

COMMUNAUTE FRANCAISE DE BELGIQUE
FACULTE UNIVERSITAIRE DES SCIENCES AGRONOMIQUES DE GEMBOUX

**ELEMENTS TRACES METALLIQUES DANS LES SOLS.
CONTRIBUTION A LA CONNAISSANCE DES DETER-
MINANTS DE LEUR DISTRIBUTION SPATIALE
EN REGION LIMONEUSE BELGE.**

Gilles COLINET

Dissertation originale présentée en vue de l'obtention
du grade de docteur en environnement

Troisième partie – Différenciations pédogénétiques

Promoteur : Pr. L. BOCK

2003

Troisième partie
Différenciations pédogénétiques

Liste des figures

Troisième partie

Figure III.1:	Localisation du secteur étudié pour l'approche "solum"	225
Figure III.2:	Localisation des points de prélèvement au Bois de Grand-Leez.	226
Figure III.3:	Localisation des points de prélèvement au et autour du Bois de Buis. .	227
Figure III.4:	Cartographie des groupes de sols sur le domaine des Bois de Grand-Leez et de Buis	229
Figure III.5:	Profils du pH et du COT dans le sol Aba(b) sous forêt	236
Figure III.6:	Profils de la teneur en argile et de la CEC dans le sol Aba(b) sous forêt	237
Figure III.7:	Profils des teneurs en Ca, Mg, K et Na dans le sol Aba(b) sous forêt	238
Figure III.8:	Relation entre TRB et pHH ₂ O dans le profil Aba(b) sous forêt	239
Figure III.9:	Profils des teneurs en Al et Fe (g/100g) dans le sol Aba(b) sous forêt	239
Figure III.10:	Profils des teneurs totales en Cu, Ni et Co dans le sol Aba(b) sous forêt	240
Figure III.11:	Profils des teneurs totales en Zn, Cr et Pb dans le sol Aba(b) sous forêt	241
Figure III.12:	Fractionnement chimique du Mn	245
Figure III.13:	Profils des teneurs en argile dans les deux solums Aba(b) sous culture.	251
Figure III.14:	Relations Al-Fe dans les trois solums Aba(b) et la coupe de Tongrinne	255
Figure III.15:	Profils des teneurs en argile et en Cu, Zn, Ni et Cr dans un Aba(b) sous culture	256
Figure III.16:	Schéma de prélèvement des échantillons le long de la séquence chronospatiale	261
Figure III.17:	Profils moyens, par site de la chronoséquence, des pHH ₂ O en fonction de la profondeur	265
Figure III.18:	Profils moyens, par site de la chronoséquence, des teneurs en argile en fonction de la profondeur.	265
Figure III.19:	Profils moyens, par site de la chronoséquence, des teneurs en Ca total en fonction de la profondeur	266
Figure III.20:	Profils moyens, par site de la chronoséquence, des teneurs en Co total en fonction de la profondeur	267
Figure III.21:	Profils moyens, par site de la chronoséquence, des teneurs en Pb total en fonction de la profondeur	267
Figure III.22:	Estimation des stocks en éléments pour les sites de la chronoséquence	268
Figure III.23:	Schéma de position des fosses pédologiques dans et autour du Bois de Grand-Leez	270
Figure III.24:	Schéma de position des sondages B_d près du Bois de Buis	271
Figure III.25:	Profils des pHH ₂ O en fonction de la profondeur pour les solums mal drainés	274
Figure III.26:	Profils des teneurs en argile en fonction de la profondeur pour les solums mal drainés	275
Figure III.27:	Profils des teneurs en Co total en fonction de la profondeur pour les solums mal drainés	279
Figure III.28:	Localisation des séquences limoneuses	283
Figure III.29:	Séquences I, II et III positionnées sur la carte des sols de la Belgique	284
Figure III.30:	Séquences IV, V, VI et VII positionnées sur la carte des sols de la Belgique	285
Figure III.31:	Schéma de lecture des tableaux de résultats III.17a, b et c	287
Figure III.32:	Profils en COT -moyennes des 7 séquences	292
Figure III.33:	Profils des teneurs en argile -moyennes des sept séquences	293
Figure III.34:	Profils des TRB -moyennes des sept séquences.	294
Figure III.35:	Relation Al-Fe dans les horizons des séquences limoneuses par rapport à celle de Tongrinne	295
Figure III.36:	Profils des teneurs en Cu -moyennes des sept séquences	297
Figure III.37:	Profils des teneurs en Zn -moyennes des sept séquences	298
Figure III.38:	Profils des teneurs en Co -moyennes des sept séquences	299

Figure III.39:	Poids des variables "explicatives" dans le premier plan factoriel relatif aux horizons des séquences limoneuses	301
Figure III.40:	Relation Zn-argile dans des "sols limoneux"	304
Figure III.41:	Position des secteurs étudiés sur une carte lithologique simplifiée de la zone d'étude	306
Figure III.42:	Extrait de la carte des sols de la Belgique - séquence substratum calcaire	307
Figure III.43:	Toposéquence illustrative des relations géologie-relief-sols en secteur "limon sur calcaire"	308
Figure III.44:	Schéma des solums étudiés dans la séquence "limon sur calcaire"	309
Figure III.45:	Extrait de la Carte des sols de la Belgique - secteur substratum de shale	309
Figure III.46:	Toposéquence représentative des relations géologie-relief-sols en secteur "limon sur shale"	310
Figure III.47:	Schéma des solums étudiés dans la séquence "limon sur shale"	311
Figure III.48:	Extrait de la Carte des sols de la Belgique - secteur substratum de sable	312
Figure III.49:	Toposéquence représentative des relations géologie-relief-sols en secteur "limon sur sable"	313
Figure III.50:	Schéma des solums étudiés dans la séquence "limon sur sable"	314
Figure III.51:	Pourcentages d'horizons de surface par classe de COT et par séquence	315
Figure III.52:	Profils des teneurs en argile dans la séquence de limons sur calcaire. .	317
Figure III.53:	Profils des teneurs en sable dans la séquence de limons sur calcaire. .	317
Figure III.54:	Profils des teneurs en argile dans la séquence de limons sur shale	318
Figure III.55:	Profils des teneurs en sable dans la séquence de limons sur shale. .	318
Figure III.56:	Profils des teneurs en argile dans la séquence de limons sur sable. .	319
Figure III.57:	Profils des teneurs en sable dans la séquence de limons sur sable. .	319
Figure III.58:	Profils des teneurs en Zn dans la séquence de limons sur calcaire. .	320
Figure III.59:	Profils des teneurs en Cu dans la séquence de limons sur shale. .	321
Figure III.60:	Profils des teneurs en Pb dans la séquence de limons sur sable. .	321
Figure III.61:	Relations Al-K dans les séquences limons sur substrat, la coupe de Tongrinne et les séquences limoneuses	323
Figure III.62:	Représentation de la composition élémentaire des horizons des séquences "limons sur substrat" dans le premier plan factoriel	324
Figure III.63:	Relations Cu-Na dans les séquences des secteurs sur substrat.	325
Figure III.64:	Relations Al-Cu dans les séquences "limons sur substrat"	326
Figure III.65:	Profils des teneurs en Na dans la séquence des limons sur calcaires	327
Figure III.66 :	Exemples de solums sur shale.	327

Liste des tableaux

Troisième partie

Tableau III.1:	Evolution du pH avec l'âge du défrichement (PECROT, 1956)	220
Tableau III.2:	Description du solum Aba(b) sous forêt	233
Tableau III.3:	a) solum Aba(b) sous forêt - paramètres pédologiques classiques.....	234
Tableau III.3:	b) solum Aba(b) sous forêt - teneurs totales.	235
Tableau III.4:	Matrice de corrélation entre teneurs totales et variables "explicatives"	242
Tableau III.5:	Importances relatives des formes des éléments Al, Fe, Mn pour quelques horizons du solum Aba(b) sous forêt.....	244
Tableau III.6:	Description du solum Aba(b) cultivé - G_C	249
Tableau III.7:	Description du solum Aba(b) cultivé - I_C.....	250
Tableau III.8:	a) paramètres pédologiques classiques - solums Aba(b) cultivés	252
Tableau III.8:	b) teneurs totales - solums Aba(b) cultivés.....	253
Tableau III.9:	Matrice de corrélation entre teneurs totales et variables "explicatives" pour un solum Aba(b) sous culture.....	257
Tableau III.10:	Importances relatives des formes des éléments Al, Fe, Mn pour quelques horizons du solum G_C et l'horizon labouré d'un solum voisin	258
Tableau III.11:	Comparaison des stocks par unité de surface pour un solum forestier et un solum cultivé	259
Tableau III.12:	a) caractéristiques pédologiques de base - Bois de Buis.....	262
Tableau III.12:	b) teneurs totales - Bois de Buis	263
Tableau III.13:	Matrice de corrélation entre teneurs totales et variables "explicatives" pour les solums du bois de Buis	264
Tableau III.14:	Description du solum Aha sous forêt - G_F ₂	273
Tableau III.15:	a) paramètres pédologiques classiques - solums mal drainés.	276
Tableau III.15:	b) teneurs totales - solums mal drainés.....	277
Tableau III.16:	Matrice de corrélation entre teneurs totales et variables "explicatives" pour les solums sous culture mal drainés.....	279
Tableau III.17:	a) paramètres pédologiques classiques - séquences limoneuses-valeurs moyennes et <i>écarts-types</i> - pH, matière organique, granulométrie, CEC.....	289
Tableau III.17:	b) teneurs totales en éléments Ca, Mg, K, Na, TRB, Al, Fe	290
Tableau III.17:	c) teneurs totales en éléments: ETMs	291
Tableau III.18:	Matrice de corrélation entre teneurs totales et variables "explicatives" -séquences limoneuses.....	300
Tableau III.19:	Pertinence des facteurs pour les ETMs.....	302
Tableau III.20:	Matrice de corrélation entre teneurs totales et variables "explicatives" -"limons sur substrats"	323
Tableau III.21:	Teneurs en ETMs dans les "sols limoneux" cultivés de la zone d'étude: percentile 10 (P10), percentile 90 (P90) et nombre d'observations.....	331

Table des matières		
	<i>CHAPITRE 6 DIFFERENCIATIONS PEDOGENETIQUES</i>	217
6.1	<i>Introduction</i>	217
6.2	<i>Présentation des approches</i>	218
6.2.1	Justification de l'approche "solum"	218
6.2.1.1	Les "sols limoneux à horizon B textural"	218
6.2.1.2	La mise en culture des sols forestiers	219
6.2.1.3	Les "sols limoneux" à drainage imparfait	222
6.2.2	Justification de l'approche toposéquentielle	222
6.2.2.1	Les "sols limoneux"	222
6.2.2.2	Les transitions entre "sols limoneux" et sols de vallées	223
6.3	<i>Approche solum</i>	224
6.3.1	Matériel et méthodes	224
6.3.1.1	Situation géographique des points de prélèvement	224
6.3.1.2	Cadrage physiographique et données existantes	228
6.3.1.3	Méthodes d'analyse	230
6.3.2	Résultats et discussions	231
6.3.2.1	Un solum limoneux à B textural bien drainé sous forêt (G_F1)	231
6.3.2.2	Influence de l'occupation du sol	246
6.3.2.3	Séquence chronospatiale relative au défrichement	261
6.3.2.4	Influence du drainage	270
6.3.3	conclusions relatives à l'approche "solum"	280
6.4	<i>Approche toposéquentielle</i>	282
6.4.1	Les modèles limoneux	283
6.4.1.1	Matériel et méthodes	283
6.4.1.2	Résultats et discussions	288
6.4.1.3	Conclusions partielles	305
6.4.2	Quelques contacts limons-substrats	306
6.4.2.1	Matériels et méthodes	306
6.4.2.2	Résultats et discussions	315
6.4.2.3	conclusions partielles	325
6.4.3	conclusions relatives à l'approche toposéquentielle	328
6.5	<i>Conclusions relatives aux différenciations pédogénétiques</i>	329

Chapitre 6 Différenciations pédogénétiques

6.1 Introduction

L'importance des minéraux argileux, des oxydes et de la matière organique en tant que phases porteuses des ETMs a été rappelée au chapitre 1 et confirmée pour les deux premières phases au cours du chapitre 5. Les processus de la pédogenèse, au sens large, sont à l'origine de la différenciation verticale de ces phases porteuses à l'échelle du solum. La distribution verticale des ETMs sera dès lors conditionnée par les processus qui ont touché les phases porteuses, apports, altération et migration principalement. L'importance du type de solum sur le profil des teneurs en ETMs a déjà fait l'objet de nombreuses illustrations dans la littérature, notamment par l'intermédiaire des travaux de BAIZE (BAIZE et CHRETIEN, 1994, BAIZE, 1997; BAIZE et PAQUEREAU, 1997; BAIZE *et al.*, 1999).

Ce chapitre a un but illustratif : nous chercherons à évaluer les valeurs et les profils de teneurs en ETMs dans des solums représentatifs des séries de sols les plus fréquentes dans la zone d'étude. Mais nous essaierons également de répondre à des questions de fond. Quels ont été et quels sont les impacts des principaux processus de la pédogenèse? Les éléments étudiés suivent-ils les mêmes relations avec les phases porteuses dans les horizons des solums que dans les matériaux parentaux, *i.e.* peut-on extrapoler le fond géochimique au fond pédogéochimique? Les niveaux de contamination actuels ont-ils une influence sur l'allure des profils de teneurs?

Pour répondre à ces questions, deux approches des ETMs dans les sols ont été menées à bien: l'approche "solum" et l'approche "toposéquentielle". La première a pour objet la différenciation verticale des teneurs en ETMs à l'échelle du solum. L'influence de l'occupation du sol et celle du drainage sur la différenciation verticale seront étudiées pour des "sols limoneux à horizon B textural". L'approche "toposéquentielle" intègre à la démarche générale les processus de morphogenèse. Les sols sont organisés en fonction du relief; un modèle limoneux de plateau sera étudié en relation avec les ondulations du relief sur les plateaux et en relation avec la présence de substrats sur les versants des vallées importantes.

6.2 Présentation des approches

6.2.1 Justification de l'approche "solum"

6.2.1.1 Les "sols limoneux à horizon B textural"

Au cours de l'Holocène, sous forêt, l'évolution du climat, de froid et sec au Préboréal (10000 à 7500 BP) à tempéré humide depuis la période Subatlantique (2 700 BP), a favorisé le développement de "sols limoneux à horizon B textural" (BT) à partir des loess. Deux séries de la légende de la carte des sols de la Belgique (CSB) sont principalement concernées: les "sols limoneux" à BT non tacheté (Aba) et les "sols limoneux à BT tacheté" (Aba(b)). Dans ces derniers, l'horizon B textural présente un faciès glossique et parfois un fragipan¹. BRAHY (2000) a réalisé une synthèse intéressante de l'évolution des conceptions relatives à la pédogenèse des sols bruns lessivés, "équivalent" des "sols limoneux à horizon B textural" dans la classification CPCS. Il résume les travaux de DUDAL, de JAMAGNE, de VAN RANST et de LANGOHR *et al.*

Les deux premiers auteurs considèrent les sols dans un cadre évolutionniste en établissant des chronoséquences relativement semblables. Le sol brun lessivé n'est qu'une étape de transition dans l'altération par acidification d'un sol peu évolué sur loess vers un sol fortement dégradé (DUDAL, 1953; JAMAGNE, 1973). Le solum à BT tacheté constituerait ainsi *un état de dégradation* (sic) du solum sans taches.

Les deux auteurs, ou groupes d'auteurs, suivants partagent une vue différente particulièrement sur la genèse de l'horizon B textural dans les sols bruns lessivés. Plutôt que de dater celle-ci de la période atlantique (7 500 à 5 000 BP), ils estiment que l'horizon BT existait déjà partiellement au début de l'Holocène (10 000 BP), hérité du Tardiglaciaire.

¹ *Le fragipan est un horizon de profondeur de texture moyenne, à densité apparente élevée par rapport aux horizons qui l'entourent. Il est dur et compact lorsqu'il est sec et, à l'état humide, les unités structurales éclatent brusquement lorsqu'on les presse entre les doigts...En Europe occidentale, sa genèse semble être liée aux glaciations quaternaires... Cet horizon aurait été compacté entre le sous-sol continuellement gelé et la partie superficielle gelée pendant la période froide...*(extrait de LOZET et MATHIEU, 2002).

glossique: *qualifie un solum dans lequel la transition E/ BT ... prend la forme de langues* (AFES, 1992).

VAN VLIET-LANOË (1990) justifie cette théorie par le fait que les migrations d'argile sont plus importantes sur des sédiments récents (peu décarbonatés²) et dans des conditions de climat froid boréal que sous le climat tempéré actuel³. La genèse principale du BT est ainsi datée de l'interstade Bölling du dernier glaciaire, et le faciès glossique ne serait pas le résultat d'une dégradation par acidification mais la conséquence de phénomènes périglaciaires.

Depuis le début de l'Holocène, l'évolution du climat aurait favorisé les processus pédogénétiques principaux suivants: illuviation et décarbonation (entre 9 000 et 7 500 BP), brunification et acidification (7 500 à 5 000 BP), podzolisation (5 000 à 2 700BP - période plus froide) et anthropisation par la mise culture (depuis 2 700 BP). Les sols ont été affectés à des degrés divers par l'ensemble de ces processus, en fonction notamment du matériau parental.

La pédogenèse ne suit pas un chemin rectiligne. Les sols actuels sur loess portent en eux les traces de fluctuations climatiques antérieures.

6.2.1.2 La mise en culture des sols forestiers

Les agriculteurs depuis le Néolithique ont défriché des surfaces forestières, modifiant ainsi le fonctionnement des sols. L'importance des surfaces agricoles a fluctué au cours de l'histoire. Même si les agriculteurs omaliens (3000 BP) *pratiquaient déjà une agriculture intensive* (sic) en Hesbaye (BRULARD, 1962), dans les clairières principalement, les grands défrichements ont eu lieu à l'époque gallo-romaine, ainsi qu'aux 12^e et 18^e siècles. Les périodes troublées des grandes invasions ou des guerres locales ont bien sûr marqué un recul de l'agriculture.

Plusieurs études comparatives de solums sous forêt et sous culture ont été réalisées en Région limoneuse. Les points importants sont:

- une augmentation de la teneur en argiles de l'horizon situé directement sous l'Ap; cette augmentation est imputée à un lessivage qui serait favorisé par le pH de l'horizon labouré⁴ (d'après

² La dispersion des argiles dans l'eau n'est possible qu'à des pH compris entre 5.5 et 6.5.

³ Sous le climat tempéré actuel, le lessivage des argiles ne serait actif qu'en conditions agricoles (resaturation du complexe d'échange).

⁴ On tempérera toutefois cet argument en rappelant que de nombreux sols agricoles présentent un pH supérieur à 6.5

PECROT, 1956; DELECOUR et PHILIPPOT, 1957) et à l'érosion qui décape l'horizon de surface, lequel "rogne" progressivement le BT par les opérations de labour;

- une évolution structurale: atténuation des marmorisations et augmentation des revêtements argileux sur les faces de structure (DELECOUR et PHILIPPOT, 1957);
- une diminution de l'acidité et une resaturation du complexe d'échange suite à l'apport répété d'amendements calcaires (PECROT, 1956; DELECOUR et PHILIPPOT, 1957; HENRY et LEGRAND, 1982); les données du tableau III.1 indiquent que cinquante ans ne suffisent pas à la resaturation du complexe d'échange dans la totalité du BT;

Tableau III. 1: Evolution du pH avec l'âge du défrichement (PECROT, 1956)

Horizon	Forêt	50 ans	100 ans	18 ^{ème} siècle
Ap ou Ah	4.4	7.3	6.1	7.3
E	4.5	7.1	7.4	7.1
BT ₁	4.8	6.8	7.6	6.6
BT ₂	5.0	5.3	7.6	6.8
BT ₃	5.4	5.0	6.9	7.0
C	5.5	5.1	5.6	7.3

Concernant l'antropisation des sols par la mise en culture, LANGOHR (2001) propose un modèle d'évolution des sols de plateaux bien drainés en fonction de l'historique d'occupation. Le point de départ de sa série évolutive est un sol de la série Abc (système CSB), qu'il qualifie de "fortement dégradé" (SFD), et que l'on trouve principalement en Forêt de Soignes (sud-est de Bruxelles). Il est caractérisé par un humus de type moder, une acidité prononcée en surface, une faible activité biologique dans les horizons A et E, ainsi que par la présence d'un horizon BT de type fragipanique et/ou à glosses. LANGOHR (1990, 2001) considère que ce type de sols correspond de très près aux sols que les premiers agriculteurs ont mis en culture il y a 7 000 ans. Il attribue la présence de sols de type Aba(b) (CSB) dans le même massif forestier au pâturage forestier. Celui-ci aurait contribué par l'apport d'urines et d'excréments à un dopage de l'activité faunique, principalement celle des lombrics et des taupes. Le sol, qu'il qualifie de "moyennement dégradé sous forêt" (SMDF), présente un humus de type moder ou mull acide, des horizons A et E plus épais et un caractère fragipanique moins

développé dans la partie supérieure du BT. En milieu agricole, le même type de sol (Aba(b) - CSB), qu'il qualifie de "moyennement dégradé agricole" (SMDA), présenterait un "horizon biologiquement actif", sous l'Ap jusqu'à 60-80cm de profondeur. Le caractère fragipanique du BT ne subsisterait qu'au delà de cette profondeur. Sur les terres mises en culture de longue date, les sols "non dégradés" (SND), *i.e.* sans traces de dégradation du BT, domineraient. La disparition complète des gloses serait due à l'érosion des horizons de surface (Aba1 - CSB, "Sols non dégradés érodés" - SNDE) et à l'activité biologique intense des vers de terre et des taupes qui a malaxé le BT.

Ce schéma semble séduisant, encore que certains points méritent certainement discussion. Par rapport aux termes choisis d'abord, si l'on accepte un schéma d'évolution par anthropisation, "Sol Non Dégradé" fait plus penser à une situation de départ qu'un aboutissement; il faut toutefois reconnaître que l'objectif de LANGOHR n'est pas de créer un nouveau système de classification, mais plutôt d'intégrer le facteur anthropique dans les classifications existantes. On peut s'interroger également sur la pertinence des SFD comme référence d'une situation de départ. D'autres étendues forestières dont il y a tout lieu de croire qu'elle ne sont pas plus anthropisées que la Forêt de Soignes existent en Région limoneuse sans que les sols ne présentent un caractère fragipanique et glossique aussi marqué; d'ailleurs VAN VLIET et LANGOHR (1981) avaient fait l'hypothèse que le degré de développement des fragipans dépend des conditions de drainage et de décarbonation au moment du permafrost. Il est donc un peu dangereux de conjecturer un modèle d'évolution à partir d'une situation qui apparaît peu représentative au départ. On peut se demander également si le schéma proposé n'est pas un peu trop simpliste à certains égards: comment, par exemple, expliquer la présence de sols de type Aba(b) en milieux cultivés de longue date? Pourquoi auraient-ils été préservés tant de l'érosion que d'une activité biologique accrue? Est-il logique alors d'encore constater une différenciation texturale verticale dans les profils cultivés si les processus de bioturbation sont intenses?

Nous retiendrons néanmoins que l'anthropisation des profils par la mise en culture peut être dans certaines situations relativement importante. Cette anthropisation se marque par une resaturation du complexe d'échange, certainement également par une modification de l'activité faunique, un brassage biologique accru des horizons et

un décapage des horizons de surface par accélération de l'érosion. La mise en culture se caractérise également par des flux d'ETMs anthropiques, par les intrants, généralement faibles mais qui durent depuis des décennies.

6.2.1.3 Les "sols limoneux" à drainage imparfait

Les conditions topographiques et/ou la présence d'horizons ou de substrats peu perméables peuvent être à l'origine d'un engorgement temporaire ou permanent des sols par une nappe perchée. En région limoneuse humide, la majorité des sols sont caractérisés par un drainage imparfait. Les processus d'hydromorphie peuvent affecter les équilibres Fe^{2+} - Fe^{3+} et donc la mobilité du fer, ainsi que la dynamique de minéralisation de la matière organique dans les horizons de surface. On peut supposer que les perturbations de la dynamique des phases porteuses "FeOOH" et "matière organique" par les phénomènes d'oxydo-réduction ont une influence sur la dynamique des ETMs, comme cela a déjà été souligné par d'autres auteurs (BOURG *et al.*, 1989; ALLOWAY, 1990, 1997; CHARLATCHKA *et al.*, 1997). Nous tenterons donc par l'étude de quelques solons de déterminer si et dans quelle mesure la présence de caractères de pseudogley doit être considérée comme un indicateur de différenciation particulière des teneurs en ETMs.

6.2.2 Justification de l'approche toposéquentielle

6.2.2.1 Les "sols limoneux"

Il a été rappelé lors de la présentation du cadre de l'étude que les "sols limoneux" de plateau s'organisaient selon un modèle topographique relativement simple : "sol limoneux à horizon BT" sur les positions hautes et relativement planes \Rightarrow "sol limoneux" tronqué sur les pentes convexes \Rightarrow "sol limoneux" sans développement de profil sur les collutions des dépressions concaves. Les variantes à ce schéma concernent essentiellement des caractères morphologiques (BT tacheté ou non tacheté) ou de drainage (associations de sols "sèches", "normales" ou "humides") ; elles ne sont pas d'ordre topologique.

Quelques séquences représentatives de l'organisation des "sols limoneux" selon le relief seront étudiées, afin d'évaluer l'importance de la morphogenèse sur la distribution spatiale des ETMs.

6.2.2.2 Les transitions entre "sols limoneux" et sols de vallées

Après l'étude du modèle limoneux pour lui-même, les transitions entre les sols de plateaux et les sols de vallées seront étudiées. Dans les vallées qui entaillent les substrats, ceux-ci marquent les solums par une charge caillouteuse, une modification de la texture ou simplement leur présence à la base du solum. Des séquences représentatives des contacts entre les limons éoliens et les principaux substrats (shales, calcaires et sables) seront étudiées.

L'approche "solum" a donc pour objet des "sols limoneux à horizon BT" perçus au travers de comparaisons d'occupation de sols et de drainage. L'approche toposéquentielle visera d'une part l'illustration de l'organisation des "sols limoneux" selon leur position dans le relief et de l'impact de ces relations sur la distribution spatiale des ETMs, et d'autre part l'étude de transitions entre les "sols limoneux" de plateaux et les sols de versant.

Les "sols des plateaux et des pentes" (CSB), ainsi que ceux des "dépressions" auront été abordés au terme de ces deux approches. On pourrait considérer que manquent à cet ensemble les sols des fonds de vallées, sur alluvions. Toutefois, on se souviendra que les sédiments des cours d'eau ont déjà fait l'objet du titre 5.1.. Bien qu'il ne s'agissait pas de données originales, nous pouvons considérer qu'à l'échelle régionale ou des bassins versants, les niveaux de teneurs sont connus. Il faut toutefois reconnaître que l'inventaire MARTIN-SONDAG (1985) ne permet pas d'aborder les sols sur alluvions à l'échelle du solum.

6.3 Approche solum

6.3.1 Matériel et méthodes

6.3.1.1 Situation géographique des points de prélèvement

L'ensemble des solums décrits et échantillonnés dans le cadre de cette approche a été circonscrit à une zone relativement limitée en terme de surface, afin de réduire autant que faire se peut tout facteur éventuel de différenciation géographique. La position géographique du secteur⁵ étudié est reprise à la figure III.1.

Une analyse des documents cartographiques existants (FERRARIS, VAN DER MAELEN⁶, cartes topographiques levées à des époques différentes, orthophotoplans) a permis de délimiter spatialement l'histoire de l'occupation des sols.

Le Bois de Grand-Leez invariablement répertorié en tant que surface boisée sur ces documents a été choisi pour le creusement d'une fosse destinée à devenir la référence forestière du solum brun lessivé bien drainé (G_F₁). Situé à proximité immédiate, le Bois de Buis présente de nombreuses similitudes avec le Bois de Grand-Leez (durée d'occupation forestière, essences, types de sols...). L'existence d'études antérieures (NEF, 1977; CHAMPION et GUILITTE, 1978; LAMBERTY; 1990 dans le Bois de Grand-Leez; DELECOUR et PHILIPOT, 1957 dans le Bois de Buis) a constitué un argument supplémentaire en faveur du choix de ces sites.

Le solum forestier sera comparé à son pendant agricole, situé soit à proximité immédiate (G_C), soit à quelques kilomètres (I_C). L'influence de l'époque du défrichement a été reprise, cinquante ans après DELECOUR, autour du Bois de Buis selon l'angle des teneurs en ETMs. Le solum brun lessivé bien drainé a été échantillonné par sondages à la tarière dans quatre situations correspondant à des durées de mise culture différentes (B_F : pas de mise en culture connue; B_C₁₀₀: défrichement au début du 20^{ème} siècle; B_C₂₅₀ : défrichement depuis FERRARIS; B_C₂₀₀₀ : défrichement antérieur à FERRARIS, *circa*

⁵ Le terme "région étudiée" correspond à la surface géographique délimitée au chapitre 2; le terme "secteur" sera réservé à des entités géographiques plus locales: secteur des Bois de Grand-Leez et Bois de Buis pour ce titre; secteur des limons sur calcaire dans la suite, *etc.*

⁶ Voir informations complémentaires en annexe 6.

1750). Deux sondages distants d'une quinzaine de mètres ont été effectués dans chaque situation et les horizons prélevés en surface (Ah ou Ap), à profondeur moyenne (50 à 60cm dans le BT) et à une profondeur de 150cm (horizon C).

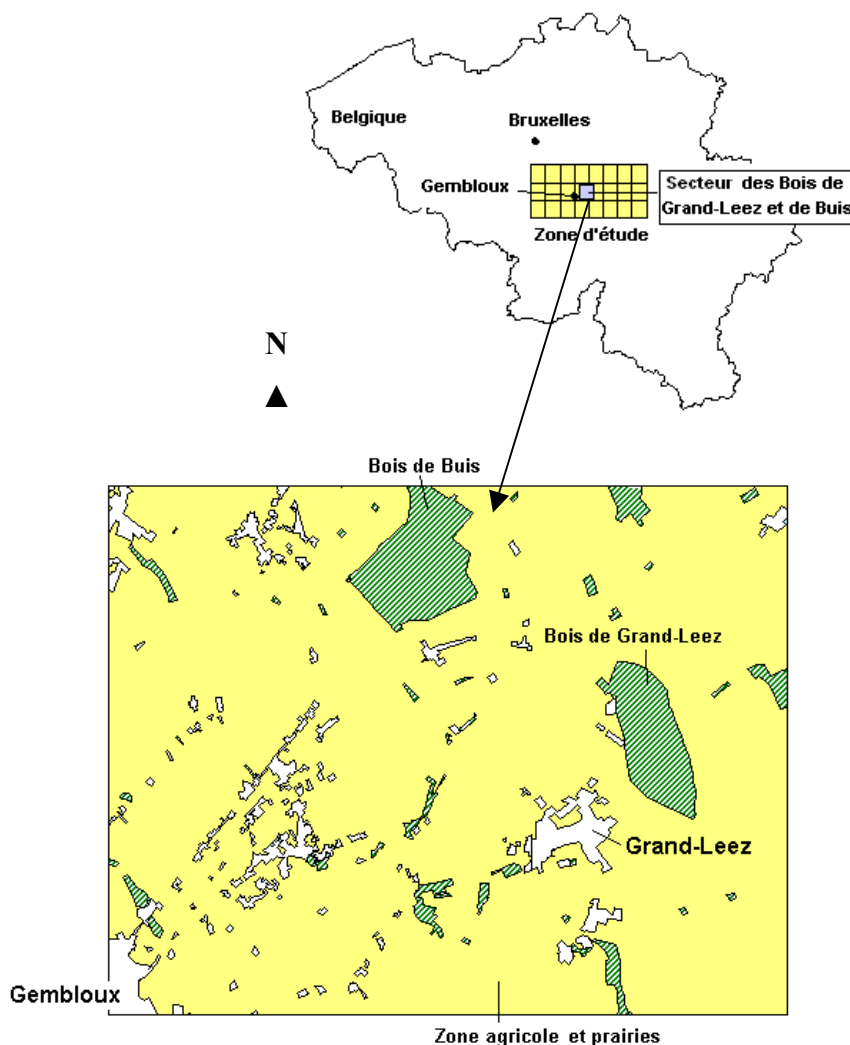


Figure III. 1:: Localisation du secteur étudié pour l'approche "solum". Occupation des sols: agricole (jaune), boisée (vert) ou habitat (blanc)

L'influence du facteur drainage sur la différenciation verticale des teneurs en ETMs a également été étudiée soit par la description et l'analyse de fosses pédologiques (G_F₂; C_C), soit par l'analyse de sondages à la tarière de cartographe (B_d; 2 sondages). Les points de prélèvement situés à l'intérieur du secteur étudié (*i.e.* tous sauf I_C et C_C qui sont

situés légèrement au sud de Gembloux) sont localisés aux figures III.2 et III.3

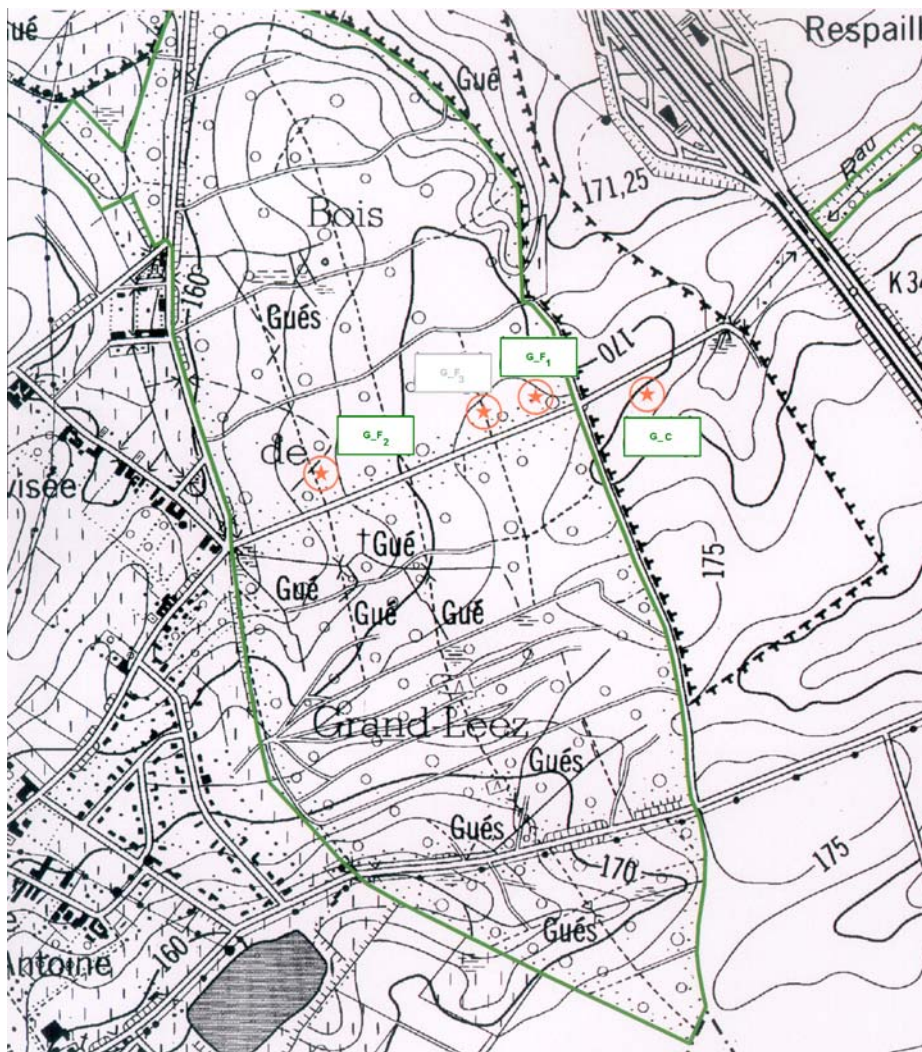


Figure III. 2: Localisation des points de prélèvement au Bois de Grand-Leez. En vert, les fosses décrites dans le texte. En gris, solum additionnel. Carte IGN 40/7. Echelle: 1/10 000.

