

COMMUNAUTE FRANCAISE DE BELGIQUE
FACULTE UNIVERSITAIRE DES SCIENCES AGRONOMIQUES DE GEMBLOUX

**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

Introduction - première partie

Promoteur : Pr. L. BOCK

2003

Colinet Gilles. (2003). Eléments traces métalliques dans les sols. Contribution à la connaissance des déterminants de leur distribution spatiale en Région limoneuse belge (thèse de doctorat). Gembloux. Faculté universitaire des sciences agronomiques, 415p., 88 tabl., 176 fig.

Résumé:

Dans les sols cultivés, la distinction de l'origine naturelle ou anthropique des niveaux de teneurs en éléments traces métalliques (ETMs) est importante pour (i) comprendre le fonctionnement des ETMs dans les sols et (ii) définir des bases d'évaluation de pratiques agricoles, de détection de contaminations ou de suivi à long terme de teneurs régionales. Une démarche méthodologique a dès lors été établie et mise en oeuvre autour de la caractérisation du déterminisme spatial naturel des teneurs en ETMs, *i.e.* le fond pédogéochimique naturel, et de l'évaluation du degré d'anthropisation actuel des sols agricoles en Région limoneuse belge.

L'étude des matériaux parentaux a permis d'établir des signatures élémentaires pour les différentes familles lithologiques, d'évaluer l'importance des teneurs en argile, en fer et en aluminium totaux en tant que facteurs explicatifs des teneurs en ETMs, ainsi que de conclure à une relative homogénéité géographique et à une absence de continuité spatiale des propriétés des matériaux parentaux loessiques de couverture. L'étude des différenciations pédogénétiques dans les loess a confirmé les relations « ETMs-facteurs explicatifs » et a montré l'intérêt de la reconnaissance des volumes de sols pour l'interprétation et la prédiction des teneurs en ETMs. Des gammes de teneurs représentatives des horizons principaux de sols "limoneux" cultivés ont ainsi été établies ; elles traduisent un niveau de contamination relativement faible en Région limoneuse.

Il a été montré que la pertinence du référentiel régional établi en tant que base de détection des contaminations locales sera d'autant plus affirmée que ce référentiel prendra en considération un certain nombre d'informations ancillaires, ainsi que des spécificités géographiques propres à des "Petites Régions Naturelles". Les différentes approches cartographiques ont permis d'estimer la variabilité des teneurs en ETMs à plusieurs niveaux d'échelle spatiale et ont montré l'intérêt de la carte des sols de la Belgique, moyennant un travail de révision de sa légende, pour une cartographie géochimique.

Copyright. Aux termes de la loi belge du 22 mars 1886, sur le droit d'auteur, seul l'auteur a le droit de reproduire cet ouvrage ou d'en autoriser la reproduction de quelque manière et sous quelle forme que ce soit. Toute photocopie ou reproduction sous autre forme est donc faite en violation avec la loi.

Colinet Gilles. (2003). Metallic trace elements in soils. Contributive study of driving factors of their spatial distribution in the Belgian Loamy region (Thèse de doctorat in French). Gembloux, Belgium. Faculté universitaire des sciences agronomiques 415p., 88 tabl., 176 fig.

Summary:

The natural background levels of metallic trace elements (MTEs) in cultivated soils should be known in order (i) to understand the processes in which MTEs are involved and (ii) settle a reference system dedicated to the appraisal of agricultural practices, to the detection of contaminations, or to the time-course follow-up of regional values. A methodological framework has thus been set up to evaluate the importance of natural driving factors, the pedogeochemical background, of the spatial distribution of MTEs in soils and also to compare the current levels of MTEs content in agricultural soils from the Loamy Region with natural values.

As main results from the study of parent materials, (i) lithological units are now characterized with element content signatures, (ii) the prominent part of clay, total iron, and total aluminium contents as driving factors of the content in MTEs has been measured, and (iii) the geographical homogeneity as well as the absence of spatial continuity of the cover loessic parent material have been showed up. The relations between MTEs and driving variables have been confirmed through the study of the influences of pedogenesis factors on the vertical and lateral differentiations of MTEs content in soils. It was also demonstrated that taking into account the natural volumes of soils when sampling facilitates the interpretation of the results and allows finer estimations of the MTEs content, even in homogeneous context. The reference values about natural and usual content in MTEs for various soil horizons that are proposed reveal a relatively weak level of man-made contamination in the Loamy Region.

It has also been shown that a regional reference system dedicated to the detection of local contaminations gains in relevance as it integers ancillary datas as well as the local specificities of small natural regions. The spatial variability of MTEs content has been evaluated through various cartographic approaches which led to the conclusion that the Soil Map of Belgium is an extremely worthy document for geochemical mapping.

A l'heure de boucler ce document, je commencerai mes remerciements par ceux qui ont eu le plus à en souffrir, non pas du bouclage mais du long processus qui l'a précédé. Merci donc aux membres de ma famille pour leur support quotidien (ou peu s'en faut car il paraît que j'ai parfois été un peu pénible avec « ma » thèse). Carine, Joséphine et Lucie, dans l'ordre d'apparition dans mon existence, ne seront pas fâchées que ce soit fini ! Merci à vous !

Je remercie le Pr Thewis, président du jury et, en qualité de Recteur de l'Institution, responsable de mon éducation au métier d'ingénieur agronome d'abord, de ma double casquette de casse-pieds des étudiants et chercheur d'or ensuite durant six années, pour lesquelles je tiens à le remercier ainsi que l'ensemble du personnel de la Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux (*Gembloux Agricultural University*), particulièrement l'équipe du Service des Etudes, dont M^{me} Willocq pour tout ce qui concerne la thèse. Je remercie également le P^r Lambotte qui s'est révélé une personne-ressource très précieuse.

Merci au P^r Bock, promoteur, guide spirituel, timonier de mes activités de recherche et capitaine de la « Joyeuse Compagnie ». Tel Charon, vous m'avez fait traverser le Fleuve qui fait six fois le tour de l'assistanat pour me mener ici. Acceptez ma reconnaissance éternelle en guise d'obole !

Merci aux P^{rs} Baize et Lacroix, siamois par leur mission de rapporteurs et jumeaux qui s'ignorent (c'est vrai que deux barbes, deux paires de jumelles et deux petites tailles, ça fait beaucoup !). Chacun dans son style m'a enseigné beaucoup. Je vous en remercie ainsi que de l'humanisme de nos rapports.

Merci au P^r Marcoen, enseignant, conseiller et chef d'équipe trismégiste. Vous avez su par nos discussions me faire conserver le sens des réalités pratiques et la nécessité de rester à un niveau appliqué. En outre, vous m'avez toujours dégagé les chemins de la communication et de la transmission de l'information utile.

Merci au P^r Delcarte, ermite troglodyte de la chimie, qui cache au fond de son laboratoire une grande gentillesse et une réelle attention aux autres. Le BEAGx qu'il dirige m'a grandement aidé pour le dosage des éléments traces.

Merci au P^r Dautrebande, inoxydable et insensible à l'érosion du temps malgré un matriarcat au sein d'un univers machiste. J'ai toujours trouvé beaucoup d'intérêt dans vos enseignements et de gentillesse dans nos rapports.

Merci au P^r Culot, infatigable travailleur et membre organique de la Société des oenologues avertis. Vos conseils et encouragements m'ont été plus que bénéficiaires. Au quotidien, vous avez toujours fait preuve d'empathie à mon égard.

Merci au P^r Bogaert pour avoir relu attentivement les parties traitant de géostatistiques. Vous m'avez accueilli sans réserves et m'avez consacré du temps de manière tout à fait gratuite. Je vous en suis très reconnaissant. Merci également à Dimitri pour ses encouragements et sa gentillesse et à toute l'équipe UCL du projet POLLUSOL, auquel j'ai eu la chance, tant professionnelle qu'humaine, de collaborer : les P^{rs} Sonnet et Delvaux ainsi que Francois, dont la galochette n'a rien à envier à la mienne.

Merci au P^r Palm et à son bras droit (à moins que ce ne fut le gauche ?), Isabelle, au suffixe tellement approprié et qui allie la compétence à son charme naturel, pour leur conseils en matière de statistiques. Je remercie également le Pr Dagnelie pour ses indispensables ouvrages en la matière.

Merci à Mr Mathieu, archiprêtre de la socio-pédologie, pour son enseignement dynamiquement désordonné et (géo)structurellement enthousiaste, ainsi que sa gentillesse sans bornes (comme ses anecdotes !).

Merci à Jean, dit « Man-in-black », ta curiosité scientifique et ton sens pratique que ce soit pour une activité de terrain ou la conception d'un projet ont rendu notre collaboration très fructueuse pour ma thèse et pour mes activités actuelles.

Merci spécial à Guy, dit « BricoMan » ! Toujours à la tâche, Guy ne fait pas « Meuh Meuh » mais il réalise ce que vous n'osez même pas imaginer. Menuisier, peintre, garagiste et imprimeur, Guy Buchet est la personne à contacter si la reliure de ce document vous lache.

Merci à toute l'équipe du laboratoire de Géopédologie : Françoise, qui n'a pas sa langue en poche quand il s'agit de pesteller mais qui a le coeur sur la main et une conscience professionnelle inestimable; Béatrice, efficace organisatrice du laboratoire, une main de fer dans un tablier de velours; Joseph, dit « X-Man », ses super-pouvoirs lui permettent de maîtriser le SAP et tout ce qui se branche dans une prise électrique; Roland et Dominique, jamais avares de compliments, tels les deux vieux du *Muppet's Show*; Ferdinand, dit « la poubelle de table » distributeur de bonne humeur; Hamado, mon co-buraliste discret, Stan Charles et Oliver Philippe, le plus petit basketteur du monde et le plus gros bidouilleur sur ArcView; Billoh, Annie, Sophie, Laurence, Geoffrey, Christophe, Lionel et Olivier, sans oublier les 3 petits cochons, les « petites mains » habiles qui cliquent et recliquent à longueur de journée, même qu'on ne s'entend plus parler. Bienvenue à Catherine qui aura la lourde tâche de me faire oublier.

Merci à Anne-Cécile, dite « Mini-Mamie », Françoise, Christophe, le biaffrais qui se nourrit aux gaufrettes, Thibault, l'âne et Dimitri, le boeuf (elle était facile celle-là !), Arnaud, Flamand de France sans accent, et Vincent, *gentleman-fumeur et tennisman averti*.

Merci à la belle Manu, à Marie, Anne-Christine, Marie-Solange, Laurence, Layla, écologues du beau sexe et Gaëtan, le *Charlie* de ces dames, et au P^r Mahy de rire encore de mes blagues après tout ce temps et d'avoir donné un coup de charme à la pause-café (c'est surtout pour les filles !).

Merci à Sylviane « Mégara », *kiteuse* platinée et grimacière brillante, et à Alex « Hercule » (ne lui dites pas qu'il est gros !) pour leur bonne compagnie, à François, Emilie et Sophie, aux étudiants de 3^e AT et surtout au P^r Feltz pour m'avoir permis de découvrir le Liban.

Merci à tous les étudiants que j'ai cotoyé au cours des six années passées en tant qu'assistant. Si j'en garderai un souvenir impérissable, c'est aussi grâce à eux.

Merci à ma Mère, qui m'a porté neuf mois et supporté 36ans, dont 25 intensifs, et à René, dit « Amadeus Hangar ». Merci à mon frère, dit « Gros Bab », mais c'était il y a longtemps. Merci à ma famille et à ma belle-famille de m'avoir encouragé alors que j'aurais dû m'occuper du jardin et de ma vieille maison. Merci à mes « camas » et à l'équipe de foot pour leur soutien moral !



A mon père...

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE 1: PROBLEMATIQUE

- 1.1 *Les ETMs dans les sols*
- 1.2 *Mobilité des ETMs*
- 1.3 *Evaluation des stocks et des flux*
- 1.4 *Conclusions*

CHAPITRE 2: PRESENTATION DU CADRE DE L'ETUDE

- 2.1 *La Région limoneuse*
- 2.2 *Présentation de la zone d'étude*

CHAPITRE 3: STRATEGIES D'ECHANTILLONNAGE

- 3.1 *Paramètres à suivre*
- 3.2 *Approches existantes en matière de détermination des teneurs naturelles en ETMs dans les sols*
- 3.3 *Méthodologie adoptée*

CHAPITRE 4: CONSIDERATIONS RELATIVES A L'INTERPRETATION DES RESULTATS ANALYTIQUES POUR LES ELEMENTS TOTAUX

- 4.1 *A propos de l'exploitation de la variabilité opératoire*
- 4.2 *A propos de l'exploitation de méthodes différentes d'analyse des éléments totaux*
- 4.3 *A propos de la représentativité des références*
- 4.4 *A propos des techniques d'interpolation et de prédition*

CHAPITRE 5: LE FOND MINERALOGIQUE ET GEOCHIMIQUE DU LIMON ROCHE-MERE

- 5.1 *Approche lithologique*
- 5.2 *Approche stratigraphique*
- 5.3 *Approche régionale (Horizons C)*
- 5.4 *Conclusions relatives à l'approche matériau parental*

CHAPITRE 6: DIFFERENCIATIONS PEDOGENETIQUES

- 6.1 *Introduction*
- 6.2 *Présentation des approches*
- 6.3 *Approche "solum"*
- 6.4 *Approche toposéquentielle*

6.5 *Conclusions relatives aux différenciations pédogénétiques*

CHAPITRE 7: FOND PEDO-GEOCHIMIQUE ET ANTHROPISSATION DE L'HORIZON LABOURE

7.1 *Introduction*

7.2 *Approches régionales*

7.3 *Approche spatiale du fond pédo-géochimique et du niveau d'anthropisation*

7.4 *Approches ponctuelles et locales*

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Introduction

Introduction générale

Ce travail s'intègre au sein d'une réflexion sur les schémas méthodologiques à mettre en oeuvre afin d'évaluer la sensibilité de sols aux pressions inhérentes à leur mode de gestion. L'identification et la caractérisation de sites de référence à vocation agro-environnementale constitue un des axes majeurs de recherche du Laboratoire de Géopédologie.

Le besoin de définition fonctionnelle de nos sols se fait de plus en plus pressant à mesure que les considérations environnementales font leur chemin dans la plupart de nos activités. Le sol, ce matériau meuble impropre à la consommation, développe progressivement un profil d'interface environnementale dans les consciences collectives, mais sa diversité typologique ainsi que la complexité des processus dont il est le siège restent encore pour beaucoup un insoudable océan de concepts pour initiés, dont l'intérêt pratique reste à démontrer. Il n'est en effet pas rare que le pédologue n'ait pas de réponse satisfaisante à donner au praticien. Cet état de fait tient sa source dans la nature même des sols. Ils sont le fruit de la conjonction de processus nombreux qui ont chacun leur pas de temps et leur variabilité spatiale. Ils présentent donc eux-mêmes une importante variabilité quadri-dimensionnelle et si l'on peut expliquer certains processus *a posteriori*, il est encore souvent très difficile de les prédire. Complexité des processus et variabilité spatiale ont ouvert la porte à deux voies de recherche en sciences du sol. D'un côté, le "pédologue-cartographe" vise la diversité des sols et leur connaissance spatiale, délimite, compare et classe des entités spatiales et, de l'autre côté, le "pédologue-mécaniste" détaille, mesure et modélise des processus, parfois difficilement généralisables. Ces deux approches ont généralement des finalités différentes, mais elles contribuent toutes deux à un développement des connaissances sur les sols d'un territoire donné. Mais faute de moyens, aucune approche ne permettra jamais d'aboutir à une connaissance anticipative complète du fonctionnement des sols en tout point de l'espace. Dès lors, pour répondre aux demandes croissantes d'application des sciences du sol, il faudra de plus en plus recourir aux prédictions spatiales et à l'évaluation de leur degré de confiance ou d'incertitude (Voir à ce propos le numéro spécial de GEODERMA -N°103, 2001- consacré à la question).

Souci de répondre à une question environnementale et besoin de spatialisations de données ponctuelles ont motivé le choix d'un thème de recherche et d'une méthodologie à la charnière des deux types d'approches évoqués *supra*: l'élaboration d'un référentiel géopédologique sur les éléments traces métalliques (ETMs) comme outil de base pour le suivi de l'anthropisation des sols agricoles par le recyclage en agriculture d'effluents organiques d'activités agricoles ou non-agricoles. Les ETMs suivis dans le cadre de la thèse sont, par ordre alphabétique, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb et Zn. D'autres éléments traces minéraux, environnementalement sensibles tels As, Cd ou Hg, n'ont pas fait l'objet de déterminations particulières, principalement pour des raisons d'ordre analytique.

Pourquoi le recyclage agricole?

Le recyclage des matières organiques sur des sols agricoles est probablement presque aussi vieux que l'agriculture elle-même. Toutefois, le recours croissant à *l'élimination agricole* d'effluents d'activités agricoles ou non-agricoles n'est pas sans susciter des interrogations tant du point de vue du respect de l'environnement que de celui de la qualité des productions agricoles.

L'élaboration d'un cadre réglementaire pour l'épandage sur les sols de matières organiques fait actuellement l'objet de travaux préparatoires par le Cabinet du Ministre Régional wallon de l'Aménagement du Territoire, de l'Urbanisme et de l'Environnement ainsi que par la Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement (DGRNE). Une note stratégique du Gouvernement Wallon adoptée en 2000 interdit *tout produit organique non-agricole à l'exception d'une liste positive restreinte*. Les discussions entre l'Administration et les différents acteurs concernés par la définition de cette liste restreinte s'annoncent chaudes et passionnelles.

Pourquoi les éléments traces métalliques?

Les paramètres retenus comme critères de base pour l'évaluation de l'anthropisation agricole sont les ETMs pour des raisons d'ordre environnemental, agricole et pratique. De nombreux ETMs *sont toxiques au-dessus de teneurs relativement basses* (COLLECTIF, 1998a). Une partie d'entre eux sont toutefois essentiels au développement animal et/ou végétal. Cette double perspective engendre des questions en matière de risque environnemental de transferts vers les plantes ou les eaux ou à l'opposé de risque de déficience pour des productions inten-

sives. Toutefois, avant même d'aborder les ETMs en termes de risques, il faut constater qu'il existe un réel besoin de références sur les teneurs actuelles en ETMs dans les sols. On ignore encore l'état de nos sols agricoles en la matière. D'un point de vue pratique, le Laboratoire de Géopédologie a, au fil de son expérience, progressivement développé une tradition d'analyse de la composante minérale des sols, privilégiant l'identification des relations sols-géologie. Or la source première, chronologiquement parlant, des ETMs dans les sols est bien la roche-mère et la question des ETMs s'impose dès lors de manière naturelle.

Qu'est-ce qu'un référentiel géopédologique?

Un référentiel -collection de références- géopédologique peut être perçu comme une représentation de la structuration et du fonctionnement des couvertures pédologiques sur un matériau géologique¹ (COLINET, 1999).

Le sol est un *continuum* dont les propriétés varient dans l'espace et dans le temps. Il est impossible de mesurer l'ensemble des propriétés des sols en chaque point de l'espace. Les références sont des connaissances qui permettent de situer une mesure par rapport à un ensemble d'autres mesures réalisées antérieurement mais également d'estimer des propriétés en des points non-investigues. Or, la prédiction nécessite de distinguer le systématique de l'aléatoire, et c'est là précisément une des fonctions du référentiel. Il s'agit d'une charpente générale organisant les données afin d'en faciliter interprétation et prédiction.

Pourquoi un référentiel géopédologique pour une évaluation de pratiques agricoles?

Pour évaluer une capacité de sols à fonctionner, des références sont nécessaires par rapport à l'état de ces sols, aux processus qui s'y déroulent, à leurs évolutions possibles... L'évaluation de la capacité de sols pour le recyclage d'apports organiques est avant tout une évaluation de l'importance des modifications engendrées par ces apports organiques et de leurs conséquences vis-à-vis des fonctions essentielles des sols.

Pour enregistrer des modifications, il est nécessaire de disposer de données relatives à la situation initiale. C'est le rôle des références et des référentiels de fournir cette base de comparaison. D'après un rapport de l'Académie des Sciences en France (COLLECTIF, 1998a), parmi les

¹ le préfixe géo- dans géopédologique se rapporte bien à la géologie et non à la géographie physique comme l'entendait POUQUET (1966).

points en déficit de connaissances sur les ETMs figurent la cartographie du fond géochimique, une synthèse à différentes échelles qui prenne en compte les stocks existants, qu'ils soient d'origine naturelle ou anthropique, ainsi que des cartes de vulnérabilité des sols par rapport à cette thématique.

L'accent sera dès lors placé, dans ce travail, sur la caractérisation de l'état des sols et leur déterminisme spatial et sur l'évaluation du degré d'anthropisation actuel des sols agricoles.

La caractérisation de sites reconnus contaminés par des activités industrielles ou minières, bien que certainement fort intéressante, ne fera donc pas l'objet de cette recherche, essentiellement parcequ'il est extrêmement difficile d'y mettre en évidence l'influence des facteurs naturels de la pédogenèse sur le déterminisme spatial. Les ordres de grandeur des teneurs en certains éléments entre sites "naturels" et "contaminés" n'ont souvent rien de comparable.

Nous avons choisi d'étudier les "stocks" (sous forme de concentrations par unité de masse) plutôt que les flux. La caractérisation globale de ces derniers nécessite en effet généralement la mise en place de "sites lourds" bien maîtrisés. L'investissement matériel et humain est alors peu compatible avec une multiplication des sites. Le choix de ceux-ci doit dès lors s'appuyer sur une représentativité spatiale bien établie sous peine de gaspillage des efforts. Même si notre connaissance des sols, notamment grâce à la carte des sols de la Belgique, est suffisante pour choisir un ou plusieurs sites représentatifs en Région Wallonne, nous avons préféré multiplier les observations afin d'avoir une connaissance satisfaisante des «stocks» dans les sols, connaissance qui pourra servir de référence, d'instant t0 dans le cadre d'un suivi à long terme de l'anthropisation des sols agricoles. En outre, la comparaison simultanée de situations correspondant à des durées d'évolution différentes n'est pas dénuée d'intérêt pour l'estimation des processus. Et même si les interprétations que l'on pourra faire à propos de ceux-ci seront toujours à prendre au conditionnel, il n'est pas sûr non plus que les différents flux que l'on mesurera au niveau d'un site bien choisi seront extrapolables cinquante mètres plus loin. C'est ce qui fait toute la difficulté et le charme des recherches dans le domaine des sciences du sol. Approche spatiale et approche "site lourd", loin de s'opposer, sont complémentaires, les données de l'une devant servir d'arguments pour l'autre. Et dans cette optique, nous attendons beaucoup de l'expérience mise en place par l'Association de Recherche et Valorisation en Agriculture (ARVA) en Région limoneuse pour l'aspect "site lourd" mais nous pensons éga-

lement que des bases de données comme celle de REQUASUD ou celle de l'Office Wallon des Déchets (OWD) contiennent un certain nombre d'informations utiles à une autre échelle de perception.

Pour les mêmes raisons de priorité donnée à une compréhension spatialisée des déterminants de la distribution des teneurs en ETMs, l'étude expérimentale, en plein champ ou en conditions contrôlées, des impacts de modes de gestion de la matière organique ne fait pas l'objet de ce travail mais doit être perçue en tant que perspective de valorisation des acquis de cette thèse. La connaissance des sols est en effet un préalable à la sélection des objets qui seront mis en expérimentation. L'évolution de propriétés de sols après incubation de différentes matières organiques en conditions contrôlées fait par ailleurs l'objet de recherches parallèles au sein du Laboratoire de Géopédologie.

En résumé, les objectifs de ce travail sont de:

- ▷ *contribuer à une réflexion méthodologique pour la définition de référentiels géopédologiques à vocation agro-environnementale en évaluant l'intérêt et les limites de divers modes et outils d'acquisition et d'analyse de données; et*
- ▷ *contribuer à une meilleure connaissance de l'état des sols en Région limoneuse et de leur degré d'anthropisation par la caractérisation de la distribution spatiale des teneurs en certains éléments tracés métalliques (ETMs).*

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE.1 PROBLEMATIQUE	6
<i>1.1 Les ETMs dans les sols.</i>	6
<i>1.2 Mobilité des ETMs</i>	10
<i>1.3 Evaluation des stocks et des flux</i>	17
1.3.1 Teneurs dans les roches et dans les sols	17
1.3.2 Transferts sols-plantes:	19
1.3.3 Données relatives aux apports éoliens diffus	23
1.3.4 La valorisation agricole en quelques chiffres	24
1.3.5 Bilan de flux en milieu agricole	28
<i>1.4 Conclusions</i>	29
CHAPITRE.2 PRESENTATION DU CADRE DE L'ETUDE	31
<i>2.1 La Région limoneuse</i>	31
2.1.1 Le cadre géologique régional	31
2.1.2 Dépôts quaternaires, modèle et régions géomorpho-logiques	34
2.1.3 Délimitation d'une zone d'étude en région limoneuse	43
<i>2.2 Présentation de la zone d'étude</i>	44
2.2.1 Oro-hydrographie	44
2.2.2 Géostructures	45
2.2.3 Lithologies	45
2.2.4 Sols	47
CHAPITRE.3 STRATEGIES D'ECHANTILLONNAGE	62
<i>3.1 Paramètres à suivre</i>	62
3.1.1 Variables explicatives	62
3.1.2 Teneurs en ETMs	65
<i>3.2 Approches existantes en matière de détermination des teneurs naturelles en ETMs dans les sols</i>	68
3.2.1 Approches du fond géochimique	68
3.2.2 Approches du fond pédogéochimique	70
<i>3.3 Méthodologie adoptée</i>	74
3.3.1 Une démarche comparative pas-à-pas	74
3.3.2 Des modes opératoires intégrés	77
CHAPITRE.4 CONSIDERATIONS RELATIVES A L'INTERPRETATION DES RESULTATS ANALYTIQUES POUR LES ELEMENTS TOTAUX	79
<i>4.1 A propos de l'exploitation de la variabilité opératoire</i>	79

4.1.1	Détermination de la variabilité opératoire	79
4.1.2	Variabilité opératoire et qualité de l'estimation en un point	81
4.1.3	Variabilité opératoire et différences significatives entre échantillons	81
4.1.4	Variabilité opératoire et analyse de la variance	82
4.2	<i>A propos de l'exploitation de méthodes différentes d'analyse des éléments totaux</i>	84
4.2.1	Comparaison attaque triacide et attaque à l'"eau régale"	84
4.2.2	Comparaison attaque triacide et fluorescence X	86
4.2.3	Conclusions	92
4.3	<i>A propos de la représentativité des références</i>	92
4.3.1	Notions de base	92
4.3.2	Ressemblance entre individus ou similarité	93
4.3.3	Classification et classement d'objets	95
4.3.4	Conclusions	102
4.4	<i>A propos des techniques d'interpolation et de prédiction</i>	103
4.4.1	Prédiction spatiale et cartes des sols	104
4.4.2	Principales méthodes d'interpolation spatiale	104
4.4.3	Conclusions	117

Première partie

Définitions, cadre naturel, problématique et démarche

Liste des figures

Première partie

Figure I.1:	Eléments-traces dans les sols: processus, formes et flux , définitions.....	7
Figure I.2:	Classification des éléments en fonction de leur potentiel chimique	12
Figure I.3:	Délimitation de la Région Limoneuse en Belgique	31
Figure I.4:	Esquisse géologique du sud de la Belgique.....	33
Figure I.5:	Coupe ouest - est dans la région limoneuse	35
Figure I.6:	Situation géographique des trois sous-régions principales de la Région limoneuse sur le territoire de la Région Wallonne	41
Figure I.7:	Délimitation des principaux ensembles géographiques en Région Limoneuse.....	42
Figure I.8:	Subdivision de la Hesbaye en unités sous-régionales	42
Figure I.9:	Situation de la zone d'étude en Région Wallonne	43
Figure I.10:	Image des altitudes.....	44
Figure I.11:	Modèle d'organisation des principales séries de sols en Région limoneuseet sous culture	50
Figure I.12:	Relations géologie-relief-sols en "Région limoneuse gembloutoise"	58
Figure I.13:	Relations géologie-relief-sols en "Région limoneuse méridionale"	59
Figure I.14:	Relations géologie-relief-sols en "Région limoneuse mixte à substrat sableux".....	60
Figure I.15:	Schéma d'altération des phyllosilicates primaires des loess en climat tempéré	63
Figure I.16:	représentation des différentes approches au sein de la méthodologiegénérale d'échantillonnage.....	75
Figure I.17:	Comparaison des résultats d'analyse du Co total par attaque triacide etabsorption atomique (AAS), ou ICP et par fluorescence X (XRF)	88
Figure I.18:	Comparaison des résultats d'analyse du K total par attaque triacide etabsorption atomique (AAS) et par fluorescence X (XRF).....	89
Figure I.19:	Comparaison des résultats d'analyse du Pb total par attaque triacide etabsorption atomique (AAS), ou ICP et par fluorescence X (XRF)	89
Figure I.20:	Comparaison des résultats d'analyse du Cr total par attaque triacide etabsorption atomique (AAS), ou ICP et par fluorescence X (XRF)	90
Figure I.21:	Exemple de dendrogramme représentant la structure du regroupement.....des individus	100
Figure I.22:	modèle de variation par palier; polygonations de THIESSEN	105
Figure I.23:	<i>Trend surfaces</i> en deux dimensions spatiales (a) linéaire, (b) quadratique,(c) cubique	106
Figure I.24:	composantes de la variation spatiale d'une propriété	109
Figure I.25:	Formes typiques de semi-variogrammes	112
Figure I.26:	exemples de surfaces variographiques	113

Liste des tableaux

Première partie

Tableau I.1:	Affinités ETMs-phases porteuses: a- par phase porteuse.....	14
Tableau I.2:	Affinités ETMs-phases porteuses: b - par ETM.....	15
Tableau I.3:	Contenu moyen (en mg/kg) de l'écorce terrestre, des roches magmatiques ... basiques, des calcaires, des grès et des shales/argiles	19
Tableau I.4:	Gammes de teneurs, d'anomalies naturelles modérées ou fortes en certains... éléments dans les sols français et dans les sols agricoles du monde.....	20
Tableau I.5:	Transferts relatifs « boue d'épuration – plantes » de Cr et Ni.....	20
Tableau I.6:	Teneurs critiques en oligoéléments dans les plantes et dans les sols.....	21
Tableau I.7:	aptitude à l'accumulation de quelques plantes.....	22
Tableau I.8:	Données relatives aux dépôts éoliens diffus.....	24
Tableau I.9:	Bilan de valorisations agricoles de déchets organiques	25
Tableau I.10:	Exemples de teneurs en ETMs dans des produits valorisables en agriculture.....	26
Tableau I.11:	Charges en "métaux lourds" qui résulteraient de l'application sur les sols agricoles d'une boue d'épuration d'effluents de l'alimentation humaine exclusivement, d'une boue contenant les teneurs limites autorisées par la législation suédoise, d'effluents d'élevage, et d'engrais commerciaux; dépôts atmosphériques estimés.....	27
Tableau I.12:	Evaluation du temps nécessaire pour augmenter les teneurs en ETMs dans les sols agricoles jusqu'aux limites recommandées pour l'application des boues en appliquant annuellement une boue conformément aux limites de la législation ou un fumier « chargé » et réduire ensuite ces teneurs de moitié	28
Tableau I.13:	Chronostratigraphie du quaternaire, phases principales de pédogenèse, sols -repères.....	37
Tableau I.14:	Subdivisions de l'Holocène.....	38
Tableau I.15:	teneur en argile des horizons E et BT des sols de type Aba et indice de différenciation texturale.....	48
Tableau I.16:	Teneur moyenne en argile et en humus de l'horizon labouré.....	51
Tableau I.17:	Proportion des principales unités cartographiques dans les associations de la Région limoneuse	54
Tableau I.18:	Statistiques relatives à la variabilité opératoire.....	80
Tableau I.19:	Analyse de la variance entre types de sols - une seule mesure par endroit	83
Tableau I.20:	Analyse de la variance entre types de sols - plusieurs mesures par endroit	83
Tableau I.21:	comparaison des résultats "triacide" et "eau régale"	86
Tableau I.22:	Estimation de l'importance des fractions des ETMs incluses dans les réseaux silicatés, à partir des relations HF-HR et à partir d'extractions séquentielles.....	86
Tableau I.23:	Répétabilité de la méthode par XRF	87
Tableau I.24:	Ordres de grandeurs des valeurs mesurées selon les différentes techniques	91
Tableau I.25:	Analyse de la variance à un critère de classification.....	97

Chapitre.1 Problématique

1.1 Les ETMs dans les sols.

Dans les sols, les ETMs sont d'origine naturelle en raison de leur présence dans les roches-mères, d'apports et d'enrichissement associés aux phénomènes d'érosion, d'altération, d'éruption et retombées volcaniques. Mais ils ont aussi été extraits de gisements ou déplacés d'un sol à l'autre par des actions anthropiques et proviennent alors d'activités agricoles, industrielles, domestiques (COLLECTIF, 1998a). Les teneurs en éléments dans un sol en un moment donné résultent de l'évolution pédogénétique d'un matériau avec ses propres teneurs et d'un bilan apports/départs qui peut être largement influencé par les activités humaines sur ce sol.

