinsèquement, la couleur est plus sombre en dessous de 70 cm ; vers 80 cm un tesson posé à plat (Rubané) : structure archéologique ? ; Limoneux ; quelques traces de racines fines ($\varnothing < 1$ mm) ; structure micro-agrégée ; traces de galeries de vers anéciques : quelques taches rouilles à partir de 105 cm ; transition progressive avec l’horizon sous-jacent

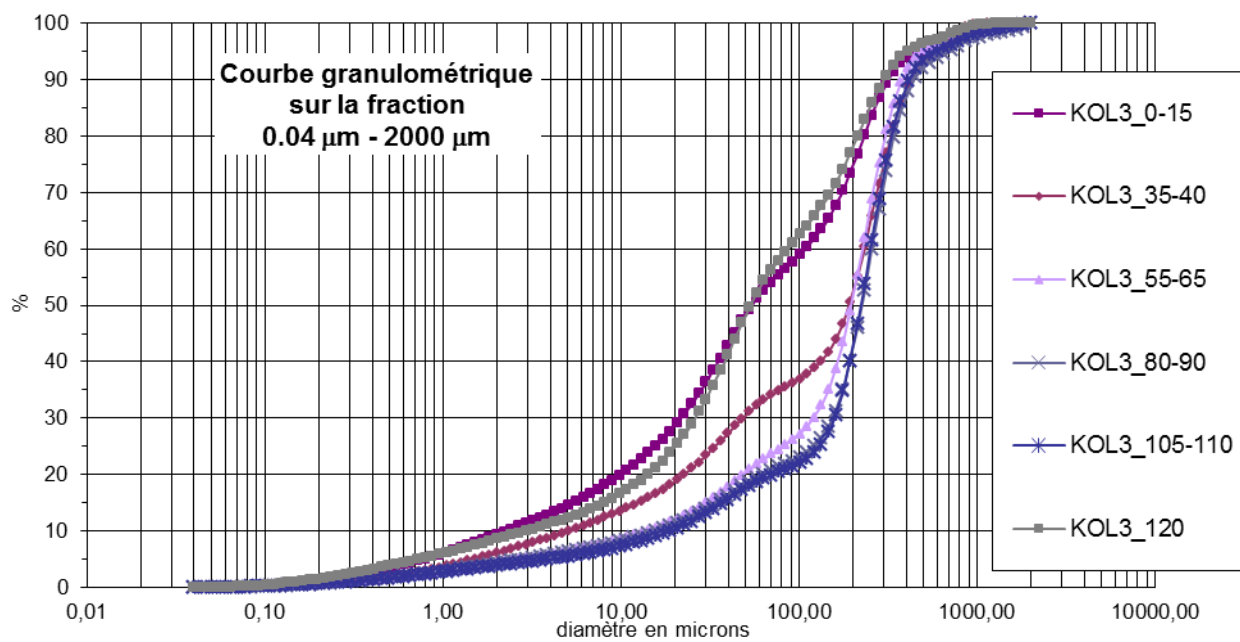
IICg : > 117 cm ; 10 YR 4/4 ; limoneux à passées sableuses (passage progressif à un sédiment alluvial) ; humide ; quelques taches rouilles.



Niveau/ horizon	Profondeur	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	MO (PAF) %	CO (WB) %	MO(WB) %	C %	N %	C:N
L	KOL1 0-15	7,92	1,02	4,64	2,70	4,64	2,00	0,21	9,58
C	KOL1 30-40	8,31	10,71	2,52	0,53	0,91	0,97	0,00	-
C	KOL1 50-60	8,54	13,17	2,28	0,46	0,79	0,95	0,00	-
Transition	KOL1 70-80	8,46	1,06	2,64	0,48	0,83	0,69	0,09	7,86
IIAm	KOL1 90-100	8,39	0,60	2,77	0,57	0,98	0,72	0,00	-
IIAm	KOL1 115-125	8,09	0,40	2,84	0,42	0,72	0,61	0,00	-
IIAm	KOL1 135-145	8,29	0,40	2,25	0,36	0,63	0,45	0,00	-
IIC/A	KOL1 160-170	8,22	0,40	1,72	0,38	0,65	0,27	0,00	-
L	KOL2 0-15	7,95	1,00	3,95	1,50	2,59	1,46	0,15	9,74
C	KOL2 30-45	8,19	1,01	2,88	0,70	1,21	0,88	0,11	8,29
IIAm	KOL2 60-70	8,19	0,91	3,49	0,56	0,97	0,85	0,09	9,49
IIAm	KOL2 80-90	8,12	1,13	4,22	0,69	1,18	0,94	0,10	9,25
IIAm	KOL2 110-120	7,93	0,92	4,21	0,89	1,53	1,02	0,11	9,19
Cg	KOL2 150-160	7,77	1,14	2,74	0,27	0,47	0,39	0,00	-
L	KOL3 0-15	8,01	0,80	4,59	1,31	2,25	1,44	0,14	10,19
C	KOL3 30-40	8,29	1,26	3,21	0,69	3,21	0,94	0,10	9,39
IIAm	KOL3 55-65	8,33	0,57	3,25	0,86	1,48	0,92	0,09	10,66
IIAm	KOL3 80-90	8,24	0,68	3,59	1,04	1,79	0,89	0,09	10,24
IIAm	KOL3 100-110	8,13	1,03	3,20	0,59	3,20	0,60	0,00	-
IICg	KOL3 120	8,10	1,03	2,96	0,20	2,96	0,39	0,00	-

Niveau/ horizon	Profondeur	% Argiles	% Limons fins	% Limons grossiers	% Sables fins	% Sables grossiers
L	KOL1 0-15	9,4	19,7	26,7	28,8	15,4
C	KOL1 30-40	9,8	20,0	33,6	25,4	11,2
C	KOL1 50-60	9,3	19,3	27,8	26,4	17,2
Transition	KOL1 70-80	9,3	19,9	22,6	20,3	27,9
IIAm	KOL1 90-100	11,1	19,8	20,5	20,1	28,5
IIAm	KOL1 115-125	11,7	21,1	23,8	24,3	19,1
IIAm	KOL1 135-145	5,8	9,7	10,8	23,6	50,1
IIC/A	KOL1 160-170	5,4	10,2	11,6	24,1	48,7
L	KOL2 0-15	7,9	15,3	18,3	24,6	33,9
C	KOL2 30-45	7,6	13,7	15,1	22,5	41,1
IIAm	KOL2 60-70	10,0	17,6	20,1	25,2	27,2
IIAm	KOL2 80-90	12,2	20,5	23,4	20,4	23,5
IIAm	KOL2 110-120	6,6	10,7	11,1	23,9	47,7
Cg	KOL2 150-160	6,9	13,9	14,1	24,8	40,3
L	KOL3 0-15	8,8	18,8	19,7	26,2	26,5
C	KOL3 30-40	5,7	12,5	11,7	20,6	49,5
IIAm	KOL3 55-65	4,1	7,4	8,4	29,1	51,0
IIAm	KOL3 80-90	4,1	6,7	7,1	22,1	60,0
IIAm	KOL3 100-110	3,7	6,3	7,3	23,0	59,8
IICg	KOL3 120	8,2	15,6	23,1	30,1	23,0





Numéro du laboratoire	Site/ type de matériel	Profondeur (cm)	TMR ou Age ¹⁴ C (ans)
SacA 25551	Kolín/ SOM	75	1735 ± 35 BP
SacA 29630	Kolin/ Charbon de <i>Corylus</i>	85	533 ± 102 AD (cal)
SacA 29631	Kolin/ Charbon de <i>Maloideae</i>	105	324 ± 85 AD (cal)

Commune	Localisation	Altitude
Sainte -Croix en Plaine (France)	48°00'48"N 7°22'17"E	196 m

Sainte-Croix-en-Plaine

SCD

Coupe stratigraphique dans un chenal

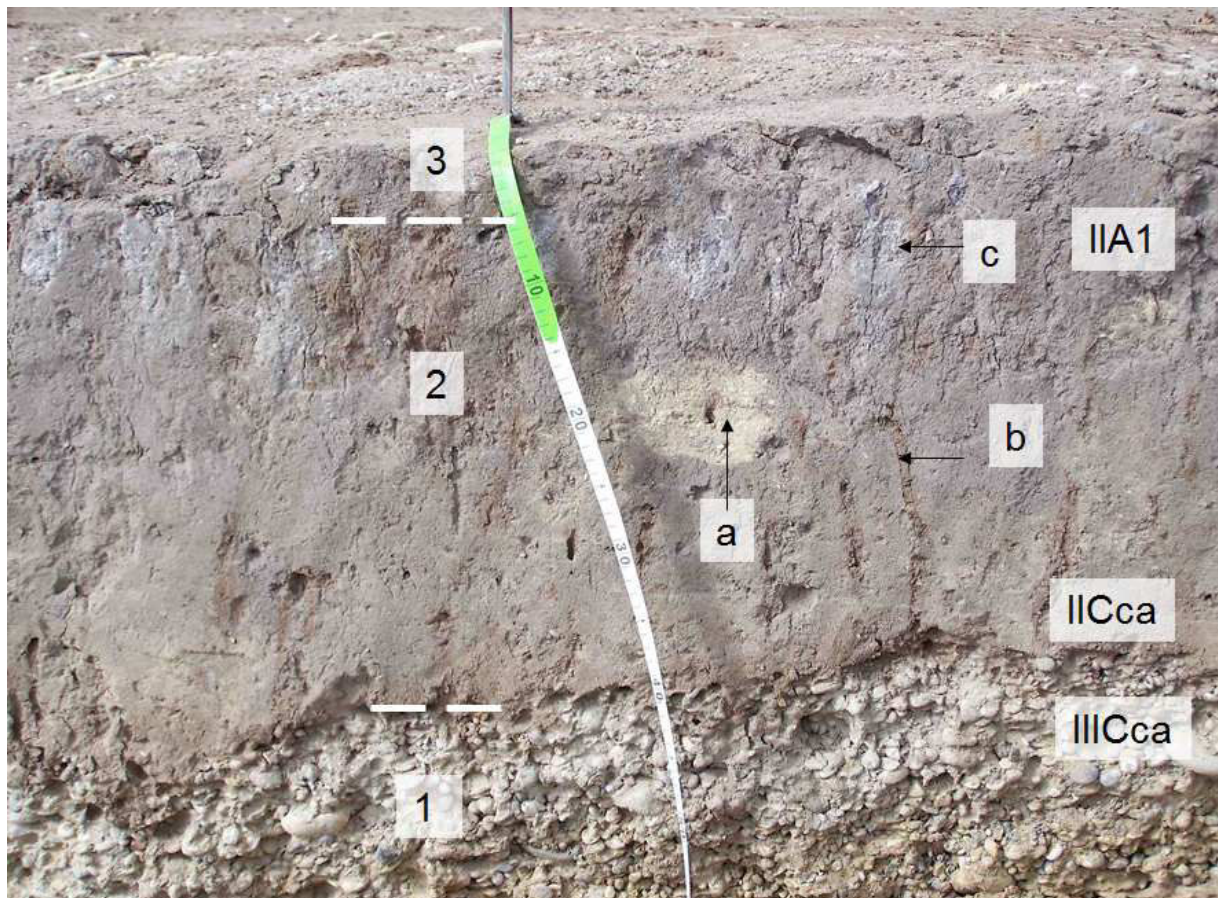


Photo : D. Schwartz

1 : Ensemble de base. Dépôt ello-rhénan pléistocène (Würm ?), essentiellement graveleux, avec des chenaux sableux ; le matériau a subi une cimentation partielle sous forme de carapace calcaire (Vogt et Marocke R., 1972, 1974). La genèse du poudingue calcaire de la Hardt (Haute-Alsace) (Bull. Soc. Hist. Nat. Colmar, 55, 161-170), notamment en bordure de chenaux ; l'encroûtement est biologique.

Constitue ici un horizon III Cca.