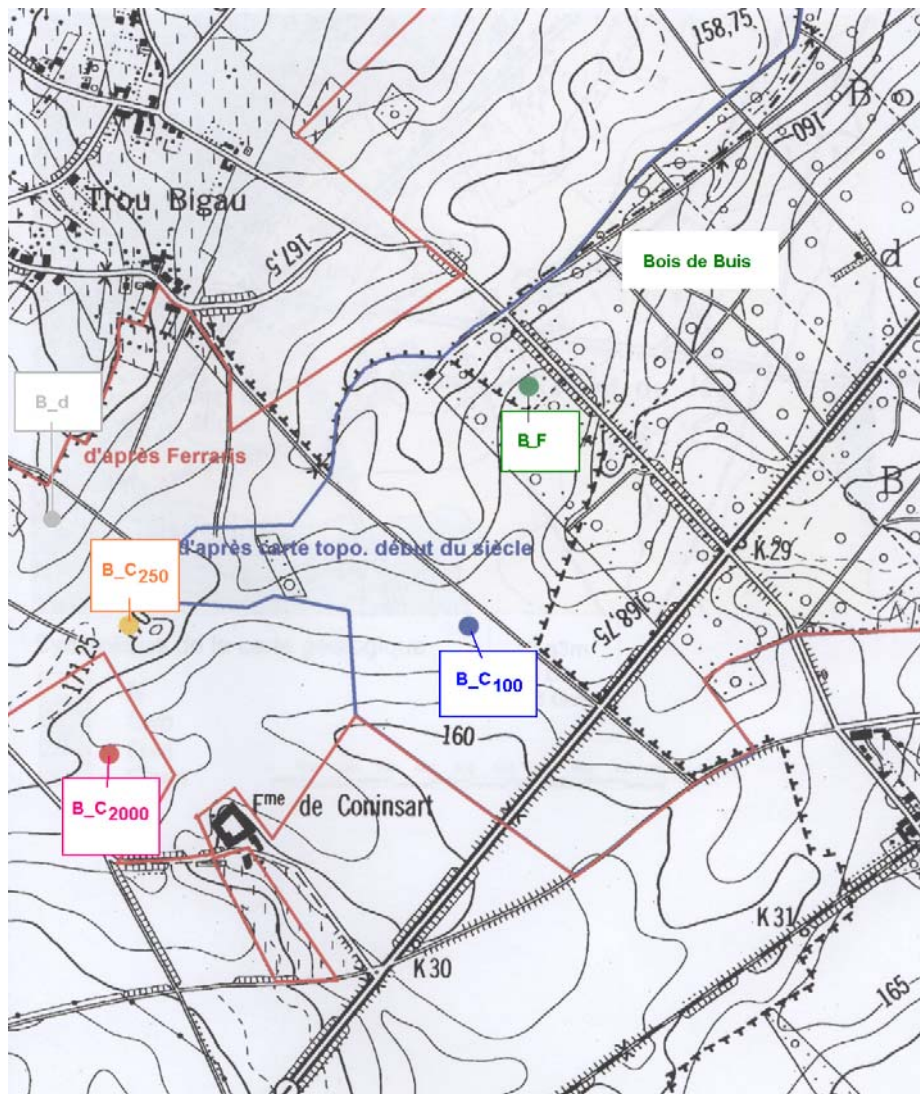


Figure III. 3: Localisation des points de prélèvement au et autour du Bois de Buis. Paires de sondages: B_F - sous forêt; B_C₁₀₀ - zone défrichée depuis moins d'un siècle; B_C₂₅₀ - zone défrichée depuis le levé de la carte de FERRARIS (1750); B_C₂₀₀₀ - zone déjà en culture à l'époque du levé de la carte de FERRARIS. B_d - sols à drainage imparfait (Ada). Fond de carte IGN 40/6.

6.3.1.2 Cadrage physiographique et données existantes

Les bois de Grand-Leez et Buis sont situés tous deux dans une zone d'interfluve entre les bassins de l'Orneau et de La Mehaigne (bassin majeur de la Meuse) et de la Gette et de la Dyle (bassin majeur de l'Escaut). Ce partage des eaux météoriques en deux bassins majeurs se réalise sur une topographie relativement plane où les vallons sont peu marqués. Les pentes sont douces et régulières interrompues par des replats et de larges dépressions humides.

D'un point de vue géostructural, l'anticlinal du Brabant, constitué de quartzites du Devillien et de shales siluriens, est surmonté de formations tabulaires cénozoïques, principalement des sables "bruxelliens". Une couverture limoneuse pléistocène pouvant atteindre plus de 15 mètres d'épaisseur sur les plateaux recouvre l'ensemble. Localement, à la base des limons, se trouve une couche argilo-sableuse peu perméable et caillouteuse, dite "panaché de base".

L'hydrologie est caractérisée par la présence d'une nappe dans les sables cénozoïques limitée à la base par les shales et les quartzites. On trouve également localement une nappe à plus faible profondeur perchée sur des couches plus argileuses dans les sables.

D'après NOIRFALISE (1981 *In* CARLETTI, 2000), la forêt naturelle sur limons de Moyenne Belgique est une chênaie mixte à Jacinthe des bois (*Endymion non-scriptus* (L.) Garcke) et Jonquille (*Narcissus pseudonarcissus* L.). Les bois de Grand-Leez et de Buis constituent *des reliques de l'antique Forêt Charbonnière qui couvrait une grande partie du pays*. Il faut garder à l'esprit que les surfaces boisées actuelles ne sont pas vierges d'activités anthropiques.

En réponse à un relief peu disséqué et à la présence de nappes superficielles, les sols à drainage imparfait sont nombreux, particulièrement dans les zones boisées. Certaines zones agricoles ont d'ailleurs fait l'objet de travaux de drainage lors de remembrements. La répartition spatiale des principales typologies de sols est présentée à la figure III.4. Les séries de la carte des sols de la Belgique (planchettes 130E et 131W) ont été regroupées par les critères "classes de drainage naturel" (b, D, F et I) et "développement de profil" (a, B, p). Les sols non limoneux, les sols sur matériaux tourbeux (V) et un ensemble qualifié de "Non Sol" (zones bâties, fosses d'extraction...) constituent trois autres groupes.

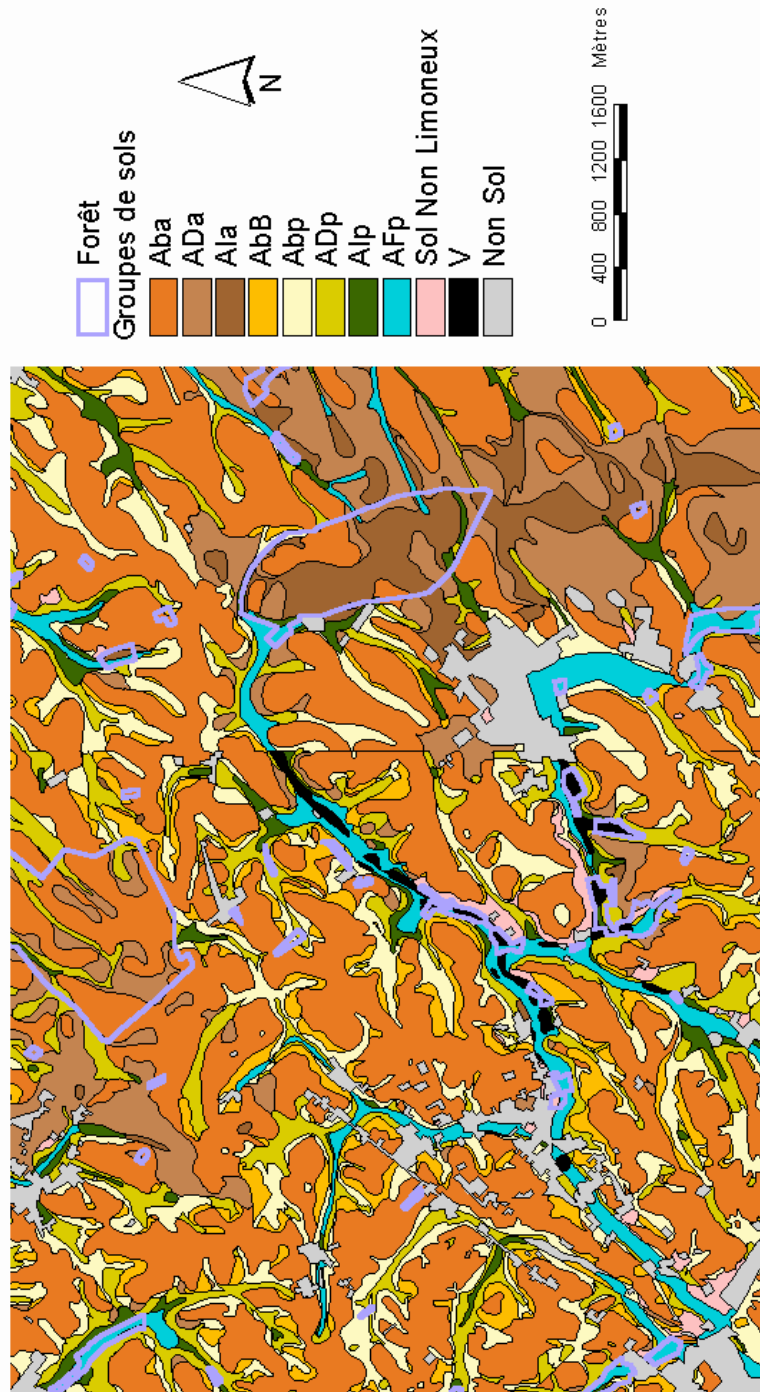


Figure III. 4: Cartographie des groupes de sols sur le secteur des Bois de Grand-Leez et de Buis.

Les études précédentes (NEF, 1977; CHAMPION et GUILITTE, 1978) dans le Bois de Grand-Leez indiquent:

- ❑ d'un point de vue morphologique, la présence de taches nombreuses dans les horizons BT ainsi que localement et plus en profondeur des niveaux riches en concrétions ferrugineuses et/ou carbonatées;
- ❑ pour les solums de type AEBC, des teneurs en argile comprises entre 12 et 15% dans les horizons supérieurs, entre 20 et 28% dans les horizons BT et de l'ordre de 20% dans les horizons C;
- ❑ des teneurs en carbone organique total de l'ordre de 4 à 6 g/100g dans les horizons Ah;
- ❑ des pH acides ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} = 4.0 - 4.5$) jusqu' à une profondeur d'au moins 120cm; mais de manière fréquente, en profondeur (de 2.5 à 5m), des horizons riches en carbonates sont trouvés;
- ❑ les nappes superficielles, par leur richesse en carbonates, sont des vecteurs de resaturation du complexe d'échange; dans les sols à faible drainage naturel ainsi que les sols de dépressions, le pH peut ainsi être proche de la neutralité à des profondeurs de 80cm.

6.3.1.3 Méthodes d'analyse

Les solums étudiés ont été décrits selon la méthodologie standardisée de description des sols de DELECOUR et KINDERMANS (1980) pour les fosses pédologiques et selon une méthodologie simplifiée (feuille en annexe 3) pour les sondages. L'échantillonnage a porté sur des horizons délimités sur base de la couleur (MUNSELL soil color chart), de la texture, de propriétés structurales (structure, compacité), de caractères redox et de traces d'activité biologique. Dans les fosses, tous les horizons ont été échantillonnés; dans les sondages, les horizons de surface, le BT et l'horizon C ont été prélevés respectivement à 0-30, 50-60 et 150-160cm.

Les caractérisations de laboratoire sont les suivantes: $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ et pH_{KCl} , carbone organique total (COT), azote total (Nt), granulométrie (neuf fractions), CEC et Cations échangeables, teneurs totales (HF) en Ca, Mg, K, Na, Al, Fe, Mn, Cu, Zn, Ni, Cr, Pb, et Co. Les protocoles d'analyse sont ceux présentés au chapitre 3.

6.3.2 Résultats et discussions

6.3.2.1 Un solum limoneux à B textural bien drainé sous forêt (G F₁)

a Présentation synthétique

Situation : Bois de Grand-Leez

Relief : Plateau, zone plane

Position : Milieu de la forme.

Lithologie : Limon quaternaire (sur sable bruxellien)

Occupation : Chênaie atlantique ancienne.

Typologie : Sol limoneux à horizon BT, à drainage normal, sur loess, de type OAEBC, acide, différencié par la couleur (noir-brun à brun -jaune terne), par l'abondance (<2 à 50%) de taches d'oxydo-réduction, par l'abondance des concrétions Fe/Mn, par la texture (limoneuse à argilo-limoneuse), par la structure (grenue, polyédrique subangulaire, massive), par la consistance (peu à très compact), par la porosité (peu poreux à poreux), par les dimensions (très fines à grosses) et l'orientation (verticale, horizontale ou oblique) des racines.

CPCS : Sol lessivé acide - sol lessivé glossique

WRB : Luvisol endofragique, hyperdystrique

RP : Luvisol Dégradé, glossique, fragique, dystrique

USDA : Fragiudalf typique

b caractères morphologiques

Les caractères morphologiques des horizons sont présentés au tableau III.2. On notera:

- l'humus de type mull indicateur d'un milieu favorable à la bioactivité;
- des horizons de surface Ah et E sans taches, peu poreux mais peu compacts; les racines sont peu nombreuses, obliques ou horizontales, et constituent les seules traces visibles d'activité biologique; les structures sont grenues en surface et polyédriques subangulaires dans l'horizon E;

- ❑ les horizons BT sont tachés d'oxydo-réduction, avec la présence de glosses blanchâtres liserées d'ocre dans l'horizon BT principal ainsi que de concrétions Fe/Mn sous forme de nodules tendres; ces caractères rédox s'accompagnent d'un accroissement important de la compacité (caractère fragipanique); les caractères glossiques et fragipaniques du profil s'ils méritent d'être soulignés n'en sont pas pour autant très spectaculaires;
- ❑ Sous le BT, les caractères rédox et structuraux s'atténuent progressivement avec la profondeur;
- ❑ Les taches sont absentes des horizons C et la structure y est massive.

Par sa morphologie, le solum décrit ici présente des caractères du lessivage⁷ (E et BT) mais également de processus renseignés dans les classifications comme relevant de la dégradation (glosses et fragipans). Ces derniers étant peu marqués, le solum Aba(b) correspond à un intergrade entre des sols de type luvisol ou sol brun lessivé typiques et des sols dégradés "typiques".

⁷ Même si les revêtements argileux sur les faces de structure et dans les pores ne sont pas des plus développés!

Tableau III. 2: Description du solum Aba(b) sous forêt.

<p>Caractères morphologiques Aba(b) sous forêt</p>	
<p><u>Horizon O:</u> litière peu épaisse</p>	<p>0 à 10 cm : limon noir-brun (7,5YR 2/2), sans taches, humifère; présentant une structure grenue, peu compact; peu poreux; racines peu nombreuses, très fines à grosses horizontales ou obliques.</p>
<p><u>Horizon Ah1:</u></p>	<p>10 à 46 cm : limon brun terne devenant brun-jaune terne (7,5 à 10YR 5/4), sans taches, à structure polyédrique subangulaire peu nette; peu compact, peu poreux; racines peu nombreuses distribuées irrégulièrement.</p>
<p><u>Horizons E:</u></p>	<p>46 à 114 cm : limon lourd brun-terne (7,5YR 5/4), à taches d'OR nombreuses (20 à 50%) irrégulières et également sous forme de langues verticales dans la partie inférieure, 10% de concrétions ferromanganiques tendres; structure polyédrique subangulaire de haut en bas compact et poreux puis très compact et moins poreux avec dans l'ensemble des horizons une porosité très fine; racines très peu nombreuses principalement de taille moyenne et de direction oblique et horizontale dans le Bt supérieur et verticale dans le Bt inférieur.</p>
<p><u>Horizons B/C:</u></p>	<p>114 à 140 cm : limon lourd brun-terne (7,5YR 5/4), taches et concrétions d'OR moins nombreuses (2 à 20% 5% respectivement); structure polyédrique subangulaire ou angulaire; très compact et peu poreux; peu de racines fines à moyennes et obliques.</p>
<p><u>Horizons C:</u></p>	<p>140 à plus de 180 cm : limon brun-jaune terne (10YR 5/4), à taches d'OR (2 à 20%) et concrétions (< 2%) diminuant avec la profondeur; structure massive; compact; à pores très fins devenant plus nombreux en profondeur; racines très peu nombreuses, fines et obliques.</p>



Tableau III. 3: a) Solum Aba(b) sous forêt - paramètres pédologiques classiques.

Horizon Prof (cm)	pH		Mat. organique		Granulométrie			Complexe d'échange				V (%)	
	(H ₂ O)	(KCl)	COT g/100g	Nt g/100g	Argile 0-2μ	Limons 2-50μ	Sable > 50μ	CEC	Ca cmol/kg	Mg cmol/kg	K cmol/kg		Na cmol/kg
Ah	3.6	3.0	6.8	0.40	15.5	75.8	8.7	22.6	1.42	0.36	0.38	0.06	9.8
E ₁	4.0	3.2	1.4	0.12	15.2	76.9	7.9	9.5	0.66	0.15	0.23	0.03	11.1
E ₂	4.1	3.5	1.2	0.08	10.9	82.4	6.8	7.4	0.26	0.10	0.25	0.02	8.5
E ₃	4.0	3.5	0.7	-	10.7	80.7	8.6	6.4	0.14	0.06	0.17	0.02	6.1
BT ₁	4.1	3.5	0.1	-	13.1	80.7	6.3	6.4	0.22	0.09	0.20	0.09	9.4
BT ₂	4.0	3.3	0.1	-	19.4	75.2	5.4	10.6	0.34	0.21	0.30	0.00	8.0
BT ₃	4.1	3.3	0.1	-	26.8	63.5	9.7	13.3	0.47	0.26	0.39	0.04	8.7
BT ₄	4.3	3.2	0.1	-	23.0	70.8	6.2	13.0	1.39	0.66	0.38	0.08	19.1
B/C ₁	4.5	3.3	0.2	-	20.0	76.4	3.6	13.1	3.19	1.68	0.35	0.06	40.1
B/C ₂	4.6	3.3	0.2	-	21.4	69.5	9.1	12.7	3.55	2.29	0.28	0.10	49.1
C ₁	4.7	3.4	0.0	-	19.3	72.7	8.1	12.7	3.98	2.37	0.21	0.18	53.1
C ₂	4.7	3.4	0.1	-	22.9	69.0	8.2	12.5	4.05	2.33	0.21	0.08	53.4
Amplitude de variation													
Profil	1.10	0.50	6.8	0.32	16.1	18.9	6.1	16.2	3.91	2.31	0.22	0.18	47.1
ppds*	0.2	0.2	0.3	N.D.	2.0	4.0	3.2	2.9	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

* ppds: plus petite différence significative ($\alpha=0.05$); N.D.: Non Déterminé

b) Solum Aba(b) sous forêt - teneurs totales (HF).

Horizon Prof (cm)	Teneurs totales															
	Ca	Mg	K	Na	TRB	Al	Fe	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co		
	g/100g				cm ol.kz	g/100g				mg/kg						
Ah	0-10	0.23	0.21	1.51	0.61	94.2	3.36	1.57	220.9	16.5	52.3	14.1	32.2	124.5	4.3	
E ₁	10-20	0.23	0.28	1.64	0.64	104.7	3.93	1.52	332.7	9.4	39.1	-	47.2	33.1	5.0	
E ₂	20-35	0.23	0.25	1.67	0.67	104.3	3.73	1.52	447.5	6.2	37.5	8.8	57.0	15.0	6.8	
E ₃	35-45	0.23	0.24	1.64	0.65	101.8	4.08	1.63	452.3	6.5	38.1	10.7	65.8	11.3	9.7	
BT	1	45-60	0.23	0.34	1.67	0.65	110.9	4.50	1.91	524.4	8.7	45.6	19.9	53.7	11.8	8.9
BT	2	65-72	0.20	0.42	1.77	0.59	116.0	5.01	2.59	406.7	11.4	57.2	24.2	50.7	11.7	10.0
BT	3	72-90	0.18	0.49	1.85	0.61	123.8	5.35	2.96	508.1	14.9	70.2	25.8	69.1	12.0	14.1
BT	3	90-115	0.21	0.52	1.82	0.61	127.0	5.68	3.07	506.7	15.4	71.5	26.6	51.3	11.2	10.2
B/	C ₁	115-140	0.26	0.56	1.91	0.67	137.8	5.62	2.84	460.4	17.3	65.3	28.1	35.2	14.0	11.1
B/	C ₂	140-150	0.28	0.51	1.83	0.66	132.1	5.41	2.85	430.3	15.7	56.1	28.1	51.1	12.2	12.2
C ₁	150-165	0.29	0.5	1.69	0.67	128.6	5.32	2.7	411.8	15.1	52.5	27.7	41.1	12.3	10.5	
C ₂	165-175	0.32	0.5	1.82	0.71	135.2	5.21	2.74	465.3	16.3	51.6	28.1	46.3	12.0	6.8	

Amplitude de variation

Profil	0.14	0.35	0.40	0.12	43.6	2.32	1.55	308.5	11.1	34.0	19.3	36.9	113.3	9.8
ppds*	0.07	0.07	0.21	0.11	N.D.*	0.68	0.30	58.4	2.6	7.5	11.8	28.3	7.0	2.9

* ppds: plus petite différence significative ($\alpha=0.05$); N.D.: Non Déterminé.

c caractéristiques pédologiques de base

Les résultats des déterminations analytiques des paramètres classiques figurent au tableau III.3.a.

Les pH traduisent un caractère très acide jusqu'à 115cm et acide plus profondément. Le pH_{H_2O} montre une diminution lente et constante de l'acidité avec la profondeur (figure III.5). Le profil du pH_{KCl} indique une grande homogénéité de ce paramètre à cette échelle.

Les teneurs liées à la matière organique affichent également une évolution en sens unique avec la profondeur. Les COT et Nt sont concentrés en surface (6.8 et 0.40g/100g, respectivement) et la diminution avec la profondeur se fait de manière d'abord brusque (Ah à E) puis graduelle dans l'horizon E (figure III.5 pour COT). A partir du BT, les teneurs sont très faibles.

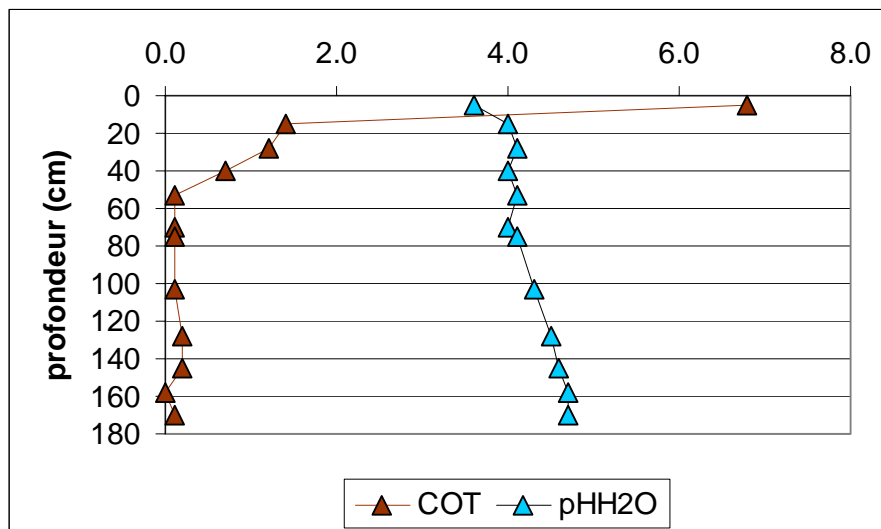


Figure III. 5: Profils du pH et du COT (g/100g) dans le sol Aba(b) sous forêt.

Les analyses granulométriques indiquent des teneurs en argile du même ordre de grandeur que les études précédentes (NEF, 1977; CHAMPION et GUILITTE, 1978), des teneurs en limons comprises entre 65 et 80% (soit les teneurs "typiques" des loess) et des teneurs en sables inférieures à 10%. Le profil des teneurs en argile (figure III.6) présente le ventre caractéristique des sols à horizon B textural. Les teneurs en argile sont légèrement plus élevées dans l'horizon Ah que dans les horizons E. De moins de 15% en surface, les teneurs dans les BT atteignent plus de

25% pour 20% dans les horizons C.

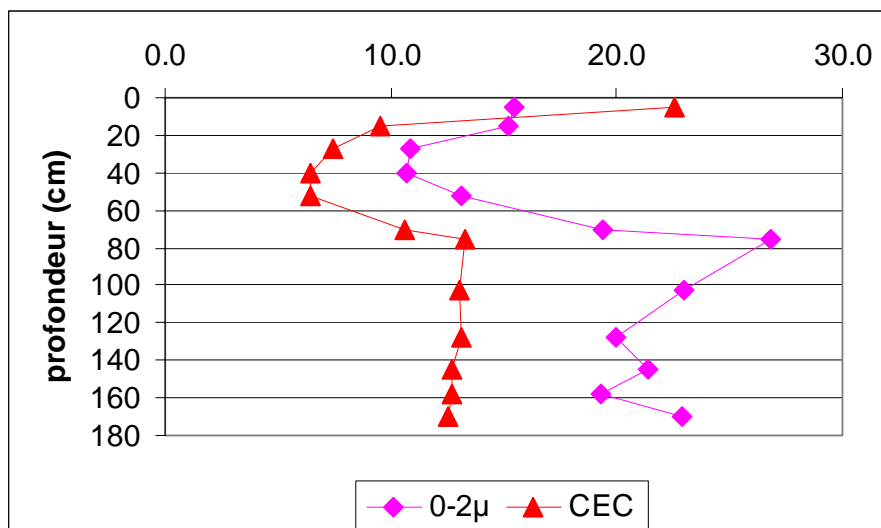


Figure III. 6: Profils de la teneur en argile (g/100g) et de la CEC (cmolc/kg) dans le sol Aba(b) sous forêt.

La CEC présente un profil sous la double influence de COT et de la teneur en argile (figure III.6). En surface, les deux contribuent à une CEC supérieure à 20 cmol_c/kg; en profondeur les teneurs évoluent parallèlement à celles de l'argile entre 6.5 et 13.3 cmol_c/kg. En profondeur, les ordres de grandeur sont les mêmes que ceux des horizons du Membre du Brabant de la coupe de Tongrinne.

Les teneurs en cations échangeables sont relativement faibles dans les horizons Ah, E et BT; le taux de saturation inférieur à 20% dans ces horizons leur vaut le qualificatif "désaturé" (AFES, 1992). Sous le BT, les teneurs en Ca et Mg échangeables sont plus élevées et le taux de saturation est proche de 50% (limite entre oligo- et méso-saturé -AFES, 1992).

Les paramètres pédologiques classiques sont ceux d'un sol à horizon BT, acide et largement désaturé dans sa partie supérieure (A-E-BT). La partie inférieure (B/C-C) est légèrement moins acide et nettement moins désaturée. Les teneurs en argile et CEC de la partie inférieure sont très proches de celles des horizons «brabantiens» de la coupe de Tongrinne.

d teneurs totales en éléments

Les teneurs totales en éléments (tableau III.3.b) montrent des amplitudes de variation supérieures aux ppds pour tous les éléments sauf Na. Les teneurs en Ca ne sont toutefois pas très différenciées non plus (figure III.7). Si pour Na, les teneurs mesurées sont du même ordre de grandeur, les teneurs en Ca dans le sol forestier sont de moitié inférieures à celles de Tongrinne. Les teneurs en Mg et K montrent des profils ressemblants, *i.e.* augmentation de la teneur avec la profondeur et maximum dans les horizons BT (figure III.7). Les ordres de grandeur des teneurs en ces deux éléments dans les horizons B/C à C sont les mêmes que ceux des horizons «brabantiens» de la coupe de Tongrinne.

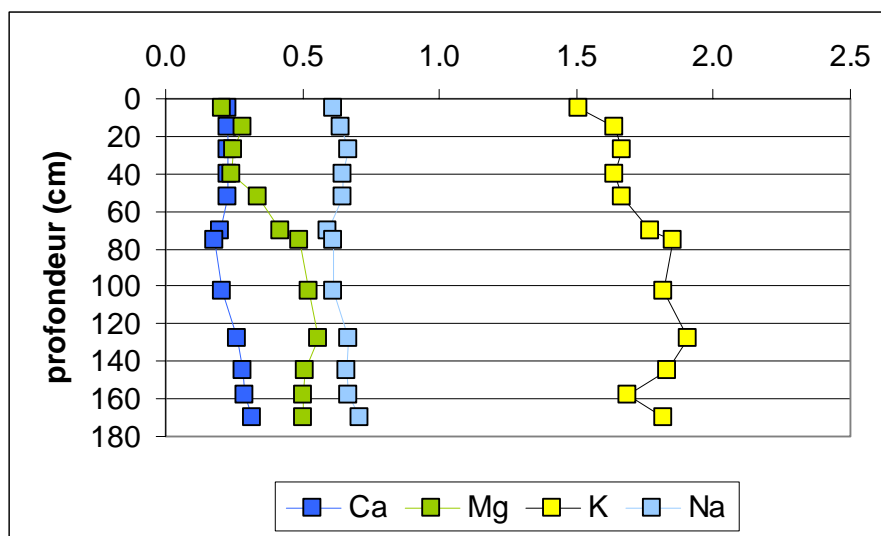


Figure III. 7: Profils des teneurs totales en Ca, Mg, K et Na dans le sol Aba(b) sous forêt.

La TRB, paramètre de synthèse pour les éléments Ca, Mg, K et Na, augmente progressivement avec la profondeur. BRAHY (2000) la considère comme un indicateur de l'altération en milieu forestier. Sur ce profil (très) acide, la TRB et le $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ semblent liés de manière linéaire (figure III.8). Toutefois, au sein d'un solum, la TRB n'exprime pas seulement le niveau d'altération mais également les processus de lessivage, car une partie de Mg et K "accompagne" les argiles.

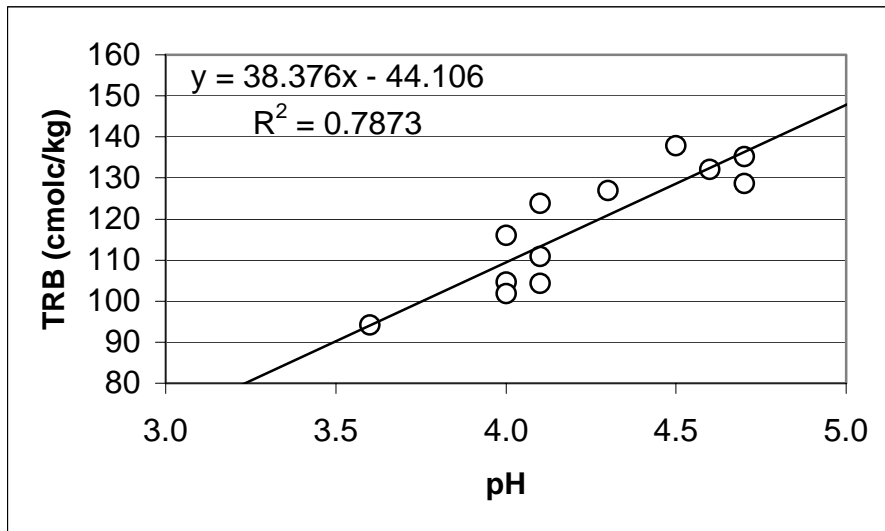


Figure III. 8: Relation entre TRB (cmolc/kg) et pH_{H_2O} dans le profil Aba(b) sous forêt.

Les teneurs en Al et Fe présentent des profils remarquablement parallèles (figure III.9) et semblables à celui de la teneur en argile, à l'exception de Al dans l'horizon de surface. Les niveaux de teneurs des horizons C sont proches de ceux des horizons "brabantiens" de la coupe de Tongrinne.

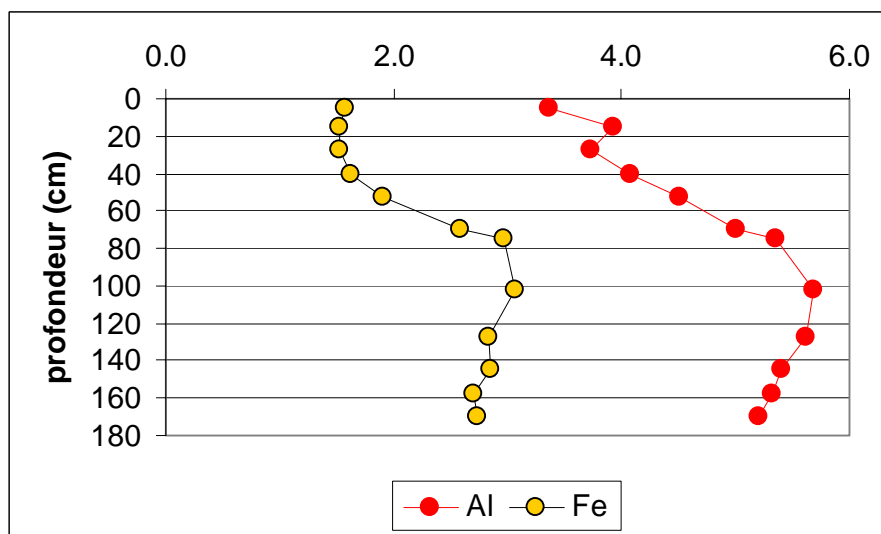


Figure III. 9: Profils des teneurs totales en Al et Fe (g/100g) dans le sol Aba(b) sous forêt.

Les teneurs en Mn sont très faibles en surface, plus élevées au sein du E, maximales dans le BT et légèrement inférieures sous celui-ci.

Les profils de teneurs en éléments traces sont présentés aux figures III.10 et III.11, en fonction des ordres de grandeur des teneurs.

Les éléments Cu, Zn et Ni présentent des évolutions semblables à celle de la teneur en argile, voire de la CEC pour Cu dont les teneurs en surface sont supérieures à celles dans l'horizon BT. Les ordres de grandeur des teneurs en ces éléments sont les mêmes dans ce solum et dans le Membre du Brabant à Tongrinne.

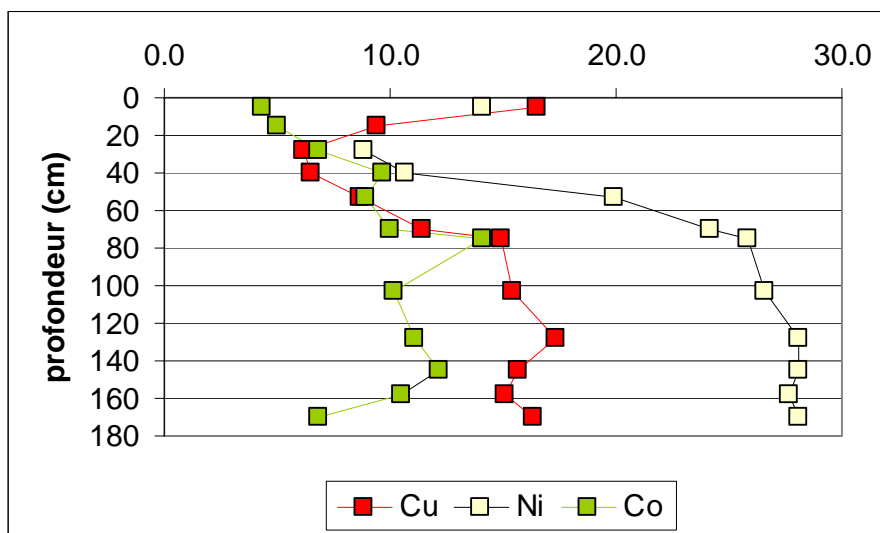


Figure III. 10: Profils des teneurs totales en Cu, Ni et Co (mg/kg) dans le sol Aba(b) sous forêt.

Les teneurs en Cr sont délicates à interpréter en raison des problèmes analytiques qui sont liés à cet élément. On peut néanmoins affirmer que les différences sont significatives entre l'horizon humifère et le BT le plus riche en argile. Les teneurs des horizons sous le BT semblent intermédiaires. On retrouverait donc un profil proche de celui de l'argile.

Le profil en Co, aux ordres de grandeur près, est très semblable à celui de Cr. Pour ces deux éléments, en plus de la relation avec l'argile, il faut mentionner de faibles teneurs en surface, comme pour Mn. Faut-il y voir une sensibilité plus grande à l'altération ou l'effet d'une mobilisation accrue aux faibles pH? La question reste entière pour l'instant. En tout état de cause, les teneurs dans le solum sous forêt semblent inférieures à celles de la coupe de Tongrinne.

Pour ce qui concerne Pb, on constate une accumulation très forte dans l'horizon de surface. Les teneurs diminuent au sein de l'horizon E mais à partir de 40cm les teneurs n'évoluent plus en fonction de la profondeur. La forte affinité entre Pb et la matière organique a déjà été largement démontrée par de nombreux auteurs; ceci en est une illustration supplémentaire. Les retombées atmosphériques constituent l'origine la plus probable de Pb en surface.