La figure I.1. illustre les principaux facteurs et processus régissant la distribution des ETMs dans les sols. BAIZE (1997) distingue (i) l'héritage de la roche-mère, (ii) le cycle bio-géochimique, (iii) les transferts pédologiques verticaux et latéraux, (iv) les transferts latéraux par ruisseaulement de surface, (v) les apports agricoles, (vi) les apports diffus aériens d'origine lointaine naturels (volcans...) et anthropiques (automobiles, industries...), (vii) les apports massifs localisés (pollutions accidentielles, industries proches), et (viii) l'exportation par les récoltes.

Le fond géochimique, *sensu stricto*, est la teneur originelle, l'héritage, de la roche-mère d'un sol. Les processus de pédogenèse engendrent des redistributions des ETMs que l'on peut qualifier de naturelles. BAIZE (1997) définit le fond pédogéochimique naturel (FPGN) comme *la concentration d'un élément chimique dans un sol, résultant des évolutions naturelles, géologiques et pédologiques, en dehors de tout apport d'origine humaine*.

Fond géochimique et FPGN se rapportent à une unité spatiale plus ou moins grande et la distinction des anomalies géochimiques est fondamentale pour la compréhension de différences comportementales des ETMs entre types de sols (COLLECTIF, 1998a, BAIZE *et al.*, 2002).

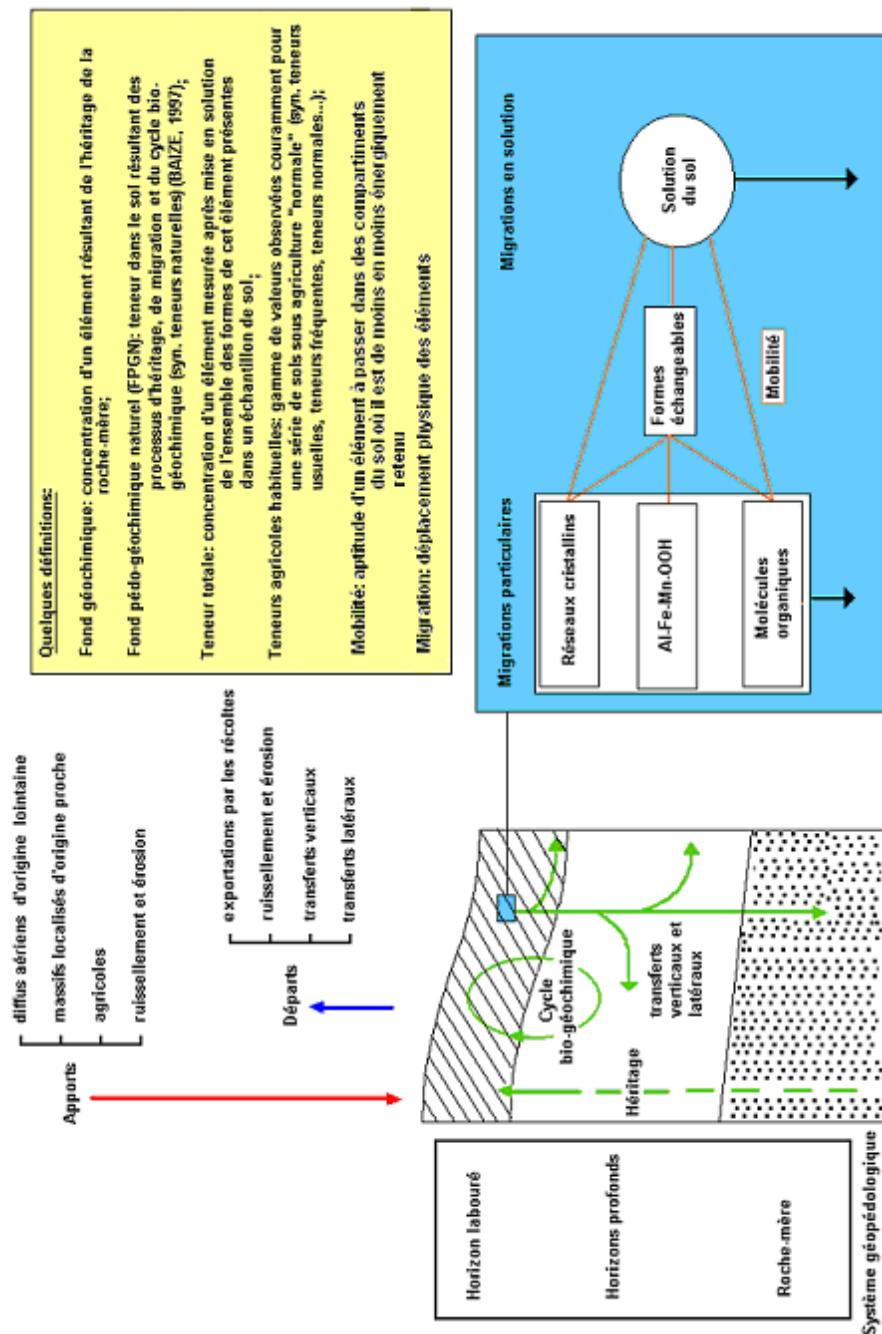


Figure I. 1: Eléments-traces dans les sols: processus, formes et flux (modifié d'après BAIZE, 1997), définitions.

Première partie - 7

Selon PEDRO et DELMAS (1970), déjà, le problème de la distribution des éléments-traces dans les roches doit être abordé sous deux angles différents: (i) l'aspect quantitatif brut et (ii) la localisation et la forme qui conditionnent la mobilité des éléments. Ces auteurs soulignent l'importance de considérer le type pétrographique, la localisation géographique et l'âge géologique¹.

Des teneurs moyennes, des intervalles de variation, ont été présentés pour les grands types de roches dans la littérature. Ce sont toujours évidemment des ordres de grandeur qui ont peu de signification pratique.

Pour simplifier, les sols naissent des transformations des roches-mères. Les processus pédogénétiques, dont les transferts d'éléments, sont nombreux et concourent généralement à une différenciation verticale plus ou moins importante entre des volumes de sols, les horizons. La pédogenèse est sous l'influence de facteurs (climat, roche-mère, relief, activité biologique...) qui ont leur propre variabilité. Elaborer une typologie des sols est un moyen de s'affranchir d'une partie de la variabilité spatiale des sols, en reconnaissant des groupes qui présentent des caractéristiques et donc des comportements similaires.

Les apports atmosphériques, qu'ils soient d'origine naturelle ou anthropique à l'exception des contaminations localisées, présentent un caractère diffus et néanmoins spatialement variable. Ils sont dès lors difficiles à estimer au niveau local (COLLECTIF, 1998b; DGRNE, 1994). Les contaminations localisées concernent principalement des sites industriels en activité ou en friche, des décharges incontrôlées ou des lieux de pollution accidentelle liée au transport ou au stockage de substances dangereuses. Si les pollutions et contaminations récentes peuvent faire l'objet d'un contrôle, voire d'un traitement, les "charges du passé" sont plus difficiles à détecter (DGRNE, 1994). On peut toutefois raisonnablement penser que les sols agricoles ne sont guère concernés par ce dernier mode d'apports, qui reste accidentel.

Les apports agricoles directs d'ETMs concernent tous les produits utilisés en agriculture pour maintenir ou améliorer le potentiel de fertilité. Que ce soit les engrains, les effluents d'élevage, ou les déchets valorisables, aucun *intrant* agricole n'est exempt d'ETMs. Comme le rappelle BAIZE (s.d.), pour les horizons de surface des sols agricoles, il

¹ ce qui équivaut à considérer le niveau "assise" de la carte géologique de Belgique à 1:40.000 ou la Formation à 1:25.000 pour la définition d'une unité géochimique fonctionnelle.

convient de parler de "teneurs agricoles habituelles", car aucun n'est exempt de contaminations.

Certains experts prédisent qu'obligation sera faite, par l'Agence Européenne de l'Environnement aux états membres de l'Union Européenne, de réaliser une cartographie géochimique complète et préconisent de concevoir d'entrée un cadre qui permette de recenser à la fois les apports naturels et les apports anthropiques (COLLECTIF, 1998a). Des essais régionaux sur des superficies limitées mais significatives (50.000 à 200.000 ha) ont été proposés avec pour objectifs: (i) la détermination du fond géochimique naturel des sols du territoire étudié, (ii) l'estimation de leur état de contamination, (iii) la possibilité de poser un diagnostic à la parcelle par raisonnement typologique, (iv) l'aide à la fixation de normes nationales et régionales et (v) la réalisation d'une base d'échantillonnage pour développer des recherches complémentaires sur la mobilité des ETMs.

La distribution spatiale des ETMs dans les sols résulte de la combinaison de facteurs naturels (climat, matériel parental, relief...) et de facteurs anthropiques (utilisation des terres, proximité d'activités industrielles...). Distinguer la part des composantes naturelles et anthropiques est important (i) pour la détermination des niveaux naturels de teneurs en ETMs dans les sols, i.e. la détermination d'une situation de référence hors-contamination pour l'évaluation de pratiques agricoles, et (ii) pour la prédiction spatiale des teneurs en ETMs ainsi que des propriétés y liées.

Pour ce qui concerne la prédiction des teneurs naturelles dans le contexte des milieux à climat tempéré, des déterminants peuvent être trouvés dans les facteurs de la pédogenèse, principalement dans l'héritage du matériel parental. Par contre, les contaminations anthropiques sont "imprédictibles" à l'échelle régionale. Les sources d'apports sont nombreuses et l'historique de ces apports est rarement suivi, si bien qu'il est pratiquement impossible de réaliser un bilan détaillé au niveau d'un sol agricole. Tout juste peut-on réaliser un constat d'une contamination anthropique et déterminer des teneurs "habituellement rencontrées".

Dans le cadre de ce document, nous utiliserons les termes et leurs acceptations suivants:

Fond géochimique: concentration d'un élément résultant de l'héritage de la roche-mère;

Fond pédo-géochimique naturel (FPGN - BAIZE, 1997): teneur en un élément dans le sol résultant des processus d'héritage, de transferts pédologiques et du cycle bio-géochimique (synonyme: teneur naturelle);

Fond pédo-géochimique corrélé à l'argile et/ou au fer total (FPG_{arg.} ; FPG_{Fe}): teneur naturelle en un élément estimée par régression avec la teneur en argile ou en Fe total;

Teneur totale: concentration d'un élément mesurée après mise en solution de l'ensemble des formes de cet élément présentes dans un échantillon de sol;

Teneurs agricoles habituelles (TA_H - BAIZE, s.d.): gamme de valeurs fréquemment observées pour une série de sols sous agriculture "normale" (synonyme: teneurs agricoles usuelles, fréquentes, normales...);

Teneurs agricoles non corrélées à l'argile (TA_{NC}): différence entre teneur totale et fond corrélé à l'argile ou au Fe total dans l'horizon labouré.

1.2 Mobilité des ETMs

Si l'on considère un cycle général de ces éléments (les ETMs) dans le sol et les hydrosystèmes... on constate que des migrations sont possibles et se produiront parfois sous forme soluble, mais aussi sous forme colloïdale et particulaire, par lixiviation et par érosion... (COLLECTIF, 1998a).

La mobilité d'un élément est son aptitude à passer dans des compartiments du sol où il est de moins en moins énergiquement retenu, écrivait JUSTE (1988). La notion de mobilité est distincte de celle de migration, évoquée au premier paragraphe et qui concerne le déplacement physique des éléments. Dans les sols, les ETMs se distribuent entre un certain nombre de compartiments en fonction des conditions physico-chimiques. Les ETMs sont, le cas échéant, camouflés à l'intérieur des

réseaux silicatés, échangeables sur le complexe argilo-humique, adsorbés par les oxy-hydroxydes² de fer, manganèse ou aluminium, complexés avec la matière organique, précipités sous forme minérale, ou en solution (PEDRO et DELMAS, 1970, JUSTE, 1988; ALLOWAY, 1990; BRADY et WEIL, 1996; BAIZE, 1997; COLLECTIF, 1998a). Chaque compartiment est caractérisé par une énergie de rétention spécifique à chaque élément (notion de mobilité) et par une susceptibilité particulière à chacun des modes de transfert physique dans les sols (notion de migration).

PEDRO et DELMAS (1970) rappellent que les éléments libérés lors de l'altération des minéraux et roches auront un comportement dynamique qui leur est propre, lié à leurs caractéristiques physico-chimiques. Parmi celles-ci, la constante d'acidité (pK_a) régit la forme ionique (si $pH < pK_a$) ou hydroxylée (si $pH > pK_a = hydrolyse$); le produit de solubilité (pS) la forme *sel* (si $pH > pS$ et $pS < pK_a$, *acidolyse*); la présence d'anions complexants (*complexolyse*) la forme *complexe*, généralement soluble.

La figure I.2. illustre les propriétés de mobilité des différents éléments traces. Cinq groupes sont reconnus par PEDRO et DELMAS en fonction de la solubilité des hydroxydes. Ces auteurs constatent un lien entre les cinq groupes et le potentiel ionique ($\emptyset = charge (z) / rayon ionique (r)$) des éléments. Les groupes A (hydroxydes solubles, $\emptyset < 2$) et E (hydroxyacides simples, $\emptyset > 11$) sont très mobiles, les groupes B (hydroxydes peu solubles, groupe du Zn, $2 < \emptyset < 3$) et D (hydroxyacides condensés, $7 < \emptyset < 11$) sont faiblement mobiles et le groupe C (hydroxydes insolubles) est considéré comme immobile. La présence de CO_2 favorisera la mobilisation des éléments du groupe B (pour des $pH > pK_a$), alors que celle de H_2S les freinera (en raison des produits de solubilité).

En première approche, par rapport aux propriétés des sols, ce seront donc le pH, la présence de matière organique complexante³, et les transferts d'eau qui vont régir les transferts d'éléments dans et hors du profil. On comprend bien pourquoi les sols podzolisés sont le siège des migrations les plus importantes.

² Dans la suite du travail, $AlOOH$, $FeOOH$ et $MnOOH$ désigneront respectivement les oxy-hydroxydes d'aluminium, de fer et de Mn.

³ qui est liée au climat présidant à la minéralisation de la matière organique.

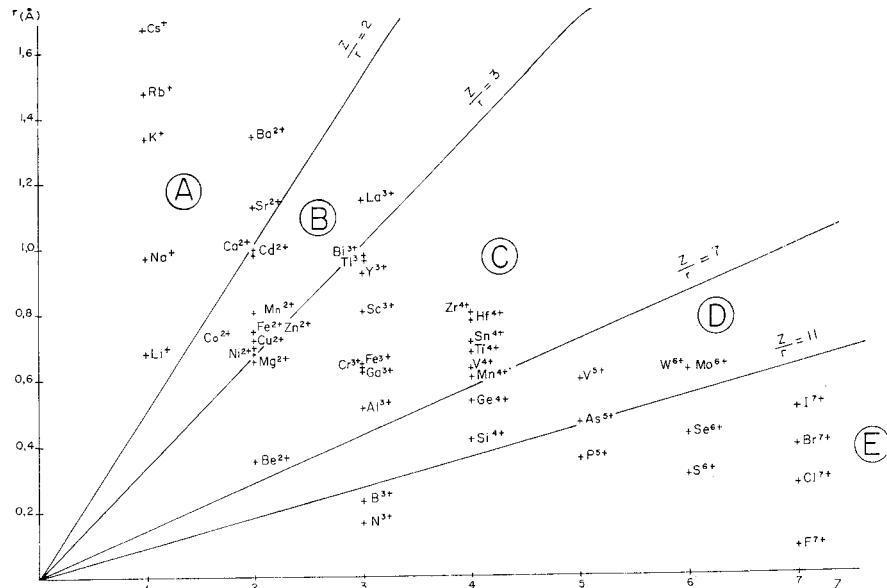


Figure I. 2: Classification des éléments en fonction de leur potentiel ionique (PEDRO et DELMAS, 1970)

Une étude réalisée sur un panel de sols suisses (CELARDIN, 2002) confirme l'importance du pH sur la mobilité des ETMs⁴ et montre l'intérêt de prendre également en considération le complexe d'échange, exprimé par la CEC. Celui-ci interagit de manière sélective avec les différents cations métalliques (ALLOWAY, 1990).

Les mécanismes de l'adsorption sont décrits, entre autres, par ALLOWAY (1990). L'adsorption non spécifique, ou échange cationique ou physisorption (CHAIGNON, 2001), résulte de forces d'attraction électrostatique entre ions. Elle caractérise la (relativement faible) fixation des ions sur les charges de signe opposé du complexe d'échange. Pour rappel, dans le sol, ce sont les charges négatives qui dominent le complexe d'échange. On distingue les charges permanentes, indépendantes du pH, dues aux substitutions isomorphiques dans les minéraux argileux, et les charges variables, dépendantes du pH. Ces dernières sont dues aux hydroxyles en bordure des minéraux argileux, à certains groupements fonctionnels des matières organiques (carboxyles et phénols principalement) et aux groupes hydroxyles des oxydes métalliques. En conditions acides, FeOOH et MnOOH développent des charges positives et contribuent alors davantage à des relations

⁴ La mobilité est estimée par le rapport de la fraction mobile, mesurée au pH du sol, sur la fraction mobilisable, mesurée à pH < 5.

d'échange anionique. La CEC en milieu acide à modérément acide est principalement le fait des minéraux argileux et des groupements fonctionnels organiques.

L'adsorption spécifique ou covalente résulte de liaisons par mise en commun à part égale (covalence) ou non (coordination) d'électrons entre les ions de la solution du sol et certains ions à l'intérieur des constituants du sol, principalement FeOOH et MnOOH. La spécificité de la liaison pour les ETMs (tableau I.1.) est expliquée par le pK et le rayon ionique des éléments. Plus la constante de dissociation est faible, plus l'adsorption est importante; et, à pK identique, plus le rayon ionique est élevé plus la force de liaison est importante (ALLOWAY, 1990; CHAIGNON, 2001). Les groupements carboxyles des composés humiques et fulviques de la matière organique contribueraient également à l'adsorption spécifique (STEVENSON, 1976; MURRAY et LINDER, 1984; cités par CHAIGNON, 2001; VAN RIEMSDIJK *et al.*, 1995). Le classement présenté au tableau I.1. dépendrait toutefois de la nature de la matière organique, du pH et des conditions de mesure.

Le coefficient de partition liquide/solide, Kd, est considéré comme un indicateur de mobilité des éléments. Le facteur de retard, Rf, intègre en outre la dimension du mouvement de l'eau à travers le sol aux réactions d'échanges (DE MATOS *et al.*, 2001). Les résultats de GOODY *et al.* (1995) témoignent de l'importance de la composition de la solution du sol, et donc des conditions expérimentales de la mesure de Kd, dans les réactions d'échanges, et traduisent la complexité de celles-ci. Les prédictions comportementales des éléments par rapport au complexe de sorption sont difficiles dans les sols en raison des nombreuses interactions possibles entre sorbant et éléments sorbés (sélectivité, compétition, complexation, précipitation...) et de dynamiques de réactions proches.

La coprécipitation -précipitation simultanée d'un élément avec un ou plusieurs autres- affecte également les ETMs. Les principales formes sont les FEOOH et MnOOH, les carbonates et les minéraux argileux (ALLOWAY, 1990).

La proportion des différents constituants minéralogiques et organiques est donc un facteur important dans la différenciation de la mobilité des divers ETMs (tableaux I.1 et I.2).

Tableau I. 1: Affinités ETMs-phases porteuses: a- par phase porteuse

<i>Processus</i>	<i>Affinités spécifiques</i>
<ul style="list-style-type: none"> - échange cationique - adsorption spécifique <ul style="list-style-type: none"> + Fe - MnOOH [1] + -COOH [2] - co-précipitation [1] <ul style="list-style-type: none"> + FeOOH + MnOOH + CaCO₃ + argiles 	<ul style="list-style-type: none"> Pas de spécificité Hg > Pb > Cu > Zn > Co > Ni > Cd Cu > Fe = Al > Co > Zn V, Mn, Ni, Cu, Zn, Mo Fe, Co, Ni, Zn, Pb V, Mn, Fe, Co, Cd V, Ni, Co, Cr, Zn, Cu, Pb, Ti, Mn, Fe
<i>Constituants</i>	<i>Affinités spécifiques</i>
<ul style="list-style-type: none"> - phyllosilicates <i>s.l.</i> [3] - kaolinite [1] - illite [1] - smectite, vermiculite [1] - FeOOH [1, 3, 6] - MOS [1, 3, 7, 8, 9] - MOD [2, 4, 6] 	<ul style="list-style-type: none"> Zn >> Ni > Cd Pb > Cu > Zn = Cd > Ni Pb > Cu > Zn > Cd Zn > Mn > Cd > Hg Pb > Cu > Zn > Ni > Cd > Co ou Cu > Pb > Zn > Ni > Co > Cd Pb > Hg > Ni > Cu > Cd >= Zn Cu >> Co > Zn > Cd

[1]: ALLOWAY, 1990; [2]: CHAIGNON, 2001; [3] TILLER *et al.*, 1984a et b; [4] HODGSON *et al.*, 1965; [5] VAN RIEMSDIJK et al, 1997; [6] NEUBAUER *et al.*, 2002; [7] RANDLE et HARTMANN, 1995; [8] MORERA *et al.*, 2001; [9] FAGERIA *et al.*, 2002.

MOS: Matière Organique du Sol; MOD: Matière Organique Dissoute.

Tableau I. 2: Affinités ETMs-phases porteuses: b - par ETM

<i>Elément trace</i>	<i>Affinités</i>
<i>Cd</i>	argiles
<i>Co</i>	Fe-MnOOH [9]
<i>Cu</i>	MO > Fe-MnOOH >> argiles [1, 2, 3, 4, 7]
<i>Mn</i>	Fe-MnOOH
<i>Ni</i>	FeOOH [1], kaolinite [3],
<i>Pb</i>	FeOOH > carbonates > MO > silicates [8]
<i>Zn</i>	FeOOH [7], carbonates [5],

[1]: ALLOWAY, 1990; [2]: CHAIGNON, 2001; [3] TILLER *et al.*, 1984a et b; [4] HODGSON *et al.*, 1965; [5] HAN *et al.*, 2000; [6] GUADALIX et PARDO, 1995; [7] GONG et DONAHOE, 1997; [8] EMMANUEL et EREL, 2002; [9] FAGERIA *et al.*, 2002.

MO: Matière Organique

Un autre paramètre doit encore être pris en considération, il s'agit du potentiel d'oxydo-réduction. Celui-ci peut agir selon trois voies (COLLECTIF, 1998a): (i) par un changement du degré d'oxydation de l'élément lui-même, ou (ii) d'éléments se liant à celui-ci (ligands), et (iii) par formation ou dissolution de phases porteuses.

Les accepteurs stables d'électrons dans les sols sont par ordre décroissant de potentiel rédox (TROLARD *et al.* 2002): NO₃, MnOOH, FeOOH, SO₄ et CO₂. Le système Fe(II)-Fe(III) joue un rôle-clé en raison de l'abondance du fer et de sa propension à former des complexes solubles plus ou moins stables (TROLARD *et al.* 2002). Les sols hydromorphes ou à hydromorphie temporaire présentent une susceptibilité plus grande par rapport à la mobilité des ETMs car un milieu réducteur favorise la solubilisation des oxy-hydroxydes de fer/manganèse et la libération des ETMs y associés, mais également la production de composés organiques à l'origine de complexes organo-métalliques stables (ALLOWAY, 1990; CHARLATCHKA *et al.*, 1997).

Doivent encore être cités, les micro-organismes qui minéralisent la matière organique ou modifient les formes chimiques des ETMs, contribuant soit à leur insolubilisation soit à leur mobilisation (BOURG *et al.*, 1989; ALLOWAY, 1990; COLLECTIF, 1998a). Les microorganismes peuvent agir directement ou indirectement sur les éléments par des pro-

cessus d'oxydo-réduction.

La mobilité doit également être considérée en fonction du pas de temps des processus. Les pièges à ETMs ne sont pas les mêmes selon que l'on considère l'échelle de la genèse des sols (importance des FeOOH) ou une échelle décennale (rôle de la matière organique) (COLLECTIF, 1998a).

L'ensemble de ces processus conduit généralement à une concentration faible d'éléments en traces dans la solution, ce qui limite considérablement les risques de transferts de solutés dans les profils vers les eaux souterraines, tout au moins tant que l'acidification du milieu reste modérée (COLLECTIF, 1998a). Ces considérations plutôt optimistes n'excluent pas les migrations à l'état particulaire par les eaux de ruissellement ou via les pores de grandes dimensions. Il faut également rappeler une des conclusions de l'étude de GONG et DONAHOE (1997): *during long-term application of acidic waste water to soils⁵, most attenuated heavy metals will become mobile due to the depletion of the soil buffering capacity and the reduction and saturation of reactive surface sites.*

En résumé, comme le rappelle BAIZE (1997), le comportement prévisible d'un ETM dans un sol dépend de quatre facteurs: l'héritage minéralogique; les processus pédologiques; la dynamique propre de l'élément chimique; et le fonctionnement actuel du sol. Les paramètres de l'environnement les plus importants par rapport à la mobilité des ETMs dans les sols sont le pH, le potentiel d'oxydo-réduction, la quantité et la qualité de la matière organique, ainsi que la capacité d'échange ionique.

En milieu acide, l'ordre de mobilité décroissante des éléments étudiés est Cd > Zn > Ni > Cu > Pb. En milieu neutre à légèrement basique, il devient Cu > Cd > Ni > Zn > Pb. Toutefois, dans ce dernier cas de figure, les indices de mobilité correspondent quasiment à la valeur minimum pour chacun des éléments (CELARDIN, 2002).

⁵ Il faut préciser que les sols étudiés, constitués de 70% de sable, présentaient des capacités d'échange cationique particulièrement faibles.

Ces ordres de mobilité sont toutefois à relativiser car (i) il est démontré que les ETMs possèdent des affinités différentes pour les compartiments physico-chimiques évoqués plus haut⁶ et (ii) ils ne témoignent pas forcément de la capacité de migration des éléments; les transports dans le sol pouvant intervenir sous forme soluble, colloïdale et partielle en fonction de la taille et de la configuration du système poral (CAMOBRECO et al., 1996; LI et SHUMAN, 1996; SMITH, 1996; MCBRIDE et al., 1997; COLLECTIF, 1998a)

Un autre aspect peu abordé dans la littérature concerne l'aspect évolutif des conditions physico-chimiques de l'environnement des ETMs. Ainsi, la conclusion d'un faible risque de mobilité des ETMs dans des sols agricoles limoneux bien drainés devrait être reconSIDérée en cas de changement d'affectation des terres vers la forêt ou toute autre activité susceptible de mener à une modification des caractéristiques physico-chimiques (pH, Eh...) des sols.

1.3 Evaluation des stocks et des flux

En référence au schéma de la figure I.1 et à titre d'illustration, des teneurs en ETMs dans les roches et les sols ainsi que l'intensité de quelques flux sont présentés ci-dessous. Il faut garder à l'esprit que ces chiffres ne constituent que des ordres de grandeurs et que la dispersion des valeurs est en général assez importante. En outre, l'information relative aux modes opératoires des déterminations analytiques n'est pas toujours disponible alors que les résultats en sont tributaires.

1.3.1 Teneurs dans les roches et dans les sols

Des teneurs moyennes dans les roches sont présentées au tableau I.3. Même si la variabilité intra-type n'y figure pas, ce tableau illustre néanmoins à suffisance l'importance potentielle du facteur lithologique dans la variabilité des teneurs en ETMs dans les sols.

⁶ En outre, si la physico-chimie et les affinités sélectives des ETMs et des différentes phases porteuses sont relativement bien connues dans les conditions de laboratoire, il en va autrement dans les sols, notamment en raison des interactions entre les différents constituants.

A noter la richesse relative⁷ des roches magmatiques en Cr, Co, Cu, Ni et Zn, et la "pauvreté" des roches sédimentaires; à l'exception de: Hg dans les trois types présentés,

Se dans les grès et les shales,
As, Cd, Pb, Tl et Zn dans les shales et argiles.