2 : Remplissage sablo-limoneux (lœss remanié ?) d'un chenal temporaire. Le remplissage a subi une pédogenèse caractéristique des climats continentaux, sans doute frais : il s'agit

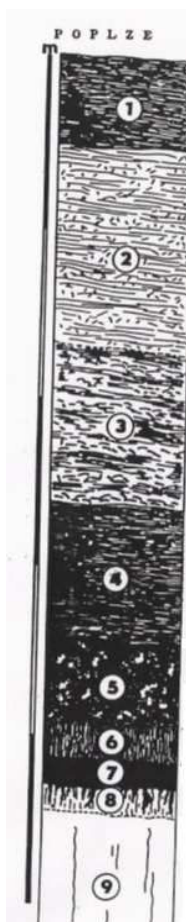
d'un **sol isohumique**, de type "sol gris de steppe" (pas assez de matière organique pour que ce soit un vrai chernozem). On note bien les deux horizons du sol : IIA1, qui en est l'horizon humifère de surface, épais d'une trentaine de cm ici, mais peut-être partiellement tronqué. On distingue en particulier des crotovinas, structures très fréquentes dans les sols isohumiques. C'est la surface de ce sol qui constitue ici la surface d'occupation archéologique du Bronze final.

3 : Recouvrement par des matériaux alluviaux ou colluvio-alluviaux. Age indéterminé, mais Holocène supérieur. Pourrait éventuellement correspondre à une reprise d'activité torrentielle lors de la crise de la fin de l'âge du Fer-Antiquité.

Commune	Localisation	Altitude
Libochovice-Poplze (Rép. Tchèque)	50°23'43"N 14°2'33"E	181 m

Poplze POL

Chernozem scellé sous les colluvions



C1 0-40 cm : (=I dans la description)
10YR 3/2, remblais, colluvion chernozemique perturbé par les activités jardinières, calcaire

C2 40-260 cm : (II et III – la transition n'a pas été reconnue), 10YR 3/2 colluvion chernozemique, structure friable, très sec, division en forme des colonnes, calcaire

C3 260-350 cm (IV.) : plus foncé que C2 – 10YR 4/2

C4 350-400 cm (V) : 10YR 3/1 – moins foncé, colluvion chernozemique

IIA1 400-442 cm (VII.) : horizon Ah scellé sous les colluvions

IIBv 442-450 cm (VIII) : base du chernozem avec des fragments de marnes calcaires et des basaltes, transition progressive avec des krotovinas à 442-445 cm (VI.) une strate avec abondance d'éléments grossiers, couleur rouille

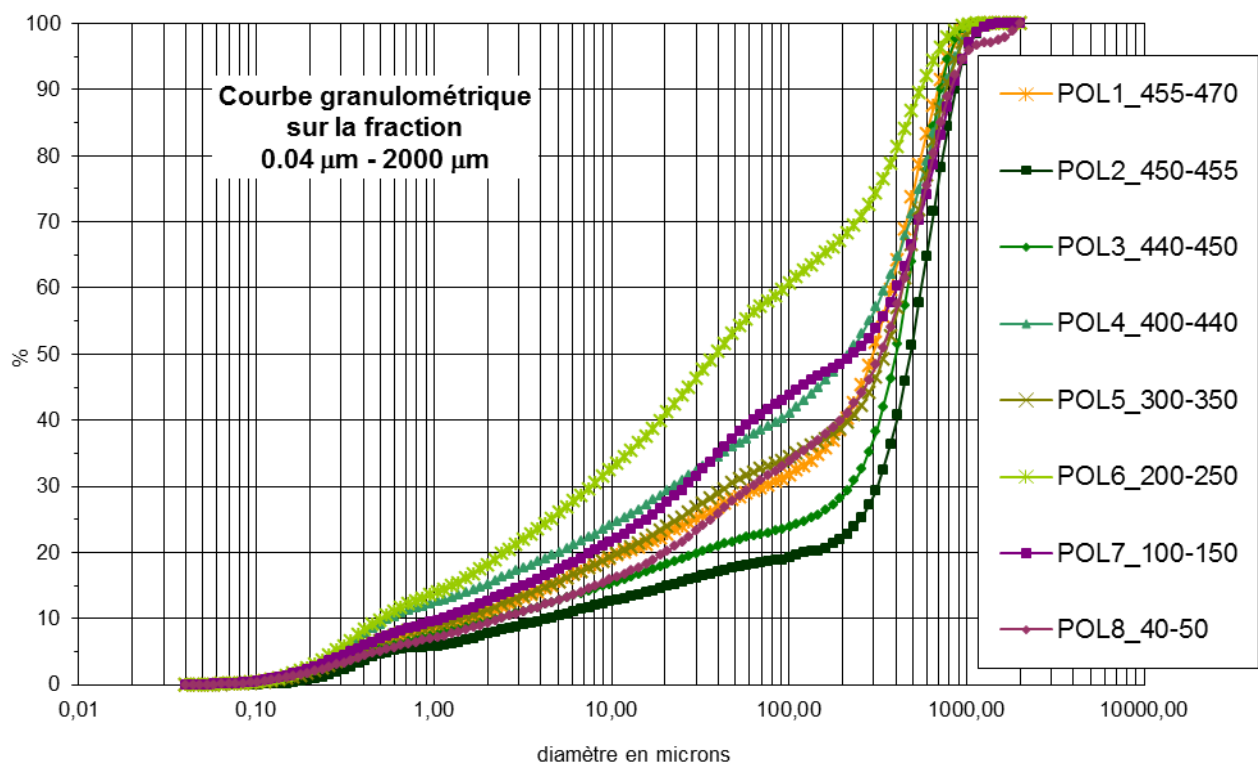
C ≤ 450 cm (IX.) : lœss finement sableux, massive avec d'éléments grossiers de marnes calcaires, très calcaire, présence de pseudomycelium, stratifié, quelques crotovinas



Photo : L. Petr

Smolíková, Ložek

Niveau/ horizon	Profondeur	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	MO (PAF) %	CO (WB) %	MO (WB) %	C %	N %	Co:N
C2	45	7,6	16,9	4,0	0,8	1,4	2,4	0,1	19,0
C2	125	7,5	15,2	4,3	1,0	1,8	2,4	0,1	16,5
C2	225	7,5	16,4	4,7	0,8	1,4	2,7	0,2	16,0
C3	325	7,8	7,9	5,3	1,8	3,1	2,0	0,0	-
IIA1	420	7,7	2,0	4,4	0,3	0,6	0,8	0,0	-
IIBv	445	7,8	8,5	3,2	0,8	1,4	1,1	0,0	-
C	452.5	7,8	17,0	3,0	1,1	1,9	1,4	0,0	-
C	462.5	7,9	22,7	2,7	1,3	2,2	3,0	0,0	-

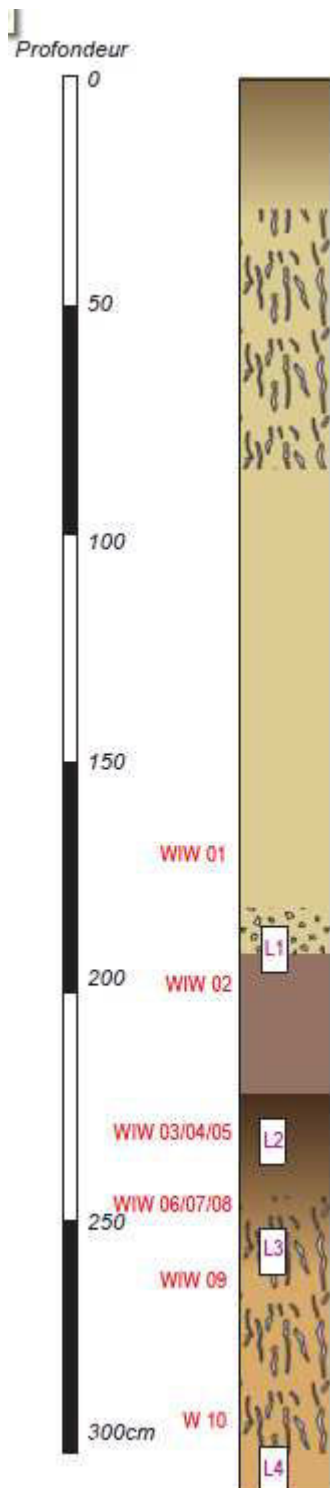


Niveau/ horizon	Profondeur (cm)	% Argile	% Limons fins	% Limons grossiers	% Sables fins	% Sables grossiers
C2	45	9,0	10,5	8,2	12,1	60,2
C2	125	12,1	14,5	10,6	11,2	51,6
C2	225	17,4	22,5	13,1	14,2	32,8
C3	325	10,9	12,3	7,2	8,2	61,4
IIA1	420	14,8	13,8	7,3	12,5	51,6
IIBv	445	9,2	8,6	3,8	6,5	71,9
C	452,5	7,4	7,1	3,1	4,4	78,0
C	462,5	10,4	11,8	5,7	10,6	61,5

Commune	Localisation	Altitude
Wiwersheim (France)	48°38'19"N 7°36'20"E	170 m

Wiwersheim

WIW



Profondeur (cm)	description
0 - 30	Limon carbonaté organique, Horizon cultural (maïs)
30 - 190	Loëss gris jaune clair, très carbonaté, pulvérulent, meuble. Présence de racines actuelles résiduelles jusqu'en bas de coupe à -300 cm. Présence d'un niveau de poupées (entre 6 et 10 cm de long) alignées à la base de la couche (-190 cm) présence de terriers (10 cm diamètre à remplissage plus sombre. Loëss en place
190 - 220	Limon plus organique brun, compact, micro-structuration fine, sédiment assez massif, carbonaté. A la base présence de poches circulaires blanchâtres (galeries). Limite inférieure nette, Colluvions ou paléosol?
220 - 260	Limon un peu argileux, gris brun, structure polyédrique angulaire fine (1/2 cm) avec légère orientation horizontale. Reprécipitation de carbonates. Sédiment légèrement carbonaté au sommet, non carbonaté à la base (245 cm). Présence de manganèse à partir de 245 cm, en grande quantité. Passage progressif à un niveau de loëss orangé, pénétrations verticales, Paléosol .
260 - 300	Loëss orange, non carbonaté, compact, avec racines verticales anciennes jusqu'à la base, où se concentrent des oxydes Fe/Mn, Substrat



Photo : D.Ertlen

Niveau/ horizon	Profondeur (cm)	A	LF	LG	SF	SG	MO PAF	Test HCl
WIW01	170	17,0	40,9	38,7	3,4	0,0	1,6	++
WIW02	200	16,0	37,8	39,4	6,8	0,0	2,8	+
WIW04	230	20,1	39,1	35,0	5,8	0,0	2,7	+
WIW07	245	19,2	37,9	35,7	7,2	0,0	3,4	+
WIW09	260	19,9	36,9	36,3	6,9	0,0	3,4	0
WIW10	290	16,5	45,1	32,6	5,8	0,0	3,9	+

Numéro du laboratoire	Site/ type de matériel	Profondeur (cm)	TMR (ans BP)
Poz-41197	WIW230/ SOM	230	25040 ± 200

Commune	Localisation		Altitude
Zeměchy (Rép. Tchèque)	50°14' N	14°16' E	196-218 m

Zeměchy

ZMC, ZMK (Ertlen, 2009)