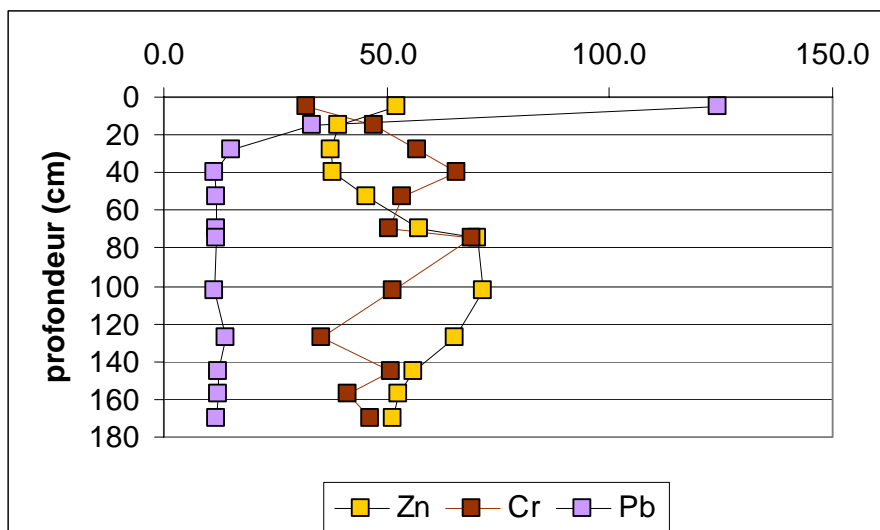


Figure III. 11: Profils des teneurs totales en Zn, Cr et Pb (mg/kg) dans le sol Aba(b) sous forêt

Les teneurs en "bases" et la TRB sont nettement inférieures à celles mesurées sur les horizons du Membre du Brabant à Tongrinne, à l'exception de Na. Il en est de même pour Mn et Pb et un doute subsiste pour Cr. On retrouve les relations habituelles avec l'argile le long des profils. Toutefois les éléments Mg, K, Al, Cr et Co présentent en surface des teneurs plus faibles par rapport au pourcentage d'argile. On peut y voir les conséquences d'une altération plus poussée, d'une mobilisation accrue aux faibles pHs, d'un prélèvement par la végétation, voire d'un artefact de laboratoire (surestimation de la teneur en argile) dû à la quantité de matière organique dans l'horizon Ah. Mais dans ce dernier cas, comment expliquer l'accumulation relative de Cu, de Zn et surtout de Ni dans l'horizon Ah par rapport aux horizons E?

e relations entre variables

Les relations entre les variables sont synthétisées au tableau III.4. D'un point de vue strictement statistique, les relations linéaires avec l'argile sont significatives pour les éléments Mg, K, Al, Fe, Cu, Zn et Ni. Dans l'étude régionale des horizons C "brabantiens", les relations pour ces éléments étaient meilleures avec la fraction granulométrique "0-10 μ m". Ce n'est pas le cas pour ce solum. Une relation linéaire avec le pH_{H2O} existe pour certains éléments, elle est partiellement due au gradient commun de pH et de teneur en argile entre les horizons de surface et le BT. Pour Ca et Mg, toutefois, la relation avec le pH est confirmée par leur niveau de teneur sous forme échangeable. Parmi les relations linéaires significatives avec le taux de carbone organique, seule celle avec Pb est positive et exprime pleinement leur forte affinité. On notera toutefois un indice de liaison entre Cu et COT par l'entremise de la CEC. Mn présente comme précédemment un profil singulier. Il semble particulièrement sensible aux conditions d'acidité régnant dans les horizons de surface, conditions qui renforce le caractère réducteur du milieu. Cr et Co sont les éléments les mieux liés à Mn.

Tableau III. 4: Matrice de corrélations entre teneurs totales (HF) et variables "explicatives" (N = 12).

	"0-2"	"0-10"	">50 μ m"	pH _{H2O}	COT	CEC	TRB	Al	Fe	Mn
Ca				0.739						
Mg	0.838	0.814		0.794	-0.623		0.975	0.981	0.967	
K	0.740	0.735		0.663	-0.709		0.892	0.896	0.863	0.659
Na				0.680						
Al	0.801	0.773		0.756	-0.705		0.940			
Fe	0.900	0.875		0.675			0.907	0.968		
Mn					-0.845	-0.609		0.613		
Cu	0.790	0.843				0.785	0.654	0.596	0.715	
Zn	0.865	0.885					0.644	0.768	0.861	
Ni	0.858	0.820		0.709			0.911	0.924	0.945	
Cr						-0.613				0.590
Pb				-0.617	0.987	0.758		-0.616		-0.855
Co					-0.647		0.612	0.765	0.735	0.654

Degré de signification: $\alpha < 0.001$; $\alpha < 0.01$; $\alpha < 0.05$

Pour ce qui concerne Cr, dont la variabilité opératoire a déjà été jugée surestimée pour la coupe de Tongrinne, il se confirme que les résultats

méritent une attention particulière. La variabilité opératoire provient essentiellement de la mise en solution⁸, et lorsque l'on dispose d'un cadre d'interprétation (un solum avec un nombre d'horizons limité par exemple), des relations avec d'autres variables peuvent être supposées, même si certaines mesures "coincident". D'un solum à un autre, si les mêmes tendances peuvent être dégagées c'est la convergence des arguments plutôt que les statistiques qui doit guider les conclusions.

f formes de l'aluminium, du fer et du manganèse

Les résultats du fractionnement chimique par extraction séquentielle figurent au tableau III.5, sous forme de proportions par rapport au total extrait.

Comme pour la coupe de Tongrinne, les formes I et II (respectivement interprétées comme fractions adsorbées sur le complexe d'échange et fractions liées aux oxydes de Mn peu cristallisés) sont très peu importantes par rapport au total, pour Al et Fe (< 2%).

Pour Al, le profil de la forme III (censée extraire les formes liées à la matière organique et les oxydes de petite taille) présente une augmentation importante dans le BT par contre, les formes IV (liées aux oxydes amorphes) et V (liée aux oxydes cristallisés) sont globalement du même ordre de grandeur d'un horizon à un autre. L'essentiel de Al (> 75%) est sous forme la forme VI ("silicates").

Pour Fe, bien que les teneurs soient peu élevées, les profils des formes I et II montrent la même évolution, à savoir des teneurs plus faibles vers la profondeur. Pour ce qui concerne la forme III, le constat est le même. Les teneurs pour les formes IV et V sont les moins élevées dans l'horizon E et les teneurs plus élevées mesurées en profondeur sont plus importantes pour les oxydes "cristallisés" que pour les "amorphes". La forme "silicates" compte pour la moitié des formes extraites, ce qui est inférieur aux résultats pour Tongrinne (55 à 70%, sauf dans la couche de Warneton).

Pour Mn, la forme I représente 5 à 8% du total, en profondeur et 14% en surface. Toutefois en valeur absolue, les teneurs dans l'horizon Ah ne sont pas différentes de celles de l'horizon E (figure III.12). L'importance de la forme II (30 à 40% à Tongrinne) est confirmée pour le solum forestier sauf pour l'horizon de surface (3%).

Tableau III. 5: Importances relatives (en %) des formes des éléments Al, Fe, Mn

⁸ Car la relation entre dosage AAS et ICP dans les jus d'extraction est linéaire!

(fractions I: Na-acétate, II: Hydroxylamine-HCl, III: Na-pyrophosphate, IV: Tamm, V: Hydroxylamine-HCl 90°C, VI: triacide) pour quelques horizons du solum Aba(b) sous forêt.

	Al-I	Al-II	Al-III	Al-IV	Al-V	Al-VI
Ah ₁	0.3	0.0	7.8	0.9	2.1	88.9
E ₂	0.7	0.4	8.1	1.1	3.0	86.7
BT ₂	0.7	0.2	15.9	1.4	3.2	78.6
C ₁	0.2	0.1	11.1	1.6	3.5	83.5
	Fe-I	Fe-II	Fe-III	Fe-IV	Fe-V	Fe-VI
Ah ₁	1.4	1.8	30.7	9.7	9.8	46.6
E ₂	0.4	0.9	26.9	6.1	11.2	54.5
BT ₂	0.0	0.5	22.8	4.3	16.7	55.6
C ₁	0.0	0.6	21.0	6.7	21.6	50.0
	Mn-I	Mn-II	Mn-III	Mn-IV	Mn-V	Mn-VI
Ah ₁	14.4	3.0	18.3	13.5	7.7	43.1
E ₂	7.7	30.0	27.6	8.4	4.3	22.0
BT ₂	6.4	35.1	19.9	10.6	7.2	20.8
C ₁	4.9	39.4	19.0	8.3	7.7	20.6

La forme III de Mn présente sa concentration absolue la plus faible dans l'horizon de surface et la plus élevée dans l'horizon E (figure III.12). Par contre, les profils des formes IV, V et VI ne sont guère différenciés. La différence relative entre l'horizon Ah et les horizons sous-jacents s'explique simplement par les différences de teneurs totales. Pour Mn, la différenciation majeure concerne la forme II qui est nettement plus basse dans l'horizon de surface.

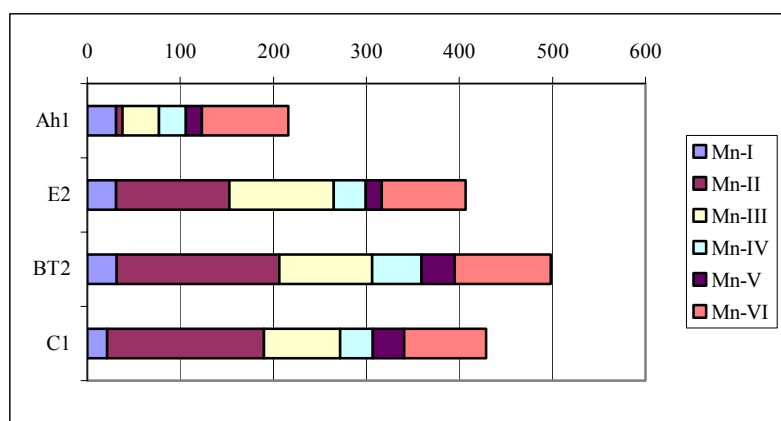


Figure III. 12: Fractionnement chimique du Mn (fractions I: Na-acétate, II: Hydroxylamine-HCl, III: Na-pyrophosphate, IV: Tamm, V: Hydroxylamine-HCl 90°C, VI: triacide) pour quelques horizons du solum Aba(b) sous forêt. Teneurs absolues en mg/kg.

Plusieurs indices convergent vers l'identification de phénomènes d'altération actifs en milieu forestier. On constate en effet en surface une augmentation des teneurs des formes I et II de Fe et la quasi-disparition de la forme II de Mn, interprétée comme les oxydes de Mn peu cristallisés. En outre, les proportions des formes "silicates" de Fe et Al ont diminué par rapport à celles observées à Tongrinne, au profit des formes III principalement.

L'augmentation des teneurs dans le BT suite au lessivage est également manifeste pour les formes III (Al, Fe), IV (Al, Mn), V (Al, Fe, Mn) et VI (Fe).

g conclusions partielles

L'analyse du solum Aba(b) sous forêt confirme l'importance de l'argile en tant que phase porteuse pour Mg, K, Al, Fe, Cu, Zn et Ni, ainsi que le comportement singulier de Mn. Par rapport au fond géochimique, deux dimensions ont été ajoutées aux facteurs de variation, la matière organique et l'acidité. Sur ce solum, l'accumulation dans les horizons hémi-organiques est évidente pour Pb et supposée pour Cu. Deux flux principaux, considérés sur une longue période et associés à une rétention accrue de la part de la matière organique, ont pu engendrer cette accumulation : le cycle biogéochimique forestier et les retombées atmosphériques. L'effet de l'acidité est le plus manifeste pour les «bases» et pour Al, Fe, Mn et Co. Toutefois, cet effet se superpose partiellement au lessivage des argiles.

6.3.2.2 Influence de l'occupation du sol

a Deux solums limoneux à horizon B textural bien drainés sous culture - présentation synthétique

Les profils G_C, en bordure du Bois de Grand-Leez, et I_C, légèrement au sud du domaine des Bois de Grand-Leez et de Buis sont présentés de manière synthétique ci-après.

a.1. profil G_C - Aba(b)

Situation : Parcelle cultivée à l'est du Bois de Grand-Leez

Relief : Plateau, zone plane

Position : Bordure.

Lithologie : Limon quaternaire (sur sable bruxellien)

Occupation : culture (betterave). **Défrichement entre 1770 et 1845.**

Typologie : Sol limoneux à horizon B textural, à drainage normal, sur loess, de type AEBC, peu structuré, différencié par la couleur (brun à brun-jaune), par la texture (limoneuse à limono-argileuse), par l'abondance (0 à 50%) et la forme (arrondie ou langues verticales) des taches et concrétions d'oxydo-réduction, par la structure (grumeleuse, polyédrique subangulaire ou massive), par la consistance (compact à très compact), par l'abondance (peu nombreux à nombreux) et la dimension (très fins à larges) des pores et par la présence de traces d'activités biologiques (galeries de lombrics, charbon de bois).

CPCS : Sol brun lessivé

WRB : Luvisol épifragique, hypereutrique

RP : Luvisol Dégradé, fragique, resaturé, agrique.

USDA : Fragiudalf typique

a.2. Profil I_C - Aba(b)

Situation : Mazy

Relief : Plateau, zone plane

Position : Milieu de la forme.

Lithologie : Limon quaternaire (sur calcaire frasien)

Occupation : Culture (céréale). **Défrichement avant 1770.**

Typologie : Sol limoneux à horizon B textural, à drainage normal, sur loess, de type ABC, sol peu structuré, différencié par la couleur (brun à brun-jaune), par la texture (limoneuse à limono-argileuse), par l'abondance (0 à 50%) et la forme (arrondie ou langues verticales) des taches et concrétions d'oxydo-réduction, par la structure (polyédrique subangulaire ou massive), par la consistance (compact à peu compact), par l'abondance (très peu nombreux à nombreux) et la dimension (très fins à larges) des pores et par l'abondance de traces d'activités biologiques (galeries de lombrics peu nombreuses à nombreuses).

CPCS : Sol brun lessivé

WRB : Luvisol épifragique, hypereutrique

RP : Luvisol Dégradé tronqué, resaturé, agrique

USDA : Fragiudalf typique

b caractères morphologiques

Les caractères morphologiques des deux solums agricoles sont présentés aux tableaux III.6 et III.7.

Ces deux solums ont en commun:

- pour l'horizon labouré, l'épaisseur, proche de 30cm, ainsi que les caractères brun-jaune terne, compact et la présence de débris inorganiques (briques et charbon de bois pour G_C, amendements et graviers calcaires pour I_C);
- un BT limoneux-lourd, brun brillant, tacheté d'oxydo-réduction, à faciès glossique,
- des horizons de transition B/C, sur une épaisseur de plus de 50cm, présentant des taches d'oxydo-réduction et 5 à 10% de concrétions Fe/Mn tendres;
- des horizons C limoneux, brun-jaune (10YR) à structure massive.

Les caractères distinctifs majeurs des deux solums sont:

- la proportion de taches plus élevée dans le solum I_C,
- un profil plus argileux en surface pour I_C en raison d'un degré de troncature du solum plus important dont témoigne la profondeur de l'horizon C moins grande dans le solum I_C que dans le G_C,
- une porosité supérieure et une compaction moindre dans le solum I_C en raison d'une activité biologique (lombrics) plus grande.

Bien que les deux solums aient un certain nombre de caractères communs, propres à la série Aba(b), il peuvent être distingués au niveau de la phase dans le système CSB. Le solum G_C correspond à un Aba(b)0 (horizon A épais), tandis que le solum I_C est à ranger dans les Aba(b)1 (horizon A mince).

Tableau III. 6: Description du solum Aba(b) cultivé - G_C

Caractères morphologiques - Aba(b) sous culture



Horizons Ap:

0 à 28/30 cm, limon brun-jaune terre (10YR 4/3) ; humifère; contenant des débris et résidus végétaux en lit horizontal; à structure grumeleuse; compact et poreux (nombreux pores, moyens et larges), présence de débris de briques et de charbon de bois.

Horizons BT:

de 28/30 à 105 cm, limon lourd brun terre à brillant (7,5YR 5/4 à 5/6); taches d'oxydo-réduction arrondies -maximum entre 80 et 95 cm- et en langues verticales; de 2 à 5% de concrétions ferromanganiques irrégulièrement distribuées; structure polyédrique subangulaire, très compact, peu poreux à poreux; galeries de lombrics dans la partie supérieure.

Horizons B/C:

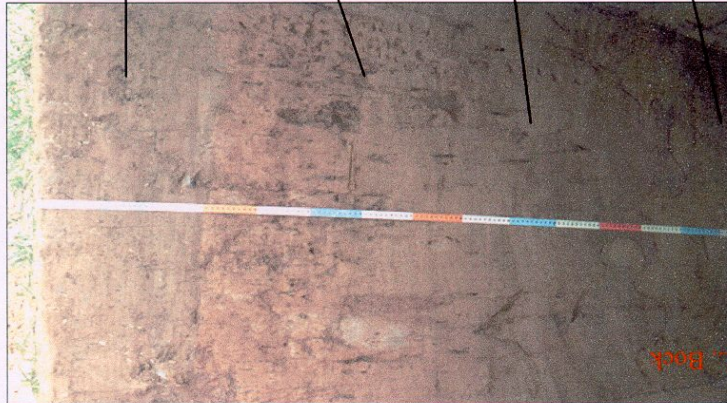
de 105 à 159 cm, limon brun terre (7,5YR 5/4); à taches d'oxydo-réduction principalement arrondies dispersées sur l'ensemble de la surface; concrétions ferro-manganiques (5 à 10%); structure massive, très compact, poreux (pores fins à très fins).

Horizon C:

> 159 cm, limon brun-jaune (10YR 5/4); sans taches, quelques concrétions ferromanganiques, structure massive; présence de comblements argileux dans des pores de taille moyenne à large, très compact, peu poreux.

Tableau III. 7: Description du solum Aba(b) cultivé - I_C

<u>Caractères morphologiques - Aba(b) sous culture</u>	
<i>Horizons Ap:</i>	(0 à 29/31 cm) : limon brun-jaune terne (10YR4/4), humifère, taches de décapage, structure polyédrique angulaire à subangulaire, compact, peu poreux, racines peu nombreuses et très fines, traces d'activité biologique peu nombreuses (résidus de récoltes, galeries de lombrics), présence localisée de nodules carbonatés, 2 à 5% de gravier calcaires.
<i>Horizons BT:</i>	(29/31 à 54/58) limon lourd brun brillant (7,5YR5/6), très nombreuses taches d'oxydo-réduction irrégulières et en langues verticales, 2 à 5% de concrétions tendres de Fe-Mn, structure polyédrique subangulaire, compact, poreux (pores nombreux très fins à larges), racines très peu nombreuses, nombreuses galeries de lombrics.
<i>Horizons B/C:</i>	(54/58 à 111/130 cm) limon lourd brun-jaune brillant (10YR5/6), nombreuses taches d'oxydo-réduction de forme irrégulière, 5 à 10% de concrétions tendres de Fe-Mn, structure polyédrique subangulaire, compact, peu poreux, racines et traces d'activités biologiques très peu nombreuses.
<i>Horizons C:</i>	> 111/130 cm, limon brun-jaune brillant (10YR 6/6); très nombreuses taches d'oxydo-réduction, 2 à 5% de concrétions tendres de Fe-Mn, structure massive; peu compact, pores nombreux et très fins, Ni racines ni traces d'activité biologique.



c caractéristiques pédologiques de base

Les paramètres pédologiques classiques figurent au tableau III.8.a.

Les pH_{H_2O} sont neutres pour le solum G_C et basiques pour le solum I_C. Le profil de pH_{H_2O} dans ce dernier est très homogène et traduit une gestion des intrants carbonatés plus régulière dans ce site. Le profil des pH dans le solum G_C présente lui une décroissance en profondeur; les valeurs restent néanmoins supérieures à celles des horizons du solum sous forêt.

Les teneurs en carbone sont logiquement toujours plus élevées en surface qu'en profondeur. Toutefois, les niveaux de teneur dans les horizons labourés sont ceux de la base des horizons E du solum forestier. La raison réside évidemment dans l'homogénéisation et la densification des horizons de surface par le labour. Les teneurs inférieures dans l'horizon labouré du solum I_C sont compatibles avec un niveau d'érosion plus important. Les rapports C/N sont de l'ordre de 10.

Les profils des teneurs en argile marquent clairement la présence d'un BT avec un maximum d'argile vers 50cm de profondeur (figure III.13). La différenciation surface-BT est plus importante pour le solum G_C, par contre, la différenciation BT-C est plus importante pour le solum I_C. Ceci se conçoit aisément si le solum I_C est tronqué.

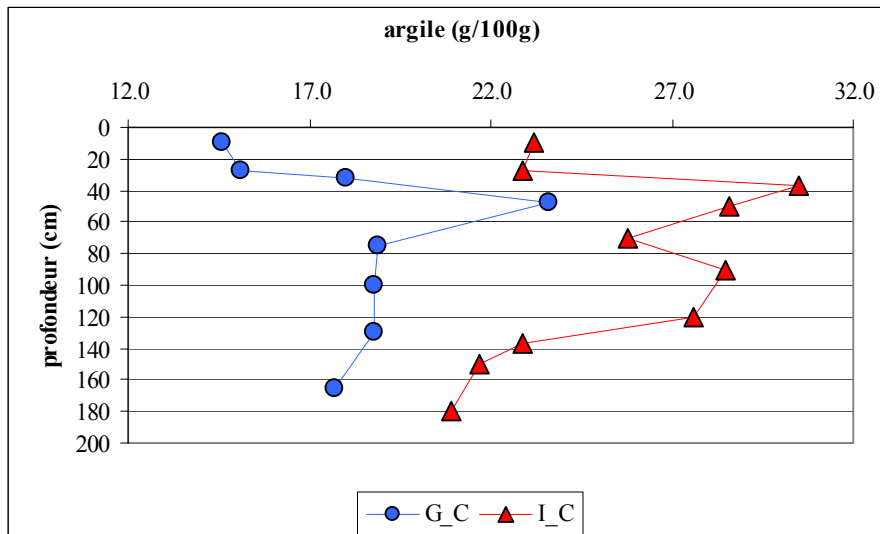


Figure III. 13: Profils des teneurs en argile dans les deux solums Aba(b) sous culture.

Tableau III. 8: a) Paramètres pédologiques classiques - solums A(b) cultivés

Horizon	pH (H ₂ O)	pH (KCl)	COT g/100g	Nt g/100g	Argile 0-2µ	Limons 2-50µ	Sable >50µ	CEC	Ca cmol/kg	Mg	K	Na	V (%)	
G C	Prof (cm)													
Ap ₁	0-20	6.7	5.9	1.2	0.12	14.6	78.9	6.6	12.1	10.11	0.73	0.64	0.20	96
Ap ₂	25-30	7.1	5.9	1.1	0.09	15.1	81.3	3.7	-	-	-	-	-	-
BT ₁	30-35	7.4	5.8	-	-	18.0	79.5	2.6	10.7	9.82	0.70	0.37	0.20	sat
BT ₂	35-60	7.6	5.8	-	-	23.6	73.6	2.9	-	-	-	-	-	-
BT ₃	60-90	7.3	5.3	0.3	-	18.9	78.8	2.4	-	-	-	-	-	-
BT ₄	95-105	6.9	4.4	0.1	-	18.8	78.0	3.2	12.2	9.47	1.64	0.18	0.40	95
B/C ₁	115-145	6.7	4.5	-	-	18.8	66.2	15.0	-	-	-	-	-	-
C ₁	160-170	6.1	4.4	0.1	-	17.7	79.3	3.1	12.2	8.59	2.33	0.34	0.40	95
I_C														
Ap ₁	0-22	7.9	6.8	0.8	0.10	23.2	70.3	6.5	12.2	12.55	0.75	0.52	0.13	sat
Ap ₂	22-30	7.9	7.0	1.0	0.09	22.9	70.3	6.8	12.5	13.42	0.85	0.49	0.06	sat
BT ₁	30-44	8.0	6.5	0.6	-	30.5	61.9	7.6	14.1	14.20	1.16	0.37	0.19	sat
BT ₂	44-56	8.0	6.4	0.3	-	28.6	63.0	8.4	13.1	13.94	1.11	0.21	0.17	sat
B/C ₁	56-80	8.0	6.4	0.2	-	25.8	67.2	7.0	11.4	11.49	0.91	0.02	0.11	sat
B/C ₂	80-98	7.9	6.3	0.3	-	28.5	68.5	3.0	11.9	12.89	1.03	0.02	0.03	sat
B/C ₃	111-130	7.9	6.3	0.1	-	27.6	66.9	5.5	12.3	12.52	1.32	0.08	0.07	sat
C ₁	130-143	7.9	6.3	0.0	-	22.9	68.2	8.9	10.3	9.31	1.30	0.00	0.05	sat
C ₂	143-156	7.8	6.3	0.0	-	21.7	67.7	10.6	10.6	8.67	1.41	0.01	0.11	96
C ₃	>172	7.7	6.2	0.0	-	20.9	66.3	12.8	11.3	8.23	1.52	0.00	0.11	87
Amplitude de variation														
G_C		1.5	1.5	1.1	0.03	9.0	15.1	12.6	1.5	1.52	1.63	0.46	0.20	8.C
I_C		0.3	0.8	1.0	0.01	9.6	8.4	9.8	3.8	5.97	0.77	0.52	0.16	31
ppds*		0.2	0.2	0.3	N.D.	2.0	4.0	3.2	2.9	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.I

* ppds: plus petite différence significative ($\alpha=0.05$); N.D.: Non Déterminé; sat.: complexe saturé en bases

b) Teneurs totales (HF) - solums Aba(b) cultivés

Horizon	Prof (cm)	Teneurs totales													
		Ca	Mg	K	Na	TRB	Al	Fe	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co
G ₁ C		g/100g				cmol.kg	g/100g				mg/kg				
Ap ₁	0-20	0.42	0.35	1.75	0.64	122.9	4.30	2.07	530.9	12.6	59.5	17.8	63.1	24.3	8.3
Ap ₂	25-30	0.45	0.38	1.74	0.68	128.3	4.37	2.21	534.2	11.2	60.6	17.0	64.1	20.2	8.5
B ₁	30-35	0.39	0.41	1.81	0.62	127.0	4.94	2.47	474.2	13.3	52.2	19.1	70.4	15.3	9.3
B ₂	35-60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B ₃	60-90	0.42	0.53	1.97	0.69	145.7	5.48	2.93	540.4	15.7	53.2	25.2	52.6	13.0	10.5
B ₄	95-105	0.38	0.52	1.83	0.80	144.0	4.69	2.55	541.2	15.2	50.1	26.4	64.5	12.6	10.2
B/C ₁	115-145	0.48	0.47	1.68	0.72	137.5	4.74	2.49	398.3	13.6	46.3	35.9	65.5	14.3	8.4
C ₁	160-170	0.43	0.5	1.73	0.77	141.0	5.01	2.67	471.75	11.7	47.6	26.9	50	13.1	10.1
I ₁ C															
Ap ₁	0-22	0.44	0.39	1.73	0.70	129.3	4.12	2.46	467.0	15.5	70.9	23.3	33.8	-	-
Ap ₂	22-30	0.45	0.40	1.76	0.71	131.8	4.52	2.42	474.2	15.3	65.9	25.1	45.0	-	-
B ₁	30-44	0.39	0.50	1.79	0.70	137.5	4.64	2.89	423.2	17.4	67.0	31.2	48.3	-	-
B ₂	44-56	0.39	0.47	1.71	0.70	132.9	5.11	2.93	466.8	16.6	61.6	34.3	46.5	-	-
B/C ₁	56-80	0.39	0.47	1.67	0.57	126.3	5.00	2.69	440.9	15.5	53.9	27.2	38.3	-	-
B/C ₂	80-98	0.40	0.52	1.82	0.71	140.9	5.47	2.95	488.3	17.4	62.3	30.5	43.1	-	-
B/C ₃	111-130	0.49	0.55	1.86	0.71	148.9	5.51	2.84	508.5	15.7	70.7	31.6	54.1	-	-
C ₁	130-143	0.34	0.38	1.57	0.71	119.8	4.42	2.32	416.7	12.6	47.7	25.3	49.3	-	-
C ₂	143-156	0.36	0.38	1.55	0.70	119.8	4.39	2.37	405.9	12.6	54.0	25.2	48.9	-	-
C ₃	>172	0.37	0.38	1.54	0.71	120.5	4.29	2.25	345.7	11.8	54.9	22.9	39.6	-	-
Amplitude de variation															
G ₁ C		0.10	0.18	0.29	0.18	22.8	1.18	0.86	142.9	4.5	14.3	18.9	20.4	11.7	2.2
I ₁ C		0.15	0.17	0.32	0.14	29.1	1.39	0.70	162.8	5.6	23.2	11.4	20.3	0.15	0.17
ppds*		0.07	0.07	0.21	0.11	N.D.*	0.68	0.30	58.4	2.6	7.5	11.8	28.3	7.0	2.9

* ppds : plus petite différence significative ($\alpha=0.05$); N.D.: Non Déterminé.

Les teneurs en sables sont relativement constantes (3 à 4g/100g dans le solum G_C et 5 à 10g/100g dans le I_C), à quelques exceptions près.

Les teneurs en COT étant nettement inférieures à celle de l'horizon de surface sous forêt, les variations de la CEC sont principalement conditionnées par les variations de la teneur en argile.

Par leurs teneurs en cations échangeables, chacun des deux solums peut être qualifié de "saturé" et de "calcique" ($Ca^{++} / Mg^{++} > 5$; AFES, 1992) sur toute l'épaisseur du profil. Les teneurs en Ca et K échangeables diminuent de la surface vers la profondeur, celles en Mg augmentent tandis que celles en Na sont stables ou augmentent.

Les caractérisations pédologiques de base montrent donc deux solums à horizon B textural, l'un neutre, l'autre basique. Par rapport au solum forestier, les différences principales résident dans le mélange des horizons de surface et le caractère saturé des profils du complexe d'échange. Ce qui est conforme aux résultats des études antérieures.

d teneurs totales en éléments

Les amplitudes de variation des teneurs totales en éléments (Tableau III.8.b) sont toutes supérieures aux indices de variabilité (ppds), à l'exception des "classiques" Ni, Cr et Co. L'intérêt d'investiguer en deçà des limites des ppds pour Ni et Cr a déjà été évoquée; l'analyse des profils sera donc réalisée pour tous les éléments.

D'une manière générale, les teneurs en "bases" sont peu différenciées à l'échelle des solums agricoles, particulièrement Ca et Na. Pour Ca, cela s'explique par la resaturation progressive du complexe d'échange (10cmol_c/kg de Ca^{++} correspondent à peu près à 0.2 g/100g de terre, soit la différence entre les horizons du solum sous forêt et ceux des solums sous culture). Pour Na, cela s'explique par l'unicité du matériau parental. Les teneurs en Mg et K présentent des profils proches de ceux de l'argile.

Les profils des teneurs en Al et Fe sont à nouveau très semblables entre eux et également par rapport aux profils des teneurs en argile. Les relations Al-Fe sont linéaires pour les deux solums sous culture et semblables à celle mesurée à Tongrinne (figure III.14).

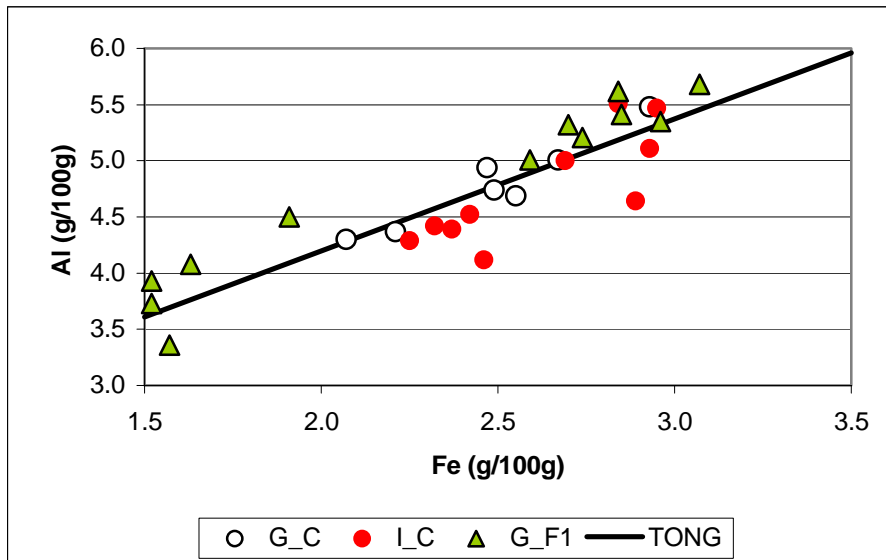


Figure III. 14: Relations Al-Fe dans les trois solums Aba(b) et la coupe de Ton-grinne.

Les teneurs en Mn sont globalement du même ordre de grandeur dans les horizons supérieurs jusqu'à 100 (G_C) à 120cm (I_C). Les niveaux de teneurs sont en moyenne supérieurs pour le solum G_C.

Les profils des teneurs en Cu, Zn, Ni, Cr et Co sont similaires à ceux de l'argile (figure III.15). Toutefois, des teneurs plus élevées (que celles que laisseraient prévoir les teneurs en argile) sont constatées pour Zn en surface. Les teneurs en Pb sont homogènes en profondeur et plus élevées en surface.

On notera que les teneurs en Cr diffèrent d'un ordre de grandeur entre G_C et I_C, mais pour chaque solum une relation linéaire existe avec l'argile.

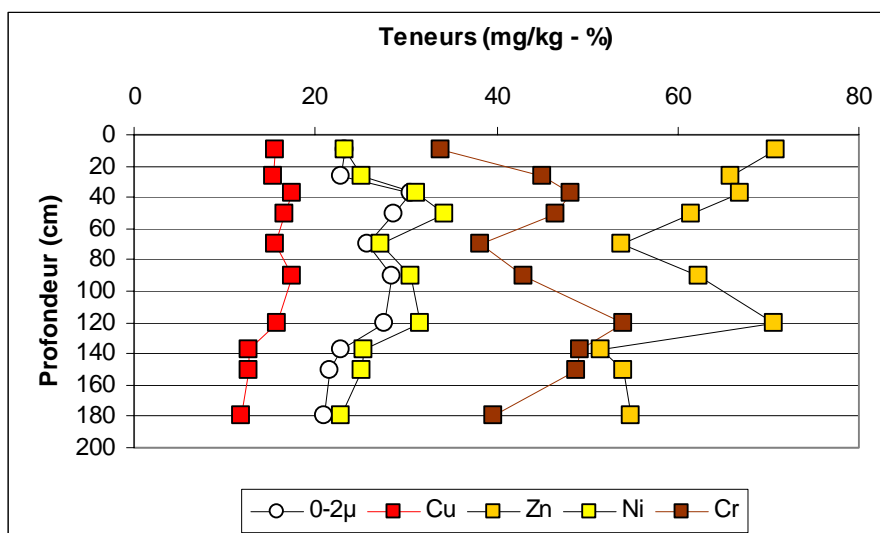


Figure III. 15: Profils des teneurs en argile (%) et en Cu, Zn, Ni et Cr (mg/kg) dans un Aba(b) sous culture (I_C).

D'une manière quasi-générale, les ordres de grandeur des éléments dans les horizons BT à C sont les mêmes pour les solums agricoles et le solum forestier. Font exception Ca (apports agricoles), Mn et Cr (problèmes opératoires). Pour ce qui concerne l'horizon de surface, l'accumulation du Pb se confirme et on constate une accumulation également pour Zn. L'enrichissement de l'horizon labouré en Zn est un constat relativement banal, car déjà signalé lors d'autres études.

e Relations entre variables

Les relations entre teneurs élémentaires et variables "explicatives" sont évaluées en terme de signification statistique au tableau III.9.

On notera:

- le caractère significatif des relations avec "0-2μm" et "0-10μm" pour Mg, K, Al, Fe, Cu, Ni et Co;
- le caractère "diluant" de la fraction ">50μm";
- les relations entre COT, Zn et Pb;
- l'opposition entre éléments liés à l'argile et éléments qui s'accumulent en surface, qui trouve à s'exprimer sur des solums de type "lessivé".

Tableau III. 9: Matrice de corrélation entre teneurs totales (HF) et variables "explicatives" pour un solum Aba(b) sous culture.