Parmi les roches sédimentaires, les shales et les argiles présentent les teneurs les plus élevées en la plupart des éléments.

Tableau I. 3: Contenu moyen (en mg/kg) de l'écorce terrestre (A),des roches magmatiques basiques (B) , des calcaires (C), des grès (D) et des shales/argiles (E) (d'après ALLOWAY, 1990).

	A	B	C	D	E
As	1.5	1.5	1.0	1	13
Cd	0.10	0.13	0.03	0.05	0.22
Cr	100	200	11	35	90
Co	20	35	0.1	0.3	19
Cu	50	90	5.5	30	39
Hg	0.05	0.01	0.16	0.29	0.18
Ni	80	150	7	9	68
Pb	14	3	5.7	10	23
Se	0.05	0.05	0.03	0.5	0.5
Tl	0.6	0.08	0.14	0.36	1.2
Zn	75	100	20	30	120

Les travaux menés sur le fond pédogéochimique naturel par BAIZE en France ont, entre autres, permis de préciser les gammes de teneurs couramment rencontrées dans les sols (tableau I.4). Les teneurs relatives aux anomalies géochimiques naturelles accentuent encore l'importance de bien identifier sur le terrain les facteurs naturels qui prévalent à la distribution des teneurs en ETMs dans les sols.

Les gammes de teneurs habituelles sont relativement larges; il existe souvent un facteur supérieur ou égal à dix entre les dents des fourchettes présentées. L'étendue de ces gammes de teneurs traduit la variabilité des propriétés des sols et des horizons (héritages de matériaux parentaux très différents et types de sols différents) d'une part, ainsi que de leurs modes de gestion (historique d'occupation, type de production...)

⁷ par rapport à la composition moyenne de l'écorce terrestre.

Tableau I. 4: Gammes de teneurs (en mg/kg) habituelles (A, D), d'anomalies naturelles modérées (B) ou fortes (C) en certains éléments dans les sols français (A, B, C - <http://etm.orleans.inra.fr/index.html>) et dans les sols agricoles du monde (D - ALLOWAY, 1990).

	A	B	C	D
As	1 - 25	30 - 60	60 - 284	1 - 20
Cd	0.05 - 0.45	0.70 - 2.00	2.0 - 46.3	0.2 - 1.0
Cr	10 - 90	90 - 150	150 - 3180	70 - 100
Co	2 - 23	23 - 90	105 - 148	10
Cu	2 - 20	20 - 62	65 - 160	20 - 30
Hg	0.02 - 0.20	0.20 - 0.45	-	0.03 - 0.06
Ni	2 - 60	60 - 130	130 - 2076	50
Pb	9 - 50	60 - 90	100 - 10180	10 - 30
Se	0.1 - 0.7	0.8 - 2.0	2.0 - 4.5	0.5
Tl	0.1 - 1.7	2.5 - 4.4	7.0 - 55.0	-
Zn	10 - 100	100 - 250	250 - 11426	50

1.3.2 Transferts sols-plantes:

Pour ce qui concerne l'interprétation des teneurs rencontrées dans les sols en terme de biodisponibilité, en 1967, une étude de la FAO à l'échelle européenne mentionne des *déséquilibres* en éléments-traces: faibles teneurs en B, Mn, Co et Cu dans certains sols, déficiences en Fe, en Mo et en Zn; et des cas de toxicité⁸ pour le Mn, Mo, Se, Al, Pb, Zn, B, Cu, Ni et Fe.

Déséquilibre, déficience et toxicité sont autant de notions qui se réfèrent à celle de "réponse-plante".

L'absorption des éléments traces par la plante dépend de nombreux facteurs liés au sol (matériau parental, type de pédogenèse, pH, rH, MO...), à la plante (espèce, cultivar, morphologie racinaire, types d'ex-sudats...), à l'environnement physique (température, humidité...) et microbien, ainsi qu'aux éléments eux-mêmes et à leurs interactions.

Ceci est partiellement illustré par les résultats de DELCARTE (1988) relatifs à la mesure de transferts de Cr et Ni vers deux plantes de grande culture et une prairie (Tableau I.5).

⁸ Les toxicités constatées étaient associées à des sols acides (Zn, Al, Cu et Fe), à des sols miniers (Zn, Pb) ou à des contextes de matériaux parentaux particuliers (Se, Cu, Ni).

Tableau I. 5: Transferts relatifs de Cr et Ni d'une boue d'épuration (sol = sable) vers luzerne, prairie et betterave (d'après DELCARTE, 1988)

	Luzerne	Prairie	Betterave
Cr	0	0	+
Ni	++	++	++

En regard de l'absorption des ETMs par les plantes, COTENIE (1983, cité par DELCARTE, 1988) classe les éléments en:

- mobiles: Cd, Co, Mo, Zn dont l'assimilation par la plante est facile;
- peu mobiles quelles que soient les conditions de milieu: Cr, Cu, Pb;
- intermédiaires Fe, Mn.

En traces dans les sols, ces éléments sont également présents en traces dans les plantes. Certains sont essentiels pour le monde vivant, mais parfois également potentiellement toxiques.

Les oligo-éléments reconnus essentiels pour les plantes sont par ordre d'accumulation inverse: Mn > Fe > Zn > B > Cu > Mo. Ni serait également essentiel à faible concentration, ainsi que Co pour les rhizobium et les animaux (FAGERIA *et al.*, 2002).

Chacun de ces éléments peut être à l'origine de toxicités pour la plante, comme de déficiences. Celles-ci seraient répandues dans les plantes cultivées en réponse à la combinaison de phénomènes (i) d'intensification des cultures et de l'augmentation concomitante des quantités produites par unité de surface, (ii) de réduction des restitutions organiques et (iii) d'utilisation d'engrais de plus en plus "pauvres" en éléments traces (FAGERIA *et al.*, 2002).

D'une manière très générale, les risques de déficience en:

- (1) B sont associés aux sols riches en AlOOH, aux sols volcaniques, ainsi qu'aux régions arides et semi-arides;
- (2) Cu aux substrats quartzeux, aux sols acides et aux sols très riches en matière organique;
- (3) Fe aux sols calcaires, ou à texture grossière, particulièrement en zones arides et semi-arides;
- (4) Mn aux taux de MOS élevés, à la présence de carbonates, à un drainage déficient, ou aux sols très acides et pauvres;

- (5) Mo dans les sols acides et bien drainés et les sols sur roches-mères pauvres en cet élément;
- (6) Zn dans les milieux carbonatés, ou phosphatés, ou fortement altérés, ou encore aux sols sableux, acides et bien drainés.

Le tableau I.6 présente des "teneurs critiques" (FAGERIA *et al.*, 2002) dans les plantes et les sols. Les chiffres présentés sont essentiellement illustratifs car fortement tributaires de la plante, du "milieu sol" et de la spéciation des éléments. En particulier, BAIZE (*com. pers.*) fait état de teneurs en ETMs mesurées dans certains sols largement supérieures aux valeurs "critiques" de FAGERIA *et al.* alors qu'aucune toxicité n'est observée⁹.

Tableau I. 6: Teneurs critiques en oligo-éléments dans les plantes et dans les sols (d'après FAGERIA *et al.*, 2002).

Elément	Teneur critiques dans les plantes (mg/kg)		Teneur critiques dans les sols (mg/kg)	
	déficience	toxicité	déficience ^(a)	toxicité ^(b)
B	10	50-200	0.8 (HW - betterave)	15-25
Cu	3-5	20-100	1.1 (0.5M EDTA - orge)	60-125
Fe	50	1000	4.5 (DTPA-TEA - sorgho)	-
Mn	10-20	300-500	3 (Mehlich-3 - maïs)	1000-3000
Mo	0.1	10-50	0.1-0.3 (NO - fourrages)	2-13
Zn	15-20	100-400	0.86 (DTPA-TEA - maïs)	70-400
Ni	1-5	10-100	-	100
Co	0.2	15-50	-	25-50

(a): formes "partielles" établies pour certaines plantes: HW = Hot Water; NO = NH₄-oxalate...

(b): formes totales (sans autre précision de la méthode d'analyse)

La toxicité d'un élément dépend en grande partie de sa spéciation, gouvernée par les facteurs du milieu, pH¹⁰, potentiel rédox, matière organique, teneur en argiles. Elle est *difficile à apprécier et les valeurs des seuils toxicologiques issues de publications sont souvent disparates*

⁹ Voir à ce propos le tableau des records de France homologués sur le site <http://etm.orleans.inra.fr/teneursnatur.html> et dont une copie figure en annexe.

¹⁰ La disponibilité diminuant quand le pH s'élève (sauf Mo qui montre un comportement inverse), l'entretien du pH en terre agricole favorise donc les formes des ETMs les moins mobiles.

(COLLECTIF, 2003).

Face au potentiel de toxicité des ETMs, certaines plantes peuvent développer des mécanismes de tolérance ou de résistance. On distingue principalement des mécanismes d'exclusion, de détoxification et d'accumulation des éléments. L'ADEME a publié une classification pour quelques plantes en fonction de leur aptitude à l'accumulation (tableau I.7).

Tableau I. 7: Aptitude à l'accumulation de quelques plantes (MIQUEL, 2001)

Plantes	Cd	Zn	Cu	Ni	Pb
Fortement accumulatrices	Carotte, laitue, épinard		Carotte	Chou	
Moyennement accumulatrices	Chou, céleri	Maïs, bette-rave	Laitue, betterave	Betterave	
Faiblement accumulatrices	Betterave, poireau	Céréales, poireaux	Pommes de terre, chou, épinard	Céréales, maïs, pommes de terre	
Très faiblement accumulatrices	Céréales, maïs	Pommes de terre	Pommes de terre		Toutes espèces

On notera donc que les risques de contamination de la chaîne alimentaire via les transferts sols-plantes sont relativement faibles pour ce qui concerne les ETMs dans les espèces de grande culture. Le constat nécessite plus de nuances par contre pour les cultures maraîchères, au sein desquelles la carotte, la laitue et l'épinard peuvent se révéler comme autant de cultures "à risques" dans certaines situations.

Pour les raisons évoquées plus haut, les exportations par les récoltes en milieu agricole sont difficiles à estimer. Les données de la littérature se rapportent généralement à des concentrations relatives aux poids secs ou frais de matière végétale mais les quantités produites par unité de surface manquent souvent.

Le facteur de transfert sol-plante d'un élément est le rapport des concentrations de cet élément dans la plante et dans le sol:

$$F_T = \frac{C_{plante}}{C_{sol}} \text{ (kg de sol par kg de végétal).}$$

Ce rapport est très variable en fonction du type de sol, de l'espèce végétale et de l'élément considéré. On notera toutefois à titre indicatif les ordres de grandeur suivants: Cd: 1-10; Ni: 0,1-1; Pb: 0,01-0,1 (COLLECTIF, 2003).

Pour ce qui concerne des valeurs exprimées en grammes par hectare et par an, nous retiendrons les ordres de grandeur de VAN DRIEL et SMILDE (1990), estimés pour un schéma moyen de grandes cultures sur des sols hollandais, à savoir: Cd= 1,2 g ha⁻¹an⁻¹; Cu = 40 g ha⁻¹an⁻¹; Hg 0.5 g ha⁻¹an⁻¹; Pb= 2 g ha⁻¹an⁻¹; Zn= 200 g ha⁻¹an⁻¹. MOOLENAAR *et al.* (1997) donnent quant à eux des flux de 1,5 et 300g ha⁻¹an⁻¹ pour Cd et Zn, respectivement.

1.3.3 Données relatives aux apports éoliens diffus

La connaissance des apports éoliens diffus en Région wallonne est relativement faible. Un réseau de mesures existe, développé au début des années septante par l'Institut National des Industries Extractives (INIEX) et géré par l'Institut Scientifique de Service Public (ISSeP) depuis la régionalisation. Ce réseau, qui compte 132 jauge réparties en 31 groupes, plus une jauge de référence pour la pollution de fond, est essentiellement dédié au suivi des contaminations localisées autour des sites industriels. Le seul site de référence hors zone industrielle est situé à Offagne en Région ardennaise.

Les données du tableau I.8 concernent ce seul site et doivent donc être considérées avec prudence en cas d'extrapolation. A cet égard, les données fournies par DELCARTE pour le site de Bossière (DGRNE, 1994) donnent des teneurs en Cu (18), en Cr (2.92) et en Ni (6.2) largement inférieures à celles d'Offagne.

Les teneurs relatives aux apports diffus sont relativement faibles (classification ISSeP). A proximité des sites industriels, les apports éoliens peuvent varier de 1 à 10, 20 voire 40 en fonction du secteur d'activités.

Par rapport aux "stocks" dans les sols, une simple évaluation permet de constater que les apports éoliens sont très peu importants: inférieurs à 3 pour mille.

Tableau I. 8: Données relatives aux dépôts éoliens diffus

	Cu	Zn	Mn	Cr	Ni	Pb	Cd	Hg
g ha ⁻¹ an ⁻¹								
Fond diffus ^a	37	37	657	15	20	73	2	0.73
Fond/sol (%) ^b	0.05	0.01	0.03	0.01	0.02	0.06	0.14	0.23
Industrie ^a								
min	37	146	1460	73	7	7	2	1.10
max	256	1862	16060	621	219	164	7	-
ISSeP ^c	A	A	B	A	A	A	A	-

a: calculé à partir des valeurs fournies dans le rapport AIR 2000 de la DGRNE (<http://mrw.wallonie.be/dgrne/rapports/dppgss/air2000/top.htm>).

b: rapport entre les apports diffus et le stock dans le sol évalué à partir des valeurs moyennes des teneurs mesurées dans les sols français (source = <http://etm.orleans.inra.fr/webtabel.htm>), d'une densité de 1.3 T/m³ et d'une profondeur de 30cm.

c: classification de l'ISSeP: A = valeurs faibles; B = valeurs élevées; C = valeurs très élevées.

1.3.4 La valorisation agricole en quelques chiffres

Le tableau I.9 illustre les volumes de déchets concernés par le recyclage agricole pour quelques grandes catégories de produits, en Région wallonne et en France.

Les effluents d'élevage sont considérés comme des engrains naturels riches en azote et en phosphore organiques, *n'étant polluants que si ils sont mal épandus ou en excès* (DGRNE, 2001). L'épandage d'effluents d'élevage en Région Wallonne est soumis à la réglementation relative à la gestion durable de l'azote en agriculture (AGW du 10 octobre 2002), qui l'autorise sur les terres de culture à concurrence de 120kg d'azote organique par hectare et par an dans les zones définies comme "non-vulnérables"¹¹. Pour les exploitations agricoles, le rapport quantité d'effluents produite/capacité d'épandage est dénommé "taux de liaison au sol", est utilisé comme un indice de risque de pollution à moyen terme. Les zones où les possibilités d'épandage sont insuffisantes sont surtout localisées en Région sablo-limoneuse, limoneuse et en Région

¹¹ Ce arrêté du gouvernement wallon est une transposition du Code de bonnes pratiques agricoles. Les valeurs utilisées pour le calcul des quantités épandables deviennent 80 kg en zone vulnérable ou 120 kg d'azote en moyenne par ha et par an pour les cultures, et 210 kg d'azote en moyenne par ha et par an pour les prairies.

herbagère liégeoise (DGRNE, 2001).

Tableau I. 9: Bilan de valorisations agricoles de déchets organiques

Types d'effluents	Quantités
Région Wallonne	
<i>Résidus agricoles</i>	
lisiers	10^7 T. MB
fumiers	$7,5 * 10^6$ m ³
<i>Résidus des Industries agro-alimentaires</i>	$8 * 10^6$ m ³
<i>Epuration des eaux/déchets urbains</i>	170 kT MB
boues stations d'épuration ^d	10 kT. MS
France^a	
<i>Résidus agricoles</i>	
lisiers de porcs	$15 * 10^6$ m ³
déjections bovines	$250 * 10^6$ m ³
<i>Résidus Industries agro-alimentaires</i>	$5 * 10^6$ m ³
<i>Epuration des eaux/déchets urbains</i>	
composts d'ordures ménagères ^b	450 kT. MB
boues stations d'épuration ^c	510 kT. MS

Sources d'information: a = ROBERT (1996); b = MARTIN in STENGEL (1998); c = <http://www.ifen.fr/> (mai 2002); d = <http://environnement.wallonie.be/egi/dgrne/>
MB: Matière brute; MS: Matière sèche.

Actuellement, les boues de stations d'épuration représentent chaque année près de 17.000 tonnes de matière sèche (T.MS) en Région Wallonne (DGRNE, 2001), 850 000 T. en France, et 7 500 000 T. au niveau de l'Union européenne (DUDKOWSKI, 2000). Et ces tonnages ne font que croître du fait de l'augmentation du nombre de stations d'épuration. Il faut donc des processus d'élimination qui soient adaptés. En Région wallonne, jusqu'en 1997 près de 90% des boues d'épuration produites faisaient l'objet d'un épandage en agriculture. En 2000, cette proportion s'est rapprochée de la moyenne européenne (60%). A l'heure actuelle, l'épandage agricole des boues reste donc, en Europe, la principale filière d'élimination.

Si les perspectives qui se dessinent pour le futur vont vers l'augmentation de la valorisation agricole des boues urbaines¹², il ne faut cepen-

¹² Au moins pour les pays ou les régions pour lesquels l'élimination des effluents de l'élevage ne représente pas un problème structurel.

dant pas oublier que celles-ci représentent moins de 2 % des déchets épandus en agriculture; les déjections animales en représentant 94 % (DUDKOWSKI, 2000).

Les autres types d'effluents valorisables en agriculture sont généralement considérés tantôt comme des amendements ou engrains (écumes, composts de débris végétaux...) tantôt comme des déchets (composts urbains...) à faible valeur fertilisante.

Parmi les implications environnementales de la valorisation agricole des effluents figurent les perturbations des "réserves" en ETMs ainsi que des cinétiques de mobilité entre les compartiments qui les abritent. Le tableau I.10. illustre les aspects "qualitatifs" différents de plusieurs types d'effluents.

Tableau I. 10: Exemples de teneurs (mg/kg MS) en certains ETMs dans divers produits valorisables en agriculture

Produit	Cu	Zn	Cr	Ni	Pb	Co
Fumier de bovin ^a	28	150	11	21	10	-
Lisier de bovin ^b	57	580	15	10	17	-
Lisier de porc ^a	300	700	18	14	12	-
Engrais (moyenne) ^c	83	268	-	21	37	13
Scorie potassique ^b	17	23		17	3,0	9,0
Compost d'ordures ménagères ^b	234	987	30	43	548	11
Boue d'épuration ^b	79	523	23	29	126	-

Sources d'information: a = HOUOT et SCHWARTZ (2002); b = DGRNE (1994); c = DELCARTE (1988).

Ces chiffres confirment que les effluents urbains présentent généralement des teneurs plus élevées pour des éléments environnementalement sensibles comme les ETMs. Tous les engrais et amendements commercialisés en Belgique sont théoriquement soumis à des critères qualitatifs respectueux de l'environnement. Il n'en va pas de même pour les effluents agricoles produits et utilisés "sur site". Or ceux-ci peuvent présenter des concentrations élevées en Cu et en Zn selon le niveau d'intensification des productions animales. Enfin il faut rappeler que la composition de tous ces effluents présente également une importante variabilité intra-filière, en fonction de la date d'échantillonnage ou des conditions de production (HOUOT et SCHWARTZ, 2002).

Le tableau I.11, tiré de WITTER (1996), rassemble des charges potentielles en "métaux lourds" (*sic*) de divers produits valorisables sur les sols agricoles en Suède (en g par ha et par an). Les dépôts atmosphériques ont été conservés dans ce tableau pour comparaison.

Tableau I. 11: Charges en "métaux lourds" (en $\text{g ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) qui résulteraient de l'application sur les sols agricoles (A) d'une boue d'épuration d'effluents de l'alimentation humaine exclusivement (1 tonne MS ha^{-1}), (B) d'une boue contenant les teneurs limites autorisées par la législation suédoise (1 tonne MS ha^{-1}), (C) d'effluents d'élevage (2 tonnes MS ha^{-1}), et (D) d'engrais commerciaux (20 kg P ha^{-1}); (E) dépôts atmosphériques estimés (d'après WITTER, 1996).

ETM	A	B	C	D	E
	$\text{g ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$				
Cd	0.50	0.75	0.64	0.80	0.50
Cr	3.7	40.0	10.0	36.0	1.2
Cu	90.0	300.0	82.0	3.3	12.0
Hg	1.00	1.50	0.18	0.04	0.20
Ni	15.0	25.0	16.0	4.3	3.0
Pb	7.0	25.0	6.0	0.6	35.0
Zn	250	600	430	25	110

On peut constater (i) que les quantités de Cd sont du même ordre de grandeur quel que soit le mode d'apport au sol, (ii) l'importance des effluents de l'alimentation, tant humaine qu'animale, sur les quantités de Cu, de Ni et de Zn; (iii) celle des boues de stations d'épuration pour Hg; (iv) des engrains commerciaux pour Cr et (v) des dépôts atmosphériques pour Pb. On notera également que ces derniers sont largement inférieurs à ceux estimés au tableau I.8. Ces chiffres illustrent néanmoins des tendances générales qui sont relativement connues aujourd'hui mais que l'on a parfois tendance à oublier, notamment que les déchets ne sont pas les seules sources potentielles d'ETMs dans les sols.

1.3.5 Bilan de flux en milieu agricole

Exprimés g par hectare et par an, les flux permettent de comparer les quantités apportées aux "stocks" déjà existants dans les sols, ce qui ouvre la porte à l'évaluation quantitative de différents scénarios de recyclage agronomique des effluents organiques. Ainsi, un calcul réalisé en Suède (WITTER, 1996) évalue le temps "nécessaire" pour aboutir à des teneurs dans les sols égales aux concentrations maximales recommandées par la directive européenne en y appliquant des boues selon les quantités annuelles maximales autorisées (tableau I.12). Figure également le temps nécessaire pour ensuite diminuer de moitié les teneurs dans les sols *par des voies naturelles ou les productions agricoles*. Nous avons également réalisé un calcul du même type à partir d'une situation relativement "moyenne" par rapport aux teneurs de l'horizon de surface telles qu'on les mesure dans les sols agricoles belges. Les flux estimés concernent les dépôts atmosphériques, une "boue" aux limites maximales autorisées, un fumier à 30% de MS appliqué à raison de 24 T ha⁻¹ an⁻¹ (ce qui correspond à peu près à la charge maximale admise en Région wallonne hors zones vulnérables) et l'exportation par les récoltes (estimée d'après VAN DRIEL et SMILDE, 1990).

Tableau I. 12: Evaluation du temps nécessaire (en années) pour (I) augmenter les teneurs en ETMs dans les sols agricoles jusqu'aux limites recommandées pour l'application des boues en appliquant annuellement une boue conformément aux limites de la législation ou un fumier « chargé » et (II) réduire ensuite ces teneurs de moitié (a- d'après WITTER, 1996 et b- estimations personnelles).

a	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
I	47	-	26	35	55	47	20
II	12 500	187 500	6 500	94 000	13 000	375 000	2 400
b	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Stock du sol g/ha	1 560	195 000	78 000	273	117 000	195 000	312 000
flux (g ha ⁻¹ an ⁻¹) et temps (I et II en années)							
air	2	15	37	0,73	20	73	37
"boue"	30	1 500	1 500	15	300	1 500	4 500
I	208	130	78	242	260	130	104
"fumier"	6	80	1 250	1,5	150	195	3 600
I	1 083	2 462	94	2 519	516	1 003	130
plantes	1,2	-	40	0,5	6	2	200
II	3 250	-	2 438	3 900	19 500	97 500	1 950

On n'est pas obligé d'être d'accord avec ce genre de calculs car, outre les nombreuses approximations liées à l'échelle de travail considérée et le simplisme de la modélisation des mécanismes en jeu, les références manquent cruellement, notamment sur les intensités possibles des pro-

cessus "d'élimination ou de transferts" des ETMs. Nos estimations relatives aux boues et aux exportations sont globalement moins pessimistes que celles de WITTER (1996). Ce dernier justifiait par cet exercice la décision des pays scandinaves et des Pays-Bas de fixer des normes d'utilisation de boues plus sévères que celles préconisées par l'Union Européenne. L'objectif visé était d'abord de limiter le plus possible l'accumulation des ETMs dans les sols, avant même de spéculer sur des limites de teneurs dans les plantes qui garantiraient une consommation saine.

L'ensemble des résultats convergent toutefois vers un constat d'accumulation, plus ou moins rapide selon les types et les quantités d'effluents, des ETMs dans l'horizon labouré. En effet, à l'exception de Zn, les exportations par les récoltes estimées sont inférieures ou du même ordre de grandeur que les dépôts atmosphériques. Dans le bilan des flux, les apports agricoles (engrais, amendements, effluents d'élevage, boues...) ne sont dès lors plus balancés que par les départs par lixiviation, généralement faibles pour la plupart des éléments, et, surtout, l'augmentation du stock dans le sol. La gestion des contaminations risque donc bien d'être une préoccupation majeure pour bon nombre de générations futures.

1.4 Conclusions

La distribution spatiale des ETMs dans les sols résulte de la combinaison de facteurs naturels et de facteurs anthropiques. Des déterminants de la distribution spatiale peuvent être trouvés dans les facteurs de la pédogenèse. Distinguer la part des composantes naturelles et anthropiques est important (i) pour la détermination des niveaux naturels de teneurs en ETMs dans les sols, i.e. la détermination d'une situation de référence hors-contamination pour l'évaluation de pratiques agricoles, et (ii) pour la prédiction spatiale des teneurs en ETMs ainsi que des propriétés y liées.

Le comportement des ETMs dans un sol dépend de quatre facteurs principaux: l'héritage minéralogique; les processus pédogénétiques anciens; la dynamique propre de l'élément chimique; et le fonctionnement actuel du sol.

Le recyclage agricole est une filière importante d'élimination des effluents agricoles et urbains. La durabilité de celle-ci nécessite un suivi attentif de ses conséquences environnementales, dont l'accumulation de certains ETMs. Par rapport aux idées reçues, déchet = nui-

sance environnementale, les teneurs en ETMs devraient être considérées en termes de stocks et de flux. Les estimations actuelles, pour grossières qu'elles soient, tendent à montrer que les teneurs mises en jeu dans les différents flux en milieu agricole convergent vers une accumulation plus ou moins lente des ETMs en surface et des risques de transferts relativement faibles.

Toutefois, ces estimations méritent d'être nuancées. D'une part, dans les études, toutes les formes de flux ne sont pas toujours considérées, les migrations particulières par les phénomènes d'érosion sont peu prises en compte par exemple. Il faut en outre dans ce genre de bilans être attentif aux formes des éléments. Appliquer 200kg/ha de Zn soluble (soit à peu près 50mg Zn /kg de terre sur l'épaisseur de l'horizon labouré), outre le fait que c'est idiot, peut paraître négligeable par rapport aux teneurs totales d'un sol de type "Terre noire" de la plate forme sinémurienne (BAIZE et CHRETIEN, 1994) mais risque néanmoins de perturber profondément le "bon" fonctionnement des communautés biologiques vivantes.

On a tendance également à oublier que le sol est un milieu complexe et évolutif dans lequel les vérités du jour ne sont pas forcément celles des lendemains. Si la "Terre noire" finira par se remettre de l'opération à long terme, bien malin qui peut prédire comment vont évoluer les ETMs anthropogènes dans les sols où aucun effet n'est perceptible actuellement.

Question complémentaire: les déchets pourraient-ils servir à corriger des déficiences? la réponse est mitigée. Les risques de déficience sont propres à des sols pauvres en matières organiques et en particules fines, i.e. le plus souvent des sols présentant les risques de mobilité et de transferts les plus élevés, ceux précisément sur lesquels les apports doivent être les mieux maîtrisés. Comme toujours, la réponse la plus satisfaisante réside dans une "bonne" gestion des pratiques.

Il reste encore beaucoup de travail de recherche à réaliser sur les impacts du recyclage agricole (évaluation des flux) mais les références manquent également par rapport aux stocks actuels dans les sols et c'est précisément ce dernier point qui fera l'objet principal de la thèse.

Chapitre.2 Présentation du cadre de l'étude

2.1 La Région limoneuse

La définition géographique à donner à la région limoneuse n'est pas celle de la région agricole mais plutôt celle de la région naturelle telle que présentée par NOIRFALISE (1988)¹ et dont les limites sont esquissées à la figure I.3.

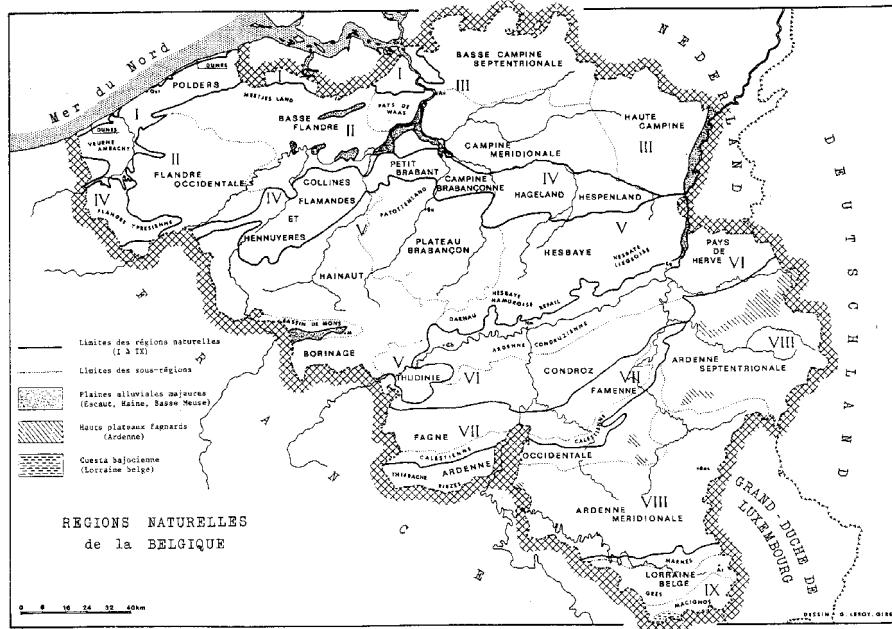


Figure I. 3: Délimitation de la Région Limoneuse (en grisé) en Belgique, d'après NOIRFALISE (1988).

2.1.1 Le cadre géologique régional

De façon assez schématique, la géologie de la région limoneuse est représentée par un manteau de limons quaternaires sur des formations préquaternaires.

2.1.1.1 *Géologie des formations préquaternaires*

Une synthèse de l'histoire géologique de la Wallonie a été publiée dans l'Etat de l'Environnement Wallon relatif au sous-sol (DGRNE, 1993):

¹ principalement sur base de la géologie et des associations de sols.