Séquence de paléo-chernozem de Pléistocène

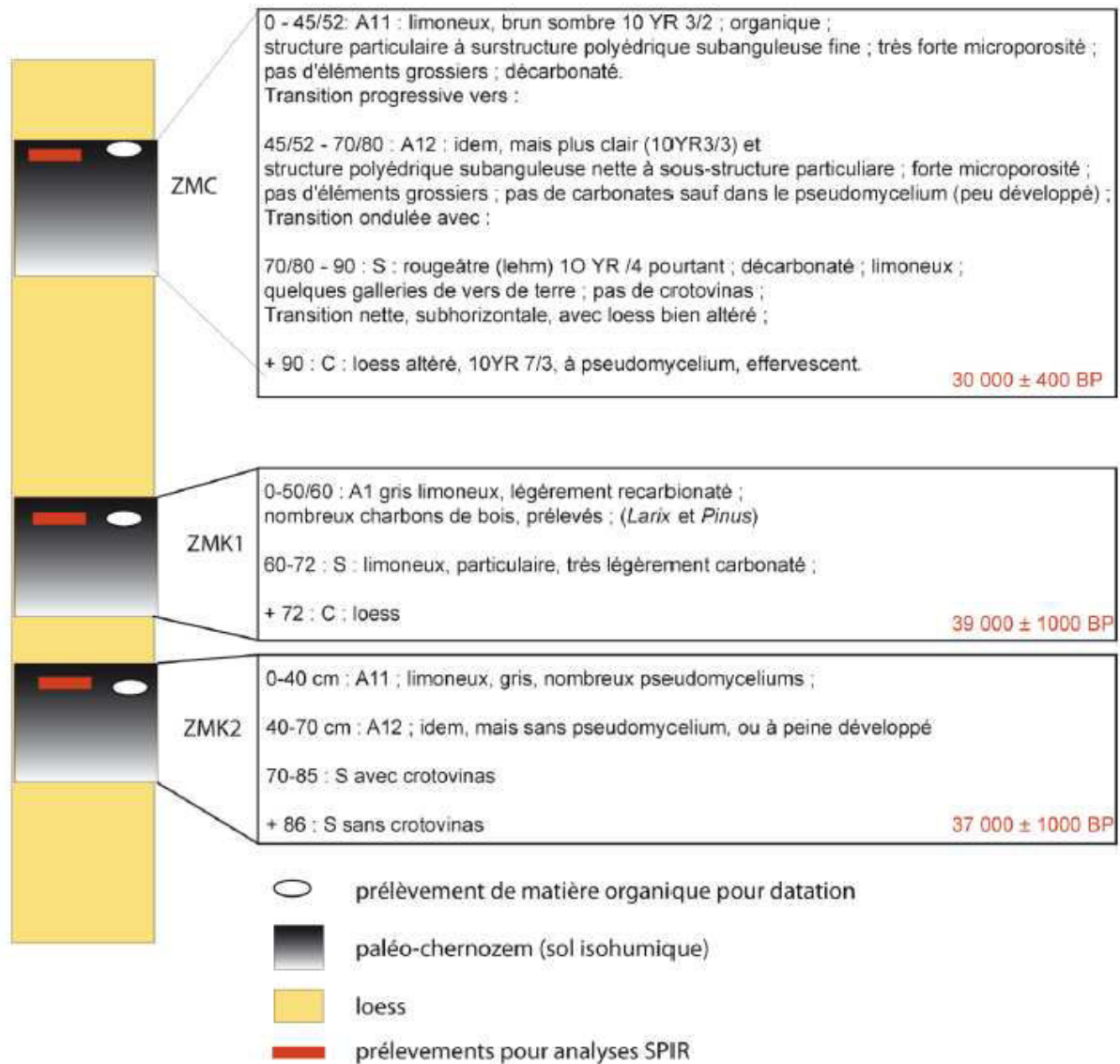
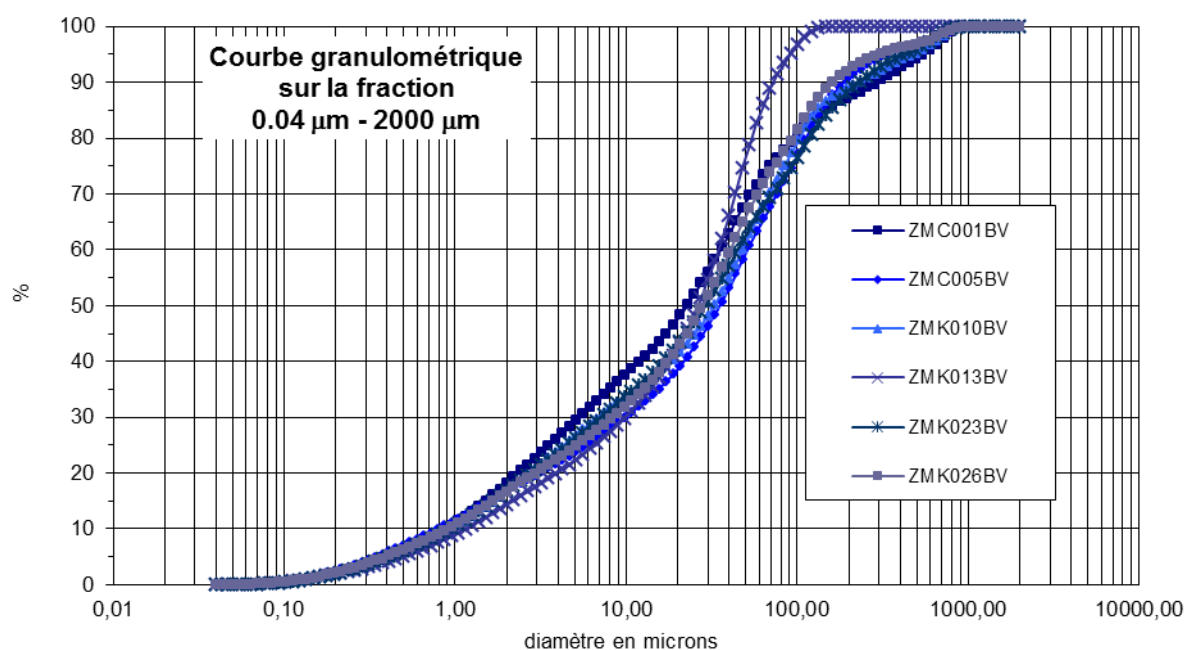


Schéma simplifié de la stratigraphie quaternaire de Zeměchy

Description par Damien Ertlen

Niveau/ horizon	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ %	MO (PAF) %	CO (WB) %	MO (WB) %	C %	N %	Co:N
ZMC01	8,1	1,3	3,7	0,6	1,1	1,8	0,1	20,0
ZMC05	8,4	0,6	3,7	0,6	1,0	0,9	0	-
ZMC10	7,9	0,4	4,1	1,0	1,8	1,6	0,1	10,2
ZMK13	8,0	0,0	3,3	0,7	1,3	0,9	0,1	9,3
ZMK23	7,9	0,2	3,4	1,0	1,8	1,5	0,1	10,2
ZMK26	7,6	0,8	2,5	0,4	0,8	0,8	0,0	-



Niveau/ horizon	% Argile	% Limons fins	% Limons grossiers	% Sables fins	% Sables grossiers
ZMC01	17,1	29,5	20,9	19,6	12,9
ZMC05	16,0	21,7	20,5	32,2	9,6
ZMC10	15,7	24,6	19,8	28,8	11,1
ZMK13	13,6	27,4	33,7	25,3	0,0
ZMK23	15,8	26,1	19,8	26,3	12,0
ZMK26	15,8	25,4	23,7	27,0	8,1

Annexe 5

Scores discriminants moyens et écarts types pour chaque profil de sol ou paléosol étudié pour l'approche bipartite : sols sous prairie et sols sous forêts. Le symbole « - » indique que l'écart-type n'est pas disponible parce qu'une seule colonne a été prélevée.

Sol/ paléosol	Prof. (cm)	Score discriminant moyen	Ecart type	Sol/ paléosol	Prof. (cm)	Score discriminant moyen	Ecart type	Sol/ paléosol	Prof. (cm)	Score discriminant moyen	Ecart type	Sol/ paléosol	Prof. (cm)	Score discriminant moyen	Ecart type
A1	2,5	-6,47	-	DUB	12,5	5,12	3,05	HUGF	47,5	5,14	0,11	KUC	60	10,19	1,71
A1	21,5	-9,51	-	DUB	17,5	2,05	3,11	HUM	2,5	-4,76	1,44	KUC	65	11,27	1,56
A1	32,5	-8,77	-	DUB	22,5	1,57	4	HUM	7,5	-3,83	0,92	KUC	70	10,08	0,37
A1	40	-4,42	-	DUB	27,5	0,41	2,13	HUM	12,5	-3,08	0,1	KUC	75	11,39	2,13
A1	50	1	-	DUB	32,5	-0,86	4,09	HUM	17,5	-3,9	0,45	KUC	80	9,08	3,76
A1	57,5	-1,94	-	DUB	37,5	-1,48	4,65	HUM	22,5	-3,09	0,06	KUC	85	2,87	8,48
A1	65	-3,98	-	DUB	42,5	-1,24	5,5	HUM	27,5	-4,25	0,32	KUC	90	2,66	1,51
A1	75	0,83	-	H1	5	-10,15	-	HUM	32,5	-3,6	0,12	KUC	95	1,62	2,36
A1	85	-1,14	-	H1	15	-6,05	-	HUM	37,5	-3,54	0,04	KUC	100	1,69	1,62
A1	95	-2,14	-	H1	25	-10,45	-	HUM	42,5	-4,11	0,14	KUC	105	0,52	1,12
A1	105	-2,81	-	H1	35	-4,12	-	HUM	47,5	-3,54	0,32	KUC	110	1,44	3,2
A1	115	-0,78	-	H1	45	-1,94	-	HUM	52,5	-3,27	0,06	KUC	115	0,36	2,03
A1	130	-8,18	-	H1	55	-3,86	-	HUM	57,5	-4,44	0,02	KUC	120	-5,1	1,56
A2	3,5	-7,35	-	H1	65	-0,28	-	HUM	62,5	-3,76	0,9	KUR	5	-5,16	0,3
A2	15	-9,18	-	H1	75	0,03	-	HUM	67,5	-4,31	0,36	KUR	25	-6,43	0,05
A2	25	-7,75	-	H1	85	0,35	-	HUM	72,5	-6,18	1,35	KUR	45	-4,78	0,9
A2	35	-11,14	-	H1	95	4,91	-	HUM	77,5	-4,63	0,66	KUR	65	-4,71	1,05
A2	45	1,44	-	H1	105	3,75	-	HUM	82,5	-4,02	0,5	KUR	85	-2,56	0,39
A2	55	-1,49	-	H1	115	3,18	-	HUM	87,5	-3,78	0	KUR	105	-0,98	0,93
A2	65	-1,16	-	H1	135	5,32	-	HUR	2,5	-7,73	0,66	MD	5	4,12	-
A2	75	0,58	-	H1	145	4,35	-	HUR	7,5	-8,81	0,27	MD	15	1,88	-
A2	85	-1,44	-	H1	155	7,27	-	HUR	12,5	-6,77	0,19	MD	25	0,29	-
A2	95	-0,41	-	H1	165	5,69	-	HUR	17,5	-7,99	0,5	MD	35	-1,62	-
A2	105	-2,11	-	H1	175	4,64	-	HUR	22,5	-8,17	0,2	MD	45	3,17	-
A2	115	-1,85	-	HRU20	2,5	-2,1	1,52	HUR	27,5	-9,57	0,04	MD	55	2,58	-
A2	125	-6,42	-	HRU20	7,5	-2,44	0,43	HUR	32,5	-11,87	0,48	MD	65	3,22	-
A2	135	-3,35	-	HRU20	12,5	-2,18	0,3	HUR	37,5	-16,38	0,52	MD	75	-3,32	-
A2	145	-1,24	-	HRU20	17,5	-2,9	0,54	HUR	42,5	-18,09	0,52	MD	85	-1,57	-
A2	155	-3,02	-	HRU20	22,5	-3,27	1,14	HUR	47,5	-21,05	0,9	MD	105	-0,05	-
A2	165	-8,77	-	HRU20	27,5	-2,26	0,31	HUR	52,5	-21,08	0,58	MD	120	1,54	-
A3	7	-6,26	-	HRU20	32,5	-2,39	1	HUR	57,5	-23,61	0,41	MD	140	-5,01	-