	"0-2"	"0-10"	>50 μ m	pH _{H2O}	COT	CEC	TRB	Al	Fe	Mn
Ca		0.577					0.751			
Mg	0.834	0.875	-0.672				0.890	0.899	0.756	
K	0.635	0.891	-0.822			0.707	0.957	0.632		
Na										
Al	0.693	0.697	-0.646				0.762		0.706	
Fe	0.940	0.827	-0.603	0.700		0.665	0.802	0.706		0.736
Mn				0.578			0.784		0.736	
Cu	0.893	0.925	-0.770	0.774		0.790	0.787		0.895	0.651
Zn		0.693			0.668	0.734	0.777			0.652
Ni	0.919	0.800		0.648		0.606	0.712	0.780	0.897	
Cr										
Pb	-0.946				0.968		-0.858	-0.763	-0.882	
Co		0.803			-0.958		0.798	0.782	0.853	

Degré de signification: $\alpha < 0.001$; $\alpha < 0.01$; $\alpha < 0.05$

f formes de l'aluminium, du fer et du manganèse

Le fractionnement de Al, Fe et Mn a été réalisé sur quelques horizons du solum G_C. Les résultats du tableau III.10 ressemblent très fort à ceux obtenus sur la coupe de Tongrinne.

On constate en effet:

- la faible importance des formes I et II pour Al et Fe;
- des proportions d'Al proches de 90% pour la fraction "silicates";
- des ordres de grandeur pour les horizons de profondeur semblables à ceux de Tongrinne pour l'ensemble des formes de Fe et Mn;

Par contre, les horizons de surface des solums agricoles présentent des caractéristiques intermédiaires entre celles du solum forestier et celles de Tongrinne pour Fe et Mn (surtout), résultat du mélange des horizons de surface par le labour.

Tableau III. 10:: Importances relatives (en %) des formes des éléments Al, Fe, Mn (fractions I: Na-acétate, II: Hydroxylamine-HCl, III: Na-pyrophosphate, IV: Tamm, V: Hydroxylamine-HCl 90°C, VI: triacide) pour quelques horizons du solum G_C (Aba(b) sous culture) et l'horizon labouré d'un solum voisin (*).

	Al-I	Al-II	Al-III	Al-IV	Al-V	Al-VI
Ap ₁	0.0	0.1	5.7	2.0	3.7	88.5
BT ₃	0.0	0.0	6.8	1.4	3.1	88.6
B/C ₂	0.0	0.1	6.7	1.2	2.7	89.3
Ap*	0.0	0.2	5.6	3.7	4.2	86.3
	Fe-I	Fe-II	Fe-III	Fe-IV	Fe-V	Fe-VI
Ap ₁	0.0	0.6	16.1	14.1	15.4	53.9
BT ₃	0.0	0.4	14.4	9.8	17.8	57.6
B/C ₂	0.0	0.3	14.8	5.1	16.3	63.4
Ap*	0.0	0.4	17.0	16.5	12.0	54.1
	Mn-I	Mn-II	Mn-III	Mn-IV	Mn-V	Mn-VI
Ap ₁	11.0	37.8	15.9	14.6	5.8	14.9
BT ₃	3.8	36.5	20.5	12.2	7.1	19.8
B/C ₂	5.6	36.5	17.2	8.1	7.0	25.5
Ap*	4.8	37.9	17.7	21.9	3.5	14.2

g évaluations de stocks par unité de surface

Lorsque l'on compare les concentrations dans les horizons de surface de solums forestiers avec ceux des solums cultivés, se pose le problème de changement de support⁹. Dans le cas présent, l'horizon Ah du profil G_F₁ présente une épaisseur de 10cm et une densité inférieure à celle de l'horizon Ap du solum G_C voisin.

Nous avons dès lors effectué une estimation des stocks par unité de surface pour ces deux solums. Pour ce faire, nous avons virtuellement mélangé les horizons supérieurs du solum forestier en tenant compte de leur épaisseur et de densités estimées par type d'horizon (d'après des données personnelles confirmées par BRAHY *et al*, 2000a). Les stocks en Fe ont été utilisés comme valeurs de référence, *i.e.* le stock forestier doit se rapprocher le plus possible du stock agricole. Les résultats figurent au tableau III.11.

⁹ Le problème peut se poser également lorsque l'on compare entre des horizons labourés de solums cultivés si leur densité apparente est trop différente.

Tableau III. 11 : Comparaison des stocks par unité de surface pour un solum forestier et un solum cultivé.

G_F ₁	Epaisseur (cm)	Densité	Fe (kg/ha)	Cu (kg/ha)	Zn (kg/ha)	Pb (kg/ha)	Co (kg/ha)	COT (kg/ha)
Ah1	10	1.0	15 700	16.5	52.3	124.5	4.3	68 000
E1	10	1.1	16 720	10.3	43.0	36.4	5.5	15 400
E2	10	1.1	16 720	6.8	41.3	16.5	7.5	13 200
E3	15	1.1	26 895	10.7	62.9	18.6	16.0	11 550
BT	1	1.4	2 674	1.2	6.4	1.7	1.2	140
Stocks			78 709	45.6	205.8	197.7	34.5	108 290
G_C								
Ap	30	1.3	80 730	49.1	232.0	94.8	32.4	46 800
Stock G_F ₁ /Stock G_C			0.97	0.93	0.89	2.09	1.07	2.31

Les rapports des stocks estimés forestiers et agricoles indiquent (i) de faibles différences pour Cu, Zn (légèrement plus en milieu agricole) et Co (légèrement plus en forêt) et (ii) des stocks de COT et de Pb plus de deux fois plus élevés en forêt qu'en zone cultivée. Pour ces deux éléments, la différence correspond presque au stock de l'horizon Ah.

La mise en culture des zones boisées s'est donc accompagnée d'une diminution sévère des stocks de matière organique, par érosion et par minéralisation principalement. Pour ce qui concerne Pb, on peut penser que la différence de stock est à la fois absolue (migrations) et relative (diminution des apports et de la rétention du Pb exogène après la mise en culture).

h conclusions partielles

Deux solums Aba(b) agricoles ont été décrits, échantillonnés et analysés. Ces deux solums se distinguent d'un point de vue morphologique par l'intensité des taches dans le BT, l'activité lombricole et le degré de "troncature" des horizons de surface. Les niveaux de pH différent également, un solum étant neutre, l'autre basique. Les caractérisations pédologiques classiques confirment que l'impact majeur de la mise en culture concerne la resaturation du complexe d'échange par Ca^{++} principalement. Pour ce qui concerne l'impact agricole sur les teneurs totales en éléments, on constate une augmentation significative de Ca, due à l'augmentation de la forme échangeable, une accumulation légère de Zn en surface et une diminution importante du stock de Pb en relation avec celui de la matière organique. Pour le reste, les relations "classiques" entre éléments et phases porteuses restent d'application.

6.3.2.3 Séquence chronospatiale relative au défrichement

a présentation de la séquence

L'étude de l'influence de la mise en culture sur les propriétés de sols à horizon BT a été prolongée en tentant de maîtriser le facteur "durée de mise en culture". Pour ce faire, une séquence chronospatiale a été délimitée autour du Bois de Buis, à partir de l'analyse de l'historique d'occupation des sols sur base des documents cartographiques existants. En 1957, DELECOUR et PHILIPPOT avaient déjà étudié l'évolution de caractéristiques chimiques des sols en fonction de l'époque de défrichement autour du Bois de Buis, mais au nord-est du bois. Les sites retenus sont localisés à la figure III.3; leur agencement spatial ainsi que les horizons prélevés sont schématisés à la figure III.16.

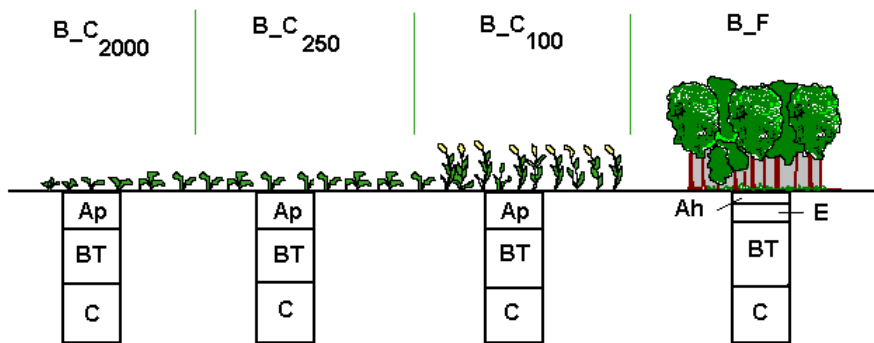


Figure III. 16: Schéma de prélèvement des échantillons le long de la séquence chronospatiale.

Quatre sites ont été retenus: le Bois de Buis (B_F); une première ceinture autour du bois défrichée au début du siècle (B_C₁₀₀); un deuxième anneau défriché depuis 1770 (B_C₂₅₀) et une zone défrichée avant 1770 (B_C₂₀₀₀). En chacun des sites deux sondages ont été effectués et des prélèvements réalisés dans chacun des types d'horizons (Ah, E, Ap, BT, C).

b caractéristiques pédologiques de base, teneurs totales et relations entre éléments et variables "explicatives".

Les résultats des déterminations "classiques" figurent au tableau III.12.a.; les teneurs totales au tableau III.12.b. et les niveaux de signification des relations entre éléments et variables "explicatives" au tableau III.13.

Tableau III. 12:a) Caractéristiques pédologiques de base - Bois de Buis

Horizon Pré lèvement (cm)	pH (H ₂ O)	pH (KCl)	COT g/100g	Nt g/100g	Argile 0-2µ	Limon 2-50µ	Sable > 50µ	CEC	Ca cmol/kg	Mg	K	Na	V (%)
B ₁ F													
Ah	3,9	2,9	3,9	0,25	16,9	74,4	8,7	17,9	0,52	0,22	0,24	0,04	5,9
E	4,4	3,5	1,2	0,08	15,6	72,6	11,8	11,2	0,11	0,09	0,19	0,03	3,7
Bt	4,4	3,4	0,2		24,5	65,9	9,7	13,6	0,41	0,34	0,33	0,05	8,3
C	5,2	3,5			19,5	70,4	10,2	13,1	4,05	2,18	0,22	0,06	49,8
B ₁ C ₁₀₀													
Ap	6,1	4,7	1,1	0,08	13,4	76,4	10,4	7,7	4,03	0,78	0,47	0,06	69,5
Bt	5,3	3,9	0,2		21,9	69,6	8,6	11,3	4,97	0,66	0,50	0,05	54,6
C	5,5	3,9			19,3	71,2	9,7	11,3	5,76	2,43	0,26	0,05	75,7
B ₁ C ₂₅₀													
Ap	6,7	5,5	1,1	0,09	15,6	75,2	9,2	9,4	6,35	0,86	0,57	0,05	80,4
Bt	6,4	4,9	0,2		23,5	67,0	9,6	12,4	7,97	0,74	0,38	0,06	70,8
C	6,6	5,0			19,7	71,6	8,9	11,5	7,78	2,16	0,25	0,07	88,8
B ₁ C ₁₀₀₀													
Ap	7,3	6,2	1,2	0,11	18,3	72,8	9,0	11,4	9,04	1,14	0,64	0,09	96,1
Bt	7,8	6,1	0,4		24,6	65,9	9,6	14,0	11,48	0,81	0,27	0,09	90,3
C	7,7	6,0			21,5	71,6	7,1	12,4	9,60	2,02	0,24	0,09	96,6

b) Teneurs totales - Bois de Buis

Horizon Prélèvement (cm)	Teneurs totales													
	Ca	Mg	K	Na	TRB*	Al	Fe	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co
	g/100g				cmol.kg	g/100g				mg/kg				
B_F														
Ah	0.22	0.32	1.59	0.62	105.3	3.71	1.86	244.3	11.0	49.5	19.4	37.2	80.1	4.6
E	0.23	0.37	1.62	0.68	113.1	3.78	1.88	628.0	7.5	45.2	17.9	33.5	17.8	7.7
BT	0.22	0.46	1.77	0.70	124.5	5.18	2.60	576.1	14.7	64.8	20.3	59.3	12.1	8.3
C	0.33	0.51	1.76	0.74	135.9	5.09	2.69	428.2	16.9	53.6	29.8	60.6	11.7	8.2
B_C ₁₀₀														
Ap	0.34	0.31	1.70	0.68	115.4	3.91	1.67	707.6	7.3	49.4	16.2	39.0	21.6	7.9
BT	0.32	0.47	1.88	0.70	133.1	5.42	2.72	540.9	15.6	56.1	31.4	69.0	12.2	9.4
C	0.38	0.49	1.75	0.72	135.4	5.07	2.63	451.4	15.6	54.6	27.9	72.8	10.9	8.7
B_C ₁₅₀														
Ap	0.39	0.34	1.69	0.64	118.3	3.96	1.82	642.5	10.3	51.3	16.8	37.7	18.6	7.4
BT	0.39	0.52	1.88	0.70	141.4	5.67	2.98	580.4	17.7	59.3	30.7	67.1	12.6	10.4
C	0.42	0.50	1.80	0.71	139.3	5.07	2.66	443.5	17.4	54.7		75.9	10.8	9.6
B_C ₃₀₀														
Ap	0.45	0.40	1.71	0.64	126.6	4.09	2.04	586.6	12.2	54.9	20.6	36.9	16.7	7.0
BT	0.47	0.55	1.89	0.68	146.6	5.64	3.06	595.0	18.2	58.9	30.0	61.2	12.5	11.3
C	0.47	0.54	1.88	0.72	147.7	5.26	2.79	483.2	19.2	51.8		65.5	11.4	9.7

Tableau III. 13: Matrice de corrélation relative aux teneurs totales (HF) et variables "explicatives" pour les solums du bois de Buis.

	"0-2"	"0-10"	">50µm"	pH _{H2O}	COT	CEC	TRB	Al	Fe	Mn
Ca				0.962	-0.390		0.726	0.398	0.396	
Mg	0.804				-0.687		0.940	0.923	0.958	
K	0.738	0.410		0.476	-0.732		0.875	0.879	0.828	
Na					-0.704		0.626	0.590	0.532	
Al	0.875	0.456			-0.718		0.875		0.969	
Fe	0.904	0.464			-0.635		0.876	0.969		
Mn					-0.665	-0.697				
Cu	0.804			0.390	-0.503		0.872	0.899	0.927	
Zn	0.771	0.714			-0.480		0.384	0.611	0.601	
Ni	0.737	0.472	-0.561		-0.509		0.839	0.867	0.880	
Cr	0.615				-0.644		0.726	0.817	0.796	
Pb	-0.389				0.921	0.500	-0.648	-0.567	-0.519	-0.581
Co	0.660			0.483	-0.775		0.809	0.806	0.800	

Degré de signification: $\alpha < 0.001$; $\alpha < 0.01$; $\alpha < 0.05$

En forêt, les sols sont acides, voire très acides en surface (pH_{H2O} < 4.2). Sous culture, le gradient de mise en culture se traduit par un gradient de pH. Verticalement, le profil défriché depuis une centaine d'années affiche des pH plus faibles en profondeur, tandis que les deux autres sont plus homogènes (figure III.17).

Tous les solums étudiés correspondent à des "sols limoneux à horizon BT", en témoignent les profils moyens des teneurs en argile (figure III.18). Les teneurs en sables sont relativement homogènes, entre 7 et 12%.

Les CEC reflètent les teneurs en argile pour l'ensemble des horizons de profondeur ainsi que les horizons de labour. Dans l'horizon Ah, l'influence de la teneur élevée en matière organique (COT ~ 4g/100g) sur la CEC est manifeste. Les solums forestiers sont largement désaturés dans le premier mètre. Par contre, le taux de saturation dans les sols cultivés augmente avec l'âge du défrichement. Le complexe d'échange est largement dominé par Ca⁺⁺, mais on constate néanmoins une augmentation des teneurs en K⁺ dans l'horizon labouré.

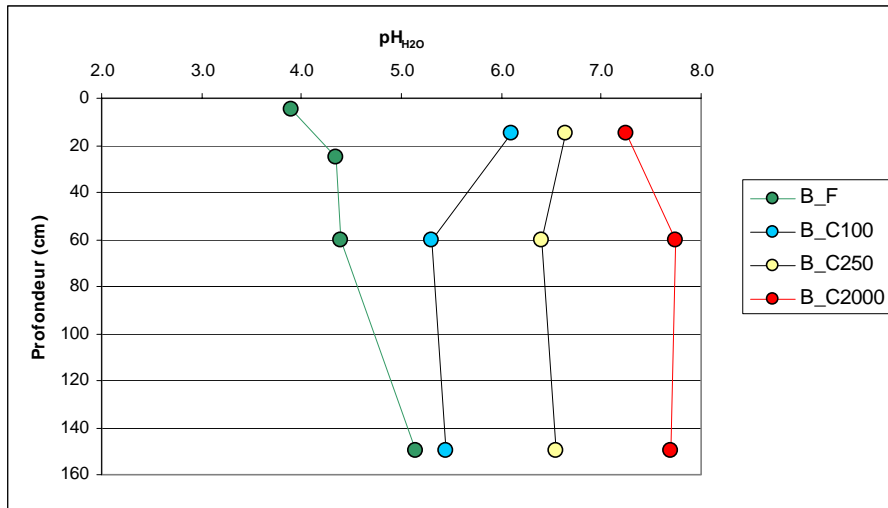


Figure III. 17: Profils moyens, par site de la chronoséquence, des pH_{H2O} en fonction de la profondeur

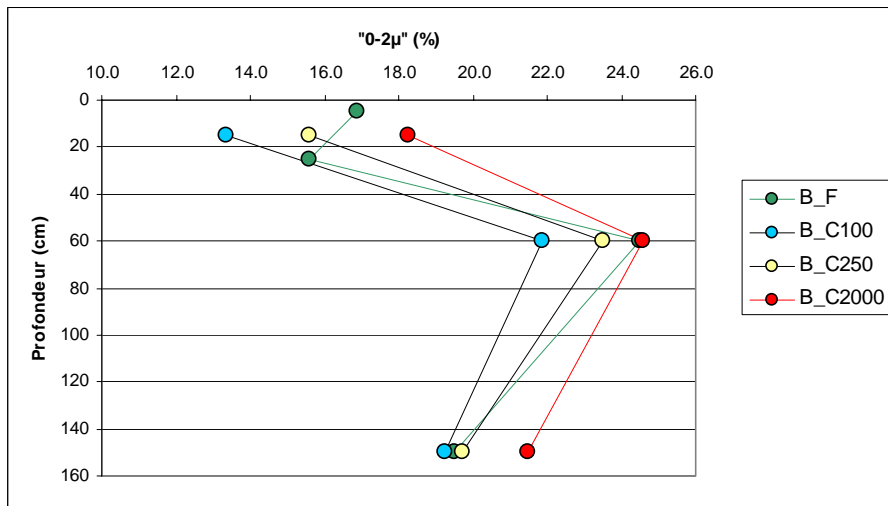


Figure III. 18: Profils moyens, par site de la chronoséquence, des teneurs en argile (%) en fonction de la profondeur.

Les teneurs totales en "bases" obéissent aux schémas constatés précédemment: faibles différenciations verticales pour Ca et Na, profils similaires à ceux des teneurs en argile pour Mg et K. On notera tout de même pour Ca un gradient de teneurs "latéral", *i.e.* en fonction de l'âge du défrichement comme pour le pH et le taux de saturation en cations échangeables (figure III.19).

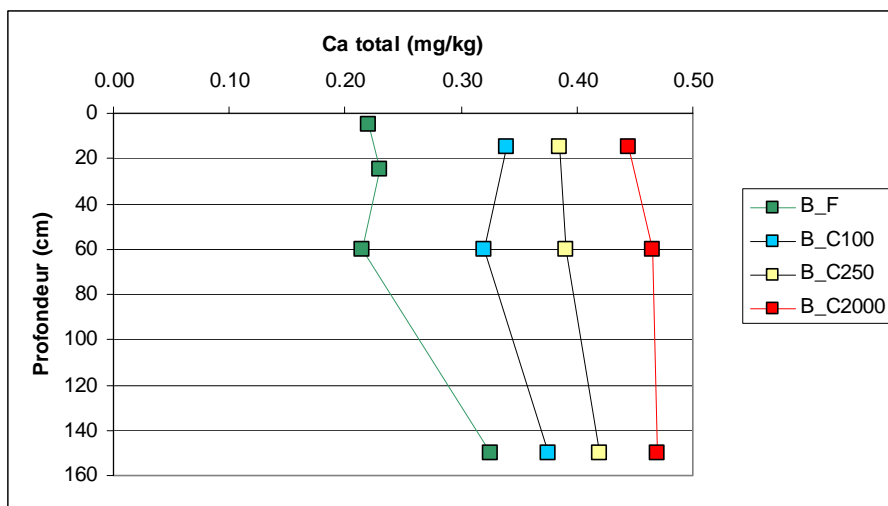


Figure III. 19: Profils moyens, par site de la chronoséquence, des teneurs en Ca total (g/100g) en fonction de la profondeur.

Les profils des teneurs en Al et Fe sont à nouveau similaires entre eux et à ceux des teneurs en argile. Les relations Al-Fe s'inscrivent relativement bien dans celle de la coupe de Tongrinne.

Les teneurs en Mn sont caractérisées par une nette diminution dans l'horizon de surface sous forêt, comme dans le cas du solum G_F₁. En outre, les teneurs dans le BT sont systématiquement supérieures à celles dans l'horizon C.

Comme pour les solums de Grand-Leez, les profils des teneurs en Cu, Zn, Ni, Cr et Co sont largement conditionnés par ceux des teneurs en argile. Une nuance peut être apportée pour Co (figure III.20). Les teneurs en Co dans les horizons de surface forestiers sont inférieures à celles attendues sur base des teneurs en argile. Le même constat avait été réalisé dans le Bois de Grand-Leez.

Pour ce qui concerne Pb (figure III.21), les teneurs dans les horizons de profondeur sont toujours du même ordre de grandeur (10 à 12 mg/kg). En surface, l'accumulation est importante sous forêt, moins élevée mais néanmoins perceptible dans les horizons labourés. On notera que la teneur en Pb dans l'Ap diminue lorsque l'âge du défrichement augmente.

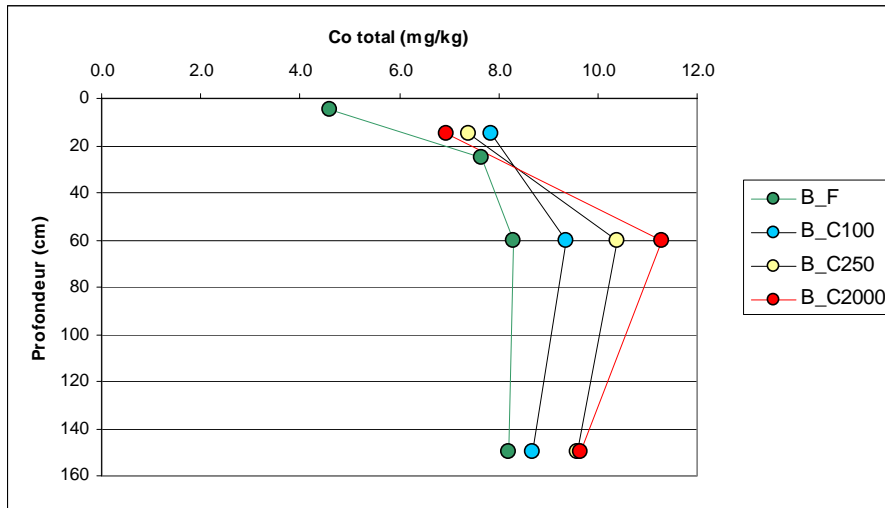


Figure III. 20: Profils moyens, par site de la chronoséquence, des teneurs en Co total (mg/kg) en fonction de la profondeur

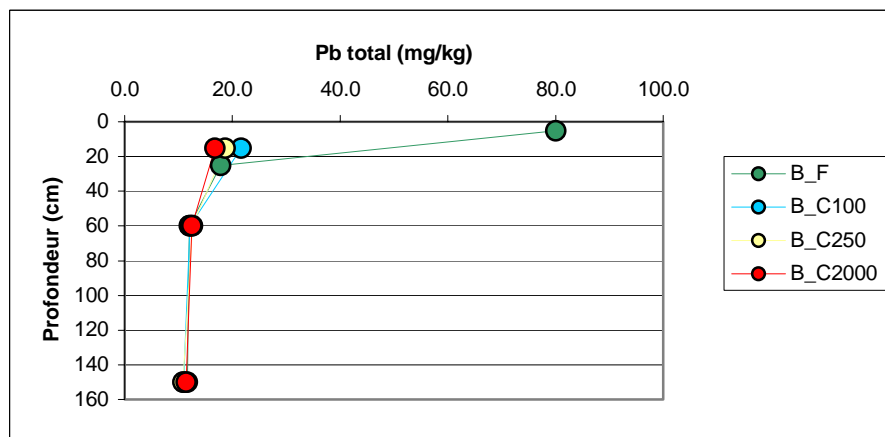


Figure III. 21: Profils moyens, par site de la chronoséquence, des teneurs en Pb total (mg/kg) en fonction de la profondeur

Les observations que l'on peut réaliser à partir d'estimations sur les stocks d'éléments par unité de surface (figure III.22) ne sont pas différentes de celles sur les mesures de concentrations. On note une augmentation légère des stocks de Cu et de Zn dans les horizons supérieurs de sols cultivés et surtout une chute des niveaux des stocks en Pb en fonction de l'âge de la conversion de la forêt à l'agriculture.

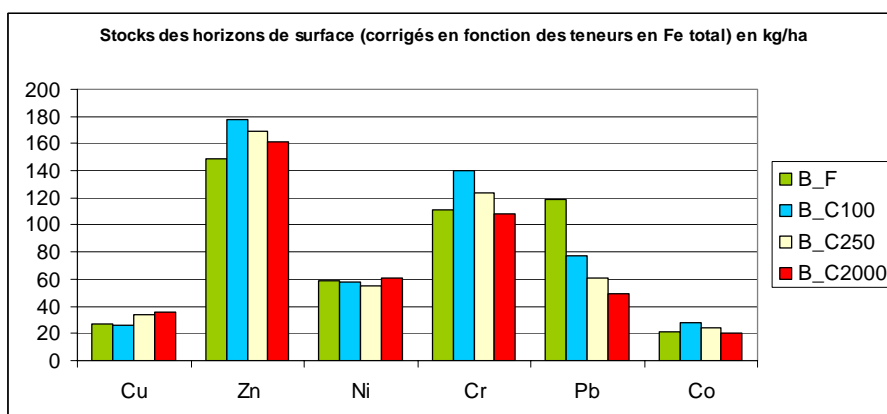


Figure III. 22: Estimations de "stocks" par unité de surface (kg/ha) pour les horizons supérieurs des sites de la chronoséquence (B_F: forêt; B_C100, B_C250; B_C2000: sites cultivés depuis 100, 250 ou 2000 ans). Une correction a été effectuée en fonction des teneurs en fer total.

Les résultats du tableau III.13, relatifs aux corrélations linéaires entre éléments et variables "explicatives", confirment:

- ❑ les relations fortes entre argile et Mg, K, Al, Fe, Cu, Zn, Ni, Cr et Co;
- ❑ les relations inverses entre COT et ces mêmes éléments (car les horizons de surface sont les moins riches en argile) et la forte affinité de Pb et, dans une moindre mesure, de Cu pour la matière organique;
- ❑ la relation forte entre pH et Ca;
- ❑ le manque de relation explicative pour Mn.

c comparaison avec les résultats précédents

Les résultats obtenus sur la chronoséquence du Bois de Buis sont remarquablement cohérents avec ceux obtenus au Bois de Grand-Leez. En outre, il faut remarquer que les éléments Cr, Pb et Co qui ont parfois posé des soucis d'interprétation, en raison de problèmes opératoires, ne suscitent pour ce point aucune inquiétude.

Plusieurs points ont donc trouvé confirmation:

- *l'importance des teneurs en argile pour Mg, K, Al, Fe, Cu, Zn, Ni, Cr et Co;*
- *l'importance de COT pour Pb, mais également pour Cu dans l'horizon Ah;*
- *les horizons de surface forestiers présentent l'état d'altération le plus marqué, particulièrement perceptible par les teneurs en Mn et en Co;*
- *ce point confirme en outre qu'une part non négligeable de Co est liée aux oxydes de Mn;*
- *l'impact majeur de la mise en culture concerne la resaturation du complexe d'échange par Ca^{++} et l'augmentation concomitante du pH, ce qui engendre également un nivellement des teneurs en Ca total dans les sols cultivés;*
- *Zn s'accumule en surface dans les sols cultivés, toutefois cette dynamique est fortement tributaire du mode de gestion des terres;*
- *Pour ce qui concerne l'accumulation de Pb dans l'horizon labouré, elle est manifeste; toutefois les niveaux de teneurs ne sont pas très élevés (<25mg/kg) et en outre, les résultats obtenus sur la chronoséquence montrent une diminution de la teneur en Pb avec l'âge du défrichement; tout se passe comme si l'agriculture n'apportait rien, comme si Pb était d'origine forestière, mélangé aux horizons E moins riches par le labour et, l'érosion aidant, sans cesse dilué par les horizons sous-jacents; ce point reste à ce stade une simple hypothèse.*

6.3.2.4 Influence du drainage

a présentation des solums mal drainés

Une fosse et trois sondages ont été réalisés en sols à drainage imparfait, un sol limoneux fortement gleyifié à horizon BT dans le Bois de Grand-Leez (G_F₂) et trois "sols limoneux" modérément gleyifiés à horizon BT à proximité du Bois de Buis (2 sondages B_d) ou dans le domaine du bassin versant de l'Orneau (V_C).

a.1. *Présentation synthétique du solum sur fosse G_F₂*

Situation : Bois de Grand-Leez

Relief : Versant en pente douce (2%)

Position : Milieu de la forme (figure III.23).

Lithologie : Limon quaternaire (sur sable bruxellien)

Occupation : Chênaie atlantique. Occupation ancienne.

Typologie : Sol limoneux à horizon BT, hydromorphe, sur loess, de type OHAEBC, acide, peu structuré, différencié par la couleur (brun-jaune clair à moyen), la texture (limoneuse à argilo-limoneuse) et la consistance, (compact à très compact).

CPCS : Sol brun lessivé hydromorphe

WRB : Luvisol épigleyique, épistyrique

RP : Néoluvisol-Rédoxisol subsaturé

USDA : Glossaqualf

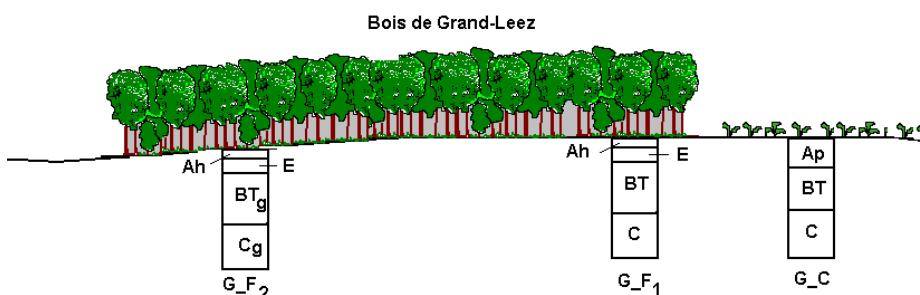


Figure III. 23: Schéma de position des fosses pédologiques dans et autour du Bois de Grand-Leez.

a.2. présentation des sondages

Deux sondages ont été effectués à proximité du Bois de Buis (B_d sur la figure III.3). La position dans le relief de ces deux sondages (écartés d'une quinzaine de mètres) par rapport aux sondages B_C₂₅₀ est schématisée à la figure III.24. Ce schéma est par ailleurs valide pour un grand nombre de sols modérément gleyifiés dans les domaines des Bois de Grand-Leez et de Buis et du bassin versant de l'Orneau, dont le sondage V_C. Les plages d'Ada y sont en effet souvent localisées au centre des plateaux, soit en zone plane soit en légère dépression, alors que les sols non gleyifiés occupent davantage les bordures des plateaux. Les phénomènes d'oxydo-réduction trouvent leur source à la fois dans la topographie plane des plateaux et dans la présence d'un substrat imperméable à relativement faible profondeur.

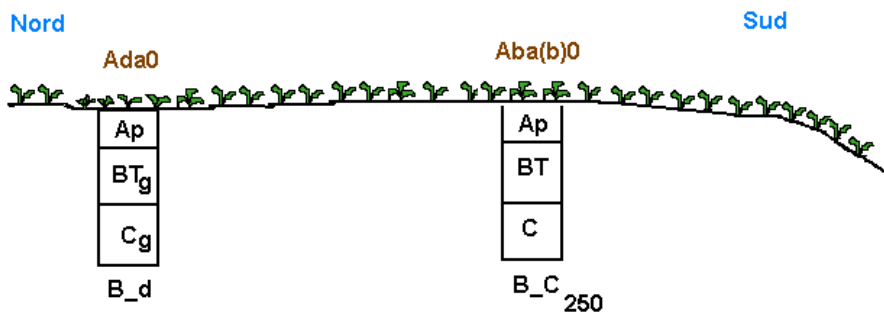


Figure III. 24: Schéma de position des sondages B_d près du Bois de Buis.

D'un point de vue typologique, les trois sondages sur sol limoneux modérément gleyifiés à horizon BT (CSB) sont classés comme suit:

- CPCS: Sols bruns lessivés hydromorphes
- WRB: Luvisols endogleyiques, hypereutriques
- RP: (Néo)luvisols-Rédoxisols resaturés

b caractères morphologiques

Les caractères morphologiques du solum sous forêt sont présentés au tableau III.14.

Les points à retenir sont:

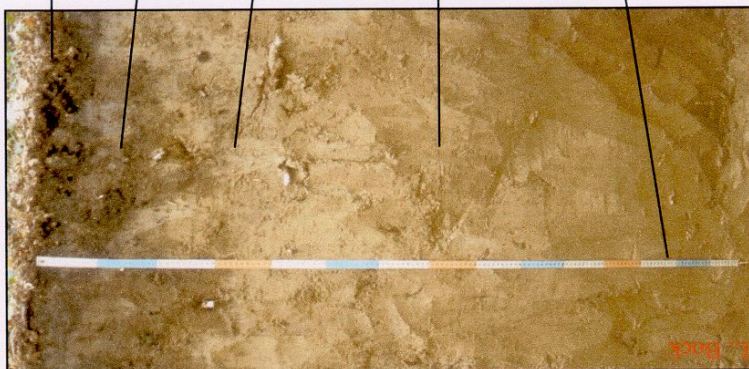
- ❑ un humus de type mull, signe que l'hydromorphie a peu d'effet sur le fonctionnement biologique des horizons de surface,
- ❑ des horizons Ah peu tachés et bien structurés, ce qui confirme l'observation du premier point;
- ❑ des horizons E tachés d'oxydo-réduction, peu poreux et très compacts;
- ❑ des horizons BT et B/C épais, fortement tachés, avec des glosses dans le BT, peu structurés, peu poreux et très compacts;
- ❑ un horizon C dans lequel la proportion de taches diminue mais dont la teinte générale pâlit;

Morphologiquement parlant, ce solum se distingue du solum bien drainé (G_F1) essentiellement par l'abondance de taches d'oxydo-réduction, et accessoirement par une structure très compacte à faible profondeur. Les propriétés des horizons humifères ne semblent pas affectées par la déficience du drainage.

Pour ce qui concerne les sondages, les taches débutent généralement à une profondeur de l'ordre de 50cm, conformément au critère de la légende de la Carte des Sols de la Belgique, l'abondance des taches est maximum dans le bas du BT et est relativement importante à 150cm.

Tableau III. 14: Description du solum Aha sous forêt - G_F₂.

<u>Caractères morphologiques - Aha sous forêt</u>	
<i>Horizon O:</i>	litière peu épaisse
<i>Horizon Ah1:</i>	0 à 7/10 cm, limon brun très foncé (7,5YR 2/3); présentant des structures polyédrique angulaire et grumeleuse; compact; poreux; racines très nombreuses, très fines à grosses, obliques et régulièrement réparties dans l'horizon.
<i>Horizon Ah2:</i>	7/10 à 17/18 cm, limon; se distingue du précédent par la teinte plus claire (7,5YR 4/3) et la présence de taches (<2%) d'oxydo-réduction; la structure est uniquement grumeleuse et les racines sont moins nombreuses mais de mêmes dimensions.
<i>Horizons Eg:</i>	17/18 à 45 cm, limon jaune-orange terme (10YR 6/4), taché d'oxydo-réduction (2-20%); présentant une structure polyédrique subangulaire, très compact et peu poreux avec quelques racines très fines à grosses, obliques; transition graduelle avec l'horizon sous-jacent.
<i>Horizons BTg:</i>	45 à 120 cm, limon lourd passant progressivement du jaune orange terme (10YR 6/4) au brun jaunâtre (10YR 5/8); les taches d'oxydo-réduction sont très nombreuses (>50%) et de forme irrégulière; entre 70 et 120 cm, on note la présence de glosses - langues verticales grisâtres témoignant d'anciennes conditions climatiques périglaciaires, très compact et peu poreux, racines très peu nombreuses très fines à grosses, obliques.
<i>Horizons B/Cg:</i>	120 à 180 cm, brun jaunâtre (10YR 5/6); taches très nombreuses (>50%); présentant une structure massive, très compact et peu poreux avec des racines très peu nombreuses et verticales.
<i>Horizon Cg:</i>	187 à > 202 cm, limon jaune-orange terme (10YR 6/3) marqué par un pâlissement de la couleur de la matrice et une diminution de la proportion de taches d'oxydo-réduction (20-50%); structure massive, compact et peu poreux; racines très peu nombreuses et verticales.



c caractérisatiques pédologiques de base

Les résultats analytiques pour la caractérisation de base des solums figurent au tableau III.15.a.