Les roches observables les plus anciennes se sont déposées au début de l'ère paléozoïque entre 570 et 400 millions d'années. Il s'agit essentiellement de schistes², et dans une moindre mesure, de grès provenant du démantèlement de régions émergées situées hors du territoire actuel de la Wallonie. Par enfouissement, ces roches sédimentaires se sont progressivement transformées sous l'effet de la pression et de la température...phyllades et quartzites... affleurent actuellement dans les vallées brabançonnes (Massif du Brabant), ainsi que dans quelques massifs ardennais et dans la bande silurienne du Condroz.

Au Silurien,... l'orogenèse calédonienne engendre l'émersion des terrains et la formation de reliefs montagneux à travers la région... ensuite une nouvelle transgression marine progresse depuis le sud; le massif du Brabant constitue encore une aire émergée. Dès le Dévonien inférieur (400 à 385 millions d'années) et jusqu'au Dévonien supérieur (385 à 360 millions d'années), la mer progresse vers le nord³. Les roches témoignant de la progression de cette avancée marine sont des roches terrigènes provenant de la destruction par l'érosion des reliefs situés au nord... un conglomérat de base qui, par cimentation, va se transformer en poudingue et, au-delà, des particules plus fines (sables et argiles) qui, consolidées, vont donner des grès et des schistes.

Le rivage vient s'établir au cours du Dévonien supérieur au sud du Massif du Brabant qui constitue encore probablement une terre émergée. Cette époque est caractérisée principalement par des dépôts calcaires...

A la fin du Dévonien, la mer se retire vers le sud... ce retrait correspond à la première manifestation du cycle orogénique hercynien qui va modeler de façon définitive le sous-sol de la Wallonie. Au Carbonifère inférieur ou Dinantien (360 à 330 millions d'années), une nouvelle transgression marine submerge la partie méridionale du Massif brabançon... Ce sont essentiellement des dépôts calcaires... Le Carbonifère supérieur (Namurien et Westphalien, entre 330 et 290 millions d'années) est marqué par le retrait de la mer et la formation de lagunes littorales qui sont alimentées en sédiments par l'érosion des reliefs méridionaux... et donneront naissance aux couches de houille... entre des couches de schistes et de grès.

² schiste est à prendre ici au sens de shale.

³ Les dépôts du Dévonien inférieur sont peu représentés dans la région limoneuse.

La fin du Carbonifère voit le paroxysme de l'orogénèse hercynienne... L'agencement des principales structures visibles sur les cartes géologiques date de cette phase de plissement.

Les structures hercyniennes vont ensuite subir érosion et alternance de nombreuses phases de transgressions et régressions. Au Crétacé (145 à 65 millions d'années), des dépôts continentaux sont piégés dans des dépressions naturelles dues à la dissolution des calcaires du Carbonifère inférieur... Pendant le Crétacé supérieur et l'ère tertiaire, la sédimentation... est caractérisée par des *craies et des tuffeaux*. A partir du Landenien (60 millions d'années), les diverses transgressions marines tertiaires qui ont recouvert le Massif du Brabant, ont conservé un caractère relativement littoral avec une composante sédimentaire dominante de nature *sableuse, voire argileuse*. Ces sédiments forment la couverture continue du Massif brabançon, du Hainaut occidental à la province de Liège...

Depuis la fin du Tertiaire, la mer s'est retirée progressivement vers le nord.

Une carte géologique du sud de la Belgique est esquissée à la figure I.4.

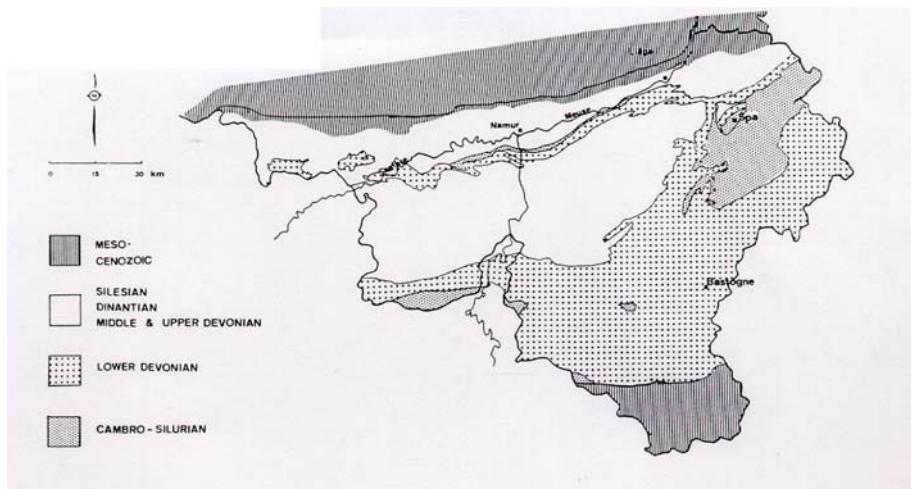


Figure I. 4: Esquisse géologique du sud de la Belgique (SONDAG, 1985)

2.1.1.2 Géostructures en Région limoneuse

Les principales géostructures en Région limoneuse sont:

- le Massif de Brabant, dont les formations cambro-siluriennes n'affleurent qu'au fond des vallées principales; au niveau des plateaux (hennuyer, brabançon et hesbayen), ces formations

sont recouvertes de dépôts postérieurs;

- le Synclinorium de Namur, très asymétrique et déversé vers le Nord, composé de formations dévonniennes et carbonifères et dont l'axe est occupé par les formations du Carbonifère supérieur.

Ces structures sont recouvertes de formations mésozoïques (bassins crétacés à l'ouest comme à l'est) et cénozoïques (sables et argiles tertiaires, limons quaternaires), comme le montre la coupe ouest-est de la figure I.5.

2.1.2 Dépôts quaternaires, modelé et régions géomorphologiques

2.1.2.1 *Dépôts quaternaires*

En Belgique, les dépôts éoliens les plus importants, en terme d'épaisseur de couverture, datent des maxima d'extension des deux derniers glaciaires, le Weichselien et le Saalien (tableau I.13). Ces dépôts se répartissent selon un gradient de granulométrie, les poussières les plus grossières au Nord, les plus fines au Sud. La Moyenne Belgique est caractérisée par une couverture de limons éoliens loessiques pouvant atteindre une trentaine de mètres d'épaisseur (GOOSSENS, 2000).

Durant les phases plus chaudes, les formations loessiques subissent des évolutions pédogénétiques donnant lieu à des "complexes pédologiques", *i.e. des formations où sont superposés des faciès d'altération traduisant des conditions climatiques de type interglaciaire, interstadiaire, voire stadiaire... souvent coupés de dépôts variés (colluvions, loess, etc.)* (CHALINE, 1985).

Les "complexes pédologiques" du dernier cycle interglaciaire-glaciaire -ou séquence de Belgique- ont été particulièrement étudiés en raison de leur abondance dans toute l'Eurasie (CHALINE, 1985).

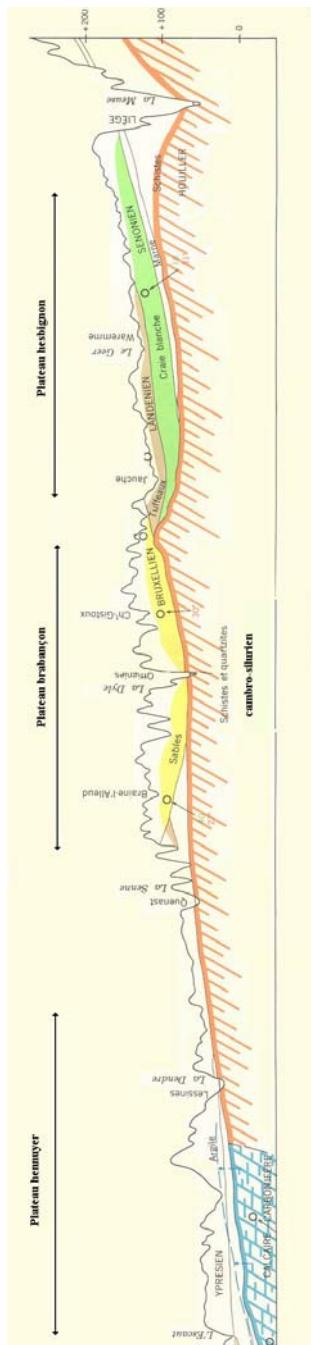


Figure I. 5: Coupe ouest - est dans la région limoneuse (d'après l'Atlas de Belgique, 1970)

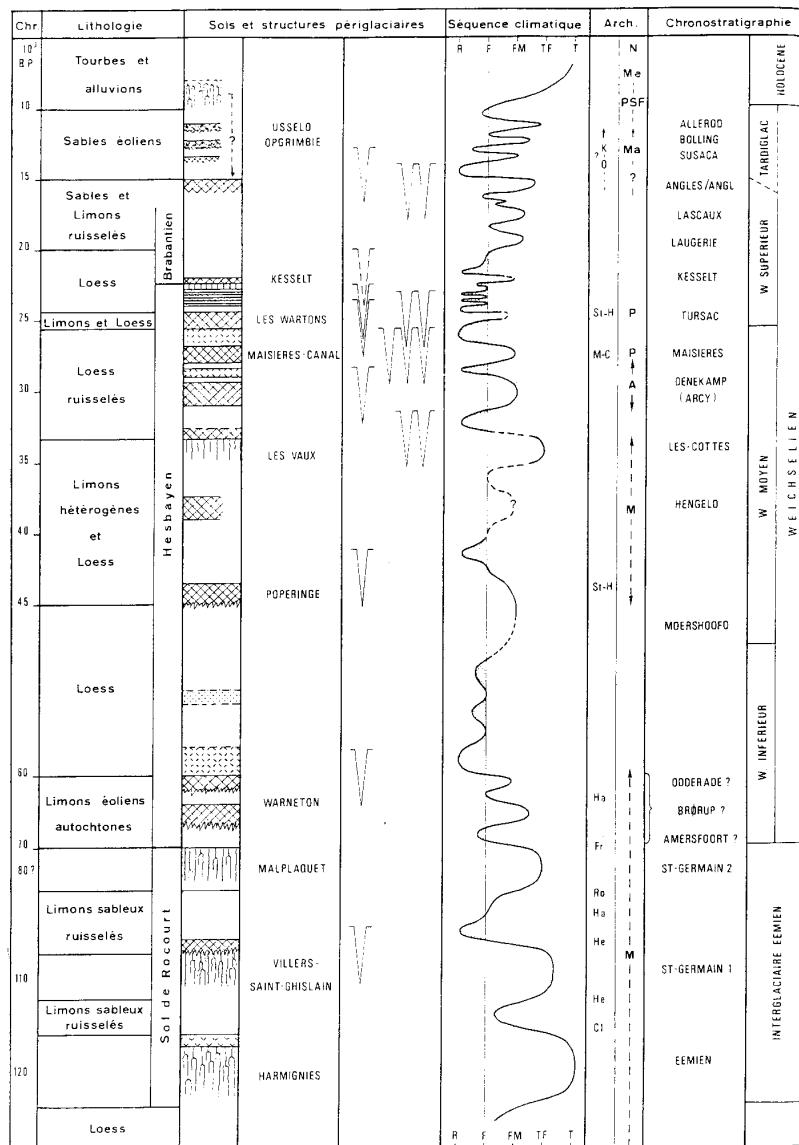
L'interglaciaire Eemien est représenté par un sol lessivé polygénétique, le sol de Rocourt, qui se développe sur les loess Saaliens (CHALINE, 1985; HAESAERTS *et al.*, 1999). La séquence Eemienne présente plusieurs stades de pédogenèse qui peuvent localement se surimposer. Elle résulterait de la succession de trois phases de pédogenèse séparées par deux épisodes froids (HAESAERTS *et al.*, 1999). La période Eemienne aurait été relativement contrastée d'un point de vue climatique et caractérisée par de nombreux épisodes d'érosion qui auraient sensiblement tronqué les dépôts de couverture en Moyenne Belgique (HAESAERTS, 1984).

Le Pléniglaciaire inférieur (Weichselien; 70.000 à 50.000 BP) en Moyenne Belgique est caractérisé par des sédiments éoliens remaniés et un complexe pédologique nommé sol de Warneton (CHALINE, 1985). Le refroidissement du climat qui a suivi s'est traduit par le développement d'un permafrost continu sur le nord-ouest de l'Europe, par des dépôts loessiques (loess hesbayens) et le début du colmatage des principales vallées du bassin de l'Escaut (HAESAERTS, 1984).

Le Pléniglaciaire moyen (50.000 à 25.000 BP) se caractérise en Moyenne Belgique d'abord par un *hiatus d'érosion*, mais à Harmignies il commence avec un sol humifère sans doute équivalent au sol de Poperinge (45.000 ± 1.500 BP) (HAESAERTS, 1984b). Sur des limons hétérogènes et des loess se développe à Harmignies le sol des Vaux. Ensuite une période très froide où se développent des loess coupés de fentes en coin a été marqué par de légères améliorations climatiques (sol de Maisières-canal) (CHALINE, 1985). A trois reprises au moins, le paysage de l'Europe du Nord-Ouest fut scellé par un permafrost continu, associé à des réseaux polygonaux à grands coins de glaces (HAESAERTS, 1984b).

Le Pléniglaciaire supérieur (25.000 à 15.000 BP) correspond d'abord à une phase froide et sèche où se met en place une épaisse couverture de dépôts éoliens (loess brabantiens en Moyenne Belgique) dont l'extension fut limitée au nord du sillon Sambre-Meuse (HAESAERTS, 1984) et au sein de laquelle se situe l'horizon pédologique cryoturbé à microfentes de gel du sol de Kesselt, rebaptisé "horizon à langues de Nagelbeek" (HAESAERTS *et al.*, 1981), puis "Kesselt suite" (GULLENTOPS *et al.*, 2001)

Tableau I. 13: Chronostratigraphie du quaternaire, phases principales de pédogénèse, sols-repères (HAESAERTS 1984).



Le Tardiglaciaire se traduit, en Basse Belgique, en Campine ainsi que le long de certaines rivières de Moyenne Belgique par des dépôts de sables éoliens, ainsi que le développement des sols lessivés de surface sur substrat loessique en Moyenne Belgique (HAESAERTS, 1984).

Les subdivisions de l'Holocène (subatlantique, sub-boréal, atlantique, boréal et préboréal - tableau I.14) correspondent à des phases d'extension d'espèces végétales différentes. L'Holocène a également été marqué par différentes phases de transgressions et régressions marines favorisant le développement de tourbes.

Tableau I. 14: Subdivisions de l'Holocène

Subdivisions	Age - début (années)	Evolution climatique *	Processus majeurs de pédogenèse **
Subatlantique	- 2 700	B → T	Anthropisation
Subboréal	- 5 000	T → B	Formations locales de tourbes et podzols
Atlantique	- 7 500	T	Brunification et acidification
Boréal	- 9 000	SA → B → T	Illuviation et décarbonatation tardives
Préboréal	- 10 000	A → SA	Hydromorphie ***

* A: arctique; SA: subarctic; B: boréal; T: tempéré

** d'après VAN-VLIET-LANOË (1991)

*** induite par la présence d'un horizon fragique

D'un point de vue lithostratigraphique, les dépôts quaternaires sont classés en Formations subdivisées en Membres. Les Couches (*Beds*) sont des niveaux-repères. Les loess du Pléistocène Moyen et du Pléistocène Supérieur appartiennent tous à la Formation de Gembloux, qui comprend, du plus ancien au plus jeune, les Membres du Hainaut, de Hesbaye et du Brabant (GULLENTOPS *et al.*, 2001).

Le Membre du Hainaut comprend les loess du Pléistocène Moyen (Elsériens et Saaliens). Il est caractérisé par la préservation de paléosols interglaciaires typiques, comme le Sol de Rocourt. A son sommet, la Couche de Warneton, marque la limite avec le Membre de Hesbaye. Le Membre du Brabant recouvre l'ensemble; une Couche dénommée "Keselt suite" délimite souvent sa base (GULLENTOPS *et al.*, 2001).

Tous les dépôts de pente sont regroupés dans la Formation des Ardennes, subdivisée en 5 Membres.

Dans la suite du travail, nous utiliserons les termes "brabantien", "hesbayen" et "hennuyen", qui relèvent de la chronostratigraphie, en lieu et place de "Membre du Brabant" etc., pour faciliter la lecture du texte essentiellement.

2.1.2.2

Evolution du modèle à l'Holocène

A la fin du Tardiglaciaire, les structures préquaternaires étaient, en Moyenne Belgique, couvertes d'un manteau limoneux d'épaisseur parfois importante. A partir de l'Holocène, le réchauffement du climat et le développement d'une végétation forestière vont considérablement modifier la dynamique de l'eau dans les formations superficielles et les processus de façonnement du relief.

L'évolution du relief durant l'Holocène a été décrite par BOLLINNE (1976).

Au Préboréal et au Boréal, sur les versants, l'activité des processus d'érosion est faible. En effet, en Haute et Moyenne Belgique, des tourbières se développent dans les plaines alluviales marécageuses... Leur croissance continue indique que les apports des versants sont faibles sinon ils auraient interrompu la croissance des tourbières.

Des sédiments limoneux, attribués à l'apparition de phénomènes de ravinement suite à l'augmentation de la pluviosité, recouvrent ces tourbières dans la plaine alluviale de la Dyle et marquent le début d'une phase d'érosion importante des versants, à l'Atlantique.

D'après BOLLINNE, sous forêt, le ravinement aurait été le processus morphogénétique le plus actif et particulièrement dans les dépôts limoneux de Moyenne Belgique. Parmi les autres processus de façonnement du relief, notons la cryoclastie et les phénomènes karstiques qui ont pu intervenir où l'érosion a dégagé les roches solides du substratum anté-quaternaire ou encore les mouvements de masse sur les pentes.

BOLLINNE distingue ensuite une seconde étape charnière dans l'évolution du relief à l'Holocène, il s'agit de la mise en culture des zones boisées: *les versants défrichés et mis en culture sont vigoureusement érodés; suite à cette érosion accélérée, des sédiments limoneux s'accumulent au bas des pentes, colmatent les ravins et recouvrent les plaines alluviales. Des formes nouvelles apparaissent. Elles sont liées aux façons culturales et à la circulation des hommes et des bêtes.* La récrustation de l'érosion serait liée à l'extension des surfaces cultivées et aux pratiques culturales. Les grands défrichements commencent au Moyen-âge et atteignent leur paroxysme au 18ème siècle; les surfaces cultivées sont agrandies et des sols *impropres a la culture et particulièrement sensibles à l'érosion* sont défrichés.

La renaissance des étendues forestières combinée à l'abandon de certaines pratiques agricoles ont contribué à réduire l'érosion entre le 18ème siècle et un passé assez récent.

BOLLINNE s'alarmait toutefois de l'évolution des pratiques agricoles en 1976; pratiques (remembrement des terres, mécanisation, extension des cultures sarclées et abandon des fumures organiques) *qui rétablissent des conditions favorables à l'érosion*.

2.1.2.3 Le modelé actuel à l'échelle régionale

MANIL (s.d.) donne la description suivante du modelé: *Au contact du pays flamand et s'en détachant à des altitudes qui varient entre 50 et 100 mètres, c'est un glacis en pente faible ou en bas plateau qui s'élève régulièrement pour atteindre environ 200 mètres à l'aplomb du sillon Sambre-Meuse.*

On peut deviner sur la figure I.5 (*cf supra*) trois zones de plateaux, d'ouest en est:

- le plateau hennuyer, sur sables et argiles yprésiennes et d'altitude générale proche de 100 mètres, *présente une succession d'interfluves bombés orientés sud-ouest - nord-est, séparés par des vallées de même orientation et à versants doux* (FOURNEAU, 1985);
- le plateau brabançon, au centre sur les sables bruxelliens et d'altitude plus élevée que le premier, présente une surface "déchiquetée" (érosion pléistocène) aux entailles parfois profondes à en atteindre le socle siluro-cambrien;
- le plateau hesbignon, à l'est sur des matériaux carbonatés meubles, présente *une surface ondulée*, résultat de l'érosion holocène, *traversée par deux cours d'eau importants mais sans réseau hydrographique autochtone* (FOURNEAU, 1985).

On peut trouver dans la littérature un certain nombre de découpages, parfois fort différents, de la Moyenne Belgique en unités naturelles. Ces différences trouvent leurs causes essentiellement dans la discipline scientifique abordée et l'échelle de perception de ces unités.

L'état de l'Environnement Wallon (DGRNE, 1996) décrit un seul type de paysage pour la zone étudiée, l'*openfield* à cultures dominantes des bas plateaux limoneux, et y reconnaît trois zones écologiquement contrastées: le plateau, le fond de vallée et les versants.

FOURNEAU (1985, 1993) distingue un ensemble de bas plateaux et le Sillon Sambre-Meuse. Il nuance la région des bas plateaux en décrivant séparément celui du Hainaut, celui du Brabant et celui de Hesbaye. Les trois sous-régions principales de la Région Limoneuse sont délimitées à la figure I.6, par rapport au territoire de la Région Wallonne.

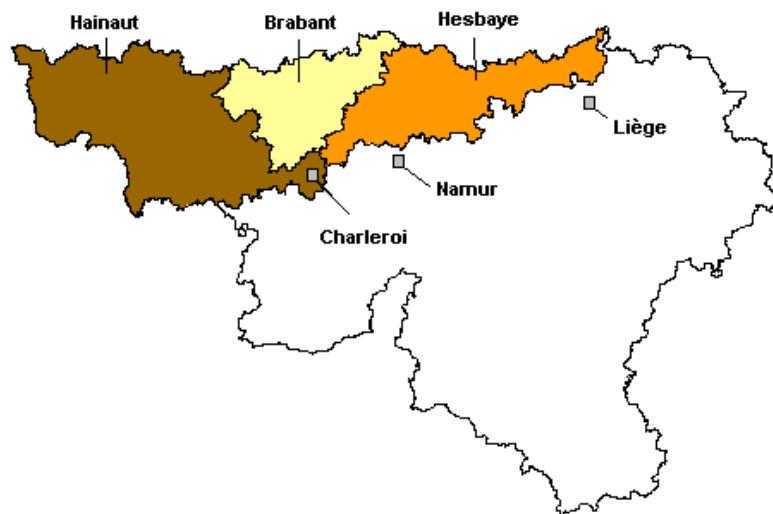


Figure I. 6: Situation géographique des trois sous-régions principales de la Région Limoneuse sur le territoire de la Région Wallonne..

MANIL (s.d.) décrit les mêmes ensembles régionaux sur base de la carte d'associations de sols au 1/800.000 de TAVERNIER et MARECHAL (1958). La carte de MANIL propose toutefois un niveau de découpage sub-régional (Hesbaye sèche, Hesbaye namuroise, Plateau brabançon...).

AVRIL (1982) reconnaît cinq grands ensembles régionaux caractérisés par des groupes de sols et la carte des régions agrogéographiques au 1/500.000 de l'Atlas de Belgique (1970) reconnaît de nombreuses unités régionales et sous-régionales: Hesbaye occidentale, Hesbaye sèche, Verger hesbignon, Brabant méridional, Brabant bruxellois, Brabant maraîcher...

Le découpage géographique de CHRISTIANS et DAELS ressemble quant à lui à une vision intermédiaire entre la précédente et celle de FOURNEAU.

Les principaux ensembles géographiques sont représentés à la figure I.7, réalisée sur base de l'ensemble des documents pré-cités.

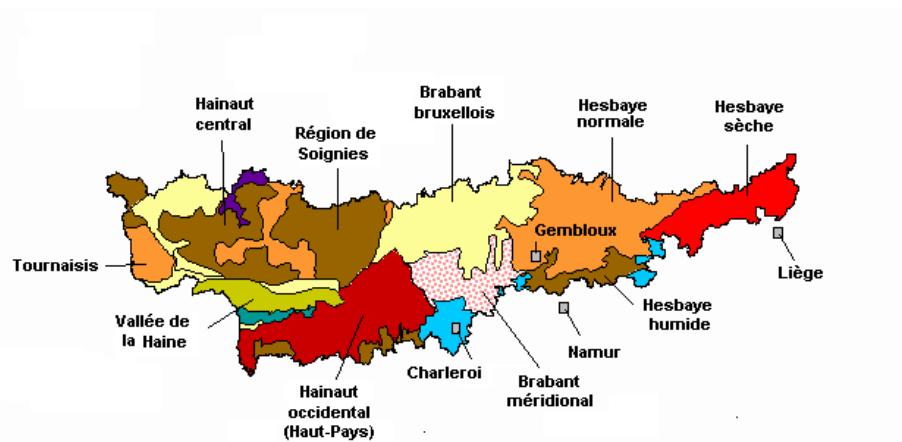


Figure I. 7: Délimitation des principaux ensembles géographiques en Région Limoneuse. Les ensembles présentant les mêmes couleurs sont caractérisés par les mêmes associations de sols, d'après les cartes d'associations de sols de TAVERNIER et MARECHAL (1958) et MARECHAL et TAVERNIER (1974).

BRULARD (1962) subdivise la Hesbaye en un Pays brabançon, un pays de Gembloux, le bassin de la Mehaigne, le plateau de Hannut, la vallée du Geer et le verger hesbignon. Les unités présentes sur le territoire wallon sont délimitées à la figure I.8. On remarquera que la définition territoriale de la Hesbaye de BRULARD diffère de la précédente. Ceci illustre bien la nécessité de définir des ensembles géographiques cohérents et structurés sur base de critères objectifs, telles que les données du milieu physique et l'occupation des sols.

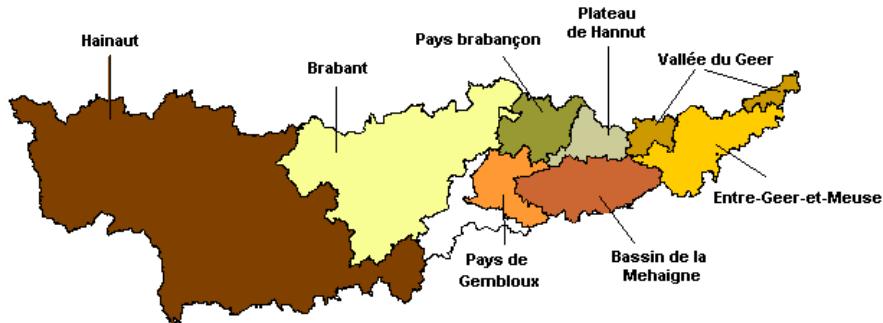


Figure I.8: Subdivision de la Hesbaye en unités sous-régionales, d'après BRULARD (1962).

Citons encore PECROT (1956) qui propose une subdivision de la Hesbaye sur base des paysages pédologiques, proposition que nous prendrons la peine de détailler au titre 2.2.4.2.

En conclusion, quoique considérée comme homogène par certains, en raison de l'importance des dépôts quaternaires, la région limoneuse présente des spécificités sous-régionales en relation directe avec la nature du substratum. Les nombreux découpages existants témoignent du besoin de définition géographique précise des unités sous-régionales sur base des paramètres du milieu physique. Les spécificités locales de ce milieu physique se traduisant notamment par des associations caractéristiques de sols, il ne fait pas de doute que la numérisation de la carte des sols de Belgique à 1/20 000 ouvre des perspectives de recherche intéressantes en matière de délimitation des unités sous-régionales.

2.1.3 Délimitation d'une zone d'étude en région limoneuse

En raison de l'étendue relativement vaste de la région limoneuse, une zone d'étude plus restreinte a été délimitée au sein de celle-ci (figure I.9). Les limites correspondent au découpage des cartes des sols 116E à 119W, 129E à 132W et 142E à 145W (soit 24 planches); et au découpage IGN, de gauche à droite et de haut en bas, 39/3-4, 40/1-2, 40/3-4, 41/1-2; 39/7-8, 40/5-6, 40/7-8, 41/5-6, 46/3-4, 47/1-2, 47/3-4, 48/1-2.

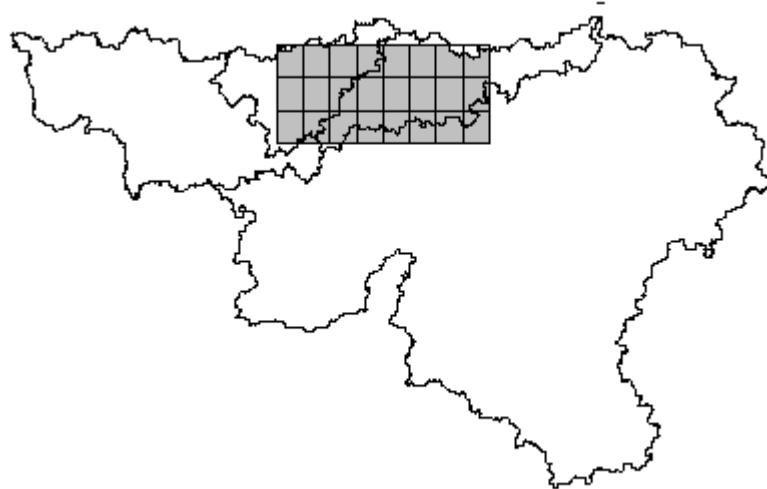


Figure I. 9: Situation de la zone d'étude (gris) en Région Wallonne.

Dans la suite du texte, les termes "zone d'étude" et "zone étudiée" se rapporteront à cette surface.

2.2 Présentation de la zone d'étude

2.2.1 Oro-hydrographie

La zone étudiée est parcourue d'ouest en est par la ligne de partage entre les bassins versants de l'Escaut et de la Meuse. Les principales rivières relevant de ces bassins sont la Sennette, la Dyle, la grande Gette et la petite Gette pour l'Escaut, le Piéton, l'Orneau, la Sambre, la Mehaigne, le Geer et la Meuse pour le bassin de cette dernière.

Le réseau de rivières parallèles constitué par l'Escaut et ses principaux affluents trouve probablement son origine dans le retrait du rivage de la mer diestienne. L'axe Sambre-Meuse lui trouverait son origine dans un *décrochement senestre* prenant place au cours du Miocène moyen entre les massifs brabançon et ardennais (DEMOULIN, 1993).

Les altitudes croissent généralement du nord vers le sud pour culminer sur le plateau qui borde l'axe sambro-mosan (figure I.10). Au nord, les altitudes dans les vallées voisinent les 50 mètres, pour atteindre la tranche 150-200 mètres au niveau des plateaux de la ligne de crête Escaut-Meuse. Paradoxalement les altitudes continuent d'augmenter sur les plateaux lorsque l'on suit le cours des principaux affluents de la Meuse. Des phénomènes de capture ont été avancés pour expliquer cet état de fait (REMY et PECROT, 1959; LAURANT, 1976; FOURNEAU, 1985). Les affluents de l'Escaut *se prolongeaient vers l'amont par différents tronçons de cours d'eau qui appartiennent maintenant au bassin mosan* (LAURANT, 1976).