Sol/ paléosol	Prof. (cm)	Score discriminant moyen	Ecart type	Sol/ paléosol	Prof. (cm)	Score discriminant moyen	Ecart type	Sol/ paléosol	Prof. (cm)	Score discriminant moyen	Ecart type	Sol/ paléosol	Prof. (cm)	Score discriminant moyen	Ecart type
A3	15	-3,92	-	HRU20	37,5	-1,92	0,58	HUS	2,5	-6,41	0,46	MIK	5	-5,97	0,48
A3	25	-1,78	-	HRU20	42,5	-2,32	0,99	HUS	7,5	-5,37	0,56	MIK	15	-5,93	0,1
A3	35	-0,72	-	HRU20	47,5	-2,38	0,78	HUS	12,5	-7,01	1,11	MIK	25	-6,75	0
A3	45	-2,48	-	HRU20	52,5	-1,92	0,39	HUS	17,5	-7,58	0,73	MIK	35	-5,8	0
A3	55	1,44	-	HRU20	57,5	-1,64	0,16	HUS	22,5	-4,98	1,19	MIK	45	-5,87	0,07
A3	65	-0,19	-	HRU20	62,5	-2,18	0,78	HUS	27,5	-8,26	1,14	MIK	55	-6,17	0,02
A3	75	-2,44	-	HRU20	67,5	-2,63	1,7	HUS	32,5	-7,13	0,45	MIK	65	-5,74	0,16
A3	85	-0,5	-	HRU20	72,5	-1,98	0,3	HUS	37,5	-7,02	0,1	MIK	75	-6,12	0,61
A3	95	-0,08	-	HRU20	77,5	-2,24	0,34	HUS	42,5	-7,72	0,79	MOR	2,5	5,97	1,55
A3	105	0,17	-	HRU20	82,5	-2,54	1,44	HUS	47,5	-6,68	0,08	MOR	7,5	2,59	0,96
A3	115	-5,56	-	HRU20	87,5	-2,2	0,74	HUS	52,5	-8,44	2,88	MOR	12,5	4,77	0,21
A3	145	-6,97	-	HRU20	92,5	-0,69	1,12	HUS	57,5	-7,83	2,69	MOR	17,5	2,68	1,27
A3	156	-13,64	-	HRU20	97,5	-3,38	1,56	HUS	62,5	-8,08	2,18	MOR	22,5	1,66	0,55
BAB	2,5	14,79	0,76	HRU21	2,5	-1,3	1,71	HUS	67,5	-6,88	1,93	MOR	27,5	1,07	0,52
BAB	7,5	12,01	1,65	HRU21	7,5	-1,8	0,33	HUS	72,5	-6,1	2,83	MOR	32,5	2,74	1,68
BAB	12,5	13,37	1,37	HRU21	12,5	-1,24	1,36	HUS	77,5	-7,48	2,11	MOR	37,5	2,02	1,58
BAB	17,5	14,34	1,49	HRU21	17,5	-1,8	0,36	HUS	82,5	-6,03	2,14	MOR	42,5	0,44	0,27
BAB	22,5	10,89	1,79	HRU21	22,5	-0,51	0,55	HUS	87,5	-7,25	0,87	MOR	47,5	-1,9	0,02
BAB	27,5	9,9	1,9	HRU21	27,5	0,29	1,63	HUS	92,5	-5,65	1,6	MOR	52,5	-9,04	4,41
BAB	32,5	6,71	5,53	HRU21	32,5	-1,07	0,75	HUS	97,5	-6,68	3,23	MOR	57,5	-5,15	1,33
BAB	37,5	6,17	0,24	HRU21	37,5	-1,59	0,99	HUS	107,5	-6,48	1,68	POL	2,5	-3,57	4,75
BAB	42,5	8,82	1,77	HRU21	42,5	-1,72	0,52	HUS	117,5	-6,78	1,76	POL	7,5	-2,27	3,78
BAB	47,5	4,87	0,77	HRU21	47,5	-2,1	0,52	HUS	127,5	-6,12	2,38	POL	12,5	-2,75	3,35
BAB	52,5	6,86	2,97	HRU21	52,5	-2,21	0,23	HUS	137,5	-7,06	2,26	POL	17,5	-3,19	2,38
BAB	57,5	9,39	2,25	HRU21	57,5	-3,5	0,87	HUS	147,5	-5,77	1,7	POL	22,5	-4,65	2,63
BAB	62,5	5,15	1,29	HRU21	62,5	-4,51	0,74	HUS	157,5	-3,64	0,46	POL	27,5	-9,11	0,22
BAB	67,5	6,43	0,82	HRU23	2,5	-3,66	0,64	HUS	167,5	-4,54	1,72	POL	32,5	-8,7	2,9
BAB	72,5	4,57	2,79	HRU23	7,5	-3,83	0,92	HUS	177,5	-5,7	1,26	POL	37,5	13,57	3,86
BAB	77,5	5,68	0,8	HRU23	12,5	-4,76	1,48	HUS	187,5	-3,85	0,71	POL	42,5	14,05	1,45
BAB	82,5	5,69	0,78	HRU23	17,5	-4,55	1,39	HUU	2,5	-3,7	2,57	POL	47,5	16,01	1,35
BRC	5	-2,61	-	HRU23	22,5	-4,21	1,46	HUU	7,5	-5,49	0,38	POP	2,5	12,91	0,97
BRC	15	-1,76	-	HRU23	27,5	-4,43	0,35	HUU	12,5	-4,91	1,14	POP	7,5	12,84	1,42
BRC	25	-2,78	-	HRU23	32,5	-4,8	0,57	HUU	17,5	-5,03	0,7	POP	12,5	13,26	0,91
BRC	35	-2,08	-	HRU23	37,5	-4,59	1,98	HUU	22,5	-4,33	0,74	POP	17,5	-12,9	1,76
BRC	45	-0,53	-	HRU23	42,5	-5,23	2	HUU	27,5	-2,75	0,1	POP	22,5	12,41	0,26
BRC	55	-2,89	-	HRU23	47,5	-6,38	0,61	HUU	32,5	-0,21	0,18	POP	27,5	12,88	2,81

Sol/ paléosol	Prof. (cm)	Score discriminant moyen	Ecart type	Sol/ paléosol	Prof. (cm)	Score discriminant moyen	Ecart type	Sol/ paléosol	Prof. (cm)	Score discriminant moyen	Ecart type	Sol/ paléosol	Prof. (cm)	Score discriminant moyen	Ecart type
BRE	2,5	-32,53	1,87	HRU23	52,5	-6,59	0,31	HUU	37,5	0,8	0,79	POP	32,5	15,03	1,76
BRE	7,5	-29,64	0,51	HRU23	57,5	-5,14	0,51	HUU	42,5	-0,03	1,64	POP	37,5	12,77	1,81
BRE	12,5	-29,52	2,02	HRU23	62,5	-6,5	2,28	HUU	47,5	-2,93	0,96	POP	42,5	-13,1	1,5
BRE	17,5	-21,76	4,14	HRU23	67,5	-5,55	1,88	HUUD	2,5	-6,85	0,13	POP	47,5	13,55	0,67
BRE	22,5	-14,52	3,06	HRU23	72,5	-4,5	0,23	HUUD	7,5	-7,5	0,69	POP	52,5	13,69	0,85
BRE	27,5	-10,08	0,93	HRU24	2,5	-3,47	0,55	HUUD	12,5	-8,68	0,33	POP	57,5	14,85	0,68
BRE	32,5	-9,92	1,01	HRU24	7,5	-2,97	0,56	HUUD	17,5	-8,52	0,1	POP	62,5	-16,3	1,71
BRE	37,5	-8,58	2	HRU24	12,5	-3,04	1,12	HUUD	22,5	-9,39	0,38	POP	67,5	16,49	2,36
BRE	42,5	-6,76	1,97	HRU24	17,5	-4,55	0,71	HUUD	27,5	-15,29	1,85	POP	72,5	17,65	3,56
BRE	47,5	-6,32	1,58	HRU24	22,5	-4,65	0,92	HUUD	32,5	-22,57	0,65	POP	77,5	19,63	3,56
BRE	52,5	-7,31	1,13	HRU24	27,5	-2,68	2,35	KOC	2,5	-3,53	0,94	SCC	5	-14,2	-
BRE	57,5	-9,38	1,89	HRU24	32,5	-4,2	2,07	KOC	7,5	-5,51	2,09	SCD	5	-3,17	-
BRE	62,5	-9,47	0,7	HRU24	37,5	-3,44	0,64	KOC	12,5	-4,09	2,07	SCD	10	-4,24	-
BRE	67,5	-13,92	4,12	HRU24	42,5	-7,41	0,7	KOC	17,5	-2,47	2,9	SCD	15	-5,61	-
BRK	5	1,52	-	HRU24	47,5	-8,54	1,59	KOC	22,5	-6,51	2,72	SCD	20	-4,54	-
BRK	15	2,52	-	HRU24	52,5	-8,3	1,9	KOC	27,5	-2,87	2,27	SCD	25	-5	-
BRK	25	-0,04	-	HRU24	57,5	-7,79	2,29	KOC	32,5	-2,74	1,93	SEN	2,5	8,58	1,65
BRK	35	0,7	-	HRU24	62,5	-6,82	3,03	KOC	37,5	-4,13	1,03	SEN	7,5	10,79	1,18
BRK	45	0,06	-	HRU24	67,5	-9	1,04	KOC	42,5	-3,72	0	SEN	12,5	6,41	1,13
BRK	55	-1,55	-	HRU24	72,5	-10,54	0,78	KOL1	2,5	6,25	2	SEN	17,5	10,22	2,4
BRK	65	-3,5	-	HRU24	77,5	-10,78	2,22	KOL1	7,5	3,59	3,44	SEN	22,5	3,04	2,07
BRK	75	-0,26	-	HRU24	82,5	-1,18	0	KOL1	12,5	3,69	1,48	SEN	27,5	6,44	0,72
BRK	85	-1,02	-	HRU25	2,5	-2,17	0,15	KOL1	17,5	7,81	0,84	SEN	32,5	8,52	2,89
BRK	95	-1,21	-	HRU25	7,5	-2,08	1,27	KOL1	22,5	7,16	1,01	SEN	37,5	7,5	2,01
BRK	105	-0,23	-	HRU25	12,5	-1,41	0,44	KOL1	27,5	4,79	0,98	SEN	42,5	5,39	2,49
BRK	115	1,79	-	HRU25	17,5	-1,89	1,17	KOL1	32,5	5,76	1,89	SEN	47,5	5,02	3,05
BRK	125	1,96	-	HRU25	22,5	-1,81	1,12	KOL1	37,5	7,21	2,68	SEN	52,5	5,58	1,62
BRK	135	1,88	-	HRU25	27,5	-1,39	0,57	KOL1	42,5	5,73	0,86	WIW	10	5,51	-
BRK	145	2,58	-	HRU25	32,5	0,55	1,98	KOL1	47,5	6,16	1,34	WIW	20	3,87	-
BRK	155	-0,48	-	HRU25	37,5	-1,7	0,98	KOL1	52,5	3,97	2,19	WIW	30	-0,54	-
BRK	165	4,48	-	HRU25	42,5	-3,58	1,48	KOL1	57,5	7,52	1,26	WIW		3,8	-
BRK	175	4,57	-	HRU25	47,5	-4,78	0,43	KOL1	62,5	7,38	1,62	ZMC		8,91	-
BRO	2,5	-3,55	4,16	HRU25	52,5	-4,61	1,68	KOL1	67,5	7,09	1,15	ZMC	2,5	9,45	-
BRO	7,5	-1,61	3,49	HRU25	57,5	-2,6	0,72	KOL1	72,5	6,77	2,65	ZMC	7,5	9,03	-
BRO	12,5	-4,44	1,72	HRU25	62,5	-1,92	0,52	KOL1	77,5	7,41	1	ZMC	12,5	9,43	-