Pour le solum forestier, les valeurs de pH dans les horizons Ah et E sont presque identiques à celles du solum bien drainé. Elles sont par contre nettement supérieures dans les horizons BT, B/C et C. Dans le bas du solum, le pH est à la neutralité (figure III.25). Dans les sols cultivés, le pH est neutre à basique tout au long des profils.

Les teneurs en COT et Nt sont relativement élevées dans l'horizon Ah du solum G_F₂, les teneurs dans les horizons labourés sont quant à elles classiques pour des sols cultivés de Région limoneuse (médiane = 1.3 g/100g d'après LAROCHE et OGER, 1999).

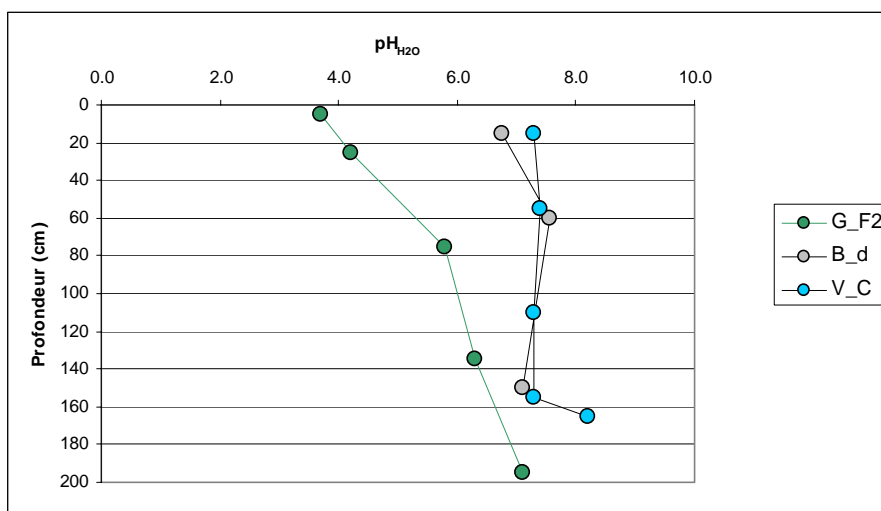


Figure III. 25: Profils des pH_{H2O} en fonction de la profondeur pour les solums mal drainés.

Les profils des teneurs en argile (figure III.26) confirment l'enrichissement en argile des horizons BT, par contre la différenciation BT-C n'est pas très marquée. Les teneurs en argile sont plus élevées pour le solum V_C et les teneurs en sables sont relativement constantes au sein de chaque profil.

La CEC, comme pour les points précédents, suit une relation avec les teneurs en argile et le taux de matière organique. Les niveaux de teneurs coïncident avec ceux des solums précédemment analysés.

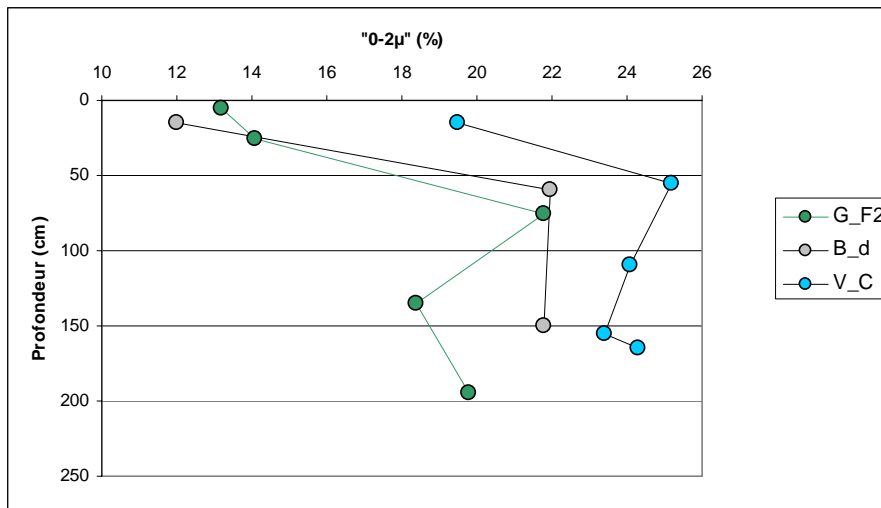


Figure III. 26: Profils des teneurs en argile (%) en fonction de la profondeur pour les solums mal drainés.

Les complexes d'échange sont largement désaturés dans les horizons Ah et E, proches de la saturation dans les autres types d'horizons. Dans le cas des sols agricoles, l'état de saturation correspond à une resaturation, au moins pour la partie supérieure des solums. Dans le cas du solum forestier, le taux de saturation élevé en profondeur confirme les résultats des études antérieures (NEF, 1977). Ce taux élevé est imputable à la présence d'une nappe en relation directe avec un ou plusieurs horizons profonds riches en carbonates. Le taux de saturation élevé traduit une certaine préservation du complexe d'échange, contrairement aux solums agricoles où il s'agit d'une resaturation.

Par rapport aux sols bien drainés, le changement principal concerne donc les horizons de profondeur sous couvert forestier, dont les taux de saturation et les pH sont proches de ceux mesurés en milieu agricole.

d teneurs totales en éléments et relations avec les variables "explicatives".

Les teneurs en "bases" (tableau III.15.b) sont relativement homogènes en contexte agricole, avec néanmoins une relation avec l'argile pour Mg et K. Les teneurs sont par contre inférieures dans les horizons de surface forestiers, en réponse aux processus, passés ou présents, d'altération et de lessivage.

Tableau III. 15: a) Paramètres pédologiques classiques - solums mal drainés.

Prélèvements (cm)	pH (H ₂ O)	pH (KCl)	COT g/100g	Nt g/100g	Argile 0-2µ	Limons 2-50µ	Sable >50µ	CEC	Ca cmol/kg	Mg	K	Na	V (%)
G_F ₂													
Ah ₁	3.7	2.9	8.0	0.49	13.2	78.3	8.5	25.4	1.39	0.40	0.46	0.05	9.1
E ₁	4.2	3.5	0.7	-	14.1	78.5	7.4	7.6	2.22	0.09	0.15	0.02	32.6
Bt ₁	5.8	4.0	0.1	-	21.8	69.4	8.8	13.2	8.80	1.87	0.29	0.08	83.6
B/C ₁	6.3	4.5	0.1	-	18.4	70.3	11.3	12.9	9.74	1.85	0.27	0.04	92.2
C ₁	7.1	4.8	-	-	19.8	67.2	13.0	12.2	10.52	1.25	0.23	0.05	96.8
B_d*													
Ap	6.8	5.9	1.3	0.11	12.0	76.2	11.9	9.3	6.99	1.17	0.57	0.06	94.9
Bt ₁	7.6	5.9	-	-	22.0	68.2	9.9	12.3	9.93	0.88	0.24	0.10	91.0
B/C ₁	7.1	5.2	-	-	21.8	67.6	10.6	12.3	8.69	2.47	0.22	0.08	93.2
V_C													
Ap	7.3	6.5	1.1	0.12	19.5	72.3	8.2	-	-	-	-	-	-
Bt ₁	7.4	6.2	-	-	25.2	70.0	4.8	-	-	-	-	-	-
B/C	7.3	6.0	-	-	24.1	67.0	8.9	-	-	-	-	-	-
C ₁	7.3	6.1	-	-	23.4	69.1	7.5	-	-	-	-	-	-
C ₁	8.2	7.5	-	-	24.3	68.2	7.5	-	-	-	-	-	-

* B_d : teneurs moyennes pour les deux sondages.

b) Teneurs totales (HF) - solums mal drainés

Prélèvements (cm)	Teneurs totales														
	Ca	Mg	K	Na	TRB	Al	Fe	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co	
	g/100g				cmol/kg	g/100g				mg/kg					
G_F ₁	0.25	0.23	1.38	0.62	94.0	4.00	1.75	192.7	16.3	49.5	11.5	37.5	82.2	4.6	
Ah	0.26	0.24	1.59	0.69	103.8	3.97	1.69	239.7	5.8	42.3	13.6	49.9	13.5	5.9	
E ₁	0.43	0.50	1.87	0.67	140.2	5.14	2.83	651.6	14.8	56.2	58.1	66.8	12.1	11.7	
Bt	0.47	0.50	1.64	0.77	140.7	5.04	2.66	522.2	12.6	53.3	28.4	51.8	10.2	7.6	
B/C ₁	0.57	0.51	1.8	0.76	150.2	5.05	2.28	433	14.1	50.3	21.7	71.7	12.1	9.6	
B _d *															
Ap	0.42	0.35	1.60	0.68	120.3	3.95	1.70	557.6	9.6	51.2	12.2	32.6	20.4	5.8	
Bt	0.41	0.45	1.73	0.67	131.0	5.01	2.55	472.8	13.8	51.5	27.0	61.1	14.2	10.2	
B/C ₁	0.44	0.52	1.77	0.75	143.0	5.18	2.61	533.7	16.9	54.1	22.5	60.4	12.4	10.2	
V_C															
Ap	0.46	0.35	1.78	0.61	124.3	4.51	2.36	534.7	16.3	75.9	19.3	39.5	32.1	12.6	
Bt	0.45	0.49	1.93	0.94	153.7	5.53	2.79	583.1	15.6	55.3	25.4	51.8	23.2	15.0	
B/C	0.49	0.49	2.18	0.96	163.0	5.48	2.76	516.1	17.0	54.0	33.2	45.6	20.9	13.9	
C ₁	0.52	0.50	1.73	0.63	139.4	5.33	2.74	498.0	16.6	55.3	29.7	56.3	20.6	14.5	
C	0.44	0.46	1.65	0.67	131.8	4.95	2.71	482.3	17.8	56.8	28.1	18.2	16.9	15.0	

*: B_d teneurs moyennes pour les deux sondages.

Les teneurs en Al et en Fe suivent des relations linéaires avec l'argile, comme cela a toujours été le cas jusqu'à présent. La relation Al-Fe est également linéaire et s'inscrit dans celle constatée sur la coupe de Tongrinne.

Pour ce qui concerne Mn, on constate une fois encore des teneurs très basses dans les horizons de surface sous forêt. Pour les autres horizons, et les autres solums, les teneurs rencontrées respectent tant les ordres de grandeur déjà rencontrés auparavant que l'absence de "logique apparente" (*i.e.* le manque de lien avec les variables "explicatives" retenues).

Pour ce qui concerne les éléments traces, les constats précédents sont confirmés:

- relation forte avec l'argile (exemple pour Co à la figure III.27), sauf pour Pb, tant à l'intérieur des solums qu'entre ceux-ci;
- accumulation de Pb et Cu en surface sous forêt et de Zn dans l'horizon de labour;
- diminution des teneurs en Co en surface sous forêt.

La linéarité des relations entre éléments et variables "explicatives" est exprimée au tableau III.16. Les conclusions que l'on peut en tirer sont exactement les mêmes que pour le titre 6.3.2.3, ce qui est un gage de cohérence des données à travers les différentes approches.

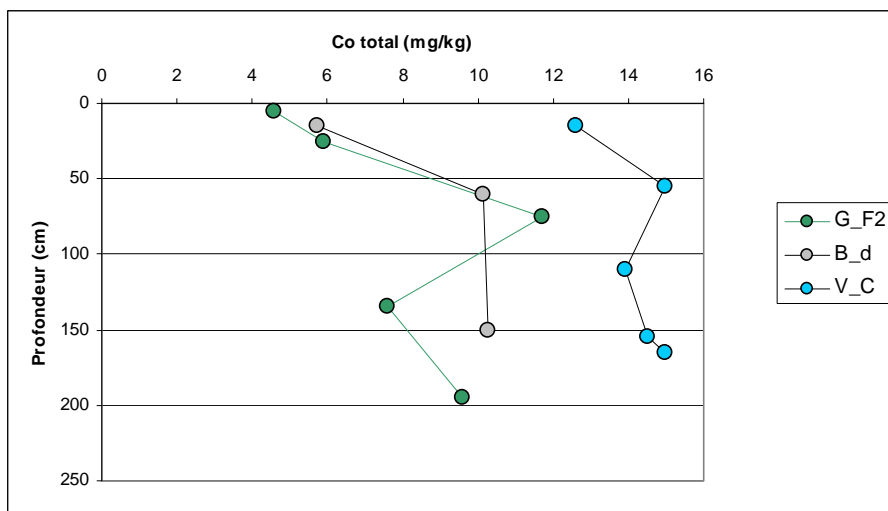


Figure III. 27: Profils des teneurs en Co total (mg/kg) en fonction de la profondeur pour les sols mal drainés.

Tableau III. 16: Matrice de corrélation relative aux teneurs totales (HF) et variables "explicatives" pour les sols sous culture mal drainés.

	"0-2"	"0-10"	">50µm"	pH _{H2O}	COT	CEC	TRB	Al	Fe	Mn
Ca	0.511	0.495	0.743	-0.537	0.829	0.633	0.570	0.673		
Mg	0.768	0.669	0.698	-0.832	0.910	0.885	0.854	0.656		
K	0.692	0.638	0.525	-0.729	0.862	0.744	0.668	0.536		
Na				-0.658	0.712	0.551				
Al	0.909	0.789	0.581	-0.879	0.873	0.930				
Fe	0.932	0.853	0.593	-0.782	0.780	0.930				0.500
Mn			0.646		0.660	0.500				
Cu	0.710	0.632			0.613	0.657	0.703			
Zn										
Ni	0.568	0.520		-0.643	0.553	0.632	0.740	0.663		
Cr				-0.907		0.511				
Pb			-0.550	0.735	0.867	-0.574				-0.555
Co	0.886	0.860	-0.487	0.680	-0.579	0.697	0.799	0.829		

Degré de signification: $\alpha < 0.001$; $\alpha < 0.01$; $\alpha < 0.05$

6.3.3 conclusions relatives à l'approche "solum"

Au terme de la première des deux approches relatives aux différenciations pédogénétiques, il convient de tirer un bilan provisoire.

Le constat majeur réalisé au cours de l'étude des matériaux parentaux (chapitre 5) concerne les relations entre la plupart des ETMs étudiés et la fraction argileuse "0-2 μ m". La vérification de l'existence de ces relations à l'échelle du solum constituait un des objectifs de l'approche éponyme. Les processus, tant anciens qu'actuels, de la pédogenèse contribuent en effet à la différenciation des matériaux parentaux en horizons. Altération, lessivage et oxydo-réduction sont donc susceptibles d'avoir engendré des modifications des principales phases porteuses et dès lors des redistributions des ETMs.

A l'échelle d'un solum à horizon BT, quels que soient l'occupation et le degré d'hydromorphie, les relations entre argile, Mg, K, Al, Fe, Cu, Zn, Ni, Cr et Co sont confirmées, à quelques nuances près. Parmi celles-ci, il faut signaler l'accumulation de Cu dans les horizons Ah forestiers et celle de Zn dans l'horizon labouré, en fonction du mode de gestion des intrants agricoles probablement. Autres confirmations: (i) le caractère "imprévisible" des teneurs en Mn, aucune relation linéaire n'existant avec les variables "explicatives" qui font l'objet de notre suivi, et (ii) l'existence d'une part non négligeable de Co sous des formes liées à celles de Mn.

D'autres points n'ont par contre pas trouvé confirmation ou encore apportent un éclairage nouveau¹⁰ sur le déterminisme des teneurs en ETMs en raison de l'ajout de dimensions nouvelles. Ont ainsi été constatées (i) une forte accumulation de Pb dans les horizons de surface sous forêt, (ii) l'absence de relation linéaire entre Pb et argile dans les horizons minéraux à l'échelle du solum, en raison d'une faible différenciation de Pb, (iii) la sensibilité de la TRB, de Mn et de Co aux conditions d'altération dans les horizons de surface sous forêt.

D'un solum à un autre, les facteurs de différenciation principaux sont l'occupation du sol, le drainage et une variabilité spatiale intra-type indépendante des deux premiers facteurs.

¹⁰ nouveau par rapport au cheminement des constats réalisés au cours de ce travail, mais pas forcément par rapport à la connaissance générale du comportement des ETMs dans les sols, acquise par les nombreuses études antérieures à cette recherche.

La mise en culture entraîne une homogénéisation des teneurs en surface tant par les opérations de labour que par les amendements carbonatés, qui resaturent le complexe d'échange et augmentent le pH.

L'"imperfection" du drainage¹¹, telle qu'elle a pu être appréhendée dans cette étude, n'engendre pas de modifications fondamentales dans le déterminisme des teneurs en ETMs. Il est probable que les conditions qui prévalent à une mobilisation accrue du fer (milieu réducteur, acidité, matière organique complexante) n'aient pas été réunies suffisamment longtemps pour que les migrations de celui-ci entre les horizons soient significatives, à l'exclusion des déplacements en compagnie des particules argileuses. Les horizons des solums modérément gleyifiés obéissent donc aux mêmes lois que ceux des solums bien drainés pour la région étudiée.

La variabilité spatiale d'un solum à un autre peut également être dictée par des facteurs locaux à caractère aléatoire¹². La teneur en argile du limon parental présente une certaine variabilité spatiale, de même que les conditions de la pédogenèse, avec en outre une dimension temporelle supplémentaire. Il en résulte que les teneurs moyennes des profils de teneurs en argile ainsi que les indices de différenciation texturale varient d'un solum à un autre. Toutefois, les relations argile-Mg-K-Al-Fe-ETMs restent d'application. Les solums les plus riches en argile présentent également les niveaux de teneurs en éléments les plus élevés. Ceci est vrai également pour Pb dans les horizons minéraux. L'absence de différenciation en fonction de l'argile, constatée à l'échelle verticale, est infirmée à l'échelle "latérale".

¹¹ Les séries de sols modérément gleyifiées sont caractérisées par un drainage "imparfait" (CSB)

¹² terme idoine pour exprimer que l'on n'a pas encore trouvé d'explication déterministe.

6.4 Approche toposéquentielle

Conformément à ce qui a été dit au chapitre de présentation de la région étudiée, la morphogenèse est le facteur naturel de différenciation pédologique le plus actif actuellement en Région limoneuse. Une manière d'évaluer les impacts de la morphogenèse sur la différenciation des teneurs en ETMs dans les sols consiste en l'étude de l'organisation de ceux-ci selon le relief.

Quelques séquences représentatives de l'organisation des "sols limoneux" selon le relief seront étudiées, afin d'évaluer l'importance de la morphogenèse sur la distribution spatiale des ETMs.

6.4.1 Les modèles limoneux

6.4.1.1 Matériel et méthodes

a présentation des séquences

Les "sols limoneux" de plateau, par opposition à l'ensemble constitué des versants et fonds de vallées alluviales, s'organisent selon un modèle topographique relativement simple : sol limoneux à horizon BT sur les positions hautes et relativement planes \Rightarrow sol limoneux tronqué sur les pentes convexes \Rightarrow sol limoneux sans développement de profil sur les colluvions des dépressions concaves.

Sept séquences représentatives de ce modèle ont été sélectionnées pour évaluer la différenciation toposéquentielle des teneurs en ETMS dans les "sols limoneux". Les sept séquences sont localisées sur la figure III.28. Tous les points de prélèvement, réalisés à la tarière de cartographe, d'une même séquence ont été choisis au sein d'une même parcelle agricole afin de réduire le plus possible les facteurs d'hétérogénéité au sein des séquences.

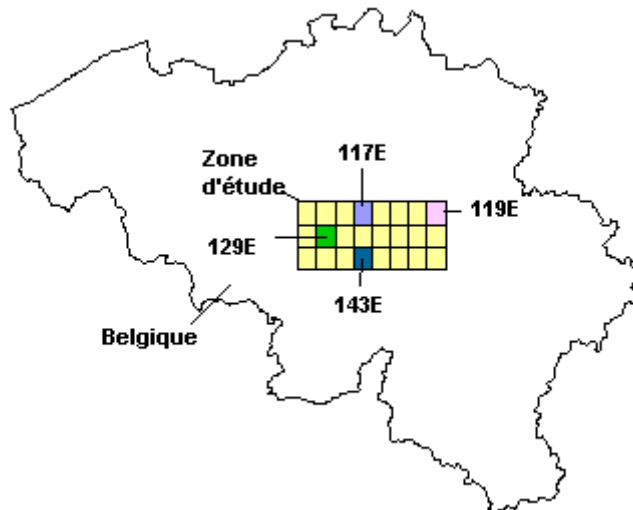


Figure III. 28: Localisation des séquences limoneuses. Séquence I: carte des sols 143E; séquence II: carte 117E; séquence III: carte 129E; séquences IV à VII: carte 119E.

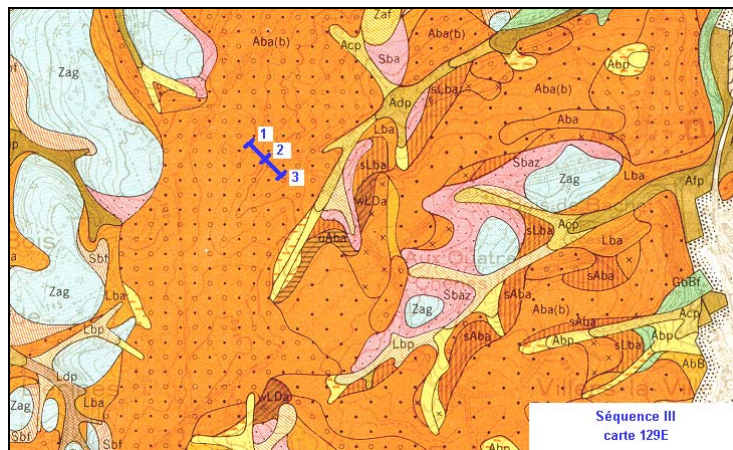
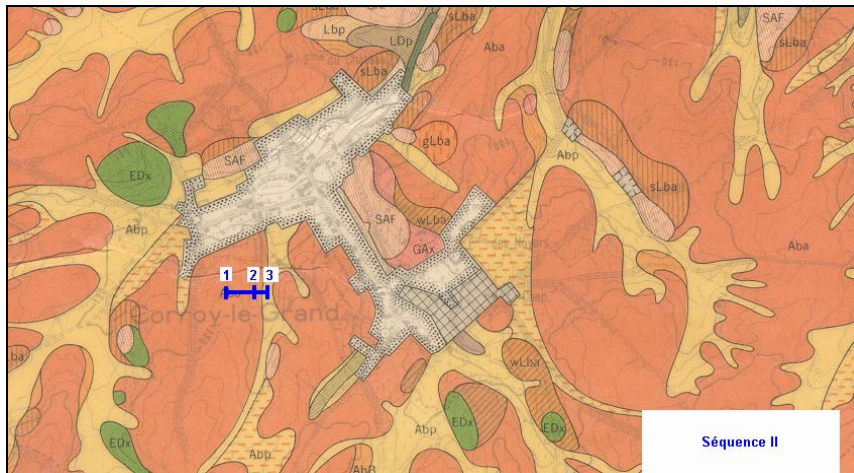
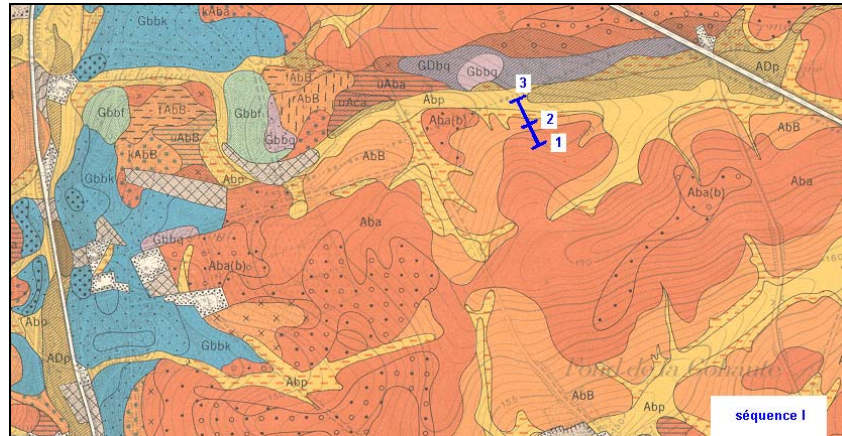


Figure III. 29: Séquences I, II et III positionnées sur la carte des sols de la Belgique (échelle de reproduction: 1/30 000)

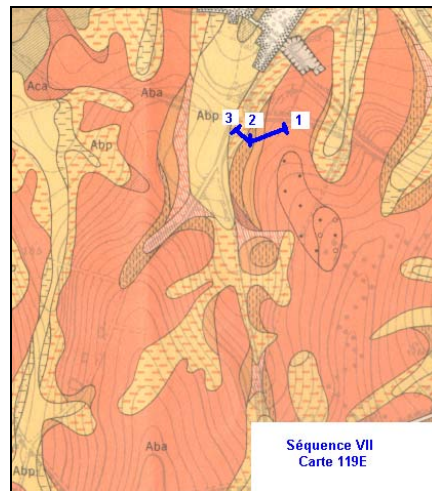
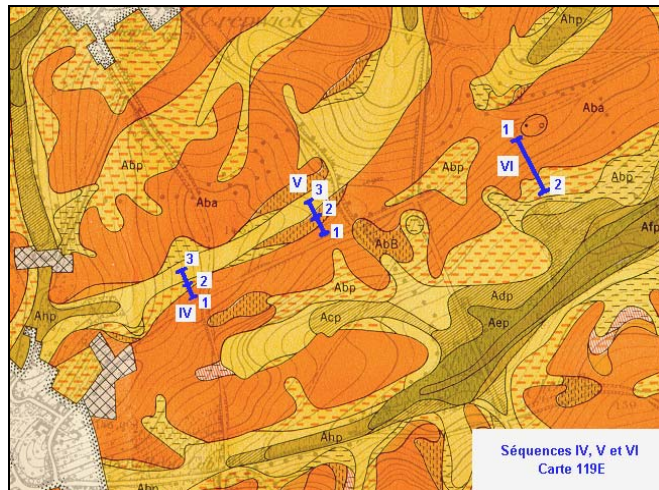


Figure III. 30: Séquences IV, V, VI et VII positionnées sur la carte des sols de la Belgique (échelle de reproduction: 1/30 000)

La séquence I est située dans le domaine du bassin versant de l'Orneau, sur une unité de pédopaysage constituée de "sols limoneux" bien drainés, sans taches, reposant sur un substratum profond (calcaires frasniens et viséens, schistes et grès frasniens et famenniens, dolomies tournaisiennes). Les observations et prélèvements ont été réalisés pour trois positions dans le relief (sommet [1], haut de versant convexe [2], bas de versant concave [3]), *i.e.* dans les séries de sols Aba, AbB et Abp (figure III.29).

La séquence II (figure III.29) présente une configuration de sols semblable à celle de la séquence I, mais à Corroy-le-Grand, sur un substratum

tum sableux ou argilo-sableux. Celui-ci est perceptible sur la carte des sols de la Belgique par différentes plages cartographiques (SAF, sAba, wLba, EDx...). Il faut remarquer que la plage d'AbB ne figure pas sur le document cartographique, pour des raisons liées à l'échelle de publication.

La séquence III (figure III.29) est située sur un plateau limoneux à l'ouest de Villers-la -Ville. Les limons recouvrent des sables bruxelliens eux-mêmes reposant sur les quartzo-phyllades de Villers-la-Ville. Cet environnement est perceptible sur la Carte des Sols de la Belgique par l'intermédiaire de nombreuses plages cartographiques (Zag, Sbf, sAba... pour les sables bruxelliens, GbBf pour la formation de Villers-la-Ville. On remarquera que la carte des sols à 1/20 000 ne distingue ni la plage d'AbB [2], ni celle d'Acp [3], qui ont été identifiées sur le terrain.

Les séquences IV à VII (figure III.30) sont représentatives de la morphologie du relief dans la "Hesbaye sèche". La séquence IV présente un Aba de sommet [1], un Abp de dépression [3] et un sol de transition caractérisé par la présence d'un horizon BT enfoui sous les colluvions (sigle Abp(c) - [2]). La séquence V présente le même schéma que les séquences I à III. Dans la séquence VI, à pente plus linéaire, seules les positions de sommet (Aba - [1]) et de bas de versant (Abp(c) - [2]) ont été retenues. Pour la séquence VII, trois positions ont été échantillonnées (Aba sur le sommet - [1], AbB dans le versant en position convexe - [2], Abp(c) dans le bas de versant - [3]).

La majorité de ces séquences ont été caractérisées, pour ce qui concerne les paramètres pédologiques, lors d'études antérieures: MASSART (1993) pour les séquences IV à VII; VERSTRAETE (1994) pour la séquence II et WARIN (2000) pour la séquence I. Toutefois, un contrôle de la qualité des analyses a été réalisé lors de ce travail.

Pour ce qui concerne les prélèvements, ceux-ci ont été effectués à la tarière de cartographe, soit à des profondeurs systématiques (MASSART et VERSTRAETE), soit à des profondeurs déterminées par la reconnaissance des horizons (WARIN et séquence III).

b présentation des résultats

Plutôt que de présenter les données brutes séquence par séquence, nous avons préféré les synthétiser sous forme d'une séquence théorique basée sur la moyenne des sept séquences observées. La séquence théorique comprend deux facteurs de stratification, la série de sols et la profondeur. Les séries de sols sont Aba, AbB et Abp. Les profondeurs sont la

surface (0-30cm), soit l'horizon labouré (Ap), une profondeur moyenne (30-60cm), *i.e.* l'horizon BT pour Aba et AbB et l'horizon C pour Abp, et une troisième profondeur (90 - 120cm), correspondant à un horizon B/C pour Aba, un horizon C pour AbB et un horizon ₂C pour Abp. Dans les cas des Abp(c), l'horizon ₂C est un BT enfoui. Les sept séquences représentent autant de répétitions.

Les résultats peuvent être analysés en terme de teneurs et de variabilité sous des angles divers: à l'échelle de l'horizon (i) pour une série de sols (ex. Ap de Aba) ou (ii) toutes séries confondues (ex. Ap); (iii) à l'échelle du solum (ex. écarts existants en moyenne entre Ap, BT et B/C dans un même solum de la série Aba) ou (iv) du solum moyen par série de sols (ex. relations entre Ap moyen, BT moyen, B/C moyen pour la série Aba); (v) à l'échelle de la série de sols (ex différence entre Aba et Abp); (vi) à l'échelle d'une séquence (moyenne des écart-types sur les horizons d'une même séquence) ou (vii) de la séquence moyenne (relations entre l'ensemble des horizons moyens).

Les tableaux III.17 a, b et c ont été construits de manière à représenter les ordres de grandeur des variables au niveau i de la liste précédente, ainsi que leur variabilité pour les niveaux i à vii. Pour ce qui concerne l'aspect variabilité, nous n'avons retenu que les écarts-types. Le schéma de la figure III.31 permet de visualiser la façon dont les différents modes de perception de la variabilité sont agencés dans les tableaux de résultats.

Variable X		
(i)		
(i)	(iv)	
(i)		
(i)		(vii)
(i)	(iv)	
(i)		
		séquence moyenne
(iii)		
(iii)		
(iii)		
(vi)		
		solum ou séquence
(ii)		profondeur
(v)		série
interaction		

Figure III. 31: Schéma de lecture des tableaux de résultats III.17a, b et c

Pour les niveaux i, iv et vii, les comparaisons portent sur les valeurs moyennes et les écarts-types. Pour les niveaux "solum" (iii) et "séquence" (vi) réels, ce sont les moyennes des écarts-types constatés pour chacun des niveaux qui seront utilisés pour comparer les niveaux de variabilité.

Pour chaque variable, sauf Nt faute de mesures hors de l'horizon labouré, une analyse de la variance à deux critères (Profondeur et Série de sols) a été réalisée. Des réserves peuvent être émises quant au strict respect des conditions d'application de la méthode; c'est pourquoi les interprétations seront empruntées d'une prudence inversement proportionnelle au niveau de signification de la statistique F. Les résultats de l'analyse de la variance concernent l'importance de la profondeur de l'horizon (niveau ii) et de la série de sols (v), et l'existence ou l'absence d'interaction entre ces deux "facteurs".

6.4.1.2 Résultats et discussions

a caractéristiques pédologiques de base

Les résultats des déterminations relatives aux paramètres "explicatifs" sont présentés au tableau III.17.a.

Du point de vue du pH, les horizons analysés sont tous neutres à basiques. La comparaison des différents écarts-types et des statistiques F permet de conclure à une faible différenciation des valeurs de pH. La nature de l'horizon et la série de sols ne sont pas des facteurs de différenciation. Les solums et les séquences présentent également une homogénéité interne relativement importante. L'essentiel de la variation des valeurs de pH s'explique en réalité par des différences entre les séquences, en réponse aux modes de gestion de la fertilité des terres.

Pour les variables COT et Nt, l'essentiel des variations se produit logiquement entre les horizons de surface et les horizons de profondeur. Ceci se vérifie tant pour les solums moyens (figure III.32) qu'individuels. On ne s'étonnera dès lors pas de constater que l'effet "profondeur" est significatif. On notera également qu'il n'y a pas d'effet "série de sols".