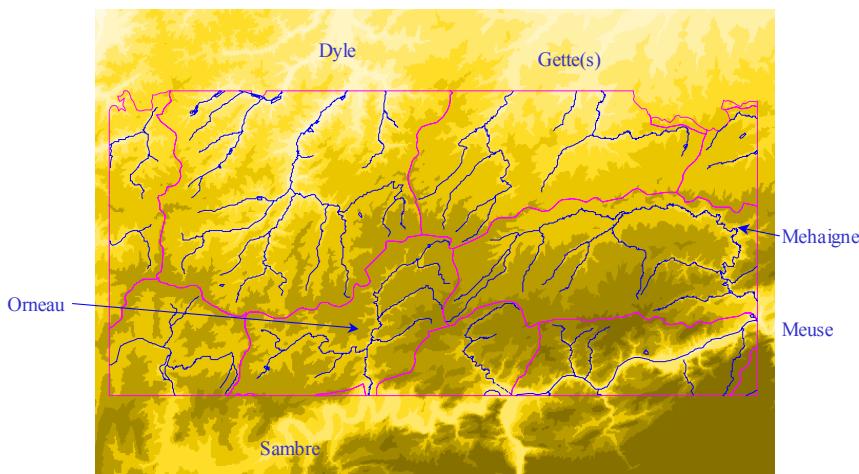


Figure I. 10: Image des altitudes, classées par tranches de 25 mètres. Les couleurs les plus foncées correspondent aux altitudes les plus élevées. En fuchsia, les limites de bassin versant.

2.2.2 Géostructures

Comme évoqué précédemment, la géologie de la zone étudiée est caractérisée par un socle calédonien (phyllades et quartzites) sur lequel se posent (i), en structure synclinale, des dépôts dévonien et carbonifères (shales, grès et calcaires) au sud, (ii) un épais bassin crétacé de formations carbonatées à l'est et (iii) des formations cénozoïques argilo-sableuses tabulaires au nord et à l'ouest. L'ensemble de ces formations préquaternaires n'affleurent que dans les entailles des vallées importantes. La couverture limoneuse est plus ou moins continue avec une épaisseur éminemment variable de quelques décimètres à plus de trente mètres.

2.2.3 Lithologies

D'après les textes explicatifs accompagnant les planchettes de la Carte des sols de Belgique, les matériaux sur lesquels se sont développés les sols de la région sont:

- Les limons éoliens.

Les limons éoliens constituent la roche-mère de la majorité des sols des plateaux et des pentes faibles de la région. Ce dépôt, autrefois appelé «ergeron» ou « marne » selon les endroits, est du type limon finement stratifié, rarement carbonaté, sauf parfois dans des complexes de sols humides.

- Les colluvions et alluvions récentes.

Les colluvions récentes sont des dépôts limoneux -de dépressions- finement stratifiés et on y trouve souvent des traces d'activités humaines (débris de briques, de charbon de bois). Leur texture est le plus souvent celle d'un limon léger. Toutefois, localement la texture peut être plus lourde ou plus sableuse selon l'énergie du relief ou la présence de substrats tertiaires affleurants.

Les alluvions modernes sont caractérisées par une texture assez variable d'un endroit à l'autre; fréquemment même, elles peuvent montrer dans la même coupe une stratification de couches de textures différentes, variant d'un limon à un limon lourd ou même une argile, voire de matériaux tourbeux.

et, localement:

□ Les sables et argiles cénozoïques et les dépôts mésozoïques

Les dépôts d'âge lutétien sont constitués d'un sable moyen ou grossier, jaunâtre, décalcifié. Il renferme des grès fistuleux. Son sommet altéré est constitué parfois de sable argileux ou d'argile très sableuse, riche en cailloux roulés ou de grès.

Le Tongrien et le Lédien sont respectivement plus limoneux et plus calcarifère. Ce dernier est également souvent représenté par un sable graveleux très riche en galets dans le nord de la région étudiée.

Le Landénien est une argile sableuse souvent altérée superficiellement en argile lourde.

Le Maestrichtien et le Sénonien sont formés de craies sableuses ou limono-sableuses et d'argiles à silex. Craies et argiles sénonniennes affleurent sur les versants des vallées de la Mehaigne et y sont recouvertes par les sables tongriens sur les plateaux.

□ Les produits d'altération des formations paléozoïques.

Sur certains versants (Piéton, Orneau...), les roches du socle (paléozoïque) sont rencontrées à faible profondeur. Elles sont couvertes d'une épaisseur souvent assez faible d'un matériau meuble composé de proportions très variables d'apports loessiques mélangés à des produits d'altération de la roche sous-jacente. Plus la pente est forte, plus les fractions caillouteuses et fines sont abondantes, aux dépens des fractions limoneuses .

Sur les calcaires, la perméabilité du matériau est bonne; la texture est argileuse sur les replats, tandis que sur les pentes fortes , l'épaisseur de terre meuble peut être réduite à quelques centimètres.

Sur les schistes (i.e. les shales) et les roches gréseuses, la perméabilité est moins favorable, surtout sur les replats où l'altération du socle peut donner naissance à une argile compacte.

2.2.4 Sols

2.2.4.1 *Types dominants*

Sont présentés ci-dessous les grands traits des types de sols les plus fréquents sur l'ensemble de la zone étudiée. Nous ferons obligatoirement souvent référence à la Carte des Sols de Belgique (CSB) dont la légende peut être trouvée en annexe 1.

Classiquement dans la légende de la Carte des sols de Belgique, les sols ont été groupés en deux ensembles suivant la position qu'ils occupent dans le paysage, plateaux et pentes d'une part, dépressions et vallées d'autre part. *Cette première subdivision sépare à peu près exactement dans la région, les sols sur limon autochtone à profil développé, des dépôts allochtones d'âge récent dans lesquels aucun horizon génétique n'a eu ni le temps, ni la possibilité de se former...* écrivait PECROT (1956) dans son étude détaillée de la Hesbaye. Plus que le caractère autochtone ou allochtone dont la pertinence peut être largement débattue, c'est la dualisation entre sols à développement de profil et sols sans développement de profil qui constitue le premier facteur de stratification des sols dans le système CSB. Le deuxième niveau de stratification est la texture des horizons de surface: limoneuse, sablo-limoneuse, limono-caillouteuse... Les niveaux suivants sont les séries et les phases (*cf* annexe 1).

Il nous semble plus pertinent d'utiliser comme premier critère de stratification un zonage géomorphologique de type "plateau"- "versant"- "fond de vallée" dans lequel "plateau" se réfère à la méga-structure des plateaux limoneux avec leurs ondulations de relief, *i.e.* y compris les dépressions colluviales, tandis que "fond de vallées" se rapporte aux vallées alluviales et "versant" aux pentes, souvent fortes, qui raccordent "plateaux" et "fonds de vallées". Dans le premier ensemble les sols sont essentiellement limoneux⁴ en surface et empreints d'une filiation génétique dont le moteur est la morphogenèse. Dans l'ensemble "versant"- "fond de vallée", le facteur principal d'évolution des couvertures pédo-logiques reste la morphogenèse mais les solums sont marqués par la présence des substrats anciens.

⁴ Etant donné qu'il sera souvent fait référence à la légende CSB, nous avons fait le choix d'en conserver au maximum les termes. Ainsi dans la suite du texte, "sols limoneux" désigne un ensemble de séries de sols dont la texture en surface est limoneuse, que ce soit du limon léger, du *echte* limon ou du limon lourd, et même si, comme le fait remarquer D. BAIZE, certains horizons d'un solum "limoneux" ne sont pas à proprement parler limoneux.

a. "Sols limoneux des plateaux"

Le solum du type A-BT-C, ou "sol limoneux à horizon B textural" (série Aba - CSB), est le mieux développé sur les limons loessiques; *il est caractérisé par un horizon E d'appauvrissement en argile, de couleur brun-jaune et de 40 à 60 cm d'épaisseur, passant à un horizon B d'accumulation d'argile ou horizon B textural (BT), de couleur brun, à structure polyédrique. L'horizon C ou loess non altéré est atteint à une profondeur habituelle de plus de 2 mètres (IRSIA, s.d.).*

Dans certains cas, l'horizon BT présente un aspect tacheté. Ces taches prennent souvent la forme de langues grises cernées d'un liseré ocre (glosses) et traduisent des phénomènes de migration ou de redistribution du fer dans les horizons. Ces phénomènes sont attribués à la présence d'un permafrost pendant le Tardiglaciaire (15 000 BP; VAN VLIET et LANGOHR, 1981). L'hydromorphie apparente dans le solum à BT tacheté (Aba(b) - CSB) ne serait plus fonctionnelle actuellement.

Les teneurs en argile pour un même horizon des sols de type Aba seraient relativement peu variables en Hesbaye (PECROT, 1956). Ceci est illustré par les données analytiques du tableau I.15. L'indice de différenciation texturale (IDT= % argile BT / % argile E) est généralement compris entre 1.3 et 1.6.

Tableau I. 15: Teneur en argile des horizons E et BT des sols de type Aba et indice de différenciation texturale (IDT) (d'après PECROT, 1956)

Planchette topographique	Pourcentage d'argile (%)		IDT
	E	BT	
Nivelles	15.5	23.5	1.52
Genappe	14.5	23.0	1.59
Seneffe	16.2	25.1	1.55
Perwez	15.0	24.6	1.64
Montenaken	15.0	24.5	1.63
Waremme	18.5	24.0	1.30
Alleur	16.3	22.8	1.40

Selon la classification CPCs, ce type de sols appartient au groupe des sols bruns lessivés⁵ (DUDAL, 1953; PECROT, 1956; JAMAGNE, 1973; DELECOUR, 1981; LANGOHR, 2001). Le caractère tacheté peut s'exprimer par une position d'intergrade vers des sols lessivés dé-

⁵ En théorie, selon l'intensité du lessivage, exprimée par l>IDT, les sols à horizon BT pourraient émerger aux groupes des sols bruns faiblement lessivés ou des sols lessivés.

gradés ou des sols lessivés glossiques.

Selon les autres systèmes majeurs de classification, les "sols limoneux à horizon BT" relèvent (i) du groupe des Luvisols (WRB), (ii) du Grand Ensemble de Référence des Luvisols (RP) et (iii) de l'ordre des alfisols (ST). Les diverses classifications permettent d'aller beaucoup plus loin dans le niveau de détail, notamment par l'utilisation de qualificatifs nombreux. Ceci sera partiellement illustré lors de la présentation des solums étudiés au cours de ce travail (chapitre 6).

La mise en culture de zones boisées qui débute à l'Holocène va engendrer des modifications du solum "typique" à horizon BT, comme le rappelle BOLINNE (1976). *Au fur et à mesure de la colonisation du pays par l'homme, de vastes étendues de terrain ont été défrichées. Le sol découvert, subit petit à petit les effets de l'érosion séculaire, qui mit généralement à nu l'horizon B du solum, plus résistant. C'est cet horizon amendé par des siècles de cultures que nous connaissons sous le nom de «terre à briques».*

Cette «terre à briques» correspond dans un premier temps à une phase de la série Aba ou Aba(b), *i.e.* la phase à horizon A mince, exprimée par le chiffre 1 à la suite du sigle de la série. Lorsque l'érosion s'accentue, que les pentes deviennent plus fortes, en relief convexe, le décappage des horizons de surface devient tel que la distinction d'un horizon enrichi en argile devient impossible. Le profil des teneurs en argile au lieu de montrer le ventre caractéristique des sols à horizon BT affiche une courbe décroissante avec la profondeur, à la manière des sols bruns (CPCS) ou à horizon B d'altération. Du point de vue de la CSB, la série correspondante est l'AbB, où B signifie "à horizon BT ou B d'altération"⁶. A strictement classer, AbB correspondrait à un Sol brun (CPCS), un Cambisol (WRB); à un Luvisol tronqué (RP) ou un alfisol (ST). On peut constater que la morphogenèse, outre le décappage du solum initial, a pour conséquence un changement de catégorie au plus haut niveau des classifications CPCS et WRB. Si cela aurait pu se comprendre à des niveaux de détail relativement précis, il est dommage que la filiation entre les séries Aba et AbB soit perdue si rapidement dans ces classifications.

D'autre part, les matériaux enlevés par l'érosion furent en partie, redéposés dans les fonds des vallées et des petites dépressions. Sur les dé-

⁶ Dans le RP, le B d'altération (Bw ou (B)) devient un horizon S (pour structural).

pôts colluviaux dans les têtes de dépressions du plateau ou en bordure de dépressions plus importantes, les sols de la série Abp, moins riches en argile, sont rencontrés. Au bas des pentes, le long de la dépression, la phase Abp(c) - *i.e.* un Abp reposant sur un horizon BT enfoui à faible profondeur- occupe une situation transitoire entre Aba ou AbB et Abp.

Dans les classifications utilisées ci-avant, Abp constitue un sol colluvial -classe des sols peu évolués- (CPCS), un fluvisol (WRB), un Colluviosol (RP) ou un entisol⁷(ST).

Ce schéma de base (figure I.11) constitue le modèle d'organisation des "sols limoneux" le plus simple mais également le plus représentatif dans la région étudiée.

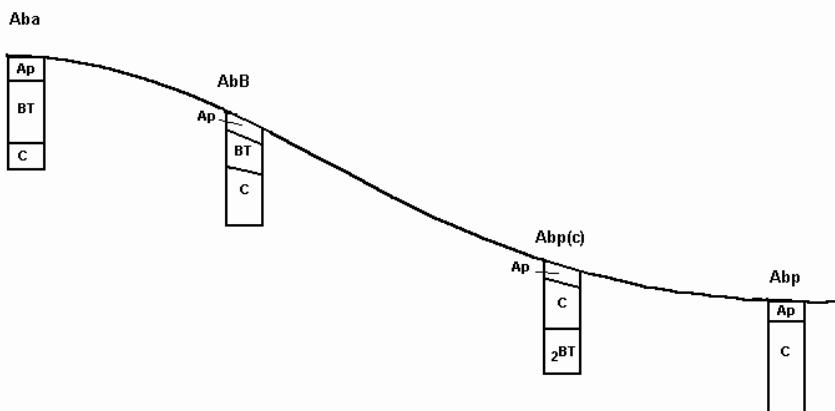


Figure I.11: Modèle d'organisation des principales séries de sols en Région limoneuse et sous culture.

A titre d'illustration, des teneurs moyennes en argile et en humus (*sic*) sont données par PECROT (1956) pour l'horizon labouré⁸ de ces différentes séries (tableau I.16).

On remarquera que les séries Aba(b)0 et Abp présentent des caractéristiques très proches, que les teneurs en argile dans l'horizon labouré sont

⁷ Fluvisol (WRB) et entisol (ST) sont synonymes d'absence d'horizons de diagnostic dans le solum, ce qui est le cas pour un Abp "typique" en milieu agricole. Notons toutefois, qu'en milieu forestier, BRAHY (2000) classe ses Abp dans les Cambisols (WRB) et les inceptisols (ST) car il pense y reconnaître des horizons d'altération.

⁸ Nous utilisons le sigle Ap pour l'horizon labouré. Pour mémoire, le RP remplace celui-ci par L.

d'autant plus élevées que la troncature du profil est marquée et que les teneurs en matière organique montrent la tendance inverse.

Tableau I. 16: Teneur moyenne en argile et en humus de l'horizon labouré (PECROT, 1956).

	Aba(b)0 (n = 26)	Aba1 - Aba(b)1 (n = 60)	AbB (n = 17)	Abp (n = 79)
Argile (%)	13.0	16.6	18.3	13.0
Humus (%)	2.02	1.75	1.65	1.91

Des variantes à ce modèle simple existent. Notamment, lorsque, localement, la faible perméabilité du substrat, ainsi que le caractère peu accidenté de la topographie provoquent l'apparition de nappes phréatiques temporaires et confèrent au sol des caractères rédoximorphes⁹.

Les séries de sols se voient alors affublées d'un qualificatif exprimant la profondeur d'apparition de taches d'oxydo-réduction ou d'un horizon réductique. Nous utiliserons les qualificatifs de la légende CSB dans la suite du texte, leur signification peut être trouvée en annexe 1.

b. Sols des "versants" et sols des "fonds de vallées"

Sur des éluvions¹⁰ caillouteuses... le solum est caractérisé par un horizon (B) appelé structural¹¹, parce qu'il se distingue seulement des horizons voisins par sa structure polyédrique et parfois sa couleur un peu plus rougeâtre. Ce solum du type A-(B)-C est typique du groupement des Sols bruns (CPCS), des Cambisols (WRB); des Brunisols (RP) ou des incvertisols (ST). Toutefois, la pratique du terrain nous a parfois montré une superposition de processus (altération, colluvionnement, mouvements de masse, par exemple) qui rendent assez inapproprié tout classement dans un ordre ou une classe.

La légende CSB regroupe une quantité de solums de ce type au sein d'une classe texturale unique, G, qualifiée de "limono-caillouteuse", mais dont la texture de la terre fine peut autant relever du limon léger que de l'argile sableuse. La charge caillouteuse est théoriquement supé-

⁹ Une série de définitions relatives à l'hydromorphie figurent dans le glossaire.

¹⁰ éluvion: produit, resté sur place, de la désagrégation des roches (dictionnaire Flammarion, 1980)

¹¹ Synonyme : B cambique (WRB), S (RP)

rieure à 5% du poids total. Si elle dépasse 15%, sa nature lithologique est précisée. Les informations relatives à la profondeur (atteinte par sondage) constituent un niveau de détail supplémentaire (phase) dans la légende CSB.

Ce type de solums, sur pentes souvent fortes, sont généralement voués à des occupations forestières ou aux pâtures. Toutefois, lorsque la pente l'autorise, les sols limono-caillouteux les plus profonds sont mis en culture.

Les affleurements de sables tertiaires des versants de la Dyle et ses affluents ont subi une évolution différente qui se traduit par l'apparition de solums à tendance podzolique, *caractérisés par un horizon B humo-ferrique*¹² (IRSIDA, s.d.). Les références dans les autres classifications sont les podzols (CPCS, WRB), Podzosols (RP) ou Spodosols (ST). Selon l'intensité des processus et la netteté des horizons, des distinctions pourront toutefois être apportées.

Un certain nombre de solums intermédiaires entre les solums typiques de "plateaux" et les "sols de versants" sont encore distingués au sein de la légende CSB sous le vocable de "séries dérivées". Ce terme est utilisé *lorsqu'un substrat dont la nature lithologique diffère de celle de la couche superficielle apparaît à moins de 125cm de profondeur*. Pour la zone d'étude, les profils sont souvent de type A-BT-₂C ou A-BT-₂R.

Les "fonds de vallée" sur dépôts alluviaux récents sont eux caractérisés par une topographie plane. Les sols ne présentent pas d'horizon diagnostique; ce sont des sols du type A-C rarement mis en culture. On retrouvera ces sols dans les groupes des Sols peu évolués d'apport alluvial (CPCS), les Fluvisols (WRB, RP) et les Entisols (ST). Les classes de drainage naturel les plus fréquentes sont "assez pauvres" à "très pauvre" avec généralement présence d'un horizon réductique.

¹² Le RP parle d'horizon BP (pour B podzolique).

c. associations de sols

Des groupements spatiaux de sols ont été représentés par l'intermédiaire de diverses cartes d'associations de sols (TAVERNIER et MARECHAL, 1958 ; MARECHAL et TAVERNIER, 1974 ; AVRIL, 1982). Ces cartes se veulent des documents de synthèse relatifs à la *constitution des sols* à petite échelle. Elles traduisent donc l'importance surfacique des différents types de sols mais elles ne sont pas suffisantes pour exprimer l'organisation des sols dans le paysage.

La carte d'associations de sols de TAVERNIER et MARECHAL (1958), à l'échelle de 1:800 000 est basée sur les régions géographiques naturelles. La Région limoneuse comprend les associations "normale", "hesbignone", "humide" et "du Brabant méridional". Ces sous-régions sont représentées à la figure I.7, à la nuance que l'association qualifiée de hesbignone correspond en fait à la Hesbaye "sèche" et nous conserverons ce dernier terme.

L'importance relative des principales séries de sols de la légende de la carte détaillée au sein de chacune des sous-régions limoneuses figure au tableau I.17.

On peut y voir que les "sols limoneux à horizon BT" dominent largement les diverses associations. Par rapport à l'association dite-normale, *i.e.* caractéristique des zones à couverture limoneuse à peu près continue sur substrat de sable cénozoïque, les autres associations se distinguent par:

- une proportion plus importante de sols sur colluvions bien drainées, dans l'association "sèche"; mise en relation avec le substrat crayeux favorable à l'infiltration des eaux;
- une proportion plus importante de sols à drainage modéré ou imparfait dans l'association "humide", caractéristique des zones à couverture limoneuse reposant sur des substrats peu perméables;
- une proportion plus importante de sols à texture de surface influencée par un substrat, sableux ou caillouteux selon l'association considérée, dans les associations "du Brabant méridional" (Vallée de la Dyle) et "des terrasses" (vallées de la Sambre et de la Meuse), cette dernière étant représentative des associations de sols dans les vallées de l'Orneau ou de la Mehaigne qui ne furent pas distinguées en raison de l'échelle du document probablement.

Tableau I.17: Proportion des principales unités cartographiques dans les associations de la Région limoneuse (TAVERNIER et MARECHAL, 1958).

Groupe	Réion limoneuse normale (Ass. 16)	Héscale sèche (Ass. 17)	Réion limoneuse humide (Ass. 18)	Brabant méridional (Ass. 19)	Réion des terrasses (Ass. 22)
<i>Aba, Aba(B)</i>	50-75 % < 5 %	65-75 % < 2 %	< 25 % 50-75 %	35-50 % < 5 %	30-70 % < 20 %
<i>Aca, Ada</i>	-	-	< 10 %	-	-
<i>Aha, Aia</i>	-	-	-	-	-
<i>Abp, Abp(c)</i>	5-20 %	23-35 %	< 2 %	5-15 %	< 10 %
<i>Agp, Adp</i>	5-15 %	< 2 %	5-15 %	< 5 %	< 5 %
<i>Ap, Agp, Abp, Ap</i>	5-10 %	-	5-10 %	2-10 %	5 %
<i>S, Z, P, L, E, G</i>	< 5 %	< 1 %	< 5 %	10-40 % ¹	20-40 % ²

1 *En majorité sableux, limono-sableux et sublo-limoneux*
 2 *En majorité sous limono-caillouteux à charge graveleuse ou schisteuse*

La carte de MARECHAL et TAVERNIER (1974), bien que plus détaillée (1:500 000), ne fait en réalité que nuancer la zonalité de certains critères descriptifs des séries de sols (développement de profil, classe de drainage et nature de la charge caillouteuse).

La carte schématique des sols de Wallonie (AVRIL, 1982) à 1:1 000 000 constitue une synthèse des deux précédentes (annexe 2). Considérée à l'échelle de la Région wallonne, la liaison avec la géologie est évidente ; à l'échelle de la Région limoneuse, ce sont des critères lithologiques et morphologiques qui président à la définition des grands groupes de sols. On regrettera cependant qu'à cette échelle, seule la typologie dominante est considérée et non plus les associations typiques de types de sols. Ceci explique par exemple que l'association limoneuse "sèche" ne soit plus individualisée sur la carte à 1:1 000 000.

2.2.4.2 *Paysages pédologiques*

En fonction de ce qui précède, ainsi que de la différenciation régionale des formes du relief et de la géologie des substrats pré-quaternaires, des paysages pédologiques spécifiques vont caractériser des ensembles géographiques que l'on nommera "petites régions naturelles" (PRN) au sein de la zone d'étude.

PECROT (1956) divise ce qu'il appelle la "Hesbaye occidentale", qui correspond à peu de choses près à la zone d'étude, en trois entités géographiques principales:

- a. le "paysage¹³ de la Région limoneuse", subdivisé en
 - Région limoneuse (ou Hesbaye) gembloutoise,
 - Région limoneuse typique ou Hesbaye sèche,
 - Région limoneuse hennuyère,
 - Région limoneuse méridionale,
- b. le "paysage du bassin de la Dyle", ou région limoneuse mixte à substrat sableux,
- c. le "paysage des versants de la Sambre et de la Meuse", ou région limoneuse mixte à substrat rocheux.

¹³ On notera au passage que la notion de relation sol-paysage, remise au goût du jour, n'a rien de neuf.

Le "paysage de la Région limoneuse" est caractérisé par une topographie générale faiblement ondulée. Les sous-associations se distinguent néanmoins par l'incision des vallons et petites vallées dans le relief. Les sous-associations "méridionale" et "sèche" présentent un relief "très faiblement ondulé"; la sous-association "gembloutoise" est caractérisée par un relief "faiblement ondulé", la sous-association "hennuyère" par un relief "ondulé" (PECROT, 1956). Dans ces deux dernières sous-associations, les petites vallées peuvent présenter des incisions relativement profondes dans le relief; les versants relativement courts présentent alors des pentes élevées.

Les sous-associations "limoneuses" se distinguent également par la classe de drainage naturel des sols. Le qualificatif "sèche" est suffisamment explicite, la "Région limoneuse méridionale" correspond aux associations humides de la carte de MARECHAL et TAVERNIER (1958), pour lequel nous avons déjà évoqué le caractère "moins bien drainé". Les "Région limoneuse gembloutoise" et "région limoneuse hennuyère" présentent globalement des sols "à drainage favorable"; à l'exception de certaines dépressions humides. Le facteur géologique, à travers la perméabilité des substrats sous la couverture limoneuse quaternaire, joue un rôle déterminant sur la classe de drainage des sols au niveau sub-régional.

Le troisième facteur de différenciation au sein de la Région limoneuse est le caractère "tacheté" du BT. Dans la "Région limoneuse hennuyère" et la "Région limoneuse gembloutoise", c'est la série Aba(b) qui domine. PECROT met en parallèle le caractère tacheté du BT et un défrichement plus récent, sans préciser s'il existe un lien de cause à effet dans un sens ou dans l'autre. L'historique d'occupation constitue d'ailleurs un autre facteur de différenciation entre les unités sous-régionales. La partie orientale de la zone d'étude est caractérisée par un défrichement général ancien (datant de l'occupation romaine, voire du Néolithique), le "pays de Gembloux" depuis le Moyen-âge; tandis que les surfaces sous forêt étaient encore relativement importantes au début du 20^{ème} siècle dans les régions "hennuyères" et "mérionales".

Les paysages des "régions limoneuses mixtes à substrat" correspondent aux zones d'entaille profonde des vallées les plus importantes (la Dyle et ses affluents pour la région sur sable; les affluents de la Sambre et de la Meuse pour les zones sur "substrat rocheux"). Les plateaux ne sont pas fondamentalement différents des "sous-associations de la région limoneuse", la nature des substrats conditionnant la ressemblance à tel ou tel sous-type. Les versants, généralement boisés présentent des pen-

tes fortes, mais également généralement une dissymétrie entre versants opposés. Les sols présentent des développements de profils différents (podzolique pour les versants sur sable cénozoïque, brunifié sur les pentes des substrats rocheux) sur le versant le plus raide. Sur le versant opposé, on retrouve plutôt des sols "limoneux" peu profonds.

L'ensemble des critères relief-géologie-texture-drainage-développement de profil sont interdépendants. La représentation en séquences permet d'illustrer les différentes relations pédopaysagères. Les figures I.12 à I.14 illustrent ces relations pour quelques unités paysagères.

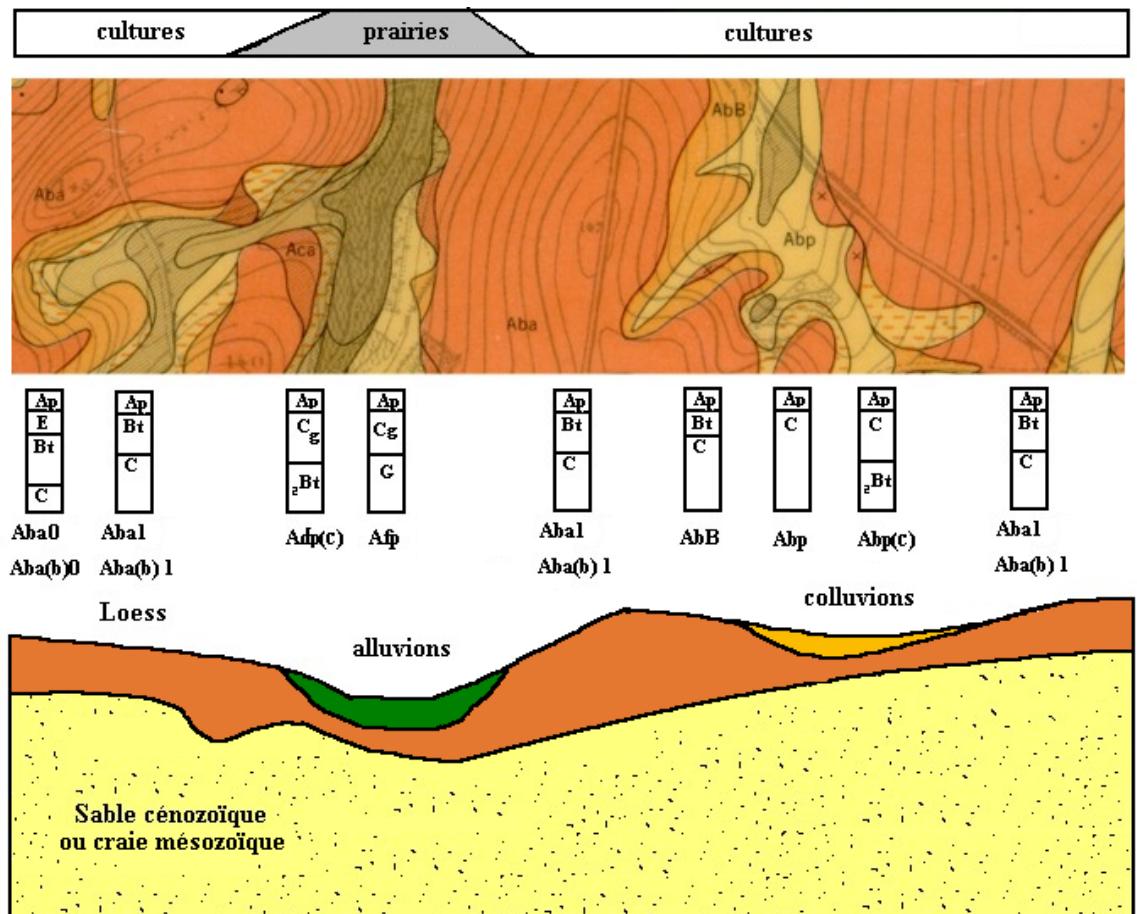


Figure I.12: Relations géologie-relief-sols en "Région limoneuse gembloutoise"
(modifié d'après PECROT, 1956).