Sol/ paléosol	Prof. (cm)	Score discriminant moyen	Ecart type	Sol/ paléosol	Prof. (cm)	Score discriminant moyen	Ecart type	Sol/ paléosol	Prof. (cm)	Score discriminant moyen	Ecart type	Sol/ paléosol	Prof. (cm)	Score discriminant moyen	Ecart type
BRO	17,5	-0,83	3,36	CT	75	-1,95	-	HUG	12,5	-3,99	0,04	KOL3	22,5	0,56	0,72
BRO	22,5	-2,19	3,65	CT	85	-2,71	-	HUG	17,5	-4,34	0,08	KOL3	27,5	0,63	0,9
BRO	27,5	-1,55	4,24	CT	95	-4,84	-	HUG	22,5	-5,46	0,87	KOL3	32,5	0,38	1,8
BRO	32,5	-2,08	2,79	CT	105	-2,63	-	HUG	27,5	-4,95	0,6	KOL3	37,5	0,19	0,73
BRO	37,5	-0,43	5,09	CT	115	-1,28	-	HUG	32,5	-5,34	0,3	KOL3	42,5	1	1,14
BRO	42,5	-1,63	3,48	CT	125	-2,13	-	HUG	37,5	-5,67	0,51	KOL3	47,5	0,63	0,63
BRO	47,5	-2,27	2,83	CT	135	-3,02	-	HUG	42,5	-6,89	1,05	KOL3	52,5	2,12	0,85
BRO	52,5	-1,7	3,26	DUB	2,5	7,87	2,34	HUG	47,5	-6,17	0,17	KOL3	57,5	-1,54	2,97
BRO	57,5	-3,28	3,08	DUB	7,5	6,25	3,96	HUGF	2,5	3,99	0,47	KOL3	62,5	2,22	2
BUB	2,5	-4,56	0,67	HRU25	67,5	-2,41	2,07	HUGF	7,5	5,55	0,45	KOL3	67,5	3,1	1,13
BUB	7,5	-1,17	0,88	HRU25	72,5	-5,86	0,62	HUGF	12,5	5,75	1,48	KOL3	72,5	1,8	1,08
BUB	12,5	-0,68	1,54	HRU25	77,5	-7,52	1,51	HUGF	17,5	5,93	0,01	KOL3	77,5	1,93	1,93
BUB	17,5	0,73	0,78	HRU26	2,5	-0,55	1,37	HUGF	22,5	5,9	0,44	KOR	2,5	-7,61	5,67
BUB	22,5	1,55	1,61	HRU26	7,5	0,05	1,19	HUGF	27,5	5,54	0,2	KOR	7,5	-2,44	2,54
BUB	27,5	0,77	1,97	HRU26	12,5	-1,14	0,43	HUGF	32,5	8,1	0,42	KOR	12,5	-4,79	1,18
BUB	32,5	2,27	0,8	HRU26	17,5	-1,6	1,34	HUGF	37,5	5,2	0,92	KUC	5	7,53	1,18
BUB	37,5	4,76	1,56	HRU26	22,5	-1,95	2,36	HUGF	42,5	5,19	1,7	KUC	10	5	1,5
BUB	42,5	5,73	2,46	HRU26	27,5	0,57	1,82	KOL1	82,5	8,09	3,45	KUC	15	4,51	1,04
BUB	47,5	5,76	1,59	HRU26	32,5	-0,96	1,92	KOL1	87,5	11,32	2,08	KUC	20	4,5	0,54
BUB	52,5	10	2,32	HRU26	37,5	-2,53	0,47	KOL1	92,5	7,21	1,5	KUC	25	3,76	0,67
BUB	57,5	13,42	1,89	HRU26	42,5	-3,73	2,11	KOL1	97,5	4,14	0,9	KUC	30	4,1	0,35
BUL	2,5	11,1	1,95	HRU26	47,5	-3,02	1,22	KOL1	102,5	4,95	2,63	KUC	35	3,01	1,95
BUL	7,5	8,18	2,49	HRU26	52,5	-3,05	0,44	KOL2	2,5	4,31	1,99	KUC	40	3,48	1,29
BUL	12,5	10,32	2,56	HRU26	57,5	-1,78	2	KOL2	7,5	3,76	0,92	KUC	45	4,93	1,25
BUL	17,5	9,43	1,69	HRU26	62,5	0,93	1,43	KOL2	12,5	4,47	1,1	KUC	50	4,61	0,64
BUL	22,5	6,23	2,99	HRU26	67,5	0,31	2,08	KOL2	17,5	2,89	0,24	KUC	55	6,3	1,44
BUL	27,5	6,19	2,08	HRU26	72,5	-4,58	1,07	KOL2	22,5	3,47	1,59	ZMC	17,5	8,6	-
BUL	32,5	4,96	1,34	HRU26	77,5	-4,47	0,08	KOL2	27,5	4,49	1,03	ZMC	22,5	12,42	-
BUL	37,5	5,45	2,68	HUB	2,5	10,01	0,83	KOL2	32,5	7,24	4,06	ZMC	27,5	13,63	-
BUL	42,5	5,57	3,12	HUB	7,5	-9,23	0,57	KOL2	37,5	4,62	0,46	ZMC	32,5	12,68	-
BUL	47,5	4,12	0,71	HUB	12,5	-8,66	1,14	KOL2	42,5	2,73	0,67	ZMC	37,5	8,34	-
BUL	52,5	6,15	1,3	HUB	17,5	-9,53	0,1	KOL2	47,5	1,81	0,2	ZMC	42,5	6,9	-
BUL	57,5	5,6	2,79	HUB	22,5	-9,57	0,11	KOL2	52,5	3,96	1,09	ZMK	2,5	4,06	-
CPB	2,5	-9,82	1,8	HUB	27,5	-9,71	0,64	KOL2	57,5	2,54	0,28	ZMK	7,5	8,53	-
CPB	7,5	-16,81	2,72	HUB	32,5	-9,63	0,83	KOL2	62,5	1,17	1,26	ZMK	12,5	6,34	-

Soil/ paléosol	Prof. (cm)	Score discriminant moyen	Ecart type	Soil/ paléosol	Prof. (cm)	Score discriminant moyen	Ecart type	Soil/ paléosol	Prof. (cm)	Score discriminant moyen	Ecart type	Soil/ paléosol	Prof. (cm)	Score discriminant moyen	Ecart type
CPB	12,5	-18,67	0,9	HUB	37,5	-8,87	0,91	KOL2	67,5	0,86	0,46	ZMK	17,5	8,55	-
CPB	17,5	-17,22	0,53	HUB	42,5	-8,4	0,6	KOL2	72,5	0,87	0,44	ZMK	22,5	6,66	-
CPB	22,5	-19,39	1,9	HUB	47,5	-8,73	0,69	KOL2	77,5	1,66	1,06	ZMK	27,5	-1,95	-
CPB	27,5	-20,85	1,11	HUB	52,5	-8,47	0,45	KOL2	82,5	0,28	1,67	ZMK	32,5	4,34	-
CPB	32,5	-24,16	2,99	HUB	57,5	-8,28	1,49	KOL2	87,5	1,62	0,97	ZMK	37,5	4,98	-
CT	5	-4,38	-	HUB	62,5	-6,79	0,94	KOL2	92,5	0,66	1,16	ZMK	42,5	3,78	-
CT	15	-4,96	-	HUB	67,5	-6,75	0,6	KOL2	97,5	0,52	0,54	ZMK	47,5	11,18	-
CT	25	-5,03	-	HUB	72,5	-7,51	0,62	KOL2	102,5	1,72	1,81	ZMK	52,5	6,64	-
CT	35	-3,91	-	HUB	77,5	-6,49	1,82	KOL3	2,5	1,45	0,83	ZMK	57,5	5,39	-
CT	45	-4,61	-	HUB	82,5	-6,31	1,5	KOL3	7,5	3,2	0,7	ZMK	62,5	8,73	-
CT	55	-5,38	-	HUG	2,5	-4,14	1,11	KOL3	12,5	1,55	0,9				
CT	65	-5,75	-	HUG	7,5	-3,96	0,1	KOL3	17,5	1,17	1,47				

Annexes 6 Les scores discriminant de la fonction 1 et 2 – la moyenne et les écarts types pour des sols étudiés pour l'approche tripartite (sols sous prairies, sols sous forêts, sols cultivés). (–) indique que la donnée n'est pas disponible (qu'une observation sur le profil a été effectuée).

Code de site	Prof. (cm)	Fonction 1	Ecart type fonction 1	Fonction 2	Ecart type fonction 2	Code de site	Prof. (cm)	Fonction 1	Ecart type fonction 1	Fonction 2	Ecart type fonction 2
A1	2,5	-0,14	-	1,24	-	HUGF	42,5	-4,44	0,3	-0,83	0,11
A1	21,5	-3,38	-	-1,18	-	HUGF	47,5	-4,46	0,19	-0,73	0,08
A1	32,5	-3,17	-	0,01	-	HUM	2,5	1,24	0,23	2,52	0,21
A1	40	-5,17	-	-0,4	-	HUM	7,5	0,37	0,16	2,92	0,38
A1	50	-5,7	-	-2,91	-	HUM	12,5	0,06	0	2,34	0,2
A1	57,5	-6,48	-	-1,67	-	HUM	17,5	-0,62	0,26	2,16	0,26
A1	65	-6,93	-	-2,92	-	HUM	22,5	-0,9	0,62	1,72	0,37
A1	75	-6,59	-	-3,14	-	HUM	27,5	-1,8	0,16	1,18	0,54
A1	85	-6,4	-	-2,57	-	HUM	32,5	-2,69	0,53	0,67	0,08
A1	95	-7,27	-	-3,44	-	HUM	37,5	-3,5	0,32	0,41	0,26
A1	105	-7,09	-	-3,1	-	HUM	42,5	-4,17	0,63	0,03	0
A1	115	-7,18	-	-3,32	-	HUM	47,5	-4,33	0,64	-0,54	0,24
A1	130	-8,22	-	-2,74	-	HUM	52,5	-4,43	0,68	-0,68	0,11
A2	3,5	-3,1	-	-0,19	-	HUM	57,5	-4,99	0,56	-0,69	0,22
A2	15	-3,66	-	0,33	-	HUM	62,5	-5,2	0,61	-1,07	0,14
A2	25	-6,7	-	-1,32	-	HUM	67,5	-5,74	0,98	-1,09	0,19
A2	35	-7,03	-	-1,51	-	HUM	72,5	-5,65	1,06	-1,34	0,21
A2	45	-7,26	-	-1,51	-	HUM	77,5	-5,53	0,64	-1,37	0,02
A2	55	-6,79	-	-2,6	-	HUM	82,5	-5,66	0,45	-1,64	0,1
A2	65	-6,44	-	-3,67	-	HUM	87,5	-7,02	-	-1,48	-
A2	75	-6,86	-	-3,29	-	HUR	2,5	0,66	0,65	3,35	0,58
A2	85	-7,19	-	-3,58	-	HUR	7,5	-0,72	0,51	3,06	0,48
A2	95	-7,54	-	-3,83	-	HUR	12,5	-0,7	0,21	2,55	0,14
A2	105	-8,44	-	-3,66	-	HUR	17,5	-1,79	0,6	2,03	0
A2	115	-7,95	-	-3,66	-	HUR	22,5	-2,31	0,27	2,29	0,1
A2	125	-8,9	-	-2,83	-	HUR	27,5	-4,06	0,42	1,73	0,04
A2	135	-8,51	-	-3,52	-	HUR	32,5	-6,94	0,06	1,37	0,14
A2	145	-8,79	-	-3,08	-	HUR	37,5	-9,57	0,21	1,52	0,06
A2	155	-8,26	-	-4,1	-	HUR	42,5	-11,09	0,22	0,84	0,08
A2	165	-9,2	-	-4,81	-	HUR	47,5	-13,67	0,19	0,12	0,17
A3	7	-1,16	-	0,38	-	HUR	52,5	-13,08	0,09	0,45	0,14
A3	15	-2,32	-	-0,49	-	HUR	57,5	-13,68	0,06	0,81	0,06
A3	25	-4,45	-	-0,64	-	HUS	2,5	0,08	0,52	2,55	0,57
A3	35	-6,22	-	-1,16	-	HUS	7,5	-0,33	0,01	1,25	0,08
A3	45	-5,73	-	-1,28	-	HUS	12,5	-1,38	0,29	1,45	0,03