**Tableau III. 17: a) Paramètres pédologiques classiques - séquences limoneuses-
valeurs moyennes et écarts-types - pH, matière organique, granulométrie, CEC.**

	pH		COT	Nt	Granulométrie			CEC
	(H ₂ O)	(KCl)			g/100g	Argile 0-2µm	Limon 2-50	
Aba (n = 7)								
Ap	7.3 <i>0.4</i>	6.6 <i>0.5</i>	1.1 <i>0.2</i>	0.11 <i>0.01</i>	19.5 <i>3.0</i>	64.2 <i>6.7</i>	16.3 <i>5.4</i>	12.9 <i>2.7</i>
BT	7.2 <i>0.3</i>	6.0 <i>0.5</i>	0.4 -	- -	25.2 <i>2.1</i>	62.3 <i>9.6</i>	12.6 <i>7.9</i>	14.9 <i>1.4</i>
B/C	7.1 <i>0.5</i>	6.0 <i>0.9</i>	0.3 -	- -	21.7 <i>2.8</i>	64.1 <i>6.6</i>	14.3 <i>7.7</i>	11.7 <i>1.3</i>
AbB (n = 5)								
Ap	7.3 <i>0.5</i>	6.6 <i>0.6</i>	1.1 <i>0.2</i>	0.10 <i>0.01</i>	19.5 <i>0.8</i>	70.5 <i>3.3</i>	10.0 <i>3.6</i>	13.4 <i>1.5</i>
BT	7.3 <i>0.4</i>	6.0 <i>0.9</i>	0.6 -	- -	22.6 <i>3.6</i>	69.9 <i>1.7</i>	7.5 <i>2.4</i>	11.2 <i>2.9</i>
C	7.5 <i>0.3</i>	7.0 <i>0.6</i>	0.1 -	- -	17.4 <i>5.8</i>	66.1 <i>5.7</i>	16.5 <i>6.6</i>	8.7 <i>0.3</i>
Abp (n = 8)								
Ap	7.4 <i>0.2</i>	6.9 <i>0.3</i>	1.2 <i>0.2</i>	0.11 <i>0.02</i>	14.3 <i>2.6</i>	69.0 <i>6.7</i>	16.7 <i>8.2</i>	10.2 <i>1.6</i>
C	7.4 <i>0.2</i>	6.5 <i>0.5</i>	1.0 <i>0.5</i>	- -	14.8 <i>2.5</i>	69.7 <i>8.5</i>	15.4 <i>9.0</i>	8.5 <i>1.2</i>
₂ C	7.3 <i>0.5</i>	6.2 <i>0.7</i>	0.2 -	- -	18.1 <i>3.6</i>	66.4 <i>6.0</i>	15.4 <i>4.7</i>	10.6 <i>2.8</i>
Écarts-types moyens dans les solums et dans les séquences								
Aba	<i>0.3</i>	<i>0.6</i>	<i>0.5</i>	-	<i>3.5</i>	<i>4.7</i>	<i>4.8</i>	<i>1.9</i>
AbB	<i>0.3</i>	<i>0.6</i>	<i>0.5</i>	-	<i>3.2</i>	<i>2.8</i>	<i>3.0</i>	<i>2.2</i>
Abp	<i>0.2</i>	<i>0.4</i>	<i>0.5</i>	-	<i>2.2</i>	<i>5.1</i>	<i>5.0</i>	<i>1.6</i>
Séq.	<i>0.3</i>	<i>0.6</i>	<i>0.5</i>	-	<i>4.3</i>	<i>6.0</i>	<i>5.7</i>	<i>2.4</i>
Niveaux de signification des statistiques F pour les horizons, les séries et l'interaction horizon-série ($\alpha < 0.001$[***]; < 0.01[**]; < 0.05[*]; [NS])								
F _{Prof.}	NS	*	***	-	**	NS	NS	NS
F _{Série}	NS	NS	NS	NS	***	*	NS	***
F _{ab}	NS	NS	NS	-	*	NS	NS	*

b) Teneurs totales en éléments: Ca, Mg, K, Na, TRB, Al, Fe

	teneurs totales						
	Ca	Mg	K	Na	TRB	Al	Fe
	g/100g				cmolc/kg	g/100g	
Aba (n = 7)							
Ap	0.52 <i>0.12</i>	0.39 <i>0.04</i>	1.53 <i>0.15</i>	0.69 <i>0.04</i>	128.2 <i>9.1</i>	4.60 <i>0.49</i>	2.27 <i>0.27</i>
BT	0.44 <i>0.06</i>	0.47 <i>0.06</i>	1.64 <i>0.17</i>	0.67 <i>0.05</i>	132.5 <i>10.2</i>	5.17 <i>0.32</i>	2.69 <i>0.21</i>
B/C	0.44 <i>0.05</i>	0.46 <i>0.06</i>	1.60 <i>0.22</i>	0.68 <i>0.05</i>	130.8 <i>11.9</i>	5.17 <i>0.32</i>	2.50 <i>0.30</i>
AbB (n = 5)							
Ap	0.50 <i>0.09</i>	0.42 <i>0.03</i>	1.63 <i>0.15</i>	0.72 <i>0.08</i>	132.4 <i>6.8</i>	4.55 <i>0.30</i>	2.28 <i>0.15</i>
BT	0.49 <i>0.09</i>	0.48 <i>0.06</i>	1.68 <i>0.14</i>	0.74 <i>0.07</i>	139.7 <i>3.4</i>	4.92 <i>0.44</i>	2.58 <i>0.24</i>
C	0.44 <i>0.08</i>	0.44 <i>0.08</i>	1.48 <i>0.12</i>	0.74 <i>0.12</i>	121.6 <i>12.9</i>	4.45 <i>0.77</i>	2.36 <i>0.36</i>
Abp (n = 8)							
Ap	0.43 <i>0.07</i>	0.31 <i>0.05</i>	1.51 <i>0.11</i>	0.73 <i>0.08</i>	117.8 <i>8.8</i>	4.02 <i>0.56</i>	1.82 <i>0.23</i>
C	0.38 <i>0.07</i>	0.31 <i>0.06</i>	1.52 <i>0.28</i>	0.73 <i>0.07</i>	115.4 <i>13.6</i>	3.99 <i>0.56</i>	1.83 <i>0.31</i>
₂ C	0.38 <i>0.07</i>	0.36 <i>0.08</i>	1.59 <i>0.06</i>	0.73 <i>0.09</i>	121.4 <i>7.2</i>	4.60 <i>0.56</i>	2.19 <i>0.44</i>
Ecart-types moyens dans les solums et dans les séquences							
Aba	<i>0.07</i>	<i>0.06</i>	<i>0.14</i>	<i>0.04</i>	<i>8.1</i>	<i>0.46</i>	<i>0.31</i>
AbB	<i>0.05</i>	<i>0.05</i>	<i>0.07</i>	<i>0.03</i>	<i>8.1</i>	<i>0.49</i>	<i>0.26</i>
Abp	<i>0.05</i>	<i>0.05</i>	<i>0.13</i>	<i>0.04</i>	<i>7.4</i>	<i>0.35</i>	<i>0.22</i>
Séq.	<i>0.18</i>	<i>0.08</i>	<i>0.14</i>	<i>0.05</i>	<i>16.0</i>	<i>0.60</i>	<i>0.39</i>
Niveaux de signification des statistiques F pour les horizons, les séries et l'interaction horizon-série ($\alpha < 0.001$[***]; < 0.01[**]; < 0.05[*]; [NS])							
F _{Prof.}	*	**	NS	NS	NS	*	**
F _{Série}	**	***	NS	*	***	***	***
F _{ab}	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

c) Teneurs totales en éléments: ETMs

	teneurs totales						
	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co
	mg/kg						
Aba (n = 7)							
Ap	504.1 48.2	14.7 1.7	70.7 9.4	21.3 3.9	57.8 13.5	24.6 1.9	8.2 1.7
BT	446.6 75.8	15.5 1.7	58.0 5.8	24.2 4.5	55.1 14.6	15.8 3.7	9.5 1.3
B/C	466.8 87.3	14.7 2.5	51.2 5.4	27.5 5.1	48.1 14.5	12.5 2.1	9.0 2.0
AbB (n = 5)							
Ap	483.8 59.1	14.3 1.7	66.8 10.7	23.8 3.6	58.9 15.8	21.7 3.4	8.2 1.6
BT	448.3 52.9	14.8 2.4	54.9 6.2	26.3 2.2	53.3 10.3	13.9 1.1	8.6 2.0
C	511.6 123.3	11.8 3.3	47.0 6.5	25.1 1.6	58.5 9.8	14.4 0.6	8.7 1.3
Abp (n = 8)							
Ap	487.7 33.7	14.0 4.1	68.1 10.7	16.5 3.4	50.4 10.3	27.5 3.1	7.3 1.1
C	516.2 98.1	10.5 2.2	44.2 6.9	15.9 4.4	46.0 13.7	15.7 2.8	7.9 1.1
₂ C	484.7 99.6	11.1 2.4	44.5 6.6	18.9 4.7	51.1 15.8	13.1 1.9	8.8 0.7
Ecart-types moyens dans les solums et dans les séquences							
Aba	59.3	1.8	9.9	4.7	8.8	6.8	1.4
AbB	57.8	1.6	9.0	2.2	8.2	4.9	1.4
Abp	51.5	2.1	12.9	2.3	5.9	7.6	0.9
Séq.	64.8	2.7	11.2	5.3	9.5	6.5	1.4
Niveaux de signification des statistiques F pour les horizons, les séries et l'interaction horizon-série ($\alpha < 0.001$ [***]; < 0.01 [**]; < 0.05 [*]; [NS])							
F _{Prof.}	NS	NS	***	NS	NS	***	NS
F _{Série}	NS	***	**	***	NS	NS	NS
F _{ab}	NS	NS	NS	NS	NS	*	NS

Les teneurs moyennes en COT dans l'horizon labouré sont comprises entre 1.0 et 1.2 g/100g terre sèche; celles de Nt entre 0.10 et 0.11 g/100g terre. Les teneurs sont nettement plus faibles dans les horizons plus profonds. L'horizon de moyenne profondeur des Abp peut toutefois encore présenter des teneurs en COT non négligeables. Les ordres de grandeur sont très proches d'une séquence à l'autre.

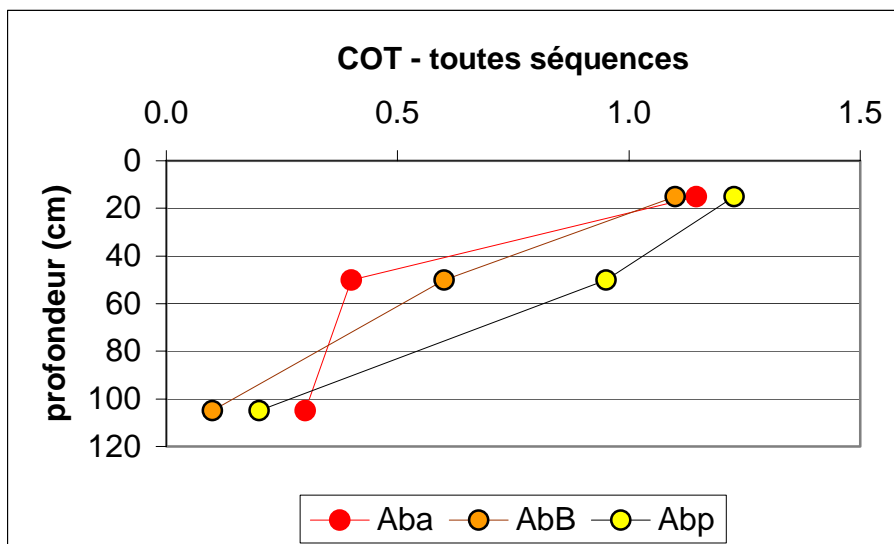


Figure III. 32: Profils en COT -moyennes des 7 séquences.

Pour ce qui concerne la granulométrie, on constate des différences évidentes entre horizons, au sein d'un même solum et à fortiori dans les séquences. Certains horizons présentent une variabilité plus importante que celle des autres entre les séquences, tels l'horizon C des solums AbB, qui selon les cas correspond à un véritable C ou à un B/C, et l'horizon $_2$ C des Abp qui peut être de nature colluviale ou être un BT enfoui. Cette occurrence de BT enfouis se marque d'ailleurs au niveau des teneurs moyennes (tableau III.17 et figure III.33). La différenciation verticale est toutefois plus importante pour les solums des séries Aba et AbB dans lesquels le ventre textural des BT est bien marqué. On remarquera qu'en moyenne le profil Aba est plus argileux que le profil AbB (figure III.34), particulièrement pour les horizons de profondeur. Ceci est dû au degré de troncature des solums AbB supérieur à celui des Aba. Au niveau d'une séquence, la différenciation texturale sera bien évidemment plus importante qu'au niveau solum, avec des différences entre colluvions et BT qui peuvent atteindre 10g/ 100g terre.

L'analyse de la variance ne fait que confirmer l'importance de la nature

de l'horizon, par le critère « profondeur », de la série de sols et de l'interaction entre les deux, *i.e.* dans le cas présent les profils de teneurs ne sont pas parallèles.

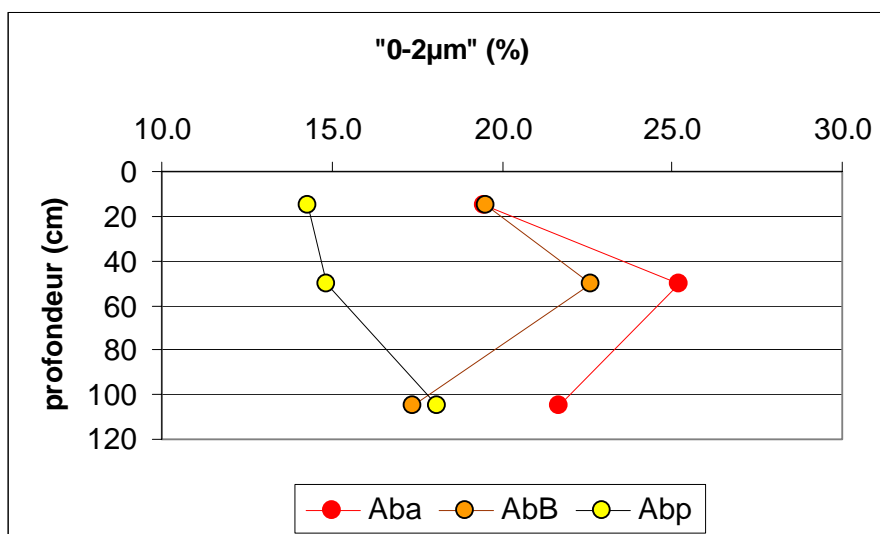


Figure III. 33: Profils des teneurs en argile -moyennes des sept séquences.

Les teneurs en sables, à l'instar du pH_{H_2O} , présentent une variabilité qui est essentiellement due aux différences entre séquences. Il en résulte notamment un carré moyen résiduel relativement élevé dans le schéma d'analyse de la variance et une perte de puissance de celle-ci. On notera tout de même que les teneurs en sables sont plus variables dans le bas des solums des séries Aba et AbB et dans le haut des solums de la série Abp.

La CEC étant fortement tributaire de la teneur en argile, il n'est pas étonnant de trouver des résultats qui s'inscrivent dans la même logique. Il existe toutefois une différence qui trouve son origine dans la contribution de la matière organique à la CEC. En effet, si les différences entre séries de sols restent significatives, celles entre horizons ne le sont plus. La différence de teneur en argile entre l'horizon Ap et le BT est compensée pour la CEC par une différence de teneur en matière organique.

b teneurs totales en éléments

Pour ce qui concerne les teneurs en Ca, Mg, K, Na et la TRB, on note que:

- des différences de teneurs entre horizons sont sensibles, sauf pour Na;
- le facteur "profondeur" n'est toutefois significatif que pour Ca (teneurs plus élevées dans l'horizon de surface) et Mg (teneurs moins élevées dans l'horizon de surface); pour K l'ampleur des variations de teneurs entre les séquences explique l'absence de signification du test F;
- la variabilité est plus forte pour l'horizon Ap de la série Aba pour Ca tandis que pour Mg, on retrouve le schéma de l'argile;
- la variabilité verticale est en moyenne légèrement plus importante dans un solum de type Aba que dans un autre solum;
- la nature de la série de sols est un facteur de différenciation pour Ca, Mg et la TRB; il s'agit essentiellement d'une différenciation entre Abp et les deux autres séries;
- pour les raisons évoquées ci-dessus, la variabilité à l'échelle d'une séquence est sensiblement plus grande qu'à l'échelle d'un solum;
- sur la séquence théorique (figure III.34), la TRB exprime relativement bien l'allure des profils des éléments Mg et K et peu ceux de Ca et Na.

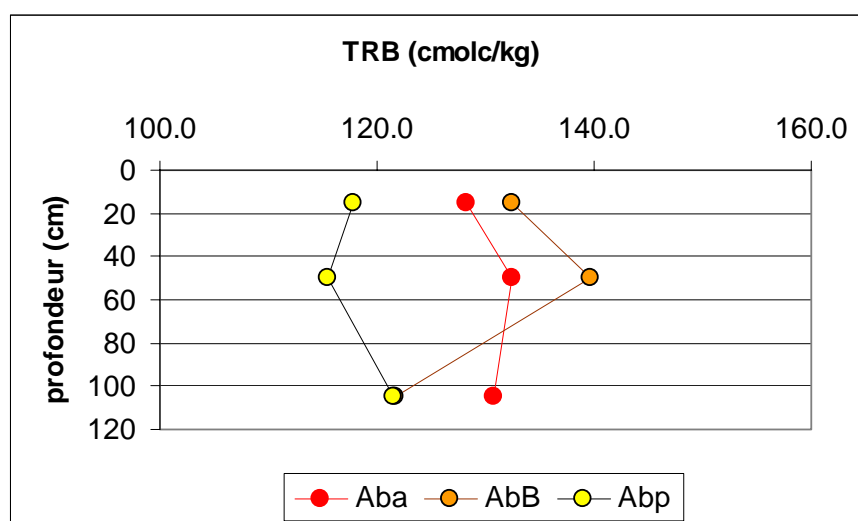


Figure III. 34: Profils des TRB -moyennes des sept séquences.

Conformément à nos précédents résultats, les teneurs en Al et Fe sont

étroitement liées, comme en atteste la figure III.35.

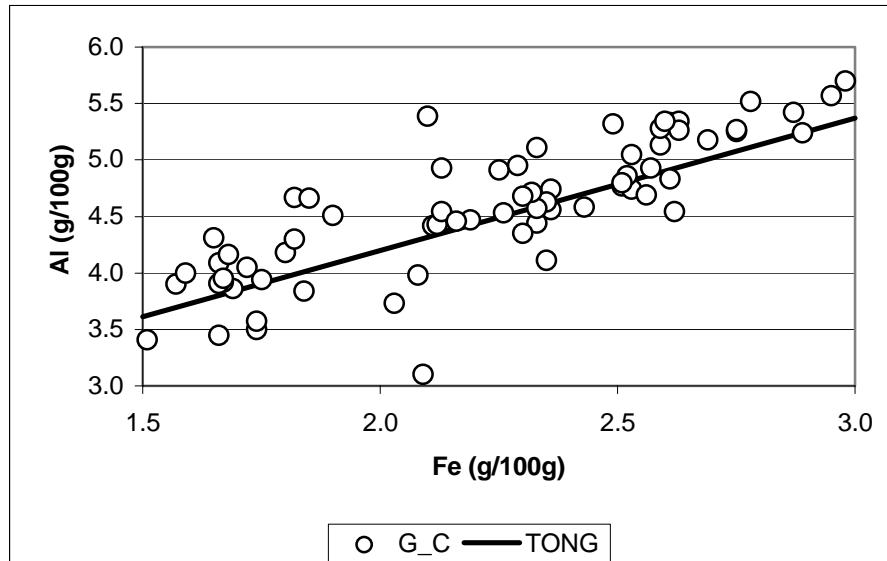


Figure III. 35: Relation Al-Fe dans les horizons des séquences limoneuses par rapport à celle de Tongrinne.

Aux ordres de grandeur près, les constats effectués pour les teneurs en argile sont rigoureusement les mêmes pour les teneurs en Al et en Fe :

- ❑ les horizons présentent des niveaux de teneurs différents les uns des autres,
- ❑ des différences significatives existent au sein d'un solum, au sein d'une séquence et parfois entre les séquences (particulièrement pour les horizons C de AbB et $2C$ de Abp);
- ❑ la différenciation verticale est plus importante pour Aba et AbB que pour Abp ; et
- ❑ la nature de l'horizon et de la série de sols constituent tous deux des "facteurs" de stratification pertinents pour les teneurs en Al et Fe.

Les teneurs moyennes en Mn sont comprises entre 446,6 (BT – Aba) et 516,2 mg/kg (C – Abp), mais les écarts-types associés à chacune des teneurs moyennes peuvent être relativement élevés. Les Ap sont globalement moins variables que les horizons sous-jacents. On notera également que dans les solums moyens la teneur en Mn est souvent plus élevée directement au-dessus de l'horizon le plus argileux du solum que dans celui-ci.

Les variations dans les solums et les séquences sont en moyenne modé-

rées par rapport à la variabilité de certains horizons.

En raison de la forte variabilité associée au niveau i, l'analyse de la variance ne permet pas de conclure à l'existence des effets « profondeur » et « série de sols ». En outre, sur base d'une analyse de la variance à un critère, non présentée ici, l'« horizon dans une série de sol » (niveau i) ne constitue pas non plus un facteur pertinent pour Mn.

Les teneurs moyennes en Cu dans les horizons sont peu variables et comprises entre 10.5 et 15.5. Les écarts-types des teneurs dans les horizons sont inférieurs à 2.5 mg/kg, sauf pour C dans l'AbB et Ap dans l'Abp (respectivement 3.3 et 4.1mg/kg).

Les différences de teneurs en fonction de la profondeur ne sont pas statistiquement significatives car les écarts-types relatifs à la différenciation verticale sont du même ordre de grandeur que la variation au sein de chaque horizon. Par contre, les séries de sols ne présentent pas les mêmes niveaux moyens de teneurs.

La figure III.36 illustre le caractère trop simpliste de ce constat. Si l'on considère les solums moyens, la série de sols semble bien être un facteur de différenciation pour les horizons des profondeurs 30-60 et 90-120cm et la différenciation verticale semble réelle pour les séries AbB et Abp. Ces différences n'ont pu être mises en évidence par l'analyse de la variance en raison de son manque de puissance quand les différenciations verticales et entre les séquences présentent les mêmes ordres de grandeur. La situation pour Cu est en réalité assez semblable à celle constatée pour la CEC, à savoir, une influence de la teneur en argile pour les horizons intermédiaires et profonds, et de la matière organique pour l'horizon labouré. En surface, on assiste à une homogénéisation des teneurs, telle que pour la prédiction de celles-ci la distinction de la série de sols ne présente plus d'intérêt.

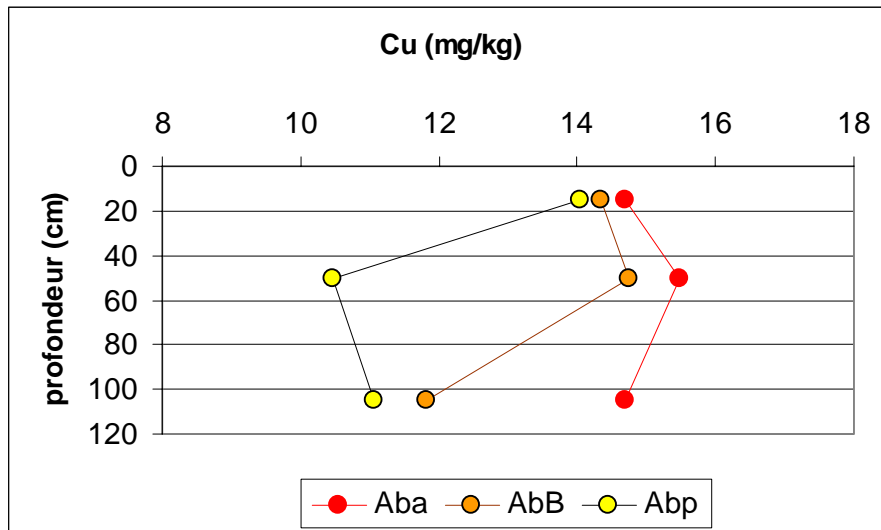


Figure III. 36: Profils des teneurs en Cu -moyennes des sept séquences.

L'analyse du tableau III.17.c pour les teneurs en Zn montre que:

- il existe une variabilité à travers les différents horizons; les horizons Ap présentent les teneurs les plus élevées en moyenne (figure III.37);
- la variabilité intra-horizon est relativement modeste; elle est toutefois plus grande pour les Ap que pour les autres horizons;
- la différenciation verticale est significative pour toutes les séries de sols et il existe un facteur "profondeur";
- exprimée en terme d'écart-type la variabilité des horizons dans une séquence peut être inférieure à la variabilité verticale dans un sol;
- il existe un effet "série de sols", principalement pour les horizons intermédiaires et de profondeur ($Abp < AbB < Aba$); en surface, on constate une certaine homogénéisation comme dans le cas de Cu.

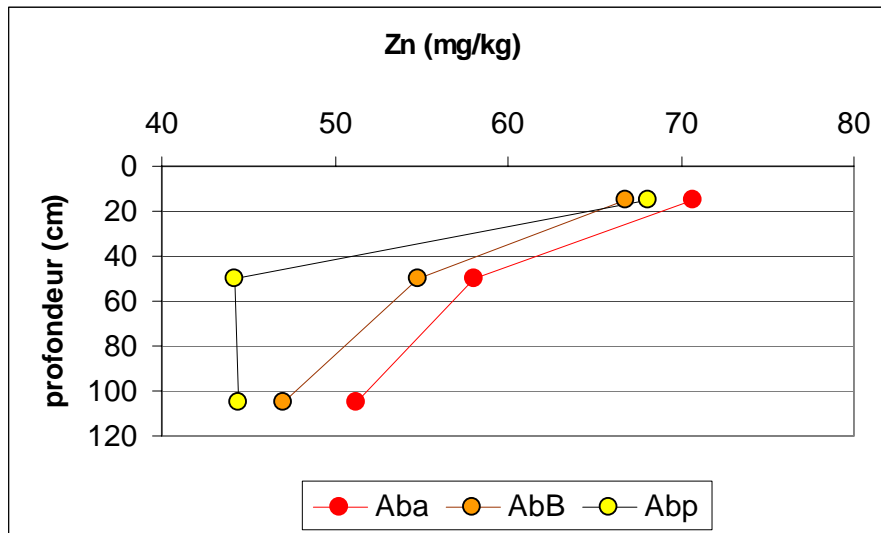


Figure III. 37: Profils des teneurs en Zn -moyennes des sept séquences.

Une différence de teneurs en Ni entre les horizons de la série Abp et ceux des deux autres séries est évidente à la lecture du tableau III.17.c. L'effet "série de sols" est d'ailleurs logiquement très hautement significatif. L'ensemble des horizons moyens présentent en outre une faible variabilité interne, ce qui confère une grande puissance à l'analyse de la variance. Celle-ci permet de conclure à l'existence d'un effet "profondeur" malgré des différenciations verticales qui sont peu marquées. Cet effet "profondeur" est en réalité le même que celui de la teneur en argile.

Pour Cr, les teneurs moyennes des horizons des séries de sols les plus argileuses (Aba et AbB) sont plus élevées que celles des horizons des Abp. Toutefois, en raison d'une variabilité intra-horizon plus grande, les différences entre les séries de sols ne sont pas significatives. On notera également que la variabilité verticale, également, est plus faible que la variabilité intra-horizon. Il est dans ces conditions difficile de mettre quoi que soit en évidence.

Pour ce qui concerne les teneurs en Pb, on observe des variations essentiellement entre les horizons de surface et les autres. Les teneurs présentent une double homogénéité: homogénéité dans les horizons de surface avec des teneurs de l'ordre de 25mg/kg et une homogénéité de profondeur avec des teneurs de l'ordre 15mg/kg. La différenciation est clairement verticale et celle à l'échelle de la séquence n'est pas plus importante que celle à l'échelle du solum.

Pour les teneurs en Co, on trouve de faibles différenciations verticales et entre séries de sols comparées à la variabilité intra-horizon. L'analyse de la variance est donc impuissante à déceler la liaison entre Co et la teneur en argile (figure III.38). La différenciation des teneurs en Co suit pourtant le même schéma que la différenciation de l'argile.

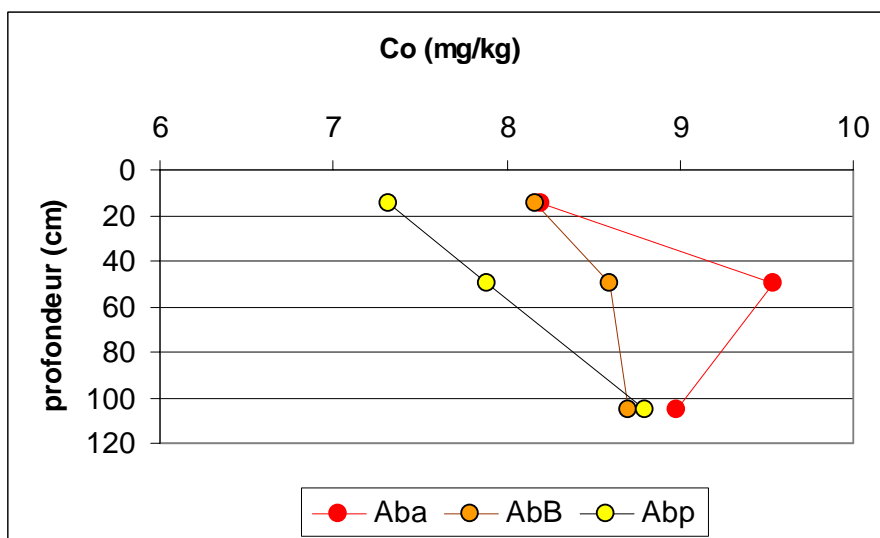


Figure III. 38: Profils des teneurs en Co -moyennes des sept séquences.

c relations entre teneurs totales et variables "explicatives"

Les niveaux de signification statistique des relations linéaires entre teneurs en éléments et variables "explicatives" figurent au tableau III.18.

On observe des relations hautement significatives entre la fraction argileuse et les teneurs en Mg, K, Al, Fe, Cu, Ni et Co. Les relations argile-Na et argile-Pb sont négatives; la première est imputable au hasard car Na est peu variable, la seconde trouve son origine dans le fait que les horizons de surface sont moins argileux que ceux en profondeur.

Le pH ne présente de caractère explicatif apparent que pour Ca, tandis que les teneurs élevées en COT sont synonymes de teneurs élevées en Ca, Zn et Pb, mais pas forcément en raison des mêmes causes. La CEC exprime bien l'interaction des composantes minérales et organiques du complexe d'échange sauf pour Pb.

Tableau III. 18: Matrice des corrélations relative aux teneurs totales (HF) et variables "explicatives" –séquences limoneuses.

	"0-2"	"0-10"	">50µm"	pH _{H2O}	COT	CEC	TRB	Al	Fe	Mn
Ca	0.291	0.299		0.254	0.441	0.413	0.596		0.380	
Mg	0.843	0.820	-0.349			0.631	0.857	0.768	0.920	
K	0.443	0.523	-0.499			0.266	0.705	<i>0.311</i>	<i>0.377</i>	
Na	<i>-0.357</i>	-0.396				-0.298				
Al	0.768	0.739	-0.288	-0.274	-0.278	0.615	0.638		0.812	
Fe	0.876	0.798			-0.237	0.705	0.768	0.812		-0.255
Mn									-0.255	
Cu	0.533	0.578				0.460	0.560	0.591	0.525	
Zn					0.634	0.395	<i>0.314</i>			
Ni	0.707	0.622				0.594	0.725	0.717	0.808	
Cr								<i>0.348</i>	0.416	
Pb	<i>-0.357</i>	<i>-0.272</i>			0.731			<i>-0.379</i>	-0.417	
Co	0.547	0.461			-0.290	0.504	0.478	0.506	0.593	

Degré de signification: $\alpha < 0.001$; $\alpha < 0.01$; $\alpha < 0.05$

La TRB exprime les mêmes relations avec les éléments que celles de l'argile, sans les relations négatives avec Na et Pb. Al et Fe présentent également des relations avec les autres éléments semblables à celles de l'argile. Toutefois, ces deux éléments sont également corrélés positivement à Cr. Les teneurs en Mn, par contre, ne portent aucun caractère explicatif direct pour les autres éléments.

Comme dans le cadre de l'estimation du fond géochimique des limons «brabantiens» (titre 5.3.2.2.e), une analyse factorielle a été réalisée sur les variables "explicatives" pour créer des facteurs indépendants. La seule modification par rapport à la factorisation précédente concerne l'introduction de la variable COT. Le détail des résultats figure en annexe 7.

Les constats sont très semblables, à quelques nuances près:

- quatre facteurs contiennent les 3/4 de la variance totale des variables explicatives; toutefois les variations de Na, Mn et COT sont moins bien prises en compte que celles des autres variables;
- le premier facteur correspond à la dualité entre les fractions granulométriques "0-2µm" et ">50µm" (figure III.39);

lométriques "0-2 μ m" et ">50 μ m" (figure III.39);

- le deuxième facteur est conditionné par le niveau des pH et Ca, mais également par COT (figure III.39); cet axe explique donc en partie la différenciation entre les horizons de surface et les autres;
- les troisième et quatrième facteurs, respectivement ici "MnOOH" et "fractions limoneuses fines" ont simplement permuté dans l'ordre des facteurs par rapport à la factorisation BRAB.

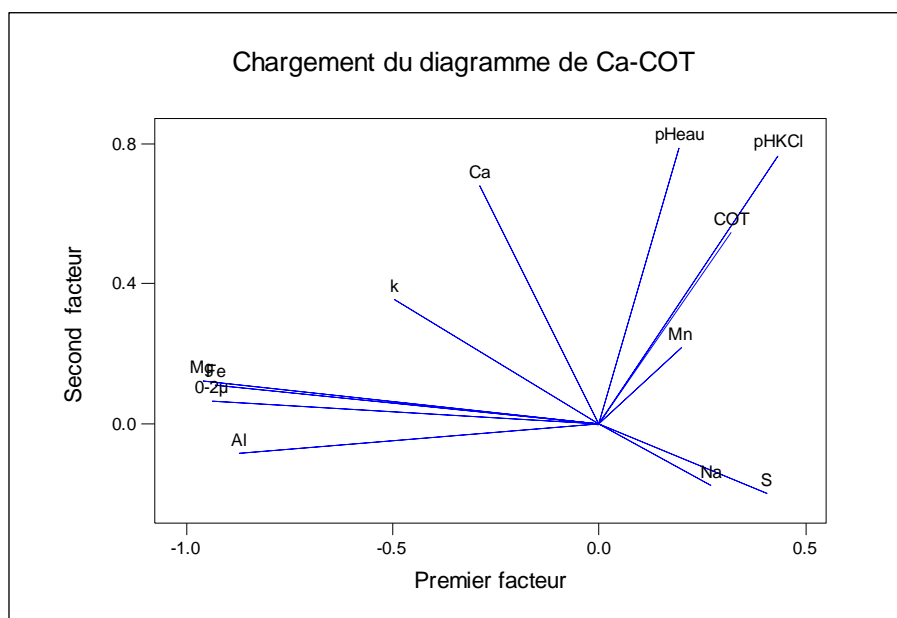


Figure III. 39: Poids des variables "explicatives" dans le premier plan factoriel relatif aux horizons des séquences limoneuses.

La sous-représentation de la variable COT s'explique par le nombre important de variables liées à la fraction argileuse. La pertinence des facteurs pour "expliquer" les variations des teneurs en ETMs peut être évaluée sur base d'une analyse en régression multiple, selon que les coefficients de régression entre facteurs et ETMs sont significatifs ou non (tableau III.19).

Si l'on considère l'ensemble des horizons, la fraction argileuse n'est plus un facteur explicatif pour Zn, contrairement aux autres éléments. A noter que pour Pb, l'argile agit comme une phase diluante dans la régression. Il s'agit d'un artéfact dû au fait que les horizons de surface plus riches en Pb sont moins argileux que les horizons sous-jacents.

Tableau III. 19: Pertinence des facteurs pour les ETMs.

	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co
Tous horizons confondus							
Facteur							
1	OUI	OUI	-	OUI	OUI	OUI	OUI
2	OUI	OUI	OUI	-	-	OUI	-
3	OUI	-	OUI	OUI	OUI	-	-
4	OUI	-	OUI	-	-	OUI	OUI
R ²	64.1	34.8	28.4	65.3	16.5	37.8	35.9
Horizons intermédiaires et profonds							
Facteur							
1	-	OUI	OUI	OUI	OUI	-	OUI
2	-	-	-	-	-	-	-
3	OUI	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-
R ²	61.9	87.9	75.6	59.0	15.3	-	18.8

Le facteur "surface" est significatif pour Mn (accumulation au-dessus du BT), pour Cu, Zn et Pb (accumulation plus ou moins importante en surface). Le facteur "MnOOH" semble agir comme phase diluante de Zn, Ni et Cr dans les horizons de profondeur, mais ce constat ne peut s'appuyer sur aucun processus physico-chimique connu. La liaison déjà supposée entre le facteur "limons fins" et Co trouve ici une confirmation.

Etant donné la sous-représentation de la variable COT ainsi que le caractère "accumulateur" de l'horizon de surface principalement pour Pb et Zn, il est légitime de penser que les variances pourraient être mieux "expliquées" en considérant séparément les horizons de surface des autres horizons. Le même exercice réalisé sur les horizons de profondeur confirme le caractère explicatif majeur des phases "0-2 μ m" et ">50 μ m" (tableau III.19).

Ces résultats montrent l'intérêt, pour les sols "limoneux" agricoles, de raisonner en terme de fond pédo-géochimique lié à l'argile et au fer (FPG_{arg} ou FPG_{Fe}), dont la valeur peut être prédite par régression. On peut donc songer à formaliser des relations ETMs-"0-2 μ m" (modèle MOSLIM dans la suite du texte) ou à extrapoler les modèles obtenus pour le fond géochimique (TONG et BRAB-IV) pour prédire les teneurs en ETMs dans n'importe quel type d'horizon de sol "limoneux" (figure III.40). La comparaison des différents modèles de régression et la per-

tinence d'équations "universelles" seront discutés au point 7.2.

La distribution des écarts entre valeurs mesurées et prédites par une loi, un modèle, *i.e.* les résidus du modèle, constitue un indicateur de la pertinence de ce modèle. Pour les horizons peu humifères des sols issus de loess, les résidus d'une régression par les teneurs en argile ou en Fe relèvent essentiellement d'aléas opératoires. Dans les horizons de surface, il faut en outre faire intervenir le cycle bio-géochimique naturel et des contaminations naturelles et/ou anthropiques, anciennes ou récentes. Si une tendance à l'accumulation existe, la différence entre la teneur effectivement mesurée et la teneur estimée est un nôme¹³ (simple -monôme- ou composé -polynôme) positif. Outre la variabilité résiduelle opératoire de moyenne nulle, il présente une composante structurale déterministe (les différentes phases porteuses autres que l'argile et les oxy-hydroxydes de fer associés, *i.e.* les matières organiques, les intrants minéraux, les poussières atmosphériques...) et une composante structurale aléatoire (variations de composition des différentes phases porteuses). Ces composantes sont difficiles à appréhender individuellement, de même qu'il est difficile d'en déterminer l'origine naturelle ou anthropique. Nous introduirons donc dans la discussion le concept de "nôme agricole", propre à l'horizon labouré, qui à l'instar des teneurs agricoles habituelles (BAIZE) pourra se satisfaire d'un traitement purement probabiliste.