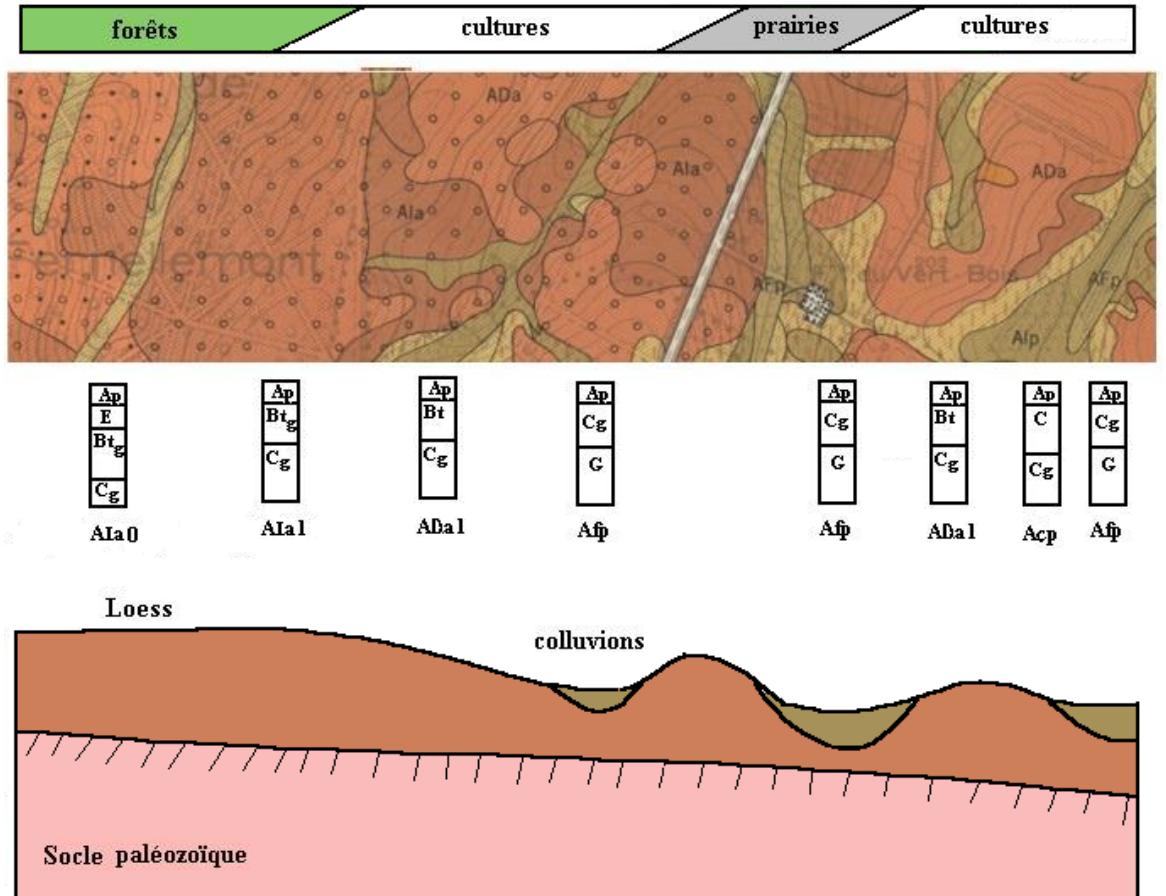


Figure I.13: Relations géologie-relief-sols en "Région limoneuse méridionale" (modifié d'après PECROT, 1956).

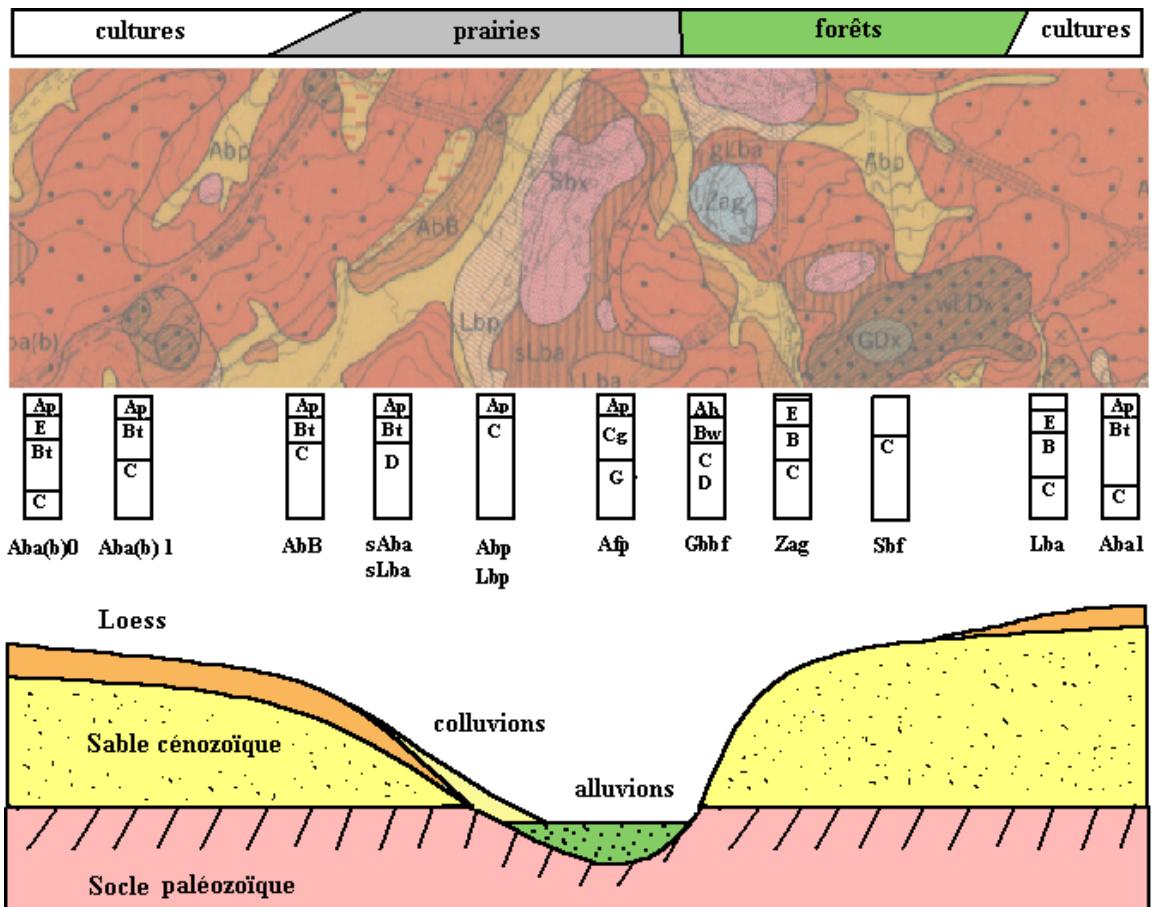


Figure I.14: Relations géologie-relief-sols en "Région limoneuse mixte à substrat sableux" (modifié d'après PECROT, 1956).

2.2.4.3 Synthèse

En résumé les grands types de sols susceptibles d'être rencontrés dans la région sont

-sur les plateaux:

- les sols à horizon B textural, de type A-BT-C, plus ou moins tronqués par l'érosion et dont l'horizon BT est plus ou moins tacheté;*
- les sols sans développement de profil sur colluvions plus ou moins humides dans les dépressions;*

- sur les versants:

- les sols limono-caillouteux de type A-(B)-C-R et*
- les sols à texture sablo-limoneuse à sableuse;*

- dans les fonds de vallées:

- les sols à horizon réductique sur alluvions récentes*

Les cartes d'associations de sols disponibles ont le mérite d'exister mais elles ne traduisent pas suffisamment l'organisation des sols qui les composent selon le relief et la géologie. Leur relecture pédopaysagère permet de combler cette lacune.

Chapitre.3 Stratégies d'échantillonnage

3.1 Paramètres à suivre

3.1.1 Variables explicatives

Les teneurs "naturelles" en ETMs dans les sols dépendent de caractères liés aux éléments mais également aux sols. Des paramètres doivent donc être trouvés qui traduisent le mieux les processus de redistribution et de rétention des ETMs et le milieu physico-chimique dans lesquels se placent ces processus.

Le cycle biogéochimique et la différenciation pédogénétique des horizons sont souvent reconnus comme les processus déterminants de la distribution spatiale des ETMs dans les sols non-contaminés (SWAINE and MITCHELL, 1960; OERTEL, 1961; KHOKHLOVA, 1967; DELECOUR, 1968; SCHLESINGER, 1991; STOLT *et al.*, 1993; GOOVAERTS and WEBSTER, 1994; BAIZE, 1997; LEE *et al.*, 1997; KLEBER *et al.*, 1998). Toutefois l'étude des processus de morphogénése ainsi que du régime hydrologique peuvent s'avérer riches d'enseignements également dans certaines situations (BOURG *et al.*, 1989; ALLOWAY, 1997; MC GRATH, 1997; KLEBER *et al.*, 1998).

Le cycle biogéochimique dans les sols loessiques de Belgique repose sur l'altération des minéraux et la minéralisation des matières organiques. Dans les loess, les minéraux dominants sont le quartz (70%), les feldspaths (7-15%), les micas (5-10%) et les minéraux denses (5%) pour les fractions limons (2-50µm), des argiles de types illite, vermiculite, smectite, chlorite, kaolinite et interstratifiées pour la fraction 0-2µm. *A l'origine, le loess aurait contenu 10 à 15% de carbonates, mais actuellement il est décarbonaté sur une épaisseur relativement importante* en Région limoneuse. L'altération procéderait par (i) désagrégation physique -ou microdivision- des minéraux de chlorite et de micas principalement et (ii) altération chimique des minéraux primaires en minéraux secondaires - argiles, FeOOH, AlOOH, MnOOH- (VAN RANST *et al.*, 1982; PEDRO, 1987; HARDY *et al.*, 1999; BRAHY *et al.*, 2000a; GOOSSENS, 2000; HARDY, 2002).

Le schéma de l'altération présenté à la figure I.15 met clairement en évidence l'importance des conditions physico-chimiques de l'altération: (i) l'altération ménagée des minéraux primaires engendre une grande quantité d'espèces minérales, un "continuum architectural", dans les sols; (ii) une altération très importante conduit à une homogénéisation

minérale; (iii) la quantité d'aluminium libre va conditionner la structure des minéraux secondaires ainsi que leurs propriétés d'échange.

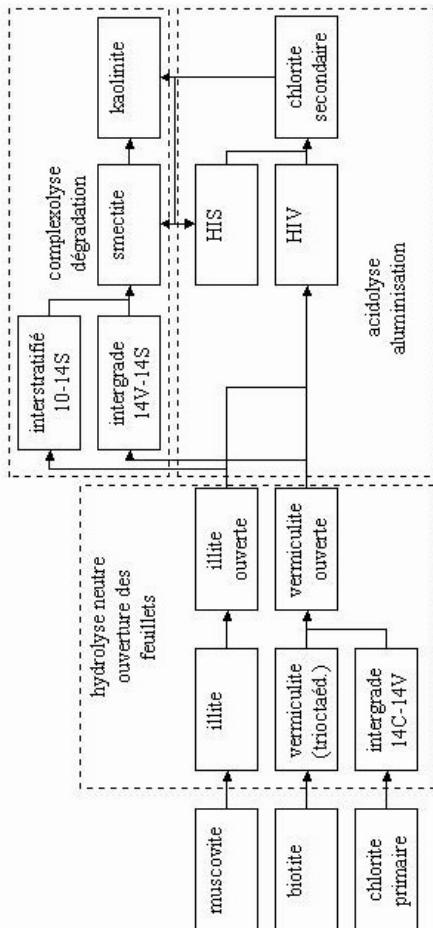


Figure I. 15: Schéma d'altération des phyllosilicates primaires des loess en climat tempéré

Les processus de l'altération, dans les horizons bien drainés, engendrent argilogenèse, accumulation relative de quartz et de feldspaths dans les fractions de la taille des silts, ainsi qu'une diminution de la réserve totale en bases (TRB = somme des formes totales des cations Ca, Mg, K et Na exprimées en cmol_c/kg) par suite d'une mobilisation accrue. Les stades initiaux du développement d'un sol à partir du matériau parental sont caractérisés par une augmentation de la capacité d'échange et du taux de saturation en bases (correspondant à l'ouverture des feuillets des phyllosilicates), alors qu'ensuite la tendance s'inverse avec la pour-

suite de l'altération (hydrolyse des minéraux et lessivage des bases) (BOCKHEIM, 1980 cité par SCHLESINGER, 1991).

Hormis dans les sols calcaires, les teneurs en Zn, Cu, Ni, Cr et Co seraient liées à celles en Fe, Mg et Al, *i.e.* à la teneur en argiles et éléments y associés (BAIZE, 1997 ; LATRILLE, 1998). Argilogenèse et migration des particules fines sont des processus dont les intensités relatives sont tributaires de l'environnement pédogénétique. Celui-ci n'étant pas stable dans le temps, il n'est pas aisé de quantifier l'importance de l'un et de l'autre dans les teneurs actuelles d'un horizon en particules de petites dimensions, et ceci d'autant plus que la couverture limoneuse est peu épaisse sur le substrat. Citons CAMPY et MACAIRE (1989) à propos de la définition du limon éolien: *sédiment d'origine mixte, souvent complexe, où interfèrent altération, pédogénèse, apport éolien, ruisseaulement, solifluxion, etc.*

Dans les loess, la composition chimique dépend également étroitement de la richesse relative en minéraux feldspathiques ou micacés. Les teneurs élémentaires en Ca (sauf dans les loess carbonatés), K et Na traduisent la présence de plagioclases, de micas et de feldspaths potassiques, minéraux plus abondants dans les fractions granulométriques correspondant aux limons fins ou aux argiles grossières (HARDY *et al.*, 1999). Mg par contre est plus abondant dans les minéraux caractéristiques de fractions plus fines (chlorites, vermiculites, interstratifiés...).

Selon HARDY (2002), les corrélations entre ETMs et éléments majeurs sont (i) étroites et négatives en cas d'absence de l'ETM dans les minéraux porteurs de l'élément majeur (ex. Si dans le quartz et Ca et Na dans les plagioclases), (ii) étroites et positives en cas de présence de l'ETM (ex Mg dans les chlorites), (iii) plus faible mais positive quand il y a interférence de deux minéraux porteurs de quantités d'ETMs très différentes (ex. K dans les feldspaths potassiques et les micas).

Les dynamiques de Fe et Mn peuvent également jouer un rôle important dans les redistributions d'ETMs dans les luvisols (FAO, 1998). En particulier, Cr et Co seraient étroitement associés aux diverses concentrations ferro-manganiques (LATRILLE, 1998).

Dans les sols, la matière organique, tant par ses aspects quantitatifs que qualitatifs, peut également jouer un rôle non-négligeable dans la rétention ou dans les redistributions d'ETMs, que ce soit par immobilisation (Pb, par exemple, démontre une affinité élevée pour la matière organique et tend à s'accumuler en surface) ou par migration sous forme de

chélates, principalement dans les podzosols, types de sols assez marginaux dans la zone d'étude.

Les paramètres à considérer doivent donc exprimer les relations entre les teneurs en ETMs et le contenu tant minéralogique (argiles, feldspaths, carbonates...) qu'organique, et refléter les processus de migrations et d'oxydo-réduction. La teneur en argile granulométrique constituera dès lors un paramètre-clé car elle exprime à la fois le contenu minéralogique et les migrations associées aux fines particules. Autres paramètres d'importance, la TRB et la capacité d'échange cationique (CEC) expriment une diversité minéralogique pour les horizons profonds, ainsi qu'une "ambiance organique" dans les horizons de surface avec le carbone et l'azote organiques totaux. Le pH traduit les conditions du milieu physico-chimique dans lequel se déroulent les processus, et des valeurs élevées indiquent la présence de carbonates. L'expression des processus d'oxydo-réduction prend généralement des formes identifiables sur le terrain (taches, ponctuations, pâlissemement de matrice, concrétions...). L'ensemble de ces paramètres constituent à priori les indices de base pour permettre l'interprétation des teneurs en ETMs en termes de facteurs identifiables. Ces indices seront souvent qualifiés dans la suite du document de paramètres "classiques" ou "de base" (car ils figurent généralement au menu des analyses de caractérisation pédologique), ou encore "explicatifs".

3.1.2 Teneurs en ETMs

Si les paramètres précédents peuvent être qualifiés d'articulations pour un référentiel ETMs, le problème des matériaux constitutifs de la charpente reste entier. Quelles sont les formes des ETMs qui doivent être prises en considération?

Les teneurs totales *traduisent le stock total de l'élément à un moment donné* (BAIZE, 1997), et donc des réserves potentielles. A priori, contrairement aux formes dites mobiles, les teneurs totales n'expriment aucun caractère dynamique, ce qui d'un point de vue agro-environnemental ressemble furieusement à une lacune sérieuse. Toutefois, dans un contexte minéralogique relativement homogène, des différences de teneurs en formes autres que totales peuvent se refléter dans les valeurs totales. De même, dans le cadre d'un suivi temporel, l'intensité d'une contamination peut s'exprimer à travers la variation des teneurs totales (BAIZE, 1997).

L'obstacle majeur à la détermination de formes présumées mobiles ré-

side dans la spécificité des formes des ETMs eux-mêmes, dans le choix d'un ou plusieurs extractifs, et également dans l'interprétation fonctionnelle des teneurs.

Ces raisons, ajoutées au fait que les réglementations relatives aux ETMs se basent en majorité sur des teneurs totales, ont motivé la sélection des teneurs totales comme indices du référentiel ETMs.

Un point reste à régler: quelle forme totale? Celle à l'eau régale(mélange HNO₃/HCl), plus judicieusement rebaptisée "pseudo-totale", la plus "facile" à mettre en routine dans les laboratoires d'analyse, et privilégiée par les *administrations wallonnes* mais dont on sait qu'elle n'extrait pas l'entièreté des formes? Celle à l'acide fluorhydrique (Norme AFNOR NFX31-147), nommée ci-après "triacide" ou "HF", qui dissout théoriquement les silicates, option retenue pour les programmes d'inventaire en France? Celle donnée par la fluorescence X, qui semble séduisante mais pour laquelle on manque encore de points de repère.

La méthode à l'acide fluorhydrique (HF) a rapidement été retenue car elle est censée extraire la totalité des formes des ETMs¹⁴ et il est gênant de se dire que des analyses qualifiées de totales n'extraient pas les éléments au coeur des silicates, quand ceux-ci en constituent une source, difficilement mobilisable mais néanmoins non négligeable.

Afin de déterminer dans quelle mesure les résultats de travaux antérieurs ou parallèles peuvent être exploités dans le cadre de ce travail, une comparaison a été effectuée entre teneurs totales déterminées (i) après attaque triacide (HF), (ii) attaque à l'eau régale (ER) et (iii) par spectrométrie de fluorescence X (XRF) (*cf. titre 4.2.*).

Parmi les éléments traces métalliques pour lesquels la méthode d'analyse triacide est censée convenir -ce qui signifie notamment que ces éléments soient en quantité suffisante par rapport aux limites de détection- figurent: Mn¹⁵, Cr, Ni, Zn, Cu, Co, Pb et Cd, par ordre d'abondance dans la lithosphère (GONI, 1966 cité par PEDRO et DELMAS, 1970), qui sont les ETMs retenus par le programme ASPITET en

¹⁴ Elle n'est toutefois pas adaptée aux éléments les plus volatils (Hg, ...) , ni idéale pour le chrome pour lequel la fusion alcaline serait plus appropriée (DELCARTE, *Comm. orale*).

¹⁵ Le Mn est parfois considéré comme un élément majeur car il fleure avec la teneur limite (0,1 g/100g) de GONI (1966, cité par PEDRO et DELMAS, 1970) séparant éléments majeurs et éléments traces.

France (BAIZE, 1997; voir titre 2.2.2.1). Les sept premiers ont été suivis de manière presque systématique dans le cadre de ce travail. Par contre, il s'est avéré à l'analyse que les options retenues (attaque triacide et absorption atomique de flamme -AAS-) ne convenaient pas pour Cd. Cet élément ne fera donc pas l'objet d'un suivi systématique, mais d'une interprétation au cas par cas. Les attaques triacides (*cf* annexe3) et les dosages par absorption atomique ont été réalisés au laboratoire de Géopédologie, à l'exception des dosages des éléments Cr, Pb et Co qui ont été effectués par le BEAGx, laboratoire agréé pour ce genre d'analyses.

3.2 Approches existantes en matière de détermination des teneurs naturelles en ETMs dans les sols

Il existe deux grands types d'approches pour évaluer le fond géochimique des sols. Les inventaires géochimiques, axés sur des prélèvements de sédiments de ruisseaux, intègrent l'information relative à un bassin versant plus ou moins étendu en un ou plusieurs points de sondage situées à l'embouchure du bassin. Les inventaires à caractère pédo-géochimique sont eux menés directement sur les sols soit par une approche typologique, soit par une approche à caractère systématique.

3.2.1 Approches du fond géochimique

3.2.1.1 *Prospections minières à l'étranger*

Depuis 1975, en France, le Bureau de Recherche Géologique et Ministère (BRGM) a développé plusieurs programmes de prospection. La *prospection géochimique stratégique* a été mise au point pour la recherche de sites miniers inconnus. Il s'agit d'une prospection systématique multi-éléments, visant à identifier les zones d'anomalies géochimiques. Cette prospection a porté principalement sur les sédiments de ruisseau des massifs hercyniens¹⁶. Le BRGM exploite les résultats notamment sous forme de cartes des zones sensibles à fort potentiel métallique (COLLECTIF, 1998a).

Le programme *National Geochemical Reconnaissance* au Canada a pour objectif la constitution d'une base de données géochimiques. Les inventaires du NGR sont caractérisés par une densité d'échantillonnage de 1 par 13km². Sont visés les sédiments lacustres dans les zones à relief doux à modéré et les sédiments de ruisseau dans les zones à relief plus accidenté.

dans le même registre méthodologique, on peut encore citer les travaux de BIANCHINI *et al.* (2002) en Italie.

3.2.1.2 *L'Inventaire Géochimique Wallon (SONDAG et MARTIN, 1985)*

Le programme d'Inventaire Géochimique des Ressources Métallifères de la Wallonie s'est appuyé sur la *campagne de prospection alluvion-*

¹⁶ comme l'inventaire géochimique wallon, d'ailleurs.

*naire systématique du Paléozoïque de Belgique pour l'uranium; dont il était un prolongement. Les teneurs totales en 20 éléments, ainsi que le pH, ont été déterminées pour plus de 10.000 échantillons de sédiments de ruisseau (*stream sediments*) provenant pour la majeure partie du programme lié à l'uranium. La superficie prospectée couvrirait la totalité des zones d'affleurement du Paléozoïque (environ 12.000 km²). Le prélèvement a, généralement, été effectué à la tarière pédologique à l'intersection du bord inférieur de la berge et du lit vif, dans la zone de battement du niveau d'eau... afin de récolter des quantités de matières suffisantes et de minimiser l'influence des contaminations récentes.*

La méthode de détermination des teneurs totales par attaque triacide et spectrométrie d'émission de plasma à courant continu présente des limites de détection de l'ordre de 1 ppm pour tous les éléments en traces analysés à l'exception de As et Sb (10 ppm) et les reproductibilités sont estimées à 10%.

Les données de l'inventaire géochimique ont fait l'objet d'une tentative de spatialisation sur base de la délimitation des bassins versants (SONNET et BENAMGHAR, 2000) ou d'une approche à caractère géostatistique (BENAMGHAR, 2002).

3.2.1.3 L'inventaire des limons d'inondation

(*overbank sediments*, VAN DER SLUYS *et al.*, 1997)

Réalisé dans le cadre d'un projet international¹⁷, cet inventaire porte, pour sa partie belgo-luxembourgeoise, sur 66 sites représentatifs de bassins versants dont les superficies individuelles sont comprises entre 60 et 600 km². Sur chaque site, des échantillons ont systématiquement été prélevés dans le limon d'inondation (deux profondeurs) et dans les sédiments de rivière. Les résultats se présentent sous formes de cartes géochimiques d'informations ponctuelles (teneurs et teneurs relatives en surface par rapport à la profondeur). L'interprétation de ces cartes reste malheureusement limitée aux grands traits du paysage géologique belge en raison de la faible densité d'échantillonnage. Toutefois, cet inventaire présente des informations intéressantes en matière de relations entre éléments d'une part et de différenciation verticale d'autre part.

¹⁷ "Regional geochemical mapping of Western Europe towards the year 2000"

3.2.2 Approches du fond pédogéochimique

Inventaires typologiques ou systématiques, différentes opérations ont été menées dans la plupart des pays européens pour étudier les teneurs naturelles en ETMs dans les sols. Citons les travaux de MAC GRATH et LOVELAND en Angleterre et au Pays-de-Galles, KUNTZE *et al.* en Allemagne, DUDKA en Pologne, ANDERSSON ou ERIKSSON en Suède et REIMAN *et al.* dans les pays baltes¹⁸.

Nous présenterons succinctement ci-après les expériences françaises et belges qui ont servi d'appui méthodologique à l'élaboration de notre démarche.

3.2.2.1 Les travaux effectués en France

a. Le programme ASPITET (BAIZE, 1994)

A tout seigneur, tout honneur! Le titre du programme "Apports d'une Stratification Pédologique pour l'Interprétation des Teneurs en Eléments Traces" est suffisamment explicite sur la volonté des chercheurs de l'INRA d'établir le lien entre teneurs en ETMs et facteurs de la pédogenèse. Les objectifs sont (i) de comprendre le déterminisme des teneurs totales en 7 ETMs, (ii) d'évaluer le fond pédo-géochimique naturel des sols et (iii) d'évaluer la mobilité et la bio-disponibilité des ETMs dans certaines situations particulières (BAIZE, 1994).

L'interprétation des teneurs totales (obtenues après attaque à l'HF) en ETMs se base sur l'identification de critères pédologiques de stratification des échantillons¹⁹ ainsi que sur les relations avec des paramètres explicatifs (*i.e.* traduisant un certain fonctionnement) plus courants en pédologie. Des techniques d'analyse statistiques sont également appliquées pour déterminer des gammes de valeurs "ordinaires" et d'anomalies naturelles. Davantage d'informations sont disponibles à travers les publications de D. BAIZE relatives aux ETMs, dont une liste peut être trouvée sur le site:

(<http://etm.orleans.inra.fr/webetmbi.htm>).

Nous tenterons une comparaison entre les résultats obtenus pour les limons de plateaux (BAIZE, 1997) et les nôtres (chapitre 7).

¹⁸ Pour les références: MAC GRATH et LOVELAND, 1992; KUNTZE *et al.*, 1991; DUDKA, 1992; DUDKA et MARKERT, 1992; ANDERSSON, 1977, 1979, 1992; ERIKSSON *et al.*, 1990, 1996; REIMAN *et al.*, 2000.

¹⁹ Plusieurs niveaux de stratification sont possibles de l'horizon au pédopaysage.

Des études sont menées conjointement par l'INRA et le BRGM pour exploiter les résultats des deux types d'approches sur une même région (BAIZE *et al.*, 2002).

b. Le Référentiel pédogéochimique en région Nord-Pas de Calais (STERCKEMAN *et al.*, 2002a)

Ce référentiel (RPG), en cours d'élaboration par l'INRA associé à l'Institut Supérieur d'Agronomie de Lille, a pour objectifs: (i) d'acquérir des connaissances sur la distribution spatiale des éléments en traces dans les sols, (ii) de déterminer des "valeurs normales agricoles" des horizons de surface, (iii) de permettre de juger du niveau de contamination de n'importe quel prélèvement et (iv) de fournir des références pour la mise en place de normes ou réglementations adaptées, à l'échelle nationale comme européenne (STERCKEMAN *et al.*, 2002a).

Un mémoire de fin d'études, réalisé par un étudiant de la FUSAGx (CORDIER, 1999), et un article de synthèse (STERCKEMAN *et al.*, 2002b) présentent les premiers résultats de ce programme. On retiendra la confirmation de l'existence de relations fortes entre constituants argileux, Al et Fe totaux (HF) et teneurs en ETMs. Des relations linéaires pour les sols développés sur matériaux loessiques ont été obtenues par régressions multivariées. Les résultats du RPG seront comparés aux nôtres au chapitre 7.

c. Le programme INRA/ADEME

L'ADEME et l'INRA se sont associés pour réaliser un recueil des très nombreuses analyses d'ETMs réalisées à travers toute la France à l'occasion des plans d'épandages de boues de stations d'épuration. L'objectif est d'en inférer une vision de la qualité des sols cultivés français, après divers traitements statistiques et cartographiques. *Malgré un certain nombre de difficultés (dispersion des données, multiplicité des laboratoires d'analyses et différences de méthodes analytiques, manque d'informations sur la nature des sols et des roches sous-jacentes) ce travail a permis de collecter plus de 11.000 analyses et donc de se faire une bonne idée de la qualité générale des sols agricoles français. Sont apparus aussi bien des secteurs présentant des anomalies naturelles que des zones de contaminations diffuses ou des cas de pollutions localisées (<http://etm.orleans.inra.fr/webetms0.htm>).*

3.2.2.2 Les travaux de référence en Belgique

- a. Un inventaire des teneurs dans les sols belges (COTTENIE et al., 1974).

Ce sont essentiellement les oligo-éléments Fe, Mn, Cu et Zn qui ont fait l'objet d'une synthèse sous le titre un peu ambitieux de "*La situation des sols belges en éléments traces*" (COTTENIE *et al.*, 1974). Celle-ci a néanmoins le mérite de reposer sur *quelques centaines d'échantillons de sol provenant de différentes régions agricoles*. Ces auteurs ont étudié les réponses de différents horizons de surface de sols agricoles à des extractifs divers dans une optique de prédiction des teneurs dans les plantes.

Les résultats sont fournis sous forme de paramètres statistiques de position (minimum, moyenne, amplitude) pour des sols regroupés en quatre classes texturales (argileuse, limoneuse, sablo-limoneuse et sableuse). Les teneurs extractibles par 0.1N et 0.5N HNO₃ sont comparées aux teneurs totales (sans mention de la méthode utilisée malheureusement) pour Fe, Mn, Cu et Zn.