Code de site	Prof. (cm)	Fonction 1	Ecart type fonction 1	Fonction 2	Ecart type fonction 2	Code de site	Prof. (cm)	Fonction 1	Ecart type fonction 1	Fonction 2	Ecart type fonction 2
A3	55	-6,05	-	-1,78	-	HUS	17,5	-2,4	0,12	1,08	0,09
A3	65	-7,1	-	-2,73	-	HUS	22,5	-1,47	0,65	0,85	0,01
A3	75	-6,86	-	-2,72	-	HUS	27,5	-2,74	0,24	1,04	0,37
A3	85	-6,61	-	-3	-	HUS	32,5	-1,59	0,4	0,88	0,48
A3	95	-6,97	-	-3,06	-	HUS	37,5	-1,73	0,48	1,02	0,27
A3	105	-7,93	-	-3,08	-	HUS	42,5	-2,04	0,07	0,86	0,34
A3	115	-7,7	-	-1,91	-	HUS	47,5	-1,84	0,44	0,94	0,11
A3	145	-7,48	-	-2,19	-	HUS	52,5	-3,23	0,89	1,28	0,56
A3	156	-7,22	-	-2,94	-	HUS	57,5	-3,4	0,6	1,11	0,62
BAB	2,5	0,21	0,73	-1,64	0,73	HUS	62,5	-3,61	0,46	0,99	0,69
BAB	7,5	-0,02	0,56	-1,82	0,56	HUS	67,5	-3,69	0,6	0,31	0,34
BAB	12,5	-0,22	0,13	-1,11	0,13	HUS	72,5	-3,96	0,79	0,01	0,58
BAB	17,5	-0,8	0,11	-1,78	0,11	HUS	77,5	-4,35	0,79	0,42	0,84
BAB	22,5	-2,03	0,17	-1,1	0,17	HUS	82,5	-4,27	0,97	0,12	0,69
BAB	27,5	-3,04	0,23	-1,37	0,23	HUS	87,5	-4,93	1	0,51	0,99
BAB	32,5	-4,22	0,44	-1,65	0,44	HUS	92,5	-4,7	0,87	-0,26	0,81
BAB	37,5	-3,74	0,15	-1,25	0,15	HUS	97,5	-5,09	1,05	0,07	0,87
BAB	42,5	-3,87	0,37	-2,08	0,37	HUS	107,5	-5,18	0,08	0,17	0,91
BAB	47,5	-5,16	0,3	-1,75	0,3	HUS	117,5	-5,89	0,77	-0,12	0,72
BAB	52,5	-5,48	0,63	-2,56	0,63	HUS	127,5	-6,24	0,81	-0,47	1,09
BAB	57,5	-5,57	0,57	-2,23	0,57	HUS	137,5	-5,98	1,02	-0,21	0,72
BAB	62,5	-6,31	0,47	-2,3	0,47	HUS	147,5	-6,11	0,63	-0,57	0,89
BAB	67,5	-6,15	0,27	-2,16	0,27	HUS	157,5	-5,34	0,26	-1,3	0,12
BAB	72,5	-6,21	0,59	-1,79	0,59	HUS	167,5	-5,09	0,14	-0,96	0,35
BAB	77,5	-6,11	0,07	-1,76	0,07	HUS	177,5	-5,17	0,21	-0,99	0,1
BAB	82,5	-5,36	0,31	-2,01	0,31	HUS	187,5	-5,29	0,26	-1,14	0,07
BRC	5	-1,95	-	-0,22	-	HUU	2,5	-0,7	0,32	2,58	0,01
BRC	15	-1,63	-	-0,42	-	HUU	7,5	-1,71	0,13	1,51	0,24
BRC	25	-2	-	0,19	-	HUU	12,5	-2,04	0,06	0,81	0,01
BRC	35	-5,51	-	-0,43	-	HUU	17,5	-2,23	0,13	0,81	0,27
BRC	45	-5,71	-	-1,14	-	HUU	22,5	-2,08	0,29	1,1	0,16
BRC	55	-6,05	-	-1,49	-	HUU	27,5	-2,37	0,12	0,88	0,05
BRO	2,5	-0,59	1,36	1,4	0,8	HUU	32,5	-2,96	0,16	0,15	0,22
BRO	7,5	-0,34	0,28	0,28	0,41	HUU	37,5	-3,26	0,16	-0,2	0,12
BRO	12,5	-3,19	2,65	0,54	0,78	HUU	42,5	-3,55	0,41	-0,06	0,04

Code de site	Prof. (cm)	Fonction 1	Ecart type fonction 1	Fonction 2	Ecart type fonction 2	Code de site	Prof. (cm)	Fonction 1	Ecart type fonction 1	Fonction 2	Ecart type fonction 2
BRO	17,5	-1,83	0,06	0,01	0,36	HUU	47,5	-4,08	0,17	-0,87	0,13
BRO	22,5	-2,22	0,14	0,19	0,1	HUUD	2,5	0,08	0,34	4,47	0,01
BRO	27,5	-2,76	0,69	-0,37	0,21	HUUD	7,5	0,3	0,1	3,34	0,06
BRO	32,5	-3,11	0,22	-0,39	0,3	HUUD	12,5	0,34	0,15	2,9	0,05
BRO	37,5	-3,39	0,16	-0,92	0,25	HUUD	17,5	-1,17	0,38	1,71	0,33
BRO	42,5	-3,85	0,28	-0,86	0,34	HUUD	22,5	-4,58	0,55	-0,3	0,06
BRO	47,5	-3,11	0,6	-1,02	0,22	HUUD	27,5	-7,11	0,62	-1,08	0,04
BRO	52,5	-3,54	0,24	-0,94	0,73	HUUD	32,5	-8,32	0,17	-1,73	0,09
BRO	57,5	-3,79	0,73	-0,76	0,92	KOC	2,5	0,07	0,81	6,92	0,66
BUL	2,5	1,52	0,51	-0,38	0,27	KOC	7,5	-0,46	0,51	9,29	0,6
BUL	7,5	-0,04	1,95	-0,66	0,26	KOC	12,5	-0,71	0,34	6,33	0,46
BUL	12,5	0,29	0,6	-1,6	0,56	KOC	17,5	-1,77	0,87	7,03	0,52
BUL	17,5	-0,92	0,26	-1,52	0,6	KOC	22,5	-2,08	0,77	7,81	1,16
BUL	22,5	-1,92	0,82	-1,4	0,61	KOC	27,5	-2,53	0,36	4,26	0,35
BUL	27,5	-2,89	0,92	-1,63	0,85	KOC	32,5	-3,42	0,49	1,06	0,78
BUL	32,5	-3,64	0,35	-1,79	0,74	KOC	37,5	-4,66	0,67	0,92	0,51
BUL	37,5	-4,42	0,68	-2,3	0,47	KOR	2,5	-0,06	0,23	2,71	0,47
BUL	42,5	-4,86	0,46	-1,84	0,47	KOR	7,5	0,04	0,54	1,53	0,71
BUL	47,5	-5,69	0,52	-1,66	0,33	KOR	12,5	-1,42	0,51	2,64	0,25
BUL	52,5	-5,71	0,91	-1,97	0,42	KUC	5	0,89	0,2	-0,12	0,89
BUL	57,5	-5,65	0,44	-2,38	0,26	KUC	10	0,04	0,55	-0,02	0,99
CT	5	3,17	-	0,21	-	KUC	15	-0,18	0,24	-0,17	0,94
CT	15	1,8	-	2,08	-	KUC	20	-1,33	0,22	-0,03	0,7
CT	25	1,14	-	0,58	-	KUC	25	-1,23	0,35	-0,6	0,31
CT	35	0,7	-	1,27	-	KUC	30	-2,18	0,51	-1,19	0,58
CT	45	-0,4	-	0,54	-	KUC	35	-2,78	0,03	-1,21	0,17
CT	55	-0,82	-	0,1	-	KUC	40	-3,32	0,58	-0,98	0,26
CT	65	-1,39	-	-1,05	-	KUC	45	-3,93	0,33	-1,68	0,29
CT	75	-1,62	-	-0,79	-	KUC	50	-4,74	0,06	-2,25	0,18
CT	85	-1,49	-	-0,42	-	KUC	55	-5,59	0,31	-2,34	0,44
CT	95	-1,64	-	-0,91	-	KUC	60	-6,34	0,79	-2,84	0,19
CT	105	-1,41	-	-1,74	-	KUC	65	-8,5	1,46	-3,7	0,81
CT	115	-4,08	-	-1,92	-	KUC	70	-10,4	2,45	-4,18	1,02
CT	125	-3,35	-	-2,12	-	KUC	75	-11,44	2,75	-4,71	0,75
CT	135	-4,1	-	-2,3	-	KUC	80	-13,55	1,34	-5,22	0,16

Code de site	Prof. (cm)	Fonction 1	Ecart type fonction 1	Fonction 2	Ecart type fonction 2	Code de site	Prof. (cm)	Fonction 1	Ecart type fonction 1	Fonction 2	Ecart type fonction 2
DUB	2,5	1,72	1,02	-2,09	1,61	KUC	85	-15,14	0,73	-5,63	0,17
DUB	7,5	0,3	0,59	-2,05	0,28	KUC	90	-16,15	0,45	-5,82	0,32
DUB	12,5	-0,57	0,5	-1,34	0,3	KUC	95	-16,9	1,11	-5,58	0,59
DUB	17,5	-2,19	0,6	-1,47	0,24	KUC	100	-16,96	1,61	-5,7	0,76
DUB	22,5	-3,39	0,49	-1,23	0,93	KUC	105	-15,46	0,43	-6,66	0,47
DUB	27,5	-4,08	0,79	-2,13	0,76	KUC	110	-14,25	0,85	-6,81	0,5
DUB	32,5	-4,53	0,66	-1,67	0,6	KUC	115	-13,89	1,11	-6,66	0,8
DUB	37,5	-4,81	0,48	-2,17	0,24	KUC	120	-13,06	0,94	-5,97	0,66
DUB	42,5	-4,7	0,76	-2,59	0,83	KUR	5	0,61	0,08	1,4	0,08
H1	5	0,54	-	0,28	-	KUR	25	0,57	0,09	1,47	0
H1	15	-0,92	-	1,13	-	KUR	45	-1,63	0,17	0,27	0,23
H1	25	-1,03	-	-0,09	-	KUR	65	-2,93	0,03	0,09	0,43
H1	35	-2,99	-	0,5	-	KUR	85	-3,86	0,02	-0,46	0,07
H1	45	-3,69	-	-0,27	-	KUR	105	-4,92	0,05	-1,03	0,21
H1	55	-3,9	-	-0,78	-	MD	5	2,65	-	-0,34	-
H1	65	-4,39	-	-1,64	-	MD	15	0,24	-	-0,96	-
H1	75	-4,83	-	-2,54	-	MD	25	-1,02	-	-1,92	-
H1	85	-6,15	-	-2,45	-	MD	35	-3,17	-	-1,46	-
H1	95	-5,51	-	-3,88	-	MD	45	-3,38	-	-2,74	-
H1	105	-5,35	-	-3,09	-	MD	55	-3,91	-	-1,86	-
H1	115	-6,16	-	-4,39	-	MD	65	-4,64	-	-2,83	-
H1	135	-5,45	-	-3,58	-	MD	75	-5,79	-	-2,58	-
H1	145	-5,25	-	-3,54	-	MD	85	-5,88	-	-2,96	-
H1	155	-5,38	-	-3,99	-	MD	105	-6,05	-	-3	-
H1	165	-6,04	-	-3,09	-	MD	120	-6,84	-	-3,58	-
H1	175	-6,45	-	-3,01	-	MD	140	-5,12	-	-3,09	-
HUB	2,5	-3,76	0,53	1,71	0,23	MIK	5	0,83	0,04	2,38	0,15
HUB	7,5	-4,18	0,19	1,59	0,1	MIK	15	0,47	0,19	2,1	0,08
HUB	12,5	-4,65	0,17	1,31	0,11	MIK	25	-0,18	0	1,89	0,02
HUB	17,5	-4,97	0,17	1,04	0,1	MIK	35	-0,76	0,04	1,13	0,21
HUB	22,5	-5,21	0,32	0,77	0,42	MIK	45	-1,45	0,06	1,33	0,07
HUB	27,5	-5,86	0,25	1,15	0,32	MIK	55	-1,98	0,02	1,43	0,16
HUB	32,5	-5,44	0,28	0,65	0,11	MIK	65	-2,13	0,08	1,17	0,4
HUB	37,5	-5,88	0,22	0,59	0,11	MIK	75	-2,55	0,43	1,17	0,28
HUB	42,5	-5,81	0,28	0,42	0,04	POP	2,5	-6,07	2,68	1,67	0,47