L'intérêt des teneurs (agro-)"nômiales" par rapport aux teneurs agricoles est qu'en s'affranchissant d'une partie de la variabilité elles permettent théoriquement de mettre plus facilement en évidence les teneurs réellement anormales. En outre, dans le contexte de la Région limousine, il est raisonnable de considérer qu'elles expriment le degré d'anthropisation des sols agricoles (même si l'on ignore où se trouve exactement le zéro!).

¹³ Nôme: quantité jointe à une autre par un signe + ou -.

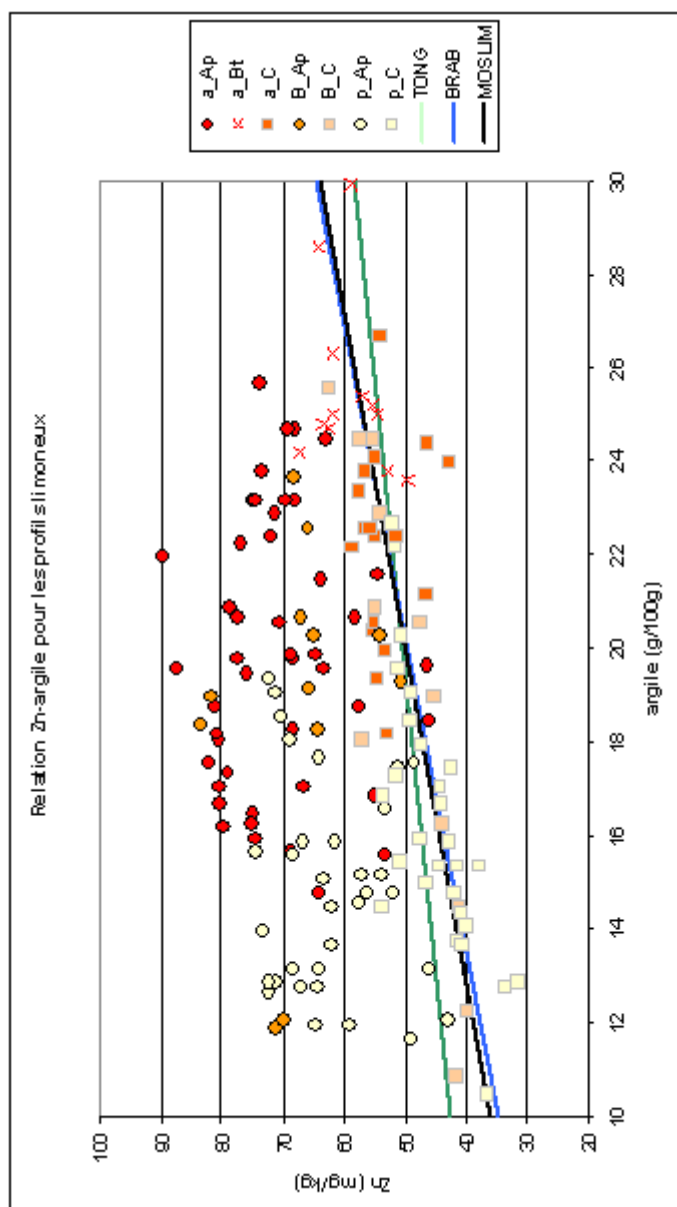


Figure III. 40: Relation Zn-argile dans des sols "limoneux". Les horizons sont distingués sur base du développement de profil du solum (a, B ou p) et du type d'horizon (Ap, BT ou C). Une relation fonctionnelle existe pour le fond pédogéochimique, modélisable par régression (TONG, BRAB, MOSLIM). Les teneurs "nômiales", relativement variables, doivent faire l'objet d'une autre approche.

6.4.1.3 Conclusions partielles

D'une manière générale, les ordres de grandeur des différentes variables dans les horizons des solums de la série Aba sont cohérents avec les résultats discutés au cours des titres précédents. La séquence moyenne formalisée au tableau III.17 peut être considérée comme représentative des teneurs et des relations entre horizons à l'échelle d'une séquence limoneuse.

L'érosion est à l'origine de la différenciation morphologique des séries AbB et Abp à partir de Aba. Les résultats montrent que les séries Aba et AbB ne peuvent pas être considérées comme fondamentalement différentes. Par contre, la série Abp est distincte des deux premières essentiellement sur base des teneurs en argile et des éléments liés à l'argile, à savoir Cu, Zn, Ni et Co pour ce qui concerne les ETMs.

Il y a toutefois lieu de nuancer les constats en fonction de la profondeur des horizons. Les horizons de surface ne présentent en effet pas les mêmes facteurs de différenciation que les autres horizons. La prééminence du facteur organique, lié à la gestion agricole des terres, est ainsi clairement mise en évidence pour les éléments Cu, Zn et Pb. Le facteur "argile" n'a pour ces éléments qu'une importance mineure dans l'horizon labouré et le critère "série de sols" plus guère d'intérêt comme facteur de stratification en "sols limoneux".

Pour les horizons de profondeur, par contre, la teneur en argile reste le facteur "explicatif" majeur des teneurs en ETMs. La série de sols et la nature de l'horizon constituent autant de facteurs potentiels de stratification des couvertures pédologiques limoneuses pour la prédiction des teneurs en ETMs.

A l'instar de celles réalisées pour l'estimation du fond géochimique, des analyses de régressions peuvent être envisagées pour la prédiction de teneurs pédo-géochimiques, *i.e* des teneurs dans les sols exemptes de tout facteur anthropique. Toutefois, la dualité des phases porteuses principales "argile" et "matière organique", ainsi que l'impossibilité de maîtriser la part naturelle dans la seconde, obligent à raisonner en termes de fond pédo-géochimique modélisable par régression avec les teneurs en argile d'une part, et par ailleurs de "nôme agricole", qui correspond au résidu de la régression pour l'horizon labouré et est pour partie d'origine naturelle et pour une autre partie d'origine anthropique.

6.4.2 Quelques contacts limons-substrats

6.4.2.1 Matériels et méthodes

a situation géographique des secteurs étudiés

Ainsi qu'il a été écrit aux chapitres 2 et 5, les lithologies dominantes dans la zone d'étude sont, outre les dépôts limoneux quaternaires: les shales, les calcaires, les grès, les sables et les argiles. Ces matériaux, prélevés dans la vallée de l'Orneau, ont fait l'objet d'une caractérisation géochimique au chapitre 5, caractérisation dont on pouvait conclure que chaque famille lithologique présente son propre spectre de composition élémentaire.

Afin de mieux cerner les limites géographiques des modèles relatifs aux "sols limoneux", les transitions entre ceux-ci et des sols sur substrats préquaternaires ont été étudiées dans trois secteurs. Des toposéquences représentatives ont ainsi été caractérisées dans un secteur sur calcaire, un secteur sur shale et un secteur sur sable (Figure III.41).

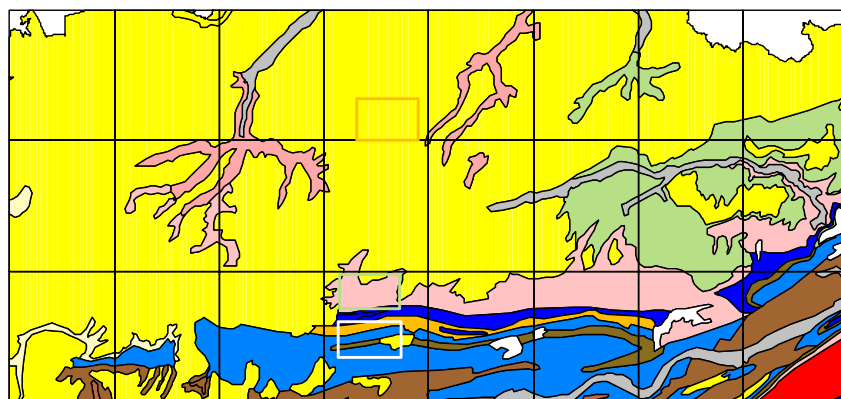


Figure III. 41: Position des secteurs étudiés sur une carte lithologique simplifiée de la zone d'étude. (légende : teintes roses, oranges, brunes: shales et grès, teintes bleues = calcaires et dolomies, vert : craies, jaune = sables et argiles, gris : alluvions). Secteur sur calcaire -blanc-, sur shale -vert- et sur sables -orange.

Les deux premiers secteurs font partie du bassin versant de l'Orneau, le troisième est situé à quelques kilomètres au nord de celui-ci. Les séquences ont été choisies à partir de l'analyse des documents cartographiques existants (Carte des Sols de la Belgique, Carte géologique détaillée [1/40 000], cartes topographiques de l'IGN) et de sondages de reconnaissance sur le terrain.

Sur les plateaux qui bordent les versants calcaires de la vallée de l'Orneau, les "sols limoneux" sont naturellement bien drainés et mis en culture. La toposéquence représentée à la figure III.43 coupe du Sud au Nord la vallée du Repjou, affluent de l'Orneau. Elle est illustrative de l'organisation des sols dans le paysage du secteur sur calcaire.

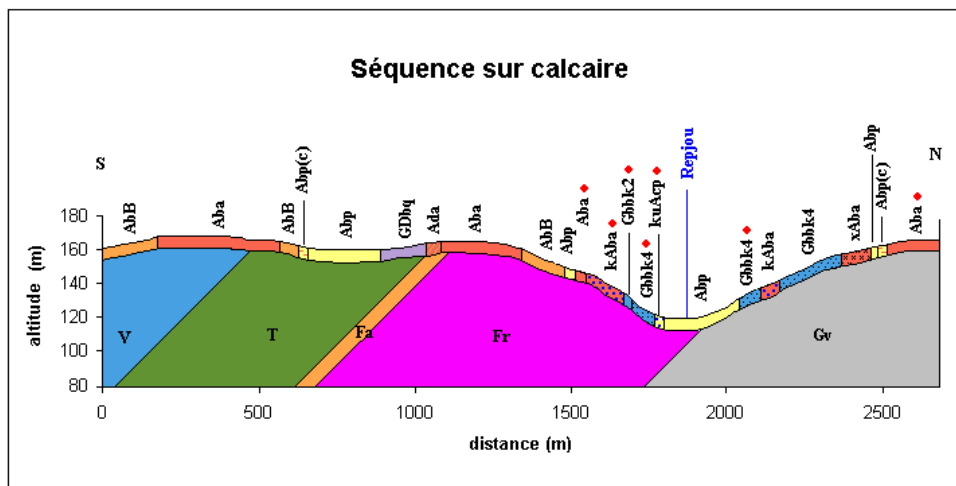


Figure III. 43: Toposéquence illustrative des relations géologie-relief-sols en secteur "limons sur calcaire". En rouge, les séries de sols échantillonnées.

Au sein de cette séquence générale, une séquence particulière a été échantillonnée. Elle se compose des séries de sols:

Aba \Rightarrow kAba¹⁴ \Rightarrow Gbbk2 \Rightarrow kuAcp sur le versant exposé au nord, et

Aba \Rightarrow Gbbk4 sur le versant opposé.

Les solums étudiés et les horizons analysés sont schématisés à la figure III.44.

¹⁴ kAba: sol limoneux à horizon BT à substrat calcaireux à faible profondeur;

Gbbk2: sol limoneux à charge calcaire peu profond;

Gbbk4: sol limoneux à charge calcaire superficiel;

kuAcp: sol sur limon à substrat argilo-calcaireux à faible profondeur (colluvions).

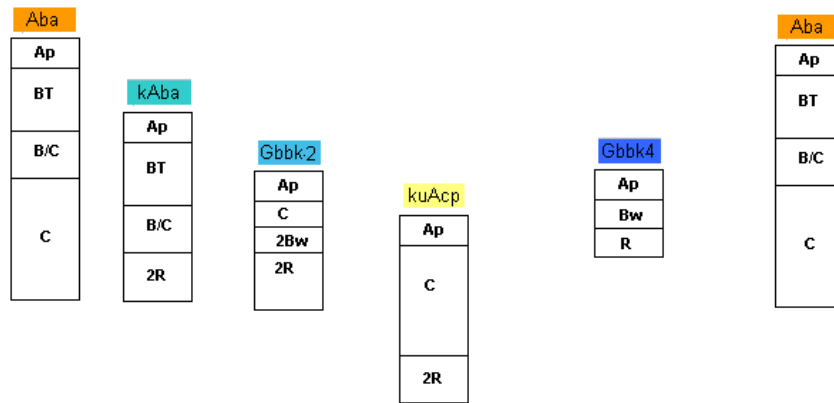


Figure III. 44: Schéma des solums étudiés dans la séquence "limons sur calcaire".

c la séquence des "limons sur shale"

L'extrait de la carte des sols relatif au secteur sur shale est présenté ci-après (Figure III.45); la toposéquence illustrative de l'organisation des sols dans le paysage à la figure III.46.

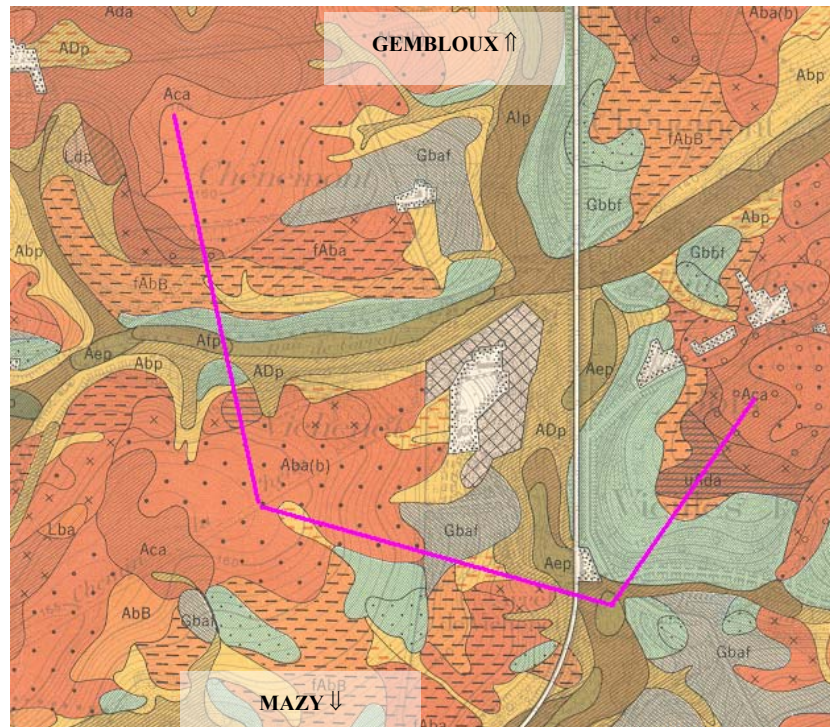


Figure III. 45: Extrait de la Carte des sols de la Belgique - substratum de shales (échelle approximative: 1/20 000). En rose, le tracé de la séquence illustrative.

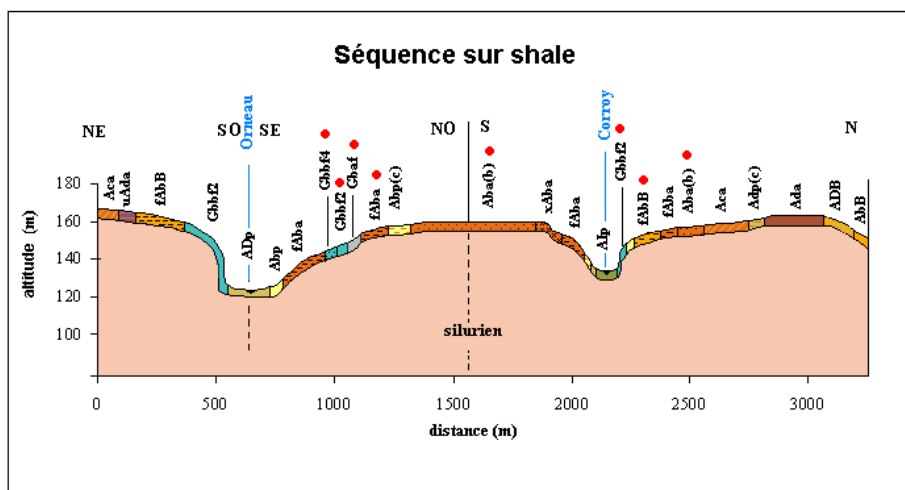


Figure III. 46: Toposéquence représentative des relations géologie-relief-sols en secteur "limons sur shale". En rouge, les séries de sols échantillonnées.

L'Orneau traverse le secteur étudié du nord au sud. Deux affluents le rejoignent, le ruisseau de Corroy à l'ouest et l'Arton à l'est. Au sud de Gembloux, l'anticlinal du Brabant se compose principalement de roches pélitiques (shales et phyllades). Les shales du secteur étudié appartiennent aux Assises de Corroy (au nord du ruisseau de Corroy) et de Vichenet (au sud). On peut remarquer sur la figure III.45 que les sols limono-caillouteux à charge schisteuse (Gbbf en vert sur la carte des sols) ne se répartissent pas de manière homogène sur les versants des cours d'eau. Il existe en effet une double dissymétrie topographique entre le versant est et le versant ouest d'une part, entre le nord et le sud d'autre part. Cette dissymétrie des versants s'accompagne d'une dissymétrie de la répartition des séries sols; les sols limono-caillouteux se concentrent sur les versants les plus raides exposés à l'ouest ou au sud. Sur les versants opposés à pente plus douce, les sols émergent aux séries "limoneux à substrat à faible profondeur". Les plateaux constituent le domaine des sols "limoneux à bon drainage naturel" si la pente est modérée, ou "gleyifiés" si la topographie est plane. Les BT sont tachetés. Les sols sur pentes fortes sont occupés par la forêt, ceux sur pentes plus faibles par la culture, les fonds de vallées humides sont réservés à la prairie.

Une double séquence de solums a été échantillonnée, la première sur le versant est de l'Orneau, la seconde perpendiculaire au ruisseau de Corroy. Les solums et leurs horizons caractéristiques sont schématisés à la figure III.47.

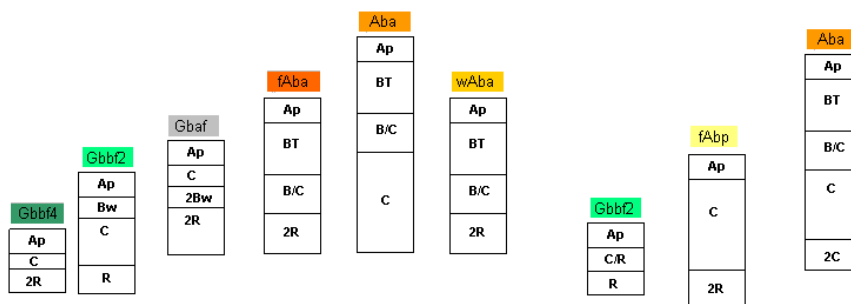


Figure III. 47: Schéma des solums étudiés dans la séquence "limons sur shale".

Les séquences caractérisées se composent donc des séries suivantes:

Aba \Rightarrow fAba¹⁵ ou wAba \Rightarrow Gbaf \Rightarrow Gbbf2 \Rightarrow Gbbf4 et

Aba \Rightarrow fAbp \Rightarrow Gbbf2.

d la séquence des "limons sur sable bruxellien".

Le secteur sur sable est situé entre les vallées principales de la Dyle et de la Gette. La Formation de Bruxelles, dont l'épaisseur peut atteindre 30m, y recouvre les formations plus anciennes de l'Anticlinal du Brabant. Localement, les sables "bruxelliens" sont surmontés des sables, plus fins et glauconifères, de la Formation de Tongres.

Un extrait de carte des sols (figure III.48) et une coupe illustrative de l'organisation des sols par rapport au relief et à la géologie (figure III.49) sont présentés.

La présence d'un substrat sableux se marque au niveau des séries de sols rencontrées par la présence de "sols limoneux" peu profonds à substrat sableux, de séries sablo-limoneuses (textures L et P), limono-sableuses (S) et sableuses (Z). Les plages cartographiques correspondant à ces différentes séries sont d'extension relativement limitée dans le secteur étudié, en bordure des vallées et des dépressions, en

¹⁵ fAba: sol limoneux à horizon BT à substrat "schisteux" à faible profondeur;

wAba: sol limoneux à horizon BT à substrat argilo-sableux à faible profondeur

Gbaf: sol limoneux à charge "schisteuse" à horizon BT;

Gbbf2: sol limoneux à charge "schisteuse" peu profond;

Gbbf4: sol limoneux à charge "schisteuse" superficiel;

fAbp: sol sur limon à substrat "schisteux" à faible profondeur (colluvions).

raison d'une dissection du relief relativement peu marquée (Figures III.48 et III.49).

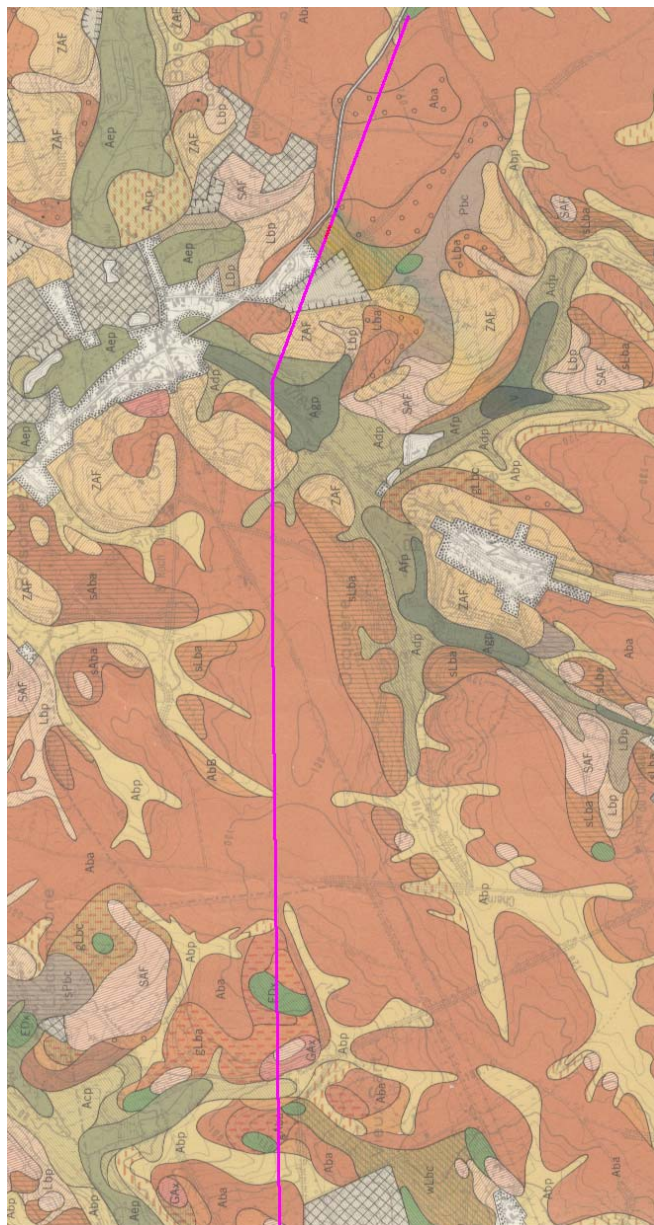


Figure III. 48: Extrait de la Carte des sols de la Belgique - substratum de sable (échelle approximative: 1/25 000). En rose, le tracé de la séquence illustrative.

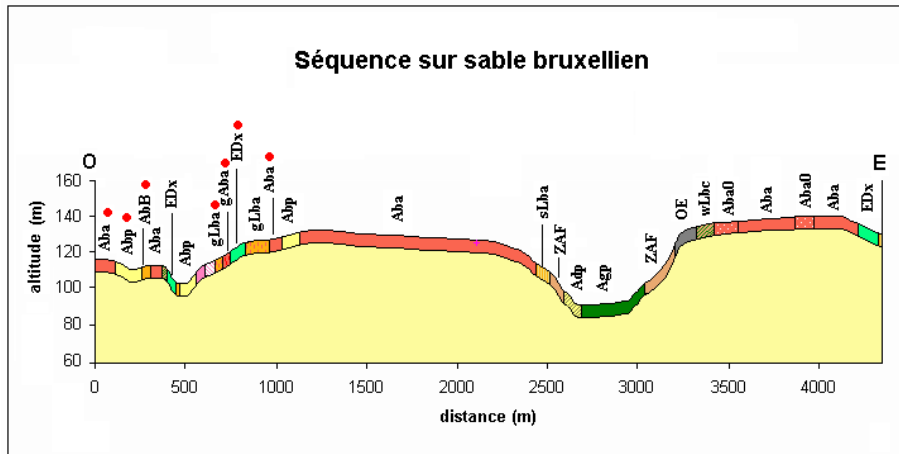


Figure III. 49: Toposéquence représentative des relations géologie-relief-sols en secteur "limons sur sable". En rouge, les séries de sols échantillonnées.

Sur les plateaux, les sols sont limoneux, profonds, à drainage naturel normal. Les horizons BT sont majoritairement sans taches. Des solums ont été échantillonnés, en deux séquences situées à proximité de la coupe théorique de la figure III.49, afin de caractériser les versants sur sable.

Les séquences caractérisées se composent donc des séries suivantes:

Aba \Rightarrow AbB \Rightarrow Abp \Rightarrow sAba¹⁶ et

Aba \Rightarrow gAba \Rightarrow gLba \Rightarrow EDx.

L'organisation des solums et des horizons étudiés est schématisée à la figure III.50.

¹⁶ sAba: sol limoneux à horizon BT à substrat sableux à faible profondeur;
gAba: sol limoneux à horizon BT à substrat caillouteux à faible profondeur
gLba: sol sablo-limoneux à horizon BT à substrat caillouteux à faible profondeur;
EDx: sol argileux modérément gleyifié à développement de profil non défini.

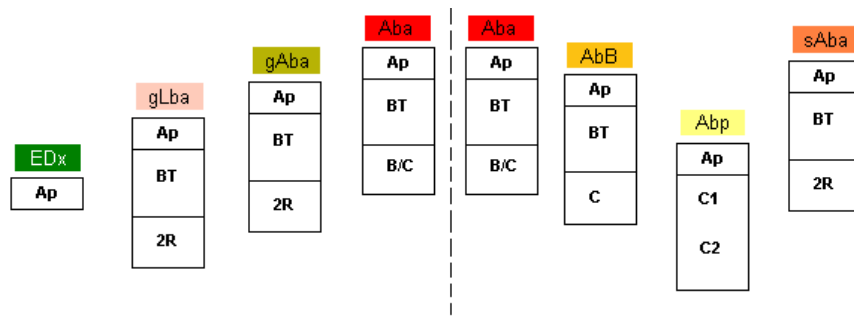


Figure III. 50: Schéma des sols étudiés dans la séquence "limons sur sable"

e méthodes d'analyse et de présentation des résultats

Deux sols ont été étudiés sur fosses, les autres par des sondages à la tarière de cartographe. Les sols ont été décrits selon la méthodologie standardisée de description des sols de DELECOUR et KINDERMANS (1980) pour les fosses pédologiques et selon la méthodologie simplifiée pour les sondages. Dans les fosses, tous les horizons ont été échantillonnés; dans les sondages, les horizons aux caractéristiques les plus tranchées (Ap, BT, (B), B/C, C, R) ont été prélevés. Dans les séquences sur sable, les horizons ont été prélevés à des profondeurs systématiques (0-30cm, 30-60cm et 90-120cm).

Les caractérisations de laboratoire sont les suivantes: pH_{H_2O} et pH_{KCl} , carbone organique total (COT), granulométrie (neuf fractions), teneurs totales (HF) en Ca, Mg, K, Na, Al, Fe, Mn, Cu, Zn, Ni, Cr, Pb, et Co. Les protocoles d'analyse figurent en annexe 3.

Les résultats ne seront pas présentés de façon détaillée pour tous les sols.

6.4.2.2 Résultats et discussions

a caractéristiques pédologiques classiques

Tous les horizons analysés dans chacune des séquences présentent un pH_{H_2O} neutre à basique; entre 7.2 et 8.3 sur secteur calcaire, 6.6 et 8.1 sur shale et entre 6.9 et 8.1 dans le secteur sur sable.

Le pH n'est donc pas un critère majeur de différenciation, ce qui confirme les résultats antérieurs sur solums agricoles.

Les teneurs en COT dans l'horizon de surface sont plus différenciées: de 0.9 à 1.8g/100g pour le secteur "calcaire", de 0.8 à 1.9g/100g sur shale et de 0.6 à 1.3g/100g sur sable. Pour référence, les percentiles 10 et 90 pour une population de plus de 14 000 analyses en Région limousine sont respectivement de 1.0 et 1.7g/100g (LAROCHE et OGER, 1999). Le secteur sur sable se distingue clairement des deux autres par des teneurs inférieures plus fréquentes (figure III.51).

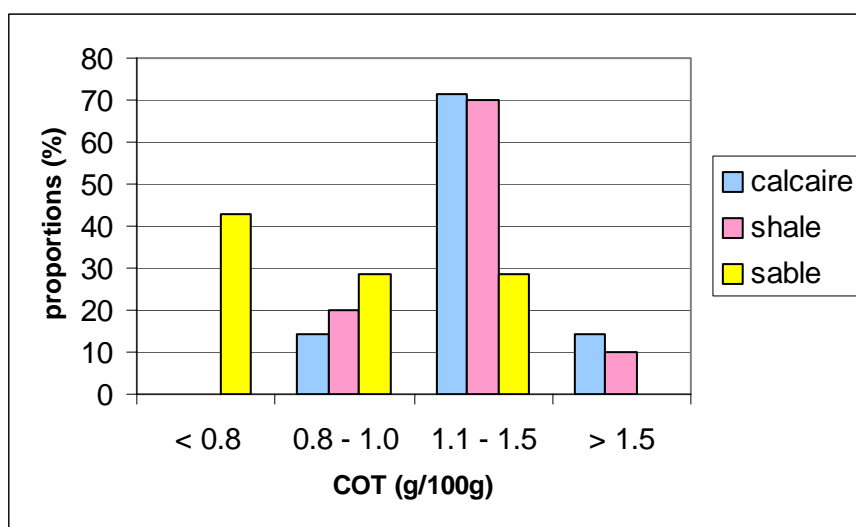


Figure III. 51: Pourcentages d'horizons de surface par classe de COT et par séquence.

Pour ce qui concerne la granulométrie, l'importance des fractions "0-2 μ m" et ">50 μ m" en tant que phase porteuse pour l'une et diluante pour l'autre a été constatée auparavant. Pour la commodité de la présentation des résultats, les teneurs en argile et en sables ont été classées selon une échelle commune à chacune des séquences. Les deux échelles sont basées sur les teneurs fréquemment observées dans les "sols limonneux" car ceux-ci servent de base de comparaison.

Pour l'argile, les classes suivantes ont été retenues: "<17.5%" (typique des colluvions limoneuses", "17.5-22.5" (typique des horizons labourés de la série Aba), "22.5-27.5" (typique des horizons BT), "27.5-32.5" (valeurs occasionnelles pour les BT" et ">32.5%" (marque une source d'argile "extérieure").

Pour la teneur en sable: "<5%" (faibles teneurs), "5-15" (valeurs typiques pour les horizons limoneux), "15-25" (teneurs élevées pour des limons), "25-35" et ">35%" (ces deux dernières traduisent le mélange en proportion croissante avec un matériau sableux).

Les teneurs en argile et en sables pour les séquences des trois secteurs sont représentées aux figures III.52 à III.57.

On notera que:

- on retrouve pour les sols des séries limoneuses les mêmes ordres de grandeur et les mêmes logiques que précédemment: présence des BT, troncature de l'AbB, colluvions moins argileuses et plus sableuses que les horizons des Aba...;
- les substrats ou leurs altérites sont nettement différenciés des horizons limoneux par les teneurs en argile ou en sable, voire les deux (cf kAba, wAba...);
- dans le secteur sur sable, les textures A sont bien différenciées des autres; par contre dans les deux autres secteurs, les textures A et G ne sont pas fondamentalement différentes, au moins pour les horizons les moins profonds à l'exception du solum Gbbk4;
- les limites entre matériaux caractérisés par des distributions granulométriques différentes sont nettes; il ne semble guère y avoir de mélange entre substrats et limons de couverture.

Pour ce qui concerne la caractérisation pédologique des secteurs étudiés, on retiendra que (i) les pH sont homogènes et typiques des sols sous culture en Région limoneuse, (ii) les teneurs en COT sont variables mais nettement plus faibles dans le secteur sur sable que dans les deux autres secteurs, (iii) les solums des séries à texture A présentent des ordres de grandeur et des relations entre horizons cohérents avec les solums étudiés précédemment, (iv) les substrats sont caractérisés par des distributions granulométriques différentes de celles des matériaux limoneux, mais (v) dans les "sols limoneux" peu profonds, avec ou sans charge caillouteuse, le passage d'un matériau à l'autre se réalise de manière franche sans horizon de mélange apparent.

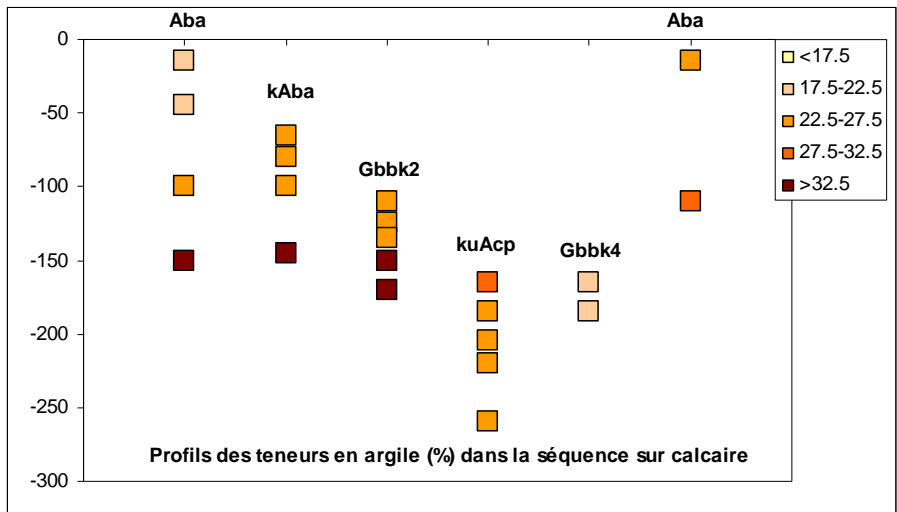


Figure III. 52: Profils des teneurs en argile (%) dans la séquence de limons sur calcaire. Les profondeurs, en ordonnées, sont relatives et idéalisées pour la représentation.

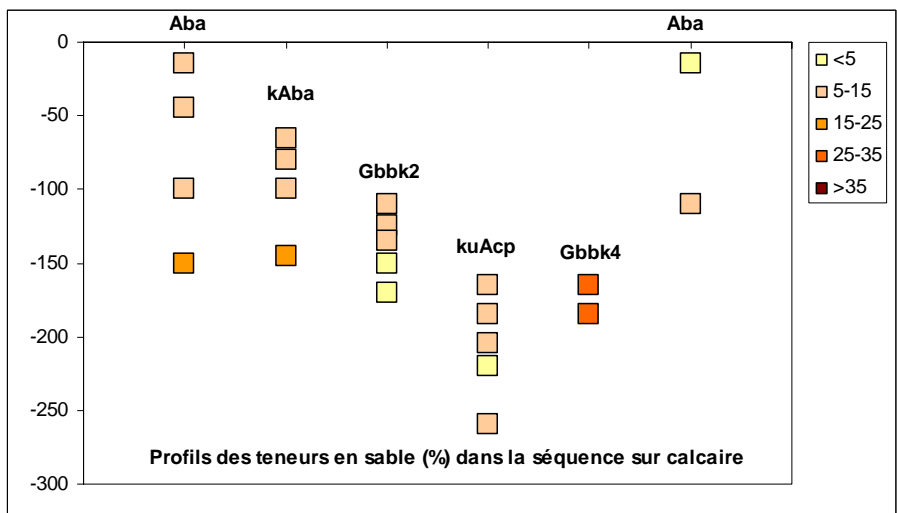


Figure III. 53: Profils des teneurs en sable (%) dans la séquence de limons sur calcaire. Les profondeurs, en ordonnées, sont relatives et idéalisées pour la représentation.