Pour ce qui concerne les teneurs totales, on peut remarquer que c'est la classe limoneuse qui présente les teneurs les plus élevées pour tous les éléments étudiés. Ce qui peut sembler surprenant, c'est le constat établi pour les textures argileuses. Dans un classement en fonction des teneurs moyennes, la classe "argileuse" arrive en deuxième (Fe), troisième (Mn), voire quatrième position (Cu et Zn). On peut probablement y voir un effet des pratiques agricoles (enrichissement des horizons de surface) mais également un manque de discrimination des classes texturales retenues (il y a argile et argile...).

- b. Les études en Région flamande

Les deux études de référence en matière de fond pédogéochimique sont celle de l'IRC (DE TEMMERMAN *et al.*, 1982) et du VITO (CORNELIS et GEUZENS, 1993). La première concluait à l'importance de la classe texturale du sol et de la distinction entre matériaux quaternaires d'une part et paléozoïques et mésozoïques d'autre part. La seconde étude a permis de formaliser des relations entre teneurs en ETMs, teneurs en argile, en carbone organique et pH pour les horizons regroupés en cinq classes texturales.

c. Le projet "Etablissement et cartographie des teneurs bruits de fond en ETMs et MPOs dans les sols de la Région Wallonne" :- POLLUSOL (SONNET et al., 2003.)

S'inspirant des résultats des études flamandes et du programme ASPITET, une étude a été menée conjointement par l'UCL et la FU-SAGx pour la détermination des teneurs bruits de fond en ETMs (As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb et Zn extraits à l'eau régale) dans les sols de Région Wallonne. Quatre cent quatre-vingt horizons (160 sites et 3 profondeurs par site) ont été sélectionnés pour analyse sur base des critères: région naturelle, type de sol, occupation (culture, prairie, forêt), horizon. La carte des sols à 1:20.000 a servi de guide pour le choix de sites représentatifs. Le découpage cartographique de la carte des sols a également été utilisé pour assurer une certaine dispersion géographique des sites (pas plus d'un échantillon par planchette). On peut noter qu'une approche similaire a été menée en Aragón (NAVAS et MACHIN, 2002).

Les résultats confirment les travaux antérieurs, à savoir que les teneurs en argile et en matière organique jouent un rôle primordial en tant que phases porteuses des ETMs.

L'occupation du sol se révèle être un facteur discriminant plus important que sa typologie, sauf quelques exceptions. Le manque de pertinence au niveau statistique du type de sol est dû à une forte variabilité des teneurs au sein des différentes séries de sols "limono-caillouteux", mais également à une faible différence de teneur moyenne entre les séries "limoneuses".

Toutefois, un test de comparaison des moyennes n'est pas forcément une méthode suffisante pour décider que les séries de sols ne sont pas différentes l'une de l'autre. Et l'on peut se demander si au moins les séries à forte variabilité ne méritent pas un complément d'investigation.

d. L'inventaire de la qualité des sols de l'Office Wallon des déchets (OWD) (DGRNE, 2001b)

Cet inventaire repose sur l'exploitation d'une base de données alimentée par les analyses effectuées sur les sols susceptibles de recevoir des boues de station d'épuration comme le prévoit l'arrêté du Gouvernement Wallon du 12 janvier 1995. Dans sa politique de protection des sols, l'OWD tente de mettre en place les bases d'un cadastre des sols et d'établir un état initial de référence. Les teneurs pseudo-totales (eau régale) sont obtenues sur des échantillons composites, l'unité spatiale

de base est donc une surface parcellaire. Les résultats sont exploités en termes de "sols moyens" à plusieurs niveaux de stratification: Région wallonne, Régions agricoles, Associations de sols.

On constate un parallélisme entre les différentes approches entamées en France et en Belgique, ainsi que probablement dans d'autres pays. Deux grandes voies d'approche des teneurs "naturelles" en éléments traces métalliques se distinguent, principalement par leur niveau d'intégration spatiale. Dans l'approche "sédiments de ruisseaux", l'unité spatiale fonctionnelle correspond à un bassin versant (BV). Les références obtenues à l'exutoire sont des intégrations de l'information relative à l'ensemble du BV. Dans les approches pédogéochimiques, les facteurs de différenciation des volumes de sols sont les éléments-clés de la compréhension des teneurs naturelles dans les sols. Celles-ci sont intégrées selon des entités spatiales qui idéalement correspondent à des niveaux d'organisation des couvertures pédologiques.

3.3 Méthodologie adoptée

3.3.1 Une démarche comparative pas-à-pas

Un des objectifs de ce travail étant de mieux connaître et évaluer la distribution spatiale des ETMs dans les sols, la méthodologie adoptée, à l'instar des travaux de BAIZE (1994, 1997) dont elle s'inspire, priviliege les comparaisons de situations.

BAIZE (1997) décrit quatre méthodes d'estimation des contaminations basées sur des comparaisons. La comparaison verticale ponctuelle prend pour objets l'horizon labouré et les horizons en-dessous. La comparaison typologique compare l'échantillon à une population du même type d'horizon dans la même série de sol. Dans la comparaison latérale, l'horizon de surface labouré est comparé au même type d'horizon et de sol sous forêt intacte de contaminations et située à proximité. La quatrième approche consiste à comparer les teneurs en ETMs sur base de relations avec l'argile granulométrique.

Ces méthodes ont été retenues et intégrées dans la démarche de ce travail. L'importance des différents facteurs de différenciation pédogénétique sur la distribution spatiale des teneurs en ETMs est évaluée par une suite d'approches complémentaires dont font l'objet les matériaux

parentaux, les horizons et volumes de sols, le drainage, l'historique d'occupation du sol... (figure I.16)

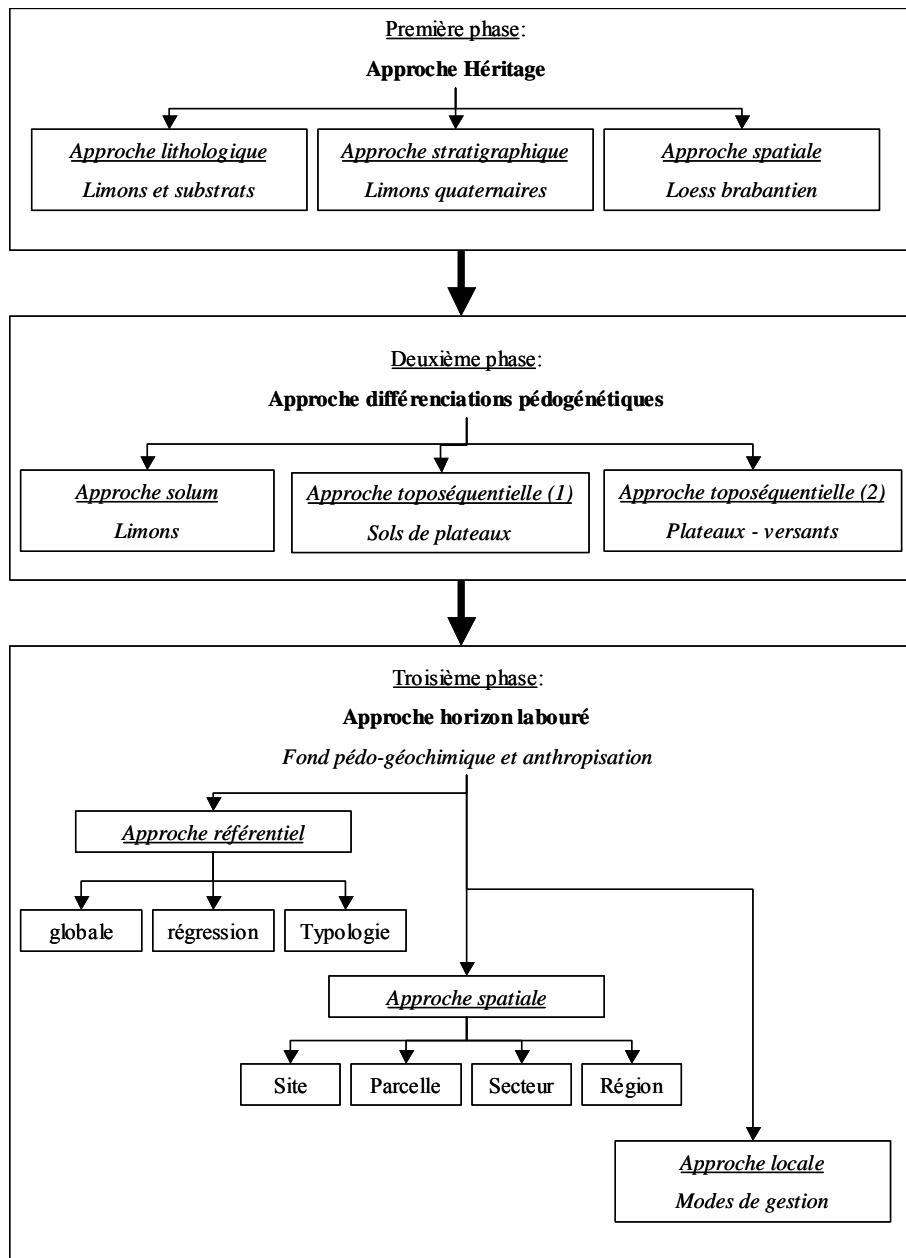


Figure I. 16: Représentation des différentes approches au sein de la méthodologie générale d'échantillonnage

Considéré à l'échelle de la zone d'étude, le sol est fonction de la roche-mère, de la topographie et de la couverture végétale. La lithologie sera donc le premier élément pris en considération dans le développement d'une méthodologie de comparaison.

L'approche "héritage" est litho-stratigraphico-régionale. Elle vise ainsi l'étude du fond minéralogique et géochimique des matériaux parentaux. Dans un premier temps, les grandes familles lithologiques (limons, argiles et shales, calcaires, sables et grès) feront l'objet de ces caractérisations. Ensuite, les différentes générations de limons quaternaires seront étudiées à partir de coupes profondes.

Si la spatialisation des résultats de cette approche semble aisée pour ce qui concerne le substrat -par l'intermédiaire de la carte géologique-, il n'en va pas de même pour les différents limons. Il n'existe en effet aucune information fiable sur leurs volumes et leur distribution spatiale. Toutefois, comme énoncé précédemment (COLINET, 1999), la connaissance de l'ordre de grandeur des variations possibles dues au facteur "roche-mère limoneuse" peut s'avérer utile dans l'interprétation des données. Au moins trois cas sont possibles: (i) les différences entre générations de limons sont insignifiantes; (ii) elles sont significatives mais "explicables" par un facteur spatialisable ou (iii) significatives et "inexplicables" par une propriété ou un phénomène spatialement connus. Dans les deux premiers cas, la variabilité de l'âge du limon le plus proche de la surface ne constitue pas un obstacle à la prédiction spatiale; dans le dernier cas, l'incertitude sur le facteur "matériau parental" sera quantifiée.

En dernière étape de cette approche, la variabilité régionale du limon de couverture sera étudiée à échelle déca-, hecto- et kilométrique à partir de transects ouest-est et nord-sud.

L'approche "solum" vise à mieux cerner les différenciations verticales entre horizons au sein des matériaux limoneux. Pour ce faire, des solums de référence seront comparés, en termes d'indices de différenciation, sous forêt et sous culture, en situation de bon drainage et de drainage ralenti.

Le "sol limoneux à horizon BT à drainage favorable" sous couvert forestier servira de point de départ à cette analyse. Il sera dans un premier temps comparé à un sol mal drainé forestier, ensuite au même type de sol, bien drainé, mais mis en culture. L'influence de l'âge du défrichement sur l'évolution du profil chimique sera étudiée par l'intermédiaire de sondages effectués selon un gradient d'ancienneté de la mise en

culture. Enfin, une comparaison entre solums bien drainés et imparfaitement drainés sera réalisée pour les sols cultivés.

L'approche "toposéquentielle" se justifie par l'existence de transferts latéraux de surface (ruissellement), hypodermiques ou en masse, dus aux processus de morphogenèse. Les sols sont organisés en fonction de la topographie et un certain nombre de toposéquences seront étudiées dans plusieurs unités de paysages limoneuses. Ensuite, l'analyse sol-relief sera étendue aux zones de contact entre matériaux limoneux quaternaires et substrats, *i.e.* dans les entailles des vallées.

L'approche "horizon labouré" constitue une réflexion sur l'élaboration d'un référentiel spatialisé des teneurs en ETMs dans l'horizon labouré.

Dans un premier temps, des données d'inventaire en Région Limoneuse seront analysées dans une optique d'interprétation des teneurs totales en "teneurs naturelles" et "teneurs habituelles" dans les sols agricoles. L'étude de la variabilité spatiale de la composition en ETMs de l'horizon labouré fera l'objet d'une deuxième partie, ainsi que l'évaluation de la faisabilité de cartographies des teneurs en ETMs. Ensuite, trois situations particulières de gestion des effluents organiques seront analysées par rapport au référentiel "horizon labouré" pour vérifier si l'impact de ces modes de gestion est significatif par rapport à ce qui se fait de manière courante en agriculture.

3.3.2 Des modes opératoires intégrés

Les méthodologies de terrain, de laboratoire et d'interprétation doivent s'inscrire dans un ensemble cohérent au sein d'une démarche. Celle sans cesse peaufinée par le Laboratoire de Géopédologie a été présentée par BOCK (1994). Elle privilégie le cadrage géomorphopédologique des analyses de sols.

Le choix des sites d'investigation presuppose un cadrage géomorphopédologique qui, *reposant sur le choix des niveaux de perception et la hiérarchisation des critères, assure la pertinence des prélèvements en évitant de confondre ce qui peut être stratifié* (BOCK, 1994). Cette approche permet de mieux comprendre l'organisation des sols dans le paysage et d'ainsi orienter (tant intellectuellement que géographiquement) de manière rapide l'échantillonneur vers l'objet de son travail.

D'une manière générale, chaque site investigué fait l'objet d'un repérage géographique sur les documents disponibles (carte topographique, orthophotoplan, carte des sols). L'opération d'échantillonnage se poursuit

avec une phase de description sur le terrain préalable au prélèvement. Les sols sont échantillonnés en fonction des limites des horizons, les prélèvements à des profondeurs systématiques n'ont lieu que dans des contextes relativement homogènes.

Les analyses de laboratoire procèdent de la même philosophie. Les menus d'analyse diffèrent en fonction des objectifs poursuivis et du type d'"objet" analysé. Loin de la systématisation de l'analyse, chaque échantillon se doit d'être recadré dans son contexte naturel afin de s'épargner des coûts en déterminations injustifiées, que ce soit en raison de l'inadéquation du mode opératoire ou par rapport au parti à tirer de l'information. L'analyse au laboratoire comme les autres outils doit être perçue pour ce qu'elle est réellement, *i.e.* avec ses limites en terme de précision et d'exactitude. La variabilité opératoire est ainsi un facteur d'imprécision inévitable et, en même temps que d'essayer de la réduire, il est important de pouvoir l'estimer pour se donner des limites, des repères pour la formulation et l'interprétation des résultats.

Pour ce qui concerne l'interprétation des résultats, aussi, le fait d'avoir positionné les échantillons dans leur cadre naturel permet généralement d'opérer des jugements plus nuancés que la simple référence à des systèmes normatifs. Le cadrage géomorphopédologique des échantillons permet également de se définir un champ spatial d'extrapolation des résultats, en fonction de la représentativité des volumes de sols étudiés.

Les modes opératoires relatifs aux analyses de laboratoire pratiquées dans le cadre de cette étude figurent en annexe 3.

Chapitre.4 Considérations relatives à l'interprétation des résultats analytiques pour les éléments totaux

4.1 A propos de l'exploitation de la variabilité opératoire

4.1.1 Détermination de la variabilité opératoire

Si l'on définit la variabilité opératoire comme la variabilité de la mesure d'une propriété Z sur un échantillon de terre, celle-ci résulte essentiellement de facteurs analytiques proprement-dit (répétabilité de la mesure par l'appareillage, répétabilité de manipulation par l'opérateur...) et de l'homogénéité de l'échantillon. La variabilité opératoire correspond alors à la dispersion des valeurs z (répétitions) autour de la moyenne observée. Elle peut être traduite par l'amplitude, la variance, l'écart-type, le coefficient de variation ou l'espace interquartile. La variance ou l'écart-type sont d'usage plus fréquent, bien qu'ils soient sensibles aux valeurs extrêmes. Le coefficient de variation peut être plus stable que l'écart-type opératoire quand les teneurs moyennes des échantillons sont fort différentes. L'amplitude par contre est à déconseiller car elle a tendance à augmenter si n augmente. L'espace interquartile est utilisé par BAIZE (1997) pour définir les valeurs aberrantes.

La variance opératoire ($\hat{\sigma}_{opér.}^2$) et les paramètres dérivés sont estimés à partir de la moyenne des variances observées sur des échantillons répétés au cours des analyses, moyenne pondérée par le nombre de répétitions. Les résultats figurent au tableau I.18 sous la forme d'écart-types et de coefficients de variation. Les premiers se rapportent à la variabilité opératoire à travers l'ensemble des déterminations. Les statistiques marquées d'un ² concernent la variabilité des témoins à l'intérieur d'une série de mesures effectuées le même jour, dans les mêmes conditions expérimentales. La différence entre les deux statistiques résulte alors essentiellement de la variabilité des conditions expérimentales (mise en solution, droite d'étalonnage, pression des gaz...).

D'une manière générale, si les données à étudier ont été obtenues à partir de mesures effectuées au sein d'une seule et même série, les valeurs les plus faibles de la variabilité opératoire seront utilisées comme références. Par contre, dans la négative, le recours aux statistiques les

moins favorables²⁰ sera plus approprié.

Les titres 3.1.2 à 3.1.4, suivants, concernent l'usage qui peut être fait des résultats du tableau I.18. dans l'analyse des données.

Tableau I. 18: Statistiques relatives à la variabilité opératoire

Elément	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe
Unité de teneur	g/100g					
Moyenne	0.43	0.51	1.7	0.73	4.89	2.66
Ecart-type	0.04	0.03	0.09	0.05	0.28	0.14
CV(%)	8.9	5.9	5.6	6.4	5.8	5.1
IC95	0.08	0.06	0.19	0.09	0.57	0.28
ppds	0.11	0.09	0.27	0.13	0.80	0.38
Ecart-type ²	0.02	0.02	0.07	0.04	0.24	0.11
CV ² (%)	5.5	4.8	4.3	5.5	4.9	4.0
IC95 ²	0.05	0.05	0.15	0.08	0.49	0.22
ppds ²	0.07	0.07	0.21	0.11	0.68	0.30
LD	0.03	0.04	0.03	0.12	0.37	0.02
LQ	0.11	0.14	0.10	0.41	1.25	0.08
Elément	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb
Unité de teneur	mg/kg					
Moyenne	504.6	15.3	53.2	28.8	59.3	13.8
Ecart-type	28.3	1.2	3.5	3.2	11.8	2.6
CV(%)	5.6	8.1	6.5	11.2	19.9	18.5
IC95	56.7	2.5	7.0	9.2	24.1	6.7
ppds	80.2	3.5	9.8	12.8	33.3	9.3
Ecart-type ²	20.6	0.9	2.6	2.5	10.0	2.5
CV ² (%)	4.1	6.1	5.0	14.3	16.9	17.9
IC95 ²	42.1	1.9	5.4	5.2	20.4	5.1
ppds ²	58.4	2.6	7.5	11.8	11.8	7.1
LD	2.7	1.7	3.0	1.6	6.8	3.2
LQ	8.9	5.7	10.1	5.2	22.6	10.8

CV: Coefficient de Variation (%);

ppds: plus petite différence significative ($\alpha = 0.95$);

IC95: demi-intervalle de confiance pour l'estimation d'une valeur ($\alpha = 0.95$);

LD: Limite de détection ($3 \times \sigma$ bruit de fond); LQ limite de quantification ($10 \times \sigma$ bruit de fond);

²: statistiques relatives à la variabilité au sein d'une même série de mesures

²⁰ ... moins favorable car permettant moins facilement de mettre en évidence des différences entre échantillons.

4.1.2 Variabilité opératoire et qualité de l'estimation en un point

Soit z_A une seule mesure de Z_A pour un échantillon A. z_A est utilisé comme estimateur de la valeur moyenne et l'erreur standard associée à la moyenne ($\sigma_{\bar{z}}$) est alors estimée par l'écart-type opératoire. L'intervalle de confiance autour de la moyenne vaut lui:

$(t_{1-\alpha/2} * \hat{\sigma}_{opér.})$ où t possède les degrés de liberté associés à la variance opératoire.

Les résultats figurent dans le tableau I.18 sous l'étiquette IC95. En première approche, ces résultats peuvent donc être considérés comme des indicateurs de l'incertitude autour de l'estimation de la valeur de la propriété en un point.

4.1.3 Variabilité opératoire et différences significatives entre échantillons

La variabilité opératoire peut également servir de base pour déterminer en première approximation si deux échantillons doivent être considérés comme différents du point de vue d'une variable Z.

Soit l'hypothèse d'égalité des moyennes : $H_0: m_1 = m_2$

Si l'on considère les valeurs z_A et z_B comme les réalisations uniques de deux variables Z_A et Z_B , i.e. la mesure de Z sur un échantillon A et de Z sur un échantillon B, $\hat{m}_1 = x_1$ et $\hat{m}_2 = x_2$ car dans les deux cas $n=1$.

En théorie (DAGNELIE, 1975), H_0 est rejeté si

$$(i) |x_1 - x_2| \geq u_{1-\alpha/2} * \sigma * \sqrt{2/n} \quad \text{lorsque } \sigma \text{ est connu, ou}$$

$$(ii) |x_1 - x_2| \geq t_{1-\alpha/2} * \sqrt{\frac{SCE_1 + SCE_2}{n * (n-1)}} \quad \text{lorsque } \sigma \text{ est inconnu}^{21}.$$

L'écart-type opératoire n'est pas connu mais estimé par $\hat{\sigma}_{opér.}$ que l'on suppose constant pour la mesure de Z_A et Z_B . Nous utiliserons donc un mélange des deux équations précédentes et H_0 sera rejeté quand

$$|x_1 - x_2| \geq t_{1-\alpha/2} * \hat{\sigma}_{opér.} * \sqrt{2} \quad (\text{car } n=1)$$

Exemple: Ca total: $\hat{\sigma}_{opér.} = 0.04$; pour $\alpha = 0.05$, $t_{1-\alpha/2} \approx 2.00$;

²¹ pour des échantillons de même effectif n.

Si $n = 1$, il faut que $|x_1 - x_2| \geq 0.11$ pour conclure avec un risque modéré de se tromper que les différences entre ces deux valeurs ne sont pas uniquement dues à la variabilité opératoire²².

Les résultats obtenus dans le cadre de ce travail figurent au tableau I.18 sous la rubrique ppds (plus petite différence significative). Ces ppds sont des approximations qui doivent servir à délimiter le champ des comparaisons de résultats.

4.1.4 Variabilité opératoire et analyse de la variance

Une population d'échantillons est toujours caractérisée par une dispersion autour de la moyenne. Plus on stratifie cette population, *i.e.* à mesure que des facteurs de différenciation sont clairement identifiés, plus les sous-populations obtenues doivent devenir homogènes. La question qui se pose est: jusqu'à quand faut-il poursuivre les investigations de ce type ou à partir de quand peut-on considérer que la variabilité entre échantillons est principalement due au facteur opératoire?

Afin de juger de l'homogénéité d'une population d'échantillons de terre du point de vue d'une variable Z , la simple comparaison des paramètres de dispersion pour cette population à la variabilité opératoire permet dans un premier temps de juger de l'homogénéité de la population.

Si l'on considère qu'une observation en un point x_i de l'espace est une variable aléatoire (Z_i) et indépendante:

$Z(x_i) = \mu + \varepsilon_i + \varepsilon'$ où μ , la moyenne générale de Z , est une constante, ε_i est un facteur aléatoire de moyenne nulle et de variance σ^2_i , correspondant à la variabilité entre les sites où sont effectuées les mesures, ε' est un facteur résiduel aléatoire de moyenne nulle et de variance $\sigma^2_{\text{rés}}$, qui correspond en théorie à la variabilité opératoire.

La variance sur Z (*i.e.* des valeurs $Z_i - \mu$) est alors égale à $\hat{\sigma}_i^2 + \hat{\sigma}_{\text{opér.}}^2$.

On peut ainsi exprimer les composantes de la variance en proportion de la variance totale. Toutefois, le rapport $\hat{\sigma}_i^2 / \hat{\sigma}_{\text{opér.}}^2$ peut apparaître plus judicieux pour comparer les variances car c'est celui qui intervient dans

²² Si l'on avait répété en chaque point la mesure de Ca ($n=2$), il aurait fallu que $|x_1 - x_2| \geq 0.08$ pour aboutir à la même conclusion; pour $n = 4$, $|x_1 - x_2| \geq 0.06...$

l'analyse de la variance proprement-dite.

L'analyse de la variance s'utilise sous la forme d'un test d'hypothèse d'égalité des moyennes ou comme méthode d'estimation.

Dans le cas d'une comparaison de moyennes entre types de sols, ou tout autre facteur de classification du continuum pédologique, basée sur un certain nombre de mesures effectuées dans des endroits déterminés de manière aléatoire (tableaux I.19 et I.20), c'est le rapport des carrés moyens relatifs aux types de sols et aux endroits qui va permettre de juger l'hypothèse d'égalité des moyennes.

Tableau I. 19 : Analyse de la variance entre types de sols - une seule mesure par endroit.

	ddl	SCE	CM	F
Type de sol endroit	p-1 n-p	SCE _f SCE _r	CM _f CM _r	F _{obs}
Total	n-1	SCE _t		

Tableau I. 20 : Analyse de la variance entre types de sols - plusieurs mesures par endroit.

	ddl	SCE	CM	F
Type de sol endroit répétition	p-1 p(q-1) pq(n-1)	SCE _a SCE _{b a} SCE _r	CM _a CM _{b a} CM _r	F _a F _{b a}
Total	pqn-1	SCE _t		

Dans le second cas (répétition des mesures en chaque endroit), le Carré Moyen relatif aux endroits doit normalement être plus petit que dans le premier et des différences entre types de sols sont plus facilement mises en évidence.

Le Carré Moyen résiduel (CM_r) est un estimateur de la variance de la population (DAGNELIE, 1975). Dans le schéma d'analyse de la variance du tableau I. 20, CM_r estime la variance opératoire ($\hat{\sigma}_{opér.}^2$) et $F_{b|a}$ peut être utilisé pour juger de l'intérêt d'une stratification de la population des endroits.

Dans le premier schéma d'analyse, par contre, CM_r correspond à $\hat{\sigma}_i^2 + \hat{\sigma}_{opér.}^2$. Si l'on considère $\hat{\sigma}_{opér.}^2$ comme une constante, le rapport

$(SCE_r / \hat{\sigma}_{opér.}^2)$ peut être considéré comme une variable χ^2 à n-p degrés de libertés (p = nombre de groupes dans l'analyse de la variance) et un test de conformité de variance est applicable. Une alternative consiste à calculer un rapport des variances et de le comparer à une distribution F théorique. Il faut toutefois rappeler la plus grande sensibilité de ce test à la non-normalité des populations-parents (DAGNELIE, 1975).

L'ensemble de ces tests fournissent des indications sur l'importance de la variabilité opératoire par rapport à la variabilité totale et doivent permettre à l'analyste de juger de l'opportunité d'investiguer plus avant les variations résiduelles de ses classifications.

4.2 A propos de l'exploitation de méthodes différentes d'analyse des éléments totaux

Dans la littérature, il est souvent fait usage du terme de "valeurs totales" pour désigner des déterminations réalisées à partir de méthodes différentes, tant au niveau des réactifs (acides plus ou moins forts, milieux alcalins...) que des principes (mises en solution ou méthodes non destructives...) ou des appareillages (AAS, ICP-AES...). Cette multiplicité des schémas analytiques rend difficiles les comparaisons de résultats.

4.2.1 Comparaison attaque triacide et attaque à l'"eau régale"

Afin de vérifier dans quelle mesure les résultats d'autres études obtenus par la méthode à l'eau régale pouvaient être comparés aux nôtres, un certain nombre d'échantillons ont été analysés selon les deux méthodes.

24 échantillons provenant de l'inventaire "teneurs bruits de fonds dans les sols en Région Wallonne" ont été sélectionnés afin de couvrir une gamme relativement large de types de sols. Ces échantillons qui font l'objet d'une attaque à l'"eau régale" (ER) dans le cadre du projet ont également été mis en solution par attaque triacide (HF) au laboratoire de Géopédologie. Les dosages des solutions HF se font par AAS comme l'ensemble des échantillons analysés pour ce doctorat, ceux des solutions ER par ICP à l'Unité de Science du Sol de Louvain-La-Neuve.

Les résultats figurent au tableau I.21, ainsi que ceux tirés d'un TFE

(GENOT, 1999). Les deux expériences peuvent être considérées comme indépendantes. Il en résulte que:

- les relations HF-ER sont très fortes, en témoignent les coefficients de détermination supérieurs à 0.90;
- les relations sont des droites dont les pentes sont très proches d'une expérience à l'autre²³, à l'exception de Cr et Pb;
- en toute logique, plus la pente de la droite HF-ER est faible, plus l'importance relative des formes "séquestrées" dans les réseaux silicatés est grande. On trouvera donc pour les fractions "silicates" proportionnellement plus de Cr, de Al et de Ni que de Mn, Pb ou Co. Ceci est partiellement confirmé par les données du tableau I.22 estimées à partir d'extractions séquentielles (*cf* annexe 3). Le résidu des différentes extractions a été mis en solution par attaque HF et si l'ordre des éléments reste à peu près le même, les fractions "silicates" estimées à partir des relations HF-ER sont inférieures à celles mesurées en fin d'extraction séquentielle; ce qui signifie que l'eau régale attaque une partie des réseaux silicatés.
- L'élément dont les résultats sont les plus divergents est Pb. La comparaison HF-ER menée sur les échantillons de l'inventaire POLLUSOL indique un caractère "labile"²⁴ pour Pb alors que les deux autres sources de données semblent indiquer le contraire. La cause n'en a jusqu'à présent pas été déterminée.

Notons qu'en ce qui concerne Cd, PRUDENTE *et al.* (2002) ont obtenu des résultats équivalents par deux méthodes: triacide-HF et HNO₃ 0.2M. Cette dernière étant moins agressive que l'eau régale, on peut dès lors supposer que l'essentiel de Cd se trouve principalement sous forme "facilement" extractible.

²³ Il faut noter que l'extraction ER "fournit" plus de manganèse que l'extraction HF. Ces résultats ont été confirmés par d'autres analyses indépendantes. La cause pourrait être une volatilisation partielle de Mn pendant l'attaque triacide.