Code de site	Prof. (cm)	Fonction 1	Ecart type fonction 1	Fonction 2	Ecart type fonction 2	Code de site	Prof. (cm)	Fonction 1	Ecart type fonction 1	Fonction 2	Ecart type fonction 2
HUB	47,5	-6,63	0,3	0,34	0,44	POP	7,5	-8,98	3,21	0,47	0,98
HUB	52,5	-7,05	0,11	0,41	0,09	POP	12,5	-8,64	2,92	0,58	0,94
HUB	57,5	-7,6	0,18	0,33	0,31	POP	17,5	-8,79	3,24	0,31	0,55
HUB	62,5	-7,53	0,31	-0,08	0,24	POP	22,5	-7,65	2,79	0,43	0,54
HUB	67,5	-7,97	0,23	-0,33	0,07	POP	27,5	-6,57	1,75	1,17	0,64
HUB	72,5	-7,86	0,18	-0,36	0,03	POP	32,5	-7,57	3,06	1,24	0,7
HUB	77,5	-7,86	0,02	-0,55	0,06	POP	37,5	-7,43	3,45	0,1	1,06
HUB	82,5	-7,55	0,16	-0,53	0,29	POP	42,5	-9,21	4,68	-0,38	1,51
HUG	2,5	1,31	0,08	2,65	0,3	POP	47,5	-10,61	2,85	-0,65	0,75
HUG	7,5	1,03	0,1	2,18	0,21	POP	52,5	-13,7	4,91	-1,65	1,69
HUG	12,5	0,27	0,33	1,43	0,18	POP	57,5	-13,45	4,42	-1,37	1,99
HUG	17,5	-0,46	0	1,01	0,15	POP	62,5	-11,9	3,94	-0,93	1,55
HUG	22,5	-1,44	0,49	0,86	0,22	POP	67,5	-13,24	3,98	-1,93	1,38
HUG	27,5	-2,55	0,56	0,36	0,32	POP	72,5	-15,35	5,64	-2,81	1,64
HUG	32,5	-3,09	0,26	-0,36	0,29	POP	77,5	-13,22	4,15	-2,31	1,3
HUG	37,5	-3,88	0,05	-1,08	0,21	SEN	2,5	-0,4	0,51	-0,93	0,67
HUG	42,5	-4,5	0,15	-1,46	0,34	SEN	7,5	-0,62	0,31	-1,39	0,15
HUG	47,5	-5,18	0,3	-2	0,61	SEN	12,5	-2,24	0,67	-1,11	0,44
HUG	52,5	-5,74	0,22	-2,1	0,45	SEN	17,5	-2,6	0,35	-1,89	0,09
HUGF	2,5	0,81	0,19	0,63	0,07	SEN	22,5	-4,96	1,97	-1,19	0,14
HUGF	7,5	-0,26	0,24	0,27	0,21	SEN	27,5	-4,55	0,47	-1,38	0,03
HUGF	12,5	-0,75	0,08	0,01	0,04	SEN	32,5	-4,55	0,42	-2,09	0,54
HUGF	17,5	-1,37	0,21	-0,22	0,05	SEN	37,5	-4,46	0,27	-1,54	0,65
HUGF	22,5	-1,77	0,13	-0,28	0,19	SEN	42,5	-4,12	0,12	-1,27	0,21
HUGF	27,5	-3,41	0,17	-0,73	0,04	SEN	47,5	-4,34	0,54	-1,59	0,49
HUGF	32,5	-3,8	0,09	-0,88	0,06	SEN	52,5	-2,72	0,37	-1,41	0,19
HUGF	37,5	-4,09	0,03	-0,88	0,12						

Annexes 7 Les scores discriminant de la fonction 1 et 2 – la moyenne et les écarts types pour des sols étudiés pour l'approche tripartite (forêts feuillues, de conifère, mixtes) (–) indique que la donnée n'est pas disponible (qu'une observation sur le profil a été effectuée).

Echantillon	Fonction 1	Fonction 2	Echantillon	Fonction 1	Fonction 2	Echantillon	Fonction 1	Fonction 2
BAB102	-3,32	-0,69	DUB203	-2,57	-1,86	KOL3114	0,1	-1,47
BAB103	-2,84	-1,01	DUB205	-1,76	-0,5	KOL3213	-0,46	-2,2
BAB104	-3,46	-0,53	DUB301	-3,23	-1,23	KOL3215	0,28	-1,51
BAB105	-2,68	-1,26	DUB302	-3,01	-0,51	KOL3216	-0,05	-0,84
BAB106	-2,17	-1,46	DUB303	-2,28	-1,01	KUC100	-2,6	0,06
BAB107	-2,02	-0,46	DUB304	-2,77	-1,1	KUC101	-2,55	-0,36
BAB108	-3,53	-0,65	DUB305	-2,59	-1,12	KUC102	-1,66	0,35
BAB109	-2,75	-1,11	DUB308	-3,1	0,07	KUC103	-2,19	0,18
BAB110	-2,78	-1,03	DUB309	-3,22	-1,47	KUC105	-3,29	-0,81
BAB111	-1,77	0,67	H110	-1,62	-0,75	KUC106	-2,4	-0,32
BAB112	-1,85	-0,01	H111	-2,9	-1,3	KUC108	-2,47	-0,91
BAB113	-1,46	-0,12	H113	-2,56	-2,39	KUC109	-1,59	-0,06
BAB114	-2,19	-0,26	H114	-3,66	-2,61	KUC110	-1,42	-0,07
BAB115	-2,69	-0,31	H115	-2,95	-2,4	KUC111	-1,37	0,2
BAB116	-3,79	-0,33	H116	-2,91	-2,13	KUC112	-0,97	-0,41
BAB117	-2,42	-0,07	H117	-2,83	-2,15	KUC113	-1	0,2
BAB201	-2,92	-1,13	HRU20102	-2,77	1,23	KUC114	-1	-1,03
BAB202	-2,92	-1,09	HRU20109	-1,38	-0,16	KUC115	-0,51	-0,87
BAB203	-1,74	-0,98	HRU20110	-1,5	-0,89	KUC116	0,56	1,04
BAB204	-3,13	0,8	HUGF01	-3,13	0,2	KUC117	2,21	3,45
BAB205	-4	-0,35	HUGF02	-2,47	0,69	KUC118	2,47	3,39
BAB206	-3,14	0,45	HUGF07	-2,75	1,8	KUC119	2,95	4,11
BAB208	-3,53	-1,08	HUGF101	-2,07	1,42	KUC200	-1,47	0,49
BAB209	-3,1	-0,9	HUGF102	-2,33	0,12	KUC203	-2,39	-1,51
BAB210	-2,35	-0,4	HUGF103	-1,8	0,9	KUC204	-1,93	-1,43
BAB211	-3,2	0,37	HUGF104	-2,32	1,08	KUC205	-1,59	-1,76
BAB212	-1,94	-0,14	HUGF105	-2,04	0,87	KUC207	-1,54	0,22
BAB213	-2,48	0,02	HUGF106	-2,04	1,03	KUC208	-2,64	-0,13
BAB214	-2,28	0,25	HUGF107	-2,79	0,92	KUC209	-1,77	-0,72
BAB215	-2,87	-0,07	HUGF108	-2,34	1,29	KUC210	-0,71	-0,64
BAB216	-3,22	0,28	HUGF109	-2,39	1,31	KUC211	-0,9	-0,41
BAB217	-2,37	2,87	HUGF110	-2,9	1,75	KUC212	-0,18	-0,53
BAB301	-3,21	-1,58	HUGF13	-2,39	1,09	KUC213	0,79	0,2
BAB302	-2,67	-2,34	HUGF15	-3,09	0,59	KUC214	0,69	0,96
BAB303	-4,02	-0,25	HUGF201	-2,09	1,35	KUC215	1,02	1,85

Echantillon	Fonction 1	Fonction 2	Echantillon	Fonction 1	Fonction 2	Echantillon	Fonction 1	Fonction 2
BAB304	-3,39	-2,08	HUGF202	-2,36	0,5	KUC216	1,08	2,54
BAB305	-3,05	-1,35	HUGF203	-1,81	0,68	KUC221	1,05	3,55
BAB306	-2,47	-1,09	HUGF204	-2,27	0,82	KUC300	-2,62	-0,77
BAB307	-2,78	-1,27	HUGF205	-2,16	1,18	KUC301	-2,43	0,34
BAB308	-2,96	-1,04	HUGF206	-2,56	0,9	KUC302	-1,01	0,64
BAB309	-2,52	-0,49	HUGF207	-1,92	0,35	KUC303	-2,69	0,26
BAB310	-1,71	0,14	HUGF208	-2,97	1,25	KUC304	-2,86	1,73
BAB311	-0,94	0,06	HUGF209	-2,55	1,38	KUC305	-2,59	-0,78
BAB312	-1,33	-0,47	HUGF210	-2,29	1,21	KUC308	-0,9	-1,02
BAB313	-2,27	0,35	KOL1108	-0,81	-0,1	KUC309	-1,68	0,68
BAB314	-2,38	0,84	KOL1109	-1,76	-0,39	KUC310	-0,51	-0,42
BAB316	-2,59	1,43	KOL1111	-0,86	-0,63	KUC311	-1,21	0,18
BAB317	-1,81	1,81	KOL1112	-0,15	-1,03	KUC312	-1,09	0,06
BAB401	-2,72	0,02	KOL1113	-0,99	-1,24	KUC313	0,36	0,78
BAB406	-3,53	0,17	KOL1114	-0,77	-1,49	KUC314	1,17	1,6
BAB409	-2,11	0,83	KOL1115	-1	-0,75	KUC315	1,97	3,93
BRO206	-1,11	5,03	KOL1116	-0,11	0,07	MD01	-2,54	0,47
BRO208	-0,49	4,44	KOL1117	-1,01	-1,14	MOR101	-3,89	-1,18
BUB105	-0,51	-1,47	KOL1118	0,31	-0,65	MOR103	-2,29	2,32
BUB108	-1,38	-2,6	KOL1119	0,2	-1,2	MOR104	-2,68	-0,9
BUB110	-1,64	-1,8	KOL1120	0,24	-0,98	MOR105	-1,28	-1,99
BUB111	0,03	-0,62	KOL1121	-0,54	-1,68	MOR106	-0,5	-1,28
BUB112	-1,33	-0,15	KOL1122	-0,94	-1,27	MOR107	0,12	0,08
BUB207	0,04	-1,37	KOL1123	-0,46	-1,13	MOR108	-2,47	-2,18
BUB208	-1,26	-2,22	KOL1124	-0,25	-1,68	MOR109	-0,79	-0,13
BUB209	-1	-1,83	KOL1125	-0,23	-0,48	MOR110	-0,61	-1,5
BUB210	-1,34	-0,56	KOL1126	-0,2	-0,28	MOR111	-0,2	-1,03
BUB211	-0,58	0,3	KOL1127	-1,46	-0,5	MOR112	1,76	-0,09
BUB212	-1,29	-0,01	KOL1128	0,83	-0,02	MOR113	-2,01	-1,66
BUB308	-0,73	-2,02	KOL1207	-0,03	-0,29	MOR114	-0,72	-2,71
BUB309	-1,56	-2	KOL1208	-1,44	-0,89	MOR115	-1,29	-0,06
BUB310	-1,48	-3,07	KOL1209	-0,64	-0,52	MOR116	-0,34	-3,29
BUB311	-1,68	-0,19	KOL1211	-0,64	-1,36	MOR210	-1,51	-1,19
BUB312	-0,38	-0,39	KOL1212	-0,42	-1,27	MOR211	-1,02	-0,14
BUL101	-3,01	-0,99	KOL1213	-0,93	-0,72	MOR213	-2,22	-2,77