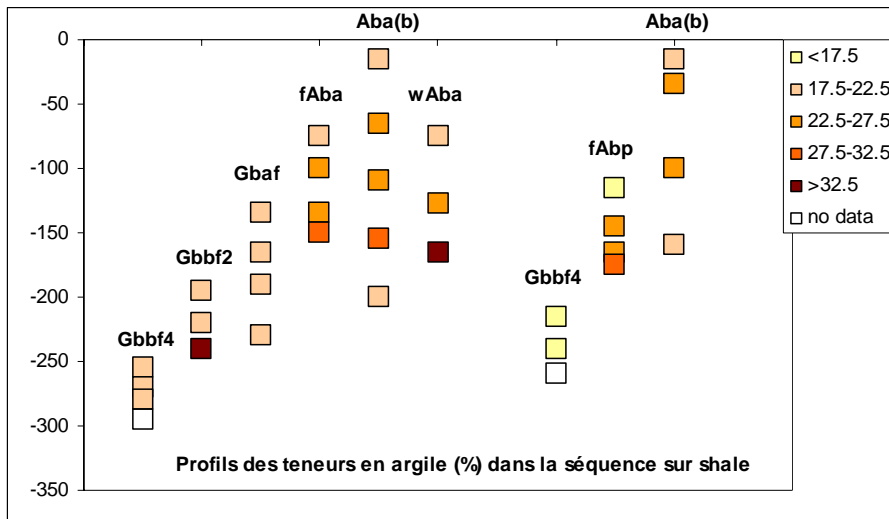


Figure III. 54: Profils des teneurs en argile (%) dans la séquence de limons sur shale. Les profondeurs, en ordonnées, sont relatives et idéalisées pour la représentation.

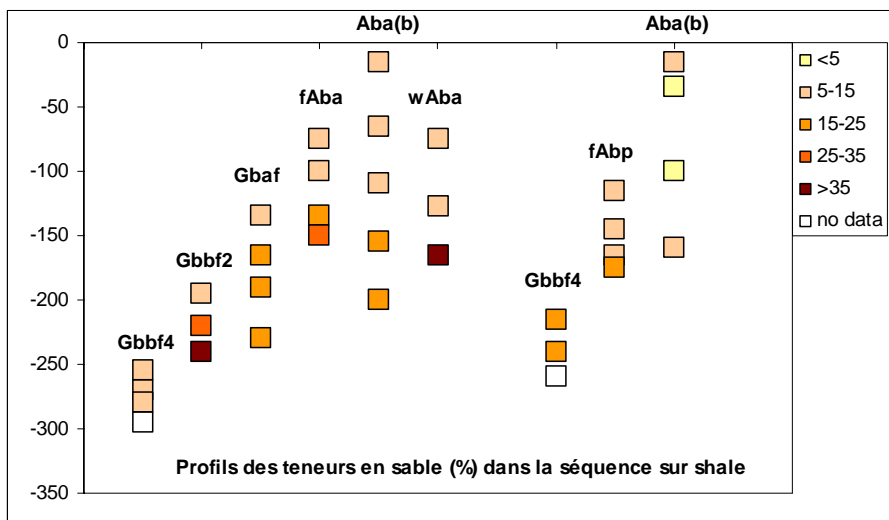


Figure III. 55: Profils des teneurs en sable (%) dans la séquence de limons sur shale. Les profondeurs, en ordonnées, sont relatives et idéalisées pour la représentation.

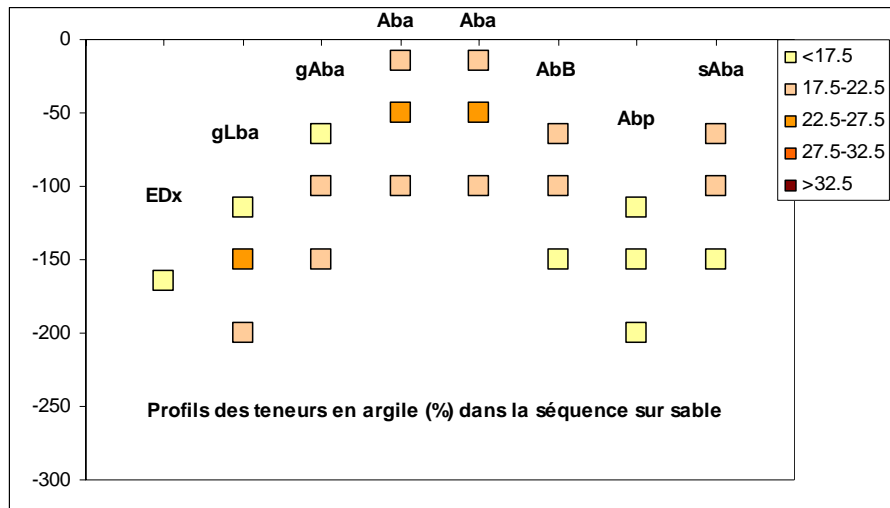


Figure III. 56: Profils des teneurs en argile (%) dans la séquence de limons sur sable. Les profondeurs, en ordonnées, sont relatives et idéalisées pour la représentation.

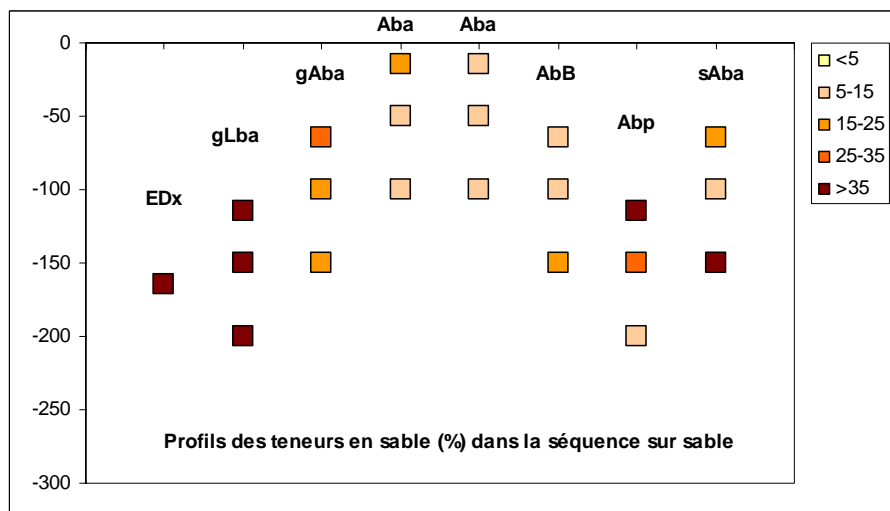


Figure III. 57: Profils des teneurs en sable (%) dans la séquence de limons sur sable. Les profondeurs, en ordonnées, sont relatives et idéalisées pour la représentation.

b teneurs totales

Pour les teneurs totales en éléments, le constat est le même que pour les fractions granulométriques:

- on retrouve dans toutes les séries limoneuses profondes les ordres de grandeur mesurés dans les solums étudiés précédemment;

- pour les séries limoneuses peu profondes (texture A avec substrat ou texture G), seuls les horizons profonds diffèrent chimiquement des horizons moins profonds limoneux;
- pour les phases superficielles (*i.e.* substrat à moins de 40cm de profondeur), les teneurs dans l'horizon de surface peuvent être influencées par la nature du substrat;
- lorsque le critère "texture" de la légende de la carte des sols (CSB) est différent, les ordres de grandeur des teneurs totales sont différents également, souvent inférieurs car il s'agit de texture plus sableuses;

A titre d'illustration, les distributions des teneurs en Zn (secteur sur calcaire), en Cu (secteur sur shale) et en Pb (secteur sur sable) sont représentées aux figures III.58 à III.60.

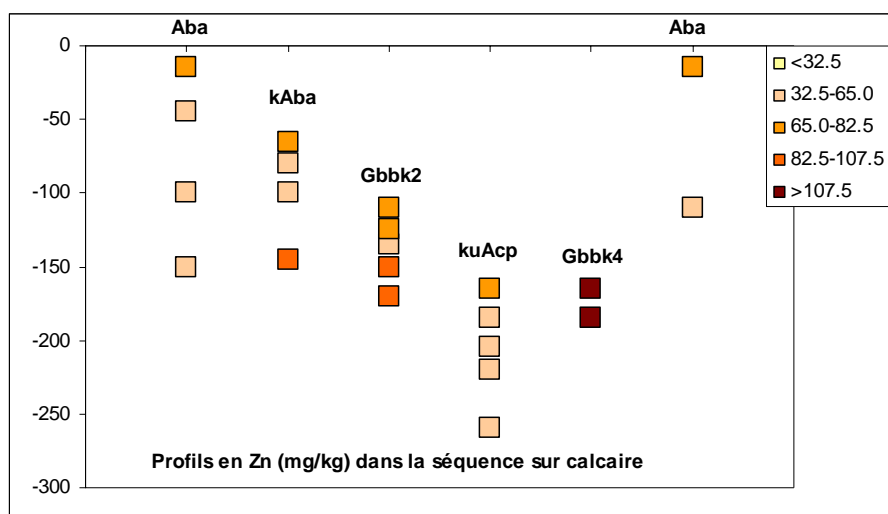


Figure III. 58: Profils des teneurs en Zn (mg/kg) dans la séquence de limons sur calcaire. Les profondeurs, en ordonnées, sont relatives et idéalisées pour la représentation. Hormis pour le solum Gbbk4, il n'y a pas de lien direct entre les teneurs dans les horizons de surface et les teneurs dans le substrat profond. On notera également les teneurs dans l'horizon labouré systématiquement supérieures à celles de l'horizon sous-jacent, signe d'une accumulation généralisable à l'ensemble des sols agricoles étudiés.

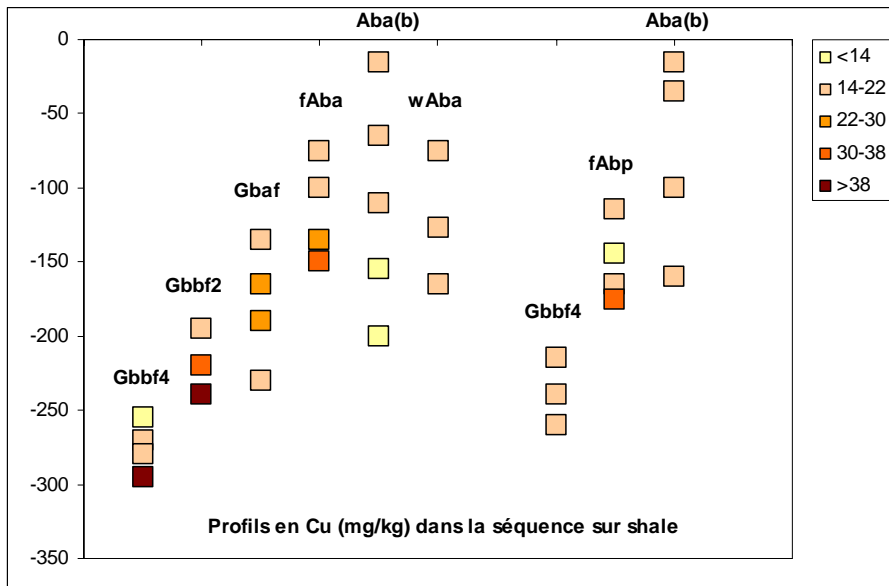


Figure III. 59: Profils des teneurs en Cu (mg/kg) dans la séquence de limons sur shale. Les profondeurs, en ordonnées, sont relatives et idéalisées pour la représentation. Il n'y a à nouveau pas de lien direct entre teneurs en Cu dans l'horizon de surface et teneurs dans les shales ou leurs altérites.

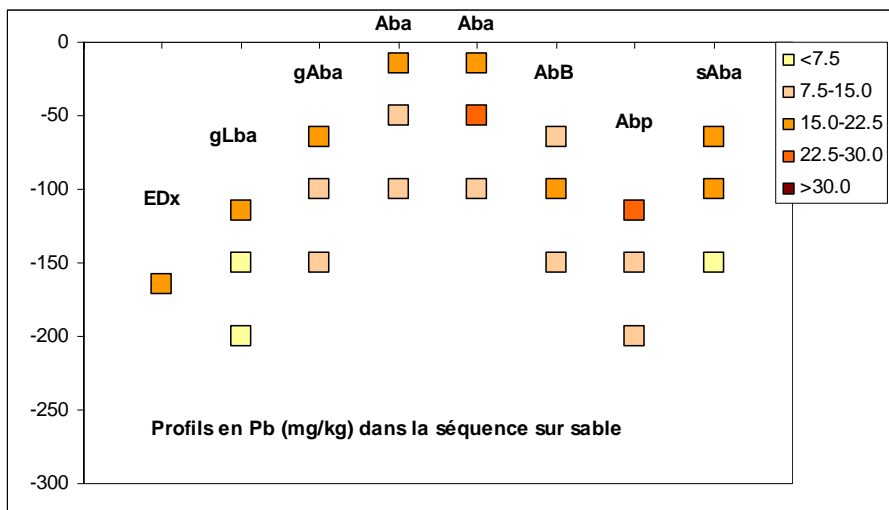


Figure III. 60: Profils des teneurs en Pb (mg/kg) dans la séquence de limons sur sable. Les profondeurs, en ordonnées, sont relatives et idéalisées pour la représentation. Les niveaux de teneurs sont relativement faibles dans les horizons limoneux et surtout les horizons sableux. On notera l'accumulation, modérée, de Pb dans l'horizon de surface où les teneurs sont homogènes.

c relations entre éléments et indices de différenciation limon-substrat

Etant donné le mélange des matériaux, certaines relations entre éléments ainsi qu'entre éléments et variables explicatives risquent de s'en trouver modifiées par rapport aux résultats précédents (tableau III.18).

Tableau III. 20: Matrice de corrélation entre teneurs totales (HF) et variables "explicatives" –limons sur substrats.

	"0-2"	">50µm"	pH _{H2O}	COT	TRB	Al	Fe	Mn
Ca			0.336		0.948			
Mg	0.329		0.295	0.260	0.596	0.431	0.490	0.731
K	0.492	-0.417			0.334	0.836	0.572	0.390
Na	-0.324	-0.642					-0.372	
Al	0.700	-0.350			0.253			
Fe	0.620		0.240	-0.325		0.783		
Mn	0.257			0.475	0.385	0.416	0.432	
Cu	0.636	-0.234		0.332	0.404	0.832	0.743	0.673
Zn				0.519	0.598	0.320	0.363	0.742
Ni	0.563				0.276	0.771	0.899	0.411
Cr	0.369					0.384	0.392	0.425
Pb			0.273	0.774	0.408			0.762
Co	0.470					0.758	0.885	0.574

Degré de signification: $\alpha < 0.001$; $\alpha < 0.01$; $\alpha < 0.05$

Les relations entre Mg, K, Al, Fe, Cu, Ni, Co et les teneurs en argile persistent. L'absence de signification statistique des relations Zn-"0-2µm" et Pb-"0-2µm" quand l'horizon labouré est considéré reste de mise également. La relation Cr-"0-2µm" est significative grâce à une plus grande différenciation des deux variables qui réduit l'importance relative de la variabilité opératoire. La relation Na-"0-2µm" est négative car les horizons limoneux sont plus "riches" en Na que les argiles d'altération des calcaires et des shales.

Les teneurs élevées en sables correspondent à deux cas de figure, soit il s'agit de l'influence des sables bruxelliens relativement "pauvres" chimiquement, soit ce sont des sables au sein de substrats à teneurs plus élevées. Les relations des éléments avec les teneurs en sable sont dès lors peu significatives sauf pour Al, K et Na. Pour Na, c'est la même

cause que pour la relation avec l'argile: tous les matériaux non-limoneux présentent des teneurs inférieures à celles des horizons limoneux. Pour ce qui concerne Al et K, c'est dans l'opposition des teneurs en argile et en sable que se trouve l'origine de leur relation négative avec ">50 μ m".

Les relations "Zn-COT" et "Pb-COT" restent très significatives car ces deux éléments s'accumulent toujours en surface.

Ca et Mg sont fortement corrélés à la TRB car ces deux éléments y contribuent d'une part et les niveaux de teneurs sont très différenciés, d'autre part, en raison de leur concentration dans les calcaires ou les argiles.

Pour ce qui concerne les relations entre éléments, on notera l'existence d'une relation Al-K très hautement significative. La figure III.61 illustre cette relation ainsi que le fait que celle-ci avait jusqu'à présent été occultée par un manque de différenciation des teneurs dans les horizons limoneux (relations TONG et MOSLIM). La relation Al-K s'explique par leur co-occurrence à l'intérieur des réseaux silicatés.

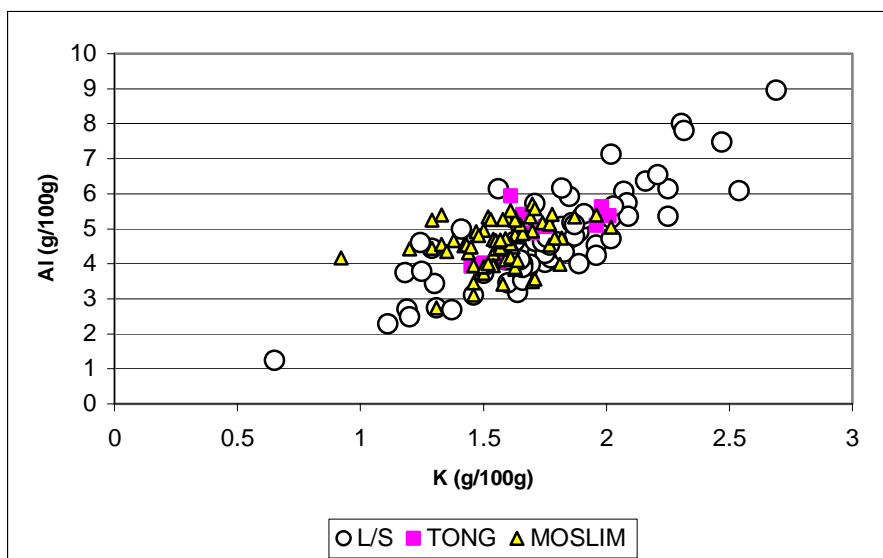


Figure III. 61: Relations Al-K dans les séquences limons sur substrat (L/S), la coupe de Tongrinne (TONG) et les séquences limoneuses (MOSLIM).

Une analyse factorielle a été menée sur les variables explicatives pour l'ensemble des horizons, tous secteurs confondus. Le premier facteur reste la granulométrie à travers la fraction "0-2 μ m" principalement et ">50 μ m" de sens contraire mais avec un poids plus modéré. Ce facteur

permet de différencier les substrats des horizons limoneux. Le deuxième facteur correspond à la différenciation des substrats calcaires, principalement sur base des teneurs en Ca et des pH.

On constate également que les teneurs en ETMs dans les horizons limoneux et les horizons sableux suivent les mêmes relations, principalement dictées par la granulométrie (figure III.62).

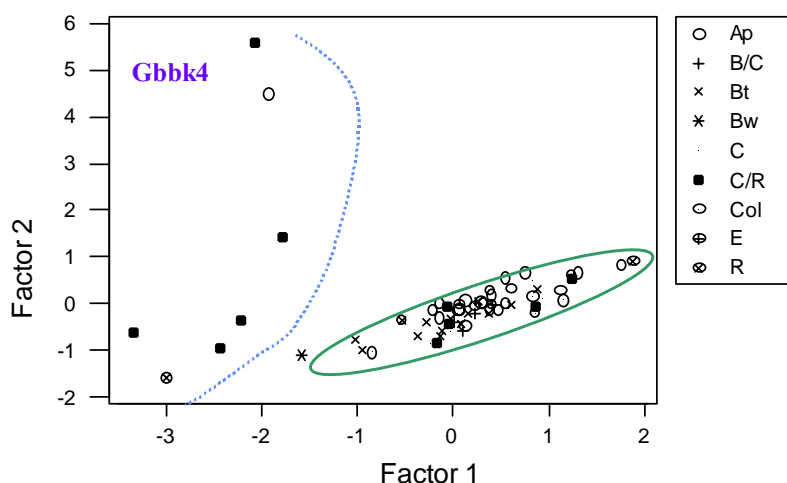


Figure III. 62: Représentation de la composition élémentaire des horizons des séquences "limons sur substrat" dans le premier plan factoriel. Les horizons limoneux et sableux forment un groupe (ellipse verte) dont la différenciation est dictée par la granulométrie. Les horizons profonds correspondant aux substrats, à gauche de la ligne bleue, ne suivent pas la même logique.

Si pour l'interprétation des teneurs naturelles en ETMs, les fractions granulométriques constituent des variables explicatives sérieuses, les teneurs en Na peuvent également être utiles en tant qu'indice lithochimique permettant de différencier matériaux limoneux et non-limoneux. La figure III.63 illustre ceci pour Cu. Les matériaux limoneux, dont font partie tous les horizons de surface sauf celui des séries EDx et gLba, sont caractérisés par des teneurs en Na supérieures à 0.55g/100g. Les matériaux non-limoneux, principalement des substrats, ont des teneurs inférieures à ce seuil. Un échantillon présentant une teneur avérée en Cu de 35mg/100g peut donc être qualifié de "suspect" de contamination si ses teneurs en Na sont supérieures à 0.55g/100g.

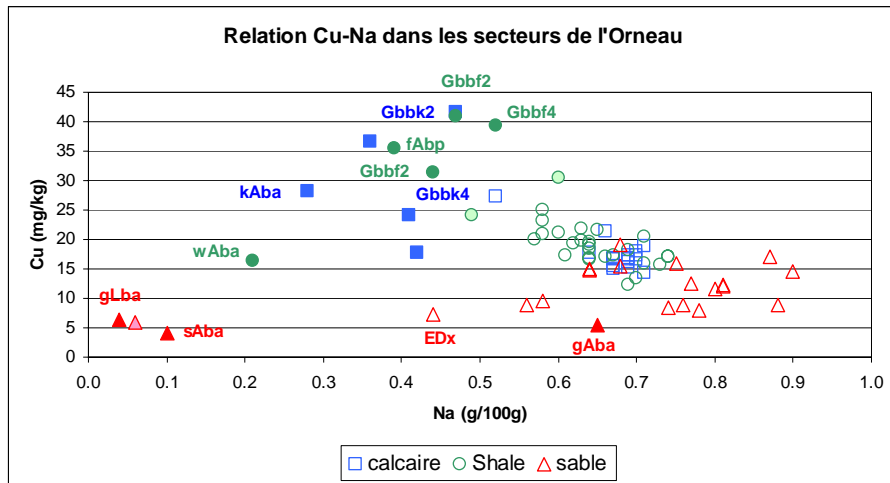


Figure III. 63: Relations Cu-Na dans les séquences des secteurs sur substrat. Les sigles creux correspondent aux horizons de surface et de profondeur intermédiaire. Les sigles pleins correspondent aux horizons profonds non-limoneux.

6.4.2.3 conclusions partielles

Les caractéristiques mesurées pour les sols de cette approche sont évidemment nettement plus différenciées que précédemment, en raison de la présence de matériaux non-limoneux.

Il appert des données que les ordres de grandeur des teneurs en ETMs dans les horizons limoneux sont les mêmes que ceux observés lors des étapes précédentes. Les teneurs y sont principalement sous l'influence des teneurs en argile (Cu, Zn, Ni, Cr, Co) et en COT (Zn, Pb), du moins à l'échelle verticale.

Dans le secteur sableux, les sables bruxelliens sont chimiquement pauvres et la fraction " $>50\mu\text{m}$ " agit comme une phase diluante. Les niveaux de teneurs sont dès lors moins élevés dans les sols à texture sableuse. Toutefois, les relations ETM-" $0-2\mu\text{m}$ " y restent d'application.

Dans les secteurs sur calcaire et sur shale, les substrats sont des roches en place ou des altérites plus ou moins remaniées qui se caractérisent par des niveaux de teneurs en ETMs sensiblement supérieurs à ceux rencontrés dans les limons. Toutefois, des lois communes semblent régir la distribution des teneurs élémentaires dans les différents horizons minéraux, une relation unique entre Al et Cu par exemple se dégage des résultats (figure III.64). Des horizons s'écartent de ces lois, soit par spécificité géochimique, soit par une action anthropique.

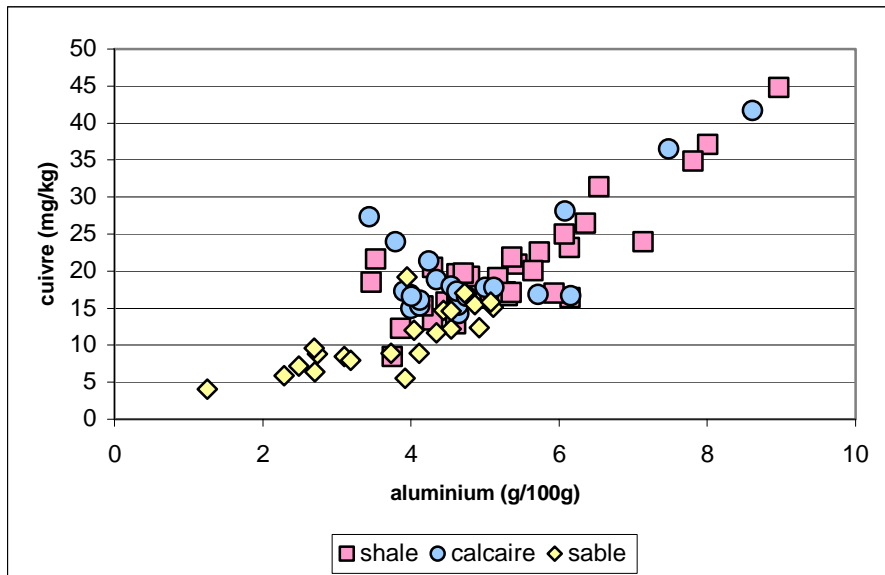


Figure III. 64: Relations Al-Cu dans les séquences "limons sur substrat". L'ensemble des horizons s'inscrit dans une relation générale, à l'exception de quatre horizons : ceux du solum Gbbk4 (bleu) et deux horizons de surface (rose) pour lesquels on peut soupçonner une source de Cu anthropique.

Sur base de la différenciation des teneurs en Na entre horizons limoneux et non-limoneux (exemple figure III.65 pour la séquence sur calcaire), il est possible de conclure à une simple superposition, *i.e.* avec un minimum de mélange, de la couverture limoneuse quaternaire sur les substrats plus anciens.

Cette superposition aux limites franches a été rendue possible par le dépôt d'une couverture épaisse de limons éoliens sur des substrats présentant alors un manteau d'altération mince et par la faible dissection du relief. Les processus de morphogenèse n'ont en effet pas généré de mélange des matériaux sur les pentes faibles (exemple figure III.66). Par contre, les sols les moins profonds, sur les pentes les plus fortes, sont eux caractérisés par un mélange plus important des matériaux limoneux et non-limoneux. Ces sols superficiels sont caractérisés par un fond pédogéochimique différent qui est mesurable dans l'horizon de surface.

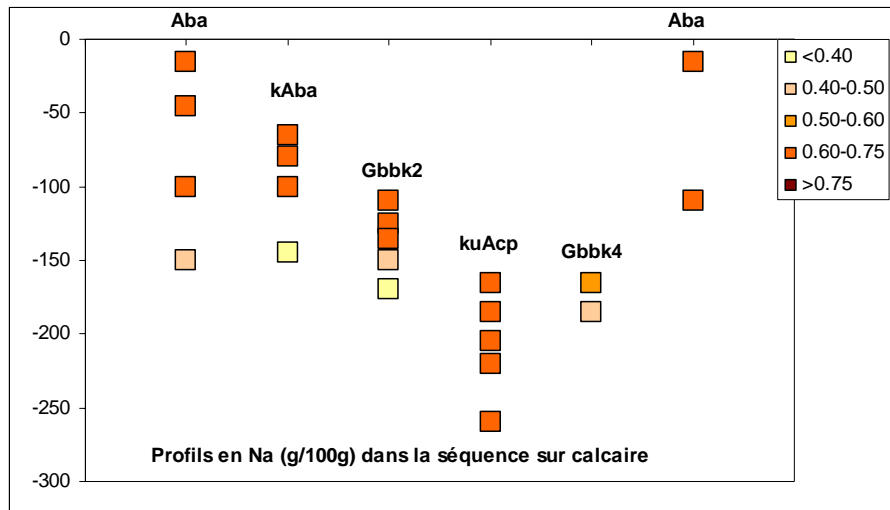


Figure III. 65: Profils des teneurs en Na (g/100g) dans la séquence des limons sur calcaires. Le dualisme entre limons et substrats est clair et confirme qu'il y a eu peu de mélange entre les premiers et les seconds.



Figure III.66: exemples de solums sur shale. Sur pente modérée (à gauche), le contraste est net entre les horizons limoneux de surface et le substrat de l'Assise de Vichenet. Sur pente forte (à droite), les différents processus de morphogénèse ont engendré un solum plus mélangé.

6.4.3 conclusions relatives à l'approche toposéquentielle

L'approche toposéquentielle visait à déterminer dans quelle mesure la morphogenèse pouvait avoir un impact sur la différenciation spatiale des teneurs en ETMs, tant par rapport aux niveaux de teneurs qu'aux relations entre éléments et phases porteuses.

La première étape de l'approche a été menée sur des "sols limoneux". Celle-ci a confirmé :

- la différenciation plus importante des teneurs résultant de la considération d'un facteur supplémentaire ;
- le rôle majeur de la teneur en argile granulométrique comme variable explicative des teneurs en Mg, K, Al, Fe, Ni et Co ;
- le dualisme existant entre horizons profonds peu humifères et horizons de surface pour Cu, Zn et Pb ; dans les premiers, les teneurs en Cu et Zn sont régies par celles en argile ; en surface, par contre, les teneurs en Cu, Zn et Pb présentent une certaine homogénéité à l'échelle de la parcelle agricole ;
- pour ces éléments, la nécessité de distinguer la part du fond pédogéochimique que l'on peut estimer par régression avec les teneurs en argile de celle, "résiduelle", qui ne s'estime que sur base fréquentielle.

Par rapport à la prédiction des teneurs dans l'horizon de surface, la "série de sols" est un critère pertinent de stratification pour tous les éléments liés à l'argile. Ce sont essentiellement les sols sur colluvions qui se distinguent des autres séries. Pour Cu et Zn, l'intérêt de la distinction des séries sur colluvions se limite à la prédiction du fond pédogéochimique minéral. Pour ce qui concerne Pb, la différenciation n'a de signification qu'entre horizons de surface et horizons peu humifères.

La seconde étape, relative aux transitions plateaux-versants, a permis de conclure au caractère extrapolable des relations entre argile et éléments "liés", aux sols à texture plus sableuses.

Elle a également montré que, dans les secteurs étudiés, la couverture limoneuse est relativement indépendante du substrat lorsque les pentes des versants sont modérées. On ne peut qu'approuver le choix des cartographes pour les séries de "sols limoneux" avec substrat (fAba, kAba...) car les caractéristiques pédogéochimiques des horizons de surface relèvent bien des modèles limoneux.

Nous avons constaté que seuls les "sols limoneux" les plus superficiels-

¹⁷, dont font partie les sols à texture sablo-limoneuse à sableuse car le substrat est mélangé au limon dès la surface, sont susceptibles de présenter un fond pédo-géochimique spécifique.

6.5 Conclusions relatives aux différenciations pédogénétiques

Les différentes étapes des approches "solum" et "toposéquence" fournissent des éléments de réponse aux questions posées en introduction.

Quels sont les niveaux de teneurs dans les sols? Quels ont été les impacts des processus pédogénétiques sur leur différenciation, à l'échelle du solum et de la toposéquence? Peut-on extrapoler le fond géochimique limoneux à un fond pédo-géochimique? Les profils de teneurs sont-ils affectés par des contaminations?

Les "sols limoneux à horizon BT" ont constitué le point de départ de notre approche. L'étude des différents solums confirme l'importance:

- du lessivage, quelle que soit l'intensité actuelle de ce processus; la différenciation verticale de la plupart des éléments est conditionnée par la présence d'un horizon BT;
- de l'altération, relevant sans doute à la fois de la complexolyse et de l'acidolyse, des oxydes les moins cristallisés dans les horizons de surface sous forêt;
- de la quantité de matière organique, pour laquelle Pb principalement présente une forte affinité,
- de la mise en culture qui a tendance à gommer les différenciations verticales liées à l'altération, et engendre une accumulation de Zn, surtout, et de Cu, un peu, dans l'horizon de surface;
- des teneurs en argile, en général; les relations argile-Mg-K-Al-Fe-ETMs, déjà moult fois citées, restent d'application à l'échelle des solums.

Par contre, le facteur "drainage" ne s'est pas révélé déterminant pour la différenciation spatiale des teneurs en ETMs. Au moins deux raisons peuvent être invoquées: (i) nous n'avons pas étudié les situations ex-

¹⁷ Critère de profondeur ≥ 4 (càd une profondeur de sondage inférieure à 40cm) pour les sols limoneux à charge caillouteuse.

trêmes mais les plus représentatives, donc des conditions de gleyification modérée et (ii) principalement en contexte agricole au sein duquel les pHs neutres à basiques ne favorisent ni la migration ni la mobilité des ETMs.

Dans les différentes toposéquences et les différents secteurs étudiés, l'impact de la morphogenèse se marque par une plus grande différenciation des teneurs en éléments, entre les "sols limoneux à horizon BT" (Aba) d'une part et les sols sur colluvions (Abp) d'autre part .

Pour les sols de versants, la différenciation la plus importante est verticale, entre les horizons limoneux et les substrats. Au sein des matériaux limoneux et sableux, des lois générales argile-élément peuvent toutefois être trouvées pour Mg, K, Al, Fe, Cu, Zn, Ni et Co. Pour Cu, Zn et Pb dans l'horizon labouré, une composante anthropique doit être ajoutée à la composante fond pédogéochimique naturel.

Les modèles reliant les ETMs aux teneurs en argile établis pour les sols de plateaux sont à priori extrapolables aux sols des versants à pente douce, à l'exception des sols très peu épais.

L'accumulation de Cu, Zn et Pb a été constatée dans les horizons de surface, sans que l'on puisse toujours parler de contamination. Ainsi, les teneurs en Pb dans l'horizon labouré sont supérieures à celles des horizons sous-jacents mais souvent largement inférieures à celle d'un horizon de surface forestier. Le constat d'accumulation est établi principalement par comparaison des profils de teneurs avec des profils de référence, teneurs en argile, en Al en Fe... Comme on peut le constater à la lecture des différents tableaux de résultats de ce chapitre, les niveaux de contamination sont relativement peu élevés.

Sur base de ce qui précède, les niveaux de teneurs en ETMs du tableau III.21 peuvent être considérés comme représentatifs des teneurs dans les "sols limoneux" cultivés. Les paramètres statistiques ont été obtenus à partir de la population entière de sols "limoneux" au sein de laquelle deux groupes ont été distingués: les "sols limoneux à horizon BT" d'une part et les sols sur colluvions limoneuses d'autre part.

Ces niveaux de teneurs sont très proches de ceux du RPG Nord-Pas-de-Calais relatifs aux "sols limoneux" (STERCKEMAN *et al.*, 2002a ; cf annexe 17).

Tableau III. 21: Teneurs en ETMs dans les "sols limoneux" cultivés de la zone d'étude: percentile 10 (P10), médiane (P50), percentile 90 (P90) et nombre d'observations (N).

	teneurs totales						
	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co
	mg/kg						
"sols limoneux"							
Ap - P10	447.0	10.9	50.5	15.1	38.5	19.9	7.2
- P50	530.5	14.6	63.5	21.3	55.4	24.4	8.7
- P90	602.1	17.0	76.2	30.5	76.1	30.4	10.9
- N	285	285	284	267	263	263	262
BT - P10	409.3	12.9	49.5	19.6	38.4	12.2	8.4
- P50	496.7	15.8	54.9	27.0	60.9	13.9	10.1
- P90	594.8	18.1	63.6	32.7	72.0	18.8	12.6
N	58	58	58	48	38	38	37
C - P10	390.3	11.6	45.1	23.5	47.1	11.0	7.9
- P50	466.3	17.2	58.9	32.8	73.0	16.3	12.4
- P90	538.0	17.1	58.4	32.9	73.3	16.3	12.8
- N	178	178	178	134	133	134	95
Sols sur colluvions							
Ap - P10	444.7	10.3	46.1	14.3	32.6	21.7	6.9
- P50	517.7	13.3	57.7	17.1	48.6	26.6	9.1
- P90	643.1	17.1	73.3	28.2	66.6	34.2	11.5
- N	63	63	63	63	61	61	61
C - P10	426.0	8.9	38.1	12.4	17.1	13.7	8.2
- P50	504.4	11.3	45.5	16.6	42.4	17.3	9.2
- P90	680.4	15.6	53.9	22.8	55.9	23.6	12.8
- N	32	32	32	32	27	27	26

Au cours de l'étape suivante, nous effectuerons un zoom sur l'horizon labouré, par lequel nous tenterons de préciser les valeurs et la variabilité du fond pédo-géochimique et des teneurs dans l'horizon de surface, ainsi que d'appliquer le caractère référentiel de nos résultats pour l'évaluation de modes de gestion agricole des terres.