Echantillon	Fonction 1	Fonction 2	Echantillon	Fonction 1	Fonction 2	Echantillon	Fonction 1	Fonction 2
BUL102	-1,23	-0,83	KOL1214	-0,74	-1,66	MOR215	-1,13	-1,35
BUL103	-1,73	-1,11	KOL1215	-1,44	-1,28	MOR219	-0,76	0,38
BUL104	-3,75	-0,84	KOL1216	-0,33	-1,16	MOR220	0,16	-0,09
BUL105	-2,76	-1,51	KOL1217	-0,57	-0,75	SEN101	-2,44	-0,3
BUL106	-2,46	-1,24	KOL1219	-1,5	-1,34	SEN102	-2,94	-0,81
BUL107	-1,7	-1,79	KOL1220	-0,43	-1,27	SEN103	-2,2	-0,57
BUL109	-2,35	-0,73	KOL1221	-0,2	-1,59	SEN104	-2,34	-0,65
BUL110	-2,25	0,53	KOL1222	-0,81	-1,03	SEN106	-2,45	0,42
BUL111	-2,33	0,27	KOL1223	-0,57	-1,76	SEN107	-2,09	0,39
BUL201	-1,68	-1,16	KOL1224	0,25	-0,39	SEN108	-3,42	0,24
BUL202	-1,97	-0,69	KOL1225	-0,05	-1,83	SEN109	-2,91	0,44
BUL203	-1,68	-0,35	KOL1226	-0,88	0,18	SEN110	-4,2	-0,42
BUL204	-0,98	-0,02	KOL1227	-0,28	-0,23	SEN111	-1,78	3,27
BUL206	-1,38	-0,7	KOL1307	-0,53	-1,2	SEN201	-3,39	-0,84
BUL207	-2,9	-0,75	KOL1308	-0,77	-0,72	SEN202	-2,22	-1,71
BUL208	-3,29	-0,15	KOL1310	-1,01	-0,53	SEN203	-1,67	0,39
BUL209	-3	-0,81	KOL1311	-0,22	-1,31	SEN204	-1,07	-0,33
BUL210	-1,67	0,23	KOL1312	-1,09	-0,6	SEN205	-3,79	-0,15
BUL211	-2,2	1,03	KOL1313	-0,18	-1,4	SEN206	-3,04	0,15
BUL212	-0,15	3,77	KOL1315	-0,37	-1,32	SEN207	-2,41	-0,45
BUL301	-1,63	0,15	KOL1316	-0,56	-0,87	SEN208	-3,08	0,17
BUL302	-1,63	-0,01	KOL1317	-0,1	-1,19	SEN209	-3,2	-0,92
BUL303	-3,4	-1,75	KOL1318	-0,58	-1,09	SEN210	-2,63	0,12
BUL304	-2,2	-0,16	KOL1319	-0,59	-0,21	SEN211	-3,24	0,72
BUL305	-2,34	-1,1	KOL1320	-0,06	-0,62	SEN301	-1,98	0,37
BUL306	-1,46	0,22	KOL1321	-0,18	-0,45	SEN302	-3	-1,61
BUL308	-2,17	-0,87	KOL1322	0,03	-1,03	SEN303	-1,4	0,89
BUL310	-2,2	0,11	KOL1323	-0,45	-0,67	SEN304	-1	1,07
BUL311	-1,17	2,04	KOL1324	0,36	-0,67	SEN305	-4,07	-0,18
BUL312	-0,81	3,23	KOL1325	-0,4	-0,44	SEN306	-2,74	0,23
BUL401	-3,9	-0,22	KOL1326	0,15	-0,49	SEN307	-2,74	-0,34
BUL402	-1,77	-0,09	KOL1327	-0,31	0,18	SEN308	-2,85	-0,8
BUL403	-1,11	0,07	KOL1328	-0,41	-0,16	WIW03	-2,56	-0,38
BUL404	-3,56	-0,85	KOL2101	-1	-3,22	WIW04	-2,37	-0,97
BUL405	-1,89	-1,72	KOL2102	-3,23	-2,74	WIW07	-1,65	-0,14

Echantillon	Fonction 1	Fonction 2	Echantillon	Fonction 1	Fonction 2	Echantillon	Fonction 1	Fonction 2
BUL407	-2,84	-1,33	KOL2105	-1,4	-3,11	WIW09	-1,6	-0,39
BUL408	-2,03	-0,14	KOL2106	-2,09	-2,74	ZMC01	-3,12	-1,96
BUL409	-2,12	-0,88	KOL2107	-0,78	-4,35	ZMC02	-3,9	-3,23
BUL410	-2,67	1,55	KOL2108	-1,49	-2,94	ZMC03	-3,79	-3,26
BUL411	-1,46	1,16	KOL2111	-1,67	-2,96	ZMC04	-3,57	-3,17
BUL412	-0,16	4,63	KOL2203	-0,86	-2,49	ZMC05	-3,34	-3,39
BUL501	-1,32	-0,67	KOL2206	-0,41	-3,19	ZMC06	-3,85	-4,59
BUL502	-2,47	-1,55	KOL2207	-1,69	-2,81	ZMC07	-4,53	-3,79
BUL503	-2,9	-0,35	KOL2208	-0,71	-3,26	ZMC08	-3,75	-2,87
BUL504	-1,64	-1,02	KOL2211	-1,8	-2,99	ZMC09	-3,64	-1,3
BUL505	-2,23	-0,27	KOL2301	0,28	-1,94	ZMK10	-1,47	-1
BUL506	-2,77	-1,51	KOL2302	-0,53	-2,89	ZMK11	-2,32	-1,6
BUL507	-2,15	-0,29	KOL2303	-1,34	-2,59	ZMK12	-2,05	-1,48
BUL508	-0,34	-0,24	KOL2304	-0,79	-2,69	ZMK13	-2,7	-0,78
BUL509	-1,18	-0,65	KOL2305	-1,4	-2,29	ZMK14	-2,18	-0,2
BUL510	-2,47	0,46	KOL2306	-1,46	-3,03	ZMK15	-2,37	1
BUL511	-1,74	0,89	KOL2307	-1,12	-2,85	ZMK22	-1,98	-0,04
BUL512	-0,12	3,71	KOL2308	-1,27	-3,12	ZMK23	-1,13	-0,7
DUB101	-2,1	-2,88	KOL2309	-1,54	-2,3	ZMK24	-1,52	-1,51
DUB201	-2,4	-1,04	KOL2321	-0,14	-0,44	ZMK25	-2,97	-3,27
DUB202	-2,39	-0,41	KOL3102	0,21	-2,67	ZMK26	-2,65	-1,67
ZMK27	-2,51	-1,47	ZMK28	-1,56	0,14			

Barbora VYSLOUZILOVA

Steppes ou forêts ? Les conditions environnementales de la formation et de l'évolution des chernozems en Europe Centrale

Résumé

Le chernozem est un sol emblématique, car il a participé à la naissance de la pédologie par l'intermédiaire des travaux de Dokuchaev (1883). Depuis, la formation des chernozems a suscité de nombreuses questions parmi les pédologues, botanistes et paléo-environmentalistes. Tandis qu'en Europe de l'Est et en Eurasie les chernozems sont décrits comme des sols zonaux, typiques des milieux steppiques continentaux, les zones où on les rencontre en Europe Centrale sont prédisposées par leur climat à la présence de forêts. L'objectif de notre travail vise à enrichir ce débat en reconstituant les conditions environnementales de la pédogénèse de ces sols en Europe Centrale.

Le chernozem est un sol le plus souvent développé sur loess à horizon de surface organique très épais et sombre qui passe directement à un horizon calcaire. La matière organique a subi une lente évolution sous la dépendance de contrastes climatiques. Néanmoins, en Europe Centrale, les facteurs climatiques liés à la présence de chernozems sont à nuancer. Les chernozems sont censés s'être formés sous les conditions climatiques différentes d'aujourd'hui qui ont dominé en Europe Centrale au Tardiglaciaire et au début de l'Holocène.

Si des nuances climatiques permettent d'expliquer la différence de répartition des chernozems (« plus sec ») et des luvisols (« plus humide ») à l'échelle régionale, ce n'est plus vrai à l'échelle locale où les limites entre ces sols sont très brutales, alors que les conditions de milieu sont identiques. Une théorie pour expliquer leur persistance considère que ce serait l'ouverture artificielle du milieu, continue depuis le Néolithique, qui aurait bloqué leur évolution vers d'autres types de sols. Cette hypothèse expliquerait leur répartition sous forme d'îlots ou de mosaïque, alternant avec des luvisols et des phaeozems.

Nous avons privilégié dans notre questionnement l'étude des archives pédologiques, plus précisément celle des matières organiques, dont certaines ont la capacité de résider dans le sol pendant des milliers d'années. Celles-ci sont d'origine locale et permettent donc de reconstituer l'environnement végétal immédiat lors de la formation du sol. Elles ont été analysées par spectroscopie proche infrarouge qualitative (SPIR-qual). Cet outil représente une approche novatrice

dans l'étude des paléo-environnements. Cette approche s'est accompagnée d'une étude pédoanthracologique sur certains paléosols et de l'analyse micromorphologique d'une catena chernozem – luvisol à l'échelle stationnelle.

Nous avons montré que certains chernozems ont évolué constamment sous prairie, tandis que d'autres ont une histoire récente forestière, mais ont connu auparavant une évolution sous végétation de prairie. Les études pédoanthracologiques sur des paléochernozems pléistocènes et holocènes ont chaque fois révélé la présence de charbons de bois d'essence forestière. L'analyse micromorphologique de la catena met en évidence un chernozem qui s'est développé à partir d'un luvisol ce qui contraste avec les modèles habituels de dégradation des chernozems en luvisols.

Ce travail confirme que la couverture végétale des chernozems peut selon le cas être forestière ou prairiale. Il est certain que des chernozems ont évolué pendant un laps de temps long sous forêt. Ce résultat est en contradiction avec l'hypothèse dominante, qui veut que les chernozems se développent et subsistent exclusivement sous steppe.

Mots clef : chernozem, paléosols, paléoenvironnement, spectroscopie proche infrarouge (SPIR), Europe Centrale, archives pédologiques, pédogénèse, luvisol

Résumé en anglais

Chernozem became the crucial soil for the beginnings of soil science through the work of Dokuchaev from 1883. Since then the genesis of chernozems in Central Europe has raised many questions among soil scientists, botanists and paleo-environmentalists. While in Eastern Europe chernozems have been described as zonal soils, that are typical for continental steppe and forest-steppe areas, there are areas in Central Europe which are predisposed by their climatic characteristics to the presence of woodlands. The goal of this dissertation is to enrich the discussion about the genesis of chernozems by restoring the environmental conditions that were prevalent during the formation of chernozem soils in Central Europe.

Chernozems are usually developed on loess with a very thick and dark organic surface which passes directly to a calcareous horizon. The organic matter underwent a polymerization in dependence on climate contrasts. However, in Central Europe, the climatic characteristics of the areas of chernozems are a bit different. These chernozems are supposed to have been formed under the climatic conditions that dominated Central Europe during the Late Glacial and the Early Holocene.

The climatic nuances may contribute to the explanation of the differences in distribution of chernozems ("drier") and luvisols ("more humid") at a regional level, but they are no help at a local level with the same environmental conditions where the boundaries between chernozems and luvisols are very sharp. There is a theory about their persistence that considers the agriculture since the Neolithic being the reason for the fact that their progression to other types of soil was blocked.

This theory would explain their distribution in the form of mosaic, alternating with luvisols and phaeozems.

This study is focused on questioning of the memory of soils and especially of their organic matter. Some soil organic matter has the ability to persist in soils for thousands of years. Such organic matter has a purely local origin. That is why it is possible to reconstruct the vegetation from the period of time of the formation of soils. There is qualitative near infrared spectroscopy (NIRS) applied for the analysis of the soil organic matter. This method is an innovative approach to the studying of the paleoenvironments of chernozems. This approach is accompanied by an anthracological study of some paleosols and of a micromorphological analysis of a catena chernozem - luvisol on a very local scale (300 m).

The NIRS analysis has proved that some chernozems developed under grassland. Other chernozems have a recent forest history, but they had also existed under grassland vegetation before. There were found some chernozems with a source of heterogeneous organic material. The charcoals studies of paleochernozems of the Pleistocene and of the Holocene have revealed the presence of woods. The micromorphological analysis of a catena between chernozem and luvisol has shown a chernozem which developed from a luvisol. That contrasts with the usual models of the degradation of chernozems into luvisols.

This dissertation confirms that the vegetation cover of chernozems can be both: grassland or woodland. Certainly, chernozems also developed under forest during a period of time. This result is inconsistent with the prevailing hypothesis that claims chernozems develop and preserve exclusively under steppe.

Keywords: chernozem, buried soils, paleoenvironment, near-infrared spectroscopy (NIRS), Central Europe, soil memory, pedogenesis, luvisol