²⁴ "labile" est utilisé, dans une acceptation chimique, pour exprimer l'ensemble des fractions non incluses dans les réseaux, i.e. non résistantes aux extractifs chimiques.

Tableau I. 21: Comparaison des résultats "triacide" et "eau régale"

Eléments	droites de régression	r^2	GENOT (1999)
Al	$Al_{ER} = 0.40 * Al_{HF}$	0.84	-
Fe	$Fe_{ER} = 0.98 * Fe_{HF}$	0.94	$Fe_{ER} = 1.00 * Fe_{HF}$
Mn	$Mn_{ER} = 1.10 * Mn_{HF}$	0.92	$Mn_{ER} = 1.07 * Mn_{HF}$
Cu	$Cu_{ER} = 0.89 * Cu_{HF}$	0.91	-
Zn	$Zn_{ER} = 0.93 * Zn_{HF}$	0.97	$Zn_{ER} = 0.91 * Zn_{HF}$
Cr	$Cr_{ER} = 0.40 * Cr_{HF}$	NS	$Cr_{ER} = 0.86 * Cr_{HF}$
Ni	$Ni_{ER} = 0.69 * Ni_{HF}$	0.96	$Ni_{ER} = 0.66 * Ni_{HF}$
Pb	$Pb_{ER} = 1.03 * Pb_{HF}$	1.00	$Pb_{ER} = 0.31 * Pb_{HF}$
Co	$Co_{ER} = 0.98 * Co_{HF}$	0.88	-

NS: Non significatif

Tableau I.22: Estimation de l'importance des fractions des ETMs incluses dans les réseaux silicatés, à partir des relations HF-HR et à partir d'exactions séquentielles.

Eléments	"Silicates" / Total		
	HF-ER*	[1]	[2]
Al	0.60	-	0.65
Fe	0.02	0.60	0.35
Mn	0.00	0.20	0.20
Cu	0.11	0.20-0.50	0.45
Zn	0.07	0.20-0.50	0.45
Ni	0.31	> 0.70	0.60
Pb	0.00	> 0.70	-
Co	0.02	-	0.15

* Données estimées à partir du tableau I.21

[1]: ADRIAENSEN et al. (2000) [2]: Données personnelles (non publiées)

4.2.2 Comparaison attaque triacide et fluorescence X

Dans le cadre d'une convention de recherche financée par le Ministère de la Région wallonne, ayant notamment pour objet la validation de la spectrométrie de fluorescence X pour l'analyse chimique des terres cultivées, BROHEE *et al.* (2002a) ont analysé par la méthode précitée un certain nombre d'échantillons prélevés dans le cadre de ce doctorat. L'analyse après mise en solution à l'HF ayant été effectuée par le laboratoire de Géopédologie, les considérations précédentes relatives à la variabilité opératoire restent d'application. Toutefois, certains échantillons ont fait l'objet d'un dosage parallèle par ICP au Centre de Recher-

che de Gembloux (CRAGx - Département Qualité des productions agricoles). Ces comparaisons ont pour objectif ici d'apporter un éclairage supplémentaire sur la qualité des méthodes analytiques mises en oeuvre au cours de ce travail de doctorat.

Les valeurs de répétabilité²⁵ de la méthode par fluorescence X sont présentées au tableau I.23. On peut constater que, par rapport aux données du tableau I.18 correspondant à la variabilité opératoire la plus élevée, la répétabilité par la fluorescence X peut être meilleure (Ca, K, Zn, Cr, Ni et Pb), équivalente (Na, Al, Fe et Cu) ou moins bonne (Mg et Mn). Si l'on considère la variabilité opératoire la moins élevée (tableau I.18), la méthode par fluorescence X reste plus répétable pour Ca, Zn, Cr, Ni et Pb, est équivalente pour K et est moins répétable pour Mg, Na, Al, Fe, Mn et Cu que l'AAS. Ces résultats reflètent, entre autres choses, une plus grande sensibilité de la méthode chimique aux conditions environnementales de l'attaque (principalement) et de la mesure d'une série à une autre.

Tableau I. 23: Répétabilité de la méthode par XRF (BROHEE *et al.*, 2002a)

Elément	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe
CV(%)	4.86	9.82	4.22	6.40	6.37	4.97
Elément	Mn	Cu	Zn	Cr	Ni	Pb
CV(%)	10.19	8.31	3.85	7.81	4.16	7.37

CV: Coefficient de variation en pour-cent

En ce qui concerne les teneurs mesurées, le rapport de BROHEE *et al.* (2002a) fait état de résultats montrant que, *suite à des tests de significations de l'ordonnée à l'origine et de conformité du coefficient de régression, la XRF mesure des teneurs statistiquement identiques en Na, P, Ca, Fe, Mn, Zn à l'AAS et en Na, P, Ca, Fe, Mn, Zn, Co à l'ICP.*

Pour Mg, K, Al, Cu, Ni et Cr, soit autant d'éléments que l'on associe généralement aux teneurs en argile, la XRF donne des valeurs supérieures (tableau I.24). Il se confirmerait ainsi que, quoi que très agressive et ne laissant pas de résidu solide discernable à l'oeil nu, l'attaque triacide ne mettrait pas en solution la totalité des éléments.

Quels sont les enseignements pratiques à tirer de ces comparaisons?

²⁵ Il s'agit ici de la répétabilité par rapport à un échantillon préparé cinq fois.

- Parmi les éléments étudiés, Ca, Na, Fe, Mn et Zn ne posent aucun problème significatif d'analyse selon le schéma "attaque HF - AAS".
- Pour les éléments K, Mg, Al, Cu et Ni, les dosages AAS et ICP sont statistiquement équivalents. Ce qui tend à éliminer tout problème de dosage pour ces éléments.
- La mesure de l'élément Co est annoncée équivalente en ICP et XRF. La figure I.17 illustre les résultats des déterminations. Dans le cas de l'ICP, l'ordonnée à l'origine peut être considérée comme nulle, et la pente de la droite égale à 1. Par contre, la relation entre les teneurs AAS et XRF est toute autre. C'est l'énergie de la flamme (trop faible pour doser le Co en AAS) qui est mise en cause (BROHEE *et al.*, 2002b). On considérera néanmoins que:
 - (i) la régression $\text{CoAAS} = 4.4406 + 0.2871 \text{ CoXRF}$ permet de faire le lien de manière satisfaisante (r^2 supérieur à celui entre ICP et XRF); ou
 - (ii) de manière beaucoup plus approximative, on dose par absorption atomique un peu plus de la moitié du Co dosé par fluorescence X.

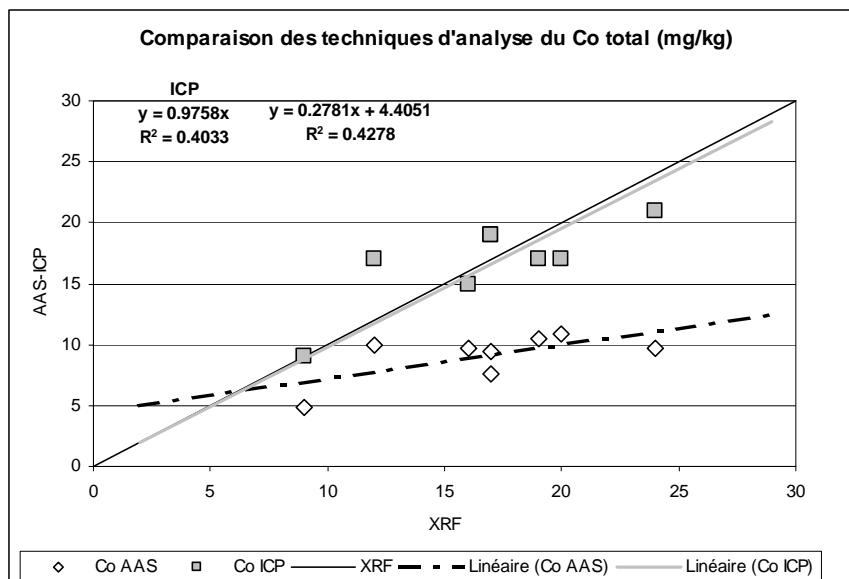


Figure I. 217: Comparaison des résultats d'analyse du Co total par attaque triacide et absorption atomique (AAS), ou ICP et par fluorescence X (XRF).

- Pour l'élément K, à priori il fallait s'attendre à des problèmes de

dosage du même ordre: trop faible énergie de la flamme AAS. Toutefois, les dosages AAS et ICP se sont révélés équivalents. La relation AAS-XRF est ici beaucoup plus nette (figure I.18) et on peut considérer sans se tromper que le K dosé par absorption atomique équivaut à 85% de celui dosé par fluorescence X.

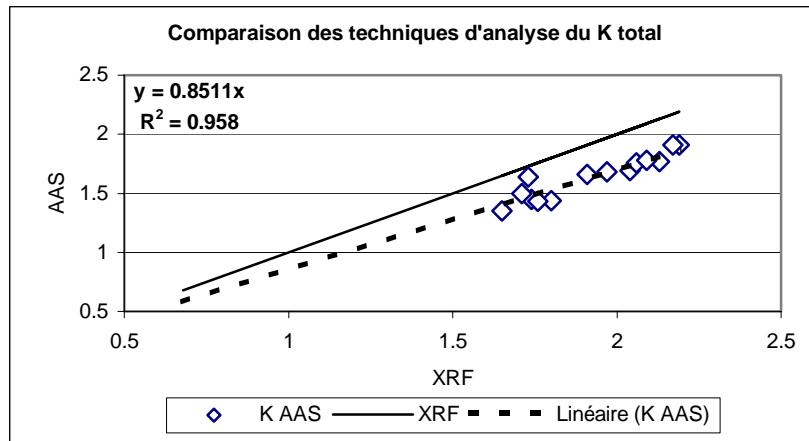


Figure I. 38: Comparaison des résultats d'analyse du K total par attaque triacide et absorption atomique (AAS) et par fluorescence X (XRF)

- En ce qui concerne le Pb, on peut constater (figure I.19) une relation du type $AAS = 0.74 * XRF$ très nette. Il faut remarquer que les teneurs obtenues par ICP sont nettement supérieures à celle de la XRF, ce qui peut signifier un problème de droite d'étalonnage en ICP ou d'interférence en XRF.

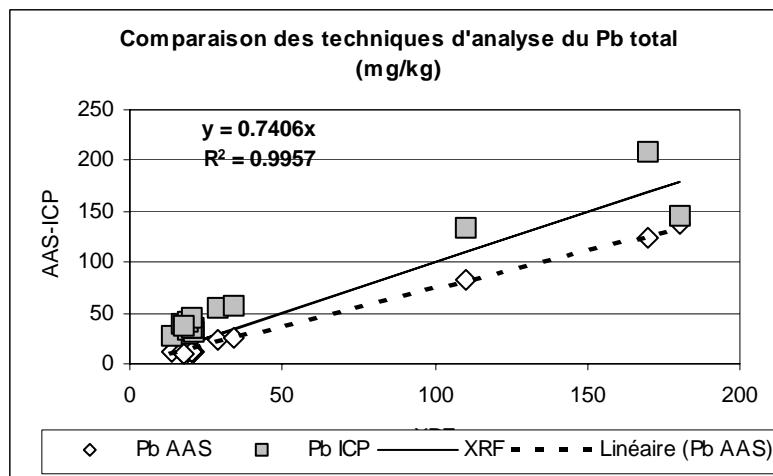


Figure I. 49: Comparaison des résultats d'analyse du Pb total par attaque triacide et absorption atomique (AAS), ou ICP et par fluorescence X (XRF).

On notera également que la netteté de la relation est en partie due à la présence de valeurs extrêmes vers le haut qui pèsent fortement sur cette relation.

- L'analyse de Cr semble plus problématique. Comme l'illustre la figure I.20, les corrélations sont faibles entre la XRF et les deux autres techniques. En outre, les ordres de grandeur sont sensiblement différents, la XRF donnant systématiquement des teneurs plus élevées que l'AAS, d'un facteur compris entre deux et trois selon l'échantillon. Faut-il y voir un problème de minéralisation -la chromite serait un minéral fortement réfractaire²⁶- ou d'inadaptation de la XRF au dosage du Cr? Par contre, la relation entre AAS et ICP est relativement bonne; les teneurs AAS valant environ 80% des teneurs ICP.

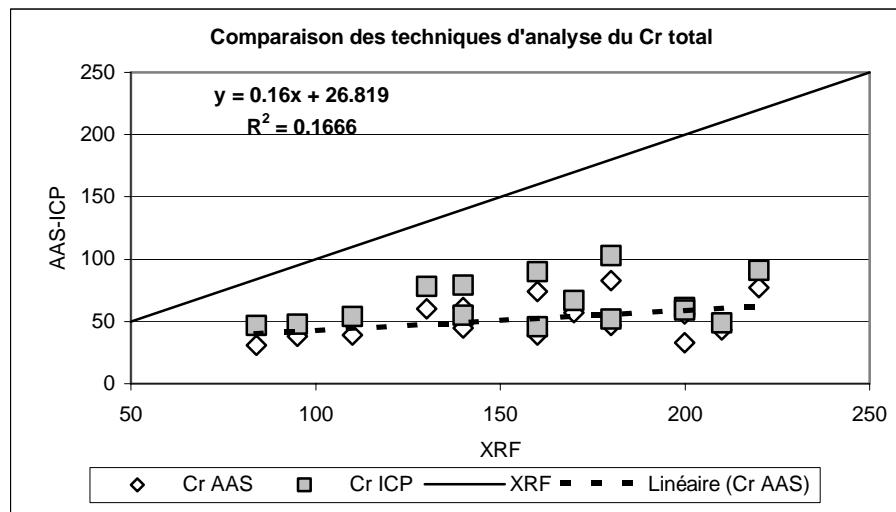


Figure I. 20: Comparaison des résultats d'analyse du Cr total par attaque triacide et absorption atomique (AAS), ou ICP et par fluorescence X (XRF).

- La détermination des teneurs en Ni présente également un caractère particulier. Il s'avère à l'analyse que la majeure partie des échantillons analysés par AAS (pour rappel AAS = ICP pour Ni) suivent une relation linéaire avec la XRF. Dans ce cas, $Ni_{AAS} = 0.47 * Ni_{XRF}$ ($r^2 = 0.67$). Les teneurs AAS de cet ensemble d'échantillons semblent cohérentes avec les résultats de la littérature, notamment les données du programme ASPITET concernant les limons de plateaux (BAIZE, 1997) à savoir des

²⁶ Mais quelle est l'importance pondérale de la chromite dans les sols limoneux?

teneur comprises entre 10 et 35 mg/kg, suivant une bonne relation avec le fer total. Toutefois, 10 à 15 pour-cent des échantillons ne suivent pas cette loi, mais donnent des teneurs équivalentes à celles de la XRF. Aucune explication complètement satisfaisante n'a été trouvée jusqu'à présent et ces résultats posent évidemment pour le futur un problème d'interprétation des teneurs "élevées" en Ni. S'agit-il de richesse naturelle, de contamination anthropique ou d'un "effet" analytique? Ces résultats seront donc à interpréter au cas par cas.

Tableau I. 24: Ordres de grandeurs des valeurs mesurées selon les différentes techniques: AAS, ICP et XRF

Eléments	AAS	ICP	XRF
Ca	1	1	1
Mg	1	1	1.5
K	1	1	1.2
Na	1	1	1
Al	1	1	1.3
Fe	1	1	1
Mn	1	-	1
Cu	1	1	2.7
Zn	1	1	1
Cr ^[a]	1	1.2	2-3
Ni	1	1	2
Pb	1	1.7	1.4
Co ^[b]	1	2	2

[a]: Absence de relation linéaire entre XRF et les deux autres techniques.

[b]: Meilleur r^2 avec la relation:

$$\text{Co(AAS)} = 4.4406 + 0.2871 * \text{Co(XRF)} .$$

4.2.3 Conclusions

L'analyse des résultats des extractions ER et HF montre une très forte corrélation entre ces deux méthodes. Dans le domaine des sols belges, il semble donc que l'on puisse assez aisément comparer des teneurs totales ER et HF, moyennant le recours à des coefficients de conversion linéaires. Les résultats acquis au sein du laboratoire de Géopédologie plaident pour des coefficients assez stables. Davantage d'expérimentation dans le futur permettront peut-être de les confirmer. Ceci mériterait d'être réalisé ne fut-ce que pour comparer les travaux belges et français relatifs aux teneurs naturelles des sols.

Dans les comparaisons de méthodes d'analyse AAS-ICP-XRF, il ne s'agit pas de considérer que les teneurs les plus élevées sont forcément les meilleures. Aux problèmes de mise en solution et de droites d'étalonnage pour les techniques AAS et ICP, se greffent ceux relatifs aux interférences dans les raies de spectrométrie X. Ceci rend l'évaluation de la valeur "vraie" délicate. Toutefois, la conclusion principale du titre 3.2.2 est que des résultats totaux obtenus par des méthodes analytiques de type triacide-AAS, triacide-ICP et XRF sont soit équivalents, soit comparables par des relations linéaires. A l'exception du chrome en XRF qui ne peut être comparé aux teneurs obtenues par les deux autres méthodes.

C'est un peu plus conscient de la qualité des analyses et de l'importance de la variabilité opératoire que nous pourrons aborder l'interprétation des données au cours des prochains chapitres.

4.3 A propos de la représentativité des références²⁷

4.3.1 Notions de base

Les références géopédologiques sont des connaissances qui permettent de représenter le contenu, l'organisation et le fonctionnement des couvertures pédologiques. Les objets pédologiques sont des éléments de représentation de ces couvertures pédologiques. Ils correspondent à des individus statistiques, réels ou non, caractérisables par un certain nombre de propriétés. En pratique, les objets pédologiques sont les niveaux

²⁷ Considérations mises à jour par rapport au travail bibliographique réalisé dans le cadre du DEA (COLINET, 1999b).

d'organisation, généralement l'horizon ou le solum, sur lesquels les mesures sont réalisées.

Un individu de référence, un solum par exemple, peut être choisi de manière empirique, par l'auteur d'un inventaire cartographique, ou sur une base statistique. Le défaut principal de la première approche est lié au risque que le solum retenu soit ce que LEGROS (1996) nomme *un « beau » solum*, et non un *solum commun*. Les individus-types obtenus par une approche statistique sont des individus moyens qui ne correspondent pas obligatoirement à un individu réellement observé mais qui sont représentatifs d'un ensemble d'individus réels.

Le terme *classification* rassemble un ensemble de techniques qui permettent de regrouper des individus sur base de classes. Le *classement* est une opération d'affectation d'un individu à une classe existante (KING, 1986). Lorsque les individus doivent être classés sur base de plusieurs critères, le classement est souvent fondé sur la ressemblance entre individus. Certaines classifications numériques sont également basées sur cette notion. La ressemblance entre deux individus ou la comparaison d'un individu à une référence relève en statistiques d'une analyse de similarité.

Ces notions, importantes pour estimer la représentativité des références, sont rappelées dans les titres suivants, d'après BURROUGH (1986), KING (1986), GIRARD et KING (1988), WEBSTER et OLIVER (1990), ROBBEZ-MASSON (1994), LEGROS (1996).

4.3.2 Ressemblance entre individus ou similarité

Pour évaluer la ressemblance entre deux individus, *i.e.* leur similarité, il existe des outils qui seront différents selon, comme le rappelle LEGROS (1996), la nature des caractères sur lesquels l'évaluation va porter.

Ainsi, la ressemblance entre deux individus sur base de critères quantitatifs est évaluée par l'inverse de leur distance mathématique. Divers types de distance sont utilisées en pédologie.

- La distance euclidienne²⁸: $d_{ij} = \sqrt{\{\sum_{k=1}^m (X_{ik} - X_{jk})^2\}}$
où X est la valeur de la propriété k aux points i et j.

²⁸ La distance euclidienne entre deux individus décrits par un seul caractère se simplifie: $d(i,j) = (X_i - X_j)^2 / \sigma_X$ où σ_X , l'écart type du caractère X dans la population d'où i et j sont extraits, permet de rendre la distance adimensionnelle (LEGROS, 1996).

Le défaut de la distance euclidienne d'être sensible aux unités de mesure peut être corrigé (i) en divisant les valeurs par les écarts types des variables (WEBSTER et OLIVER, 1990) -on parle alors de distance de PEARSON- ou (ii) en transformant les variables en leurs composantes principales (BURROUGH, 1986). *L'élévation au carré donnerait toutefois plus de poids à de grandes différences entre quelques variables qu'à de petites différences entre un très grand nombre de variables* (GIRARD et KING, 1988).

- La distance de Manhattan (ou *City-block metric* ou métrique L_1):

$$d_{ij} = \sum_{k=1}^p |X_{ik} - X_{jk}|.$$

D'après ROBBEZ-MASSON (1994), elle serait la mieux adaptée au classement par vecteurs de composition.

D'autres indices de similarité basés sur la notion de distance s'appliquent tant aux variables quantitatives qu'aux variables qualitatives ordonnées.

- Le coefficient de similarité de Gower est donné par la relation:

$$S_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^p z_{ijk} w_{ijk}}{\sum_{k=1}^p w_{ijk}}$$

dans laquelle z_{ijk} est une valeur de comparaison du $k^{\text{ème}}$ caractère et w_{ijk} le facteur de pondération qui lui est associé. Pour des variables continues,

$$z_{ijk} = 1 - \frac{|X_{ik} - X_{jk}|}{r_k}$$

où r_k est l'amplitude du caractère²⁹.

L'indice de Gower permet de prendre en compte en même temps des variables binaires, qualitatives et quantitatives (GIRARD et KING, 1988). Pour les variables qualitatives non ordonnées, $z_{ijk}=1$ si $X_{ik} = X_{jk}$ et vaut 0 dans les autres cas. Le facteur de pondération w_{ijk} est fixé à 1 si les objets i et j peuvent être comparés pour le caractère k, à 0 si l'une des valeurs ou les deux sont manquantes ou inappropriées (WEBSTER et OLIVER, 1990).

²⁹ Pour un caractère, on retrouve la relation citée par LEGROS(1996): $d(i,j) = |X_i - X_j| / (X_{\max} - X_{\min})$.

Pour les variables qualitatives ordonnées, on peut utiliser le terme de *distance de rang*, qui sous la forme présentée par LEGROS (1996) est une adaptation de l'indice de Gower.

- La métrique de Canberra: $d_{ij} = 1/m \sum_{k=1}^m |X_{ik}-X_{jk}|/(X_{ik}+X_{jk})$ est un indice de dissimilarité compris entre 0 et 1. La ressemblance est donnée par $1-d_{ij}$. Selon WEBSTER et OLIVER (1990), son principal avantage est de ne dépendre que des individus qui sont comparés. La métrique de Canberra est appropriée pour les proportions. Toutefois, elle serait limitée aux valeurs positives et peu valide pour les échelles qui présentent un zéro arbitraire (pH, Teinte...).
- La distance généralisée de MAHALANOBIS:

$$\Delta = \sqrt{(\mathbf{m}_1 - \mathbf{m}_2)' \Sigma^{-1} (\mathbf{m}_1 - \mathbf{m}_2)}$$

où \mathbf{m}_1 et \mathbf{m}_2 correspondent aux vecteurs des moyennes des populations 1 et 2 et Σ à la matrice commune de variances et covariances (DAGNELIE, 1975).

permet de comparer des groupes d'individus et supporte les corrélations entre variables, au contraire des autres distances (BURROUGH, 1986; PALM, 2000).

Il existe encore d'autres indices de similarité qui ne seront pas abordés ici. Aucun ne revêt a priori un caractère universel, adapté à toutes les situations. Le choix d'une métrique est lié avant tout au type de variables à comparer et aux objectifs du classement.

4.3.3 Classification et classement d'objets

Classification -détermination de classes dans une population- et classement -attribution d'une classe à un objet- sont souvent intimement liés. *Le cas est fréquent en analyse des données d'une démarche mixte et itérative entre classement et classification* (DAGNELIE, 1975).

En matière de classifications statistiques, il faut distinguer celles qui se basent sur une seule variable continue et celles fondées sur une analyse multivariée.

4.3.3.1 Classifications à une variable

La classification d'une variable se résume en fait à déterminer des intervalles de classes pour "disséquer" la population statistique en un certain nombre de groupes, pas trop élevé pour que la classification soit accessible et pas trop faible pour qu'elle rende encore compte de la

distribution de la population. EVANS (1977 *In* BURROUGH, 1986) distingue des intervalles de classes (i) exogènes, *i.e.* fixés de façon universelle et indépendamment du jeu de données étudié; (ii) arbitraires, fixés sans objectif précis; (iii) idiographiques ou naturels, choisis en fonction des données; (iv) en séries, *i.e.* dont les limites sont en relations mathématiques les unes avec les autres. La question se pose souvent du choix d'intervalles de type exogène ou idiographique. Les premiers ont l'avantage de l'universalité -ils permettent les comparaisons entre des jeux de données différents. Les seconds sont les mieux adaptés au jeu de données étudié mais rendent difficiles les comparaisons avec d'autres données.

La méthode la plus couramment pratiquée pour vérifier la qualité d'une classification sur base d'intervalles exogènes est l'analyse de la variance, qui permet de déterminer la part de la variance des données "expliquée" par la classification (BURROUGH, 1986; WEBSTER et OLIVER, 1990, 2001). Le modèle d'analyse de la variance pose que:

$$Z_{ik} = \mu + \alpha_k + \varepsilon_{ik}$$

où la valeur de la variable Z au point i de la classe k est donnée par la moyenne générale μ , la différence α_k entre la moyenne générale μ et la moyenne de la classe μ_k et un terme d'erreur ε_{ik} normalement distribué de moyenne nulle et de variance σ_k^2 , soit la variance à l'intérieur de la classe k .

La meilleure classification des données est celle qui répartit la plus grande partie de la variation entre les données sur les différences entre classes, *i.e.* qui minimise l'erreur résiduelle ε_{ik} . L'*efficacité* d'une classification peut être estimée simplement³⁰ par le calcul de l'expression $1-(S_w^2/S_T^2)$ où S_w^2 estime la variance au sein des classes et S_T^2 estime la variance totale (Tableau I.24).

³⁰ WEBSTER et OLIVER (1990) proposent le coefficient de corrélation intra-classe ρ_i , défini par $\rho_i = \frac{\sigma_B^2}{\sigma_B^2 + \sigma_W^2}$ (B et W se rapportent aux variances entre classes et intra-classes, respectivement). ρ_i , moins simple à estimer, présente toutefois des valeurs similaires à $1-(S_w^2/S_T^2)$ quand les nombres d'échantillons et de groupes sont élevés.

Tableau I.25: Analyse de la variance à un critère de classification (BURROUGH, 1986)

Source de variation	DL	SCE	Carré Moyen
Entre classes (factorielle)	k-1	$SCE_b = \sum n_i(x_{i\bar{}} - \bar{x})^2$	$SCE_b/(k-1)$
Dans les classes (résiduelle)	n-k	$SCE_w = \sum \sum (x_{ik} - x_{i\bar{}})^2$	$SCE_w/(n-k) = s_w^2$
Total	n-1	$SCE_T = \sum \sum (x_{ik} - \bar{x})^2$	$SCE_T/(n-1) = s_T^2$

DL: Degré de liberté; SCE: Somme des carrés des écarts

4.3.3.2 *Classifications multi-variables*

Lorsque des objets sont décrits par plusieurs variables, il est possible d'évaluer les relations entre des couples d'individus par le biais de calculs d'indices de similarité. Mais il n'est pas possible par cette méthode d'envisager simultanément plus de deux individus. Quand les individus sont caractérisés par un grand nombre de variables, plutôt que de diviser chacune des variables en deux ou trois classes, ce qui aurait pour effet selon WEBSTER et OLIVER (1990) de rapidement créer un nombre de groupes ingérable, il peut être préférable de recourir aux techniques d'ordination pour réduire la masse d'informations.

a. Principes de l'ordination

L'ordination est un terme général pour un ensemble de techniques multifactorielles permettant de réduire un espace riche en dimensions en un autre espace à dimensions moins nombreuses (DAGNELIE, 1975b; LECOUTRE, 1998).

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une technique de réduction des données utilisée pour identifier un petit ensemble de variables qui justifient une grande partie de la variance totale des variables, quantitatives, initiales. L'ACP permet de voir s'il existe des relations entre les variables et peut être présentée soit comme *la recherche d'un ensemble réduit de variables non-correlées... résumant avec précision les données* ou comme *la recherche de sous-espaces (droite, plan,...) qui représentent au mieux le nuage de données initial* (LECOUTRE, 1998).

Des descriptions détaillées de l'ACP peuvent être trouvées chez DAGNELIE (1975b), WEBSTER et OLIVER (1990) et LECOUTRE (1998). Les principes de base sont résumés ci-après.

Les données originelles sont transformées par remplacement des variables en un système d'autres variables (les composantes principales)

orthogonales (donc indépendantes), combinaisons linéaires des premières et de variance décroissante.

$$PC_1 = \alpha_1 V_1 + \beta_1 V_2 + \gamma_1 V_3 \dots \omega_1 V_m$$

$$PC_2 = \alpha_2 V_1 + \beta_2 V_2 + \gamma_2 V_3 \dots \omega_2 V_m$$

$$PC_m = \alpha_m V_1 + \beta_m V_2 + \gamma_m V_3 \dots \omega_m V_m \quad (\text{BURROUGH, 1986})$$

où α , β , $\gamma \dots \omega$ sont les *contributions* de chaque variable initiale (V) aux composantes principales (PC).

L'ACP extrait les composantes principales à partir des matrices de corrélation ou de covariance. Les composantes sont classées par ordre décroissant de variance (*eigenvalues* ou *valeurs propres*). Ce sont donc les premières composantes qui "expliquent" la plus grande partie de la variance des données. Le terme "expliquer" n'a de sens que si les composantes principales sont susceptibles d'être interprétées physiquement. Pour cela, on examine les corrélations (ou *saturations*) entre les nouvelles et les anciennes variables, au besoin par l'intermédiaire d'une représentation graphique. Comme le rappellent WEBSTER et OLIVER (1990), les composantes principales ne sont rien d'autre que des constructions mathématiques et elles n'ont dès lors pas de signification physique directe. Il n'est donc pas acquis à l'avance que les composantes principales puissent être interprétées. Dans certains cas, une rotation des axes (varimax, quartimax...) peut apporter plus d'éclairage sur le sens à donner aux composantes principales. Les individus peuvent également être représentés dans l'espace défini par les composantes principales. Leurs coordonnées dans cet espace sont encore nommées *scores* ou *scores factorisés*.

L'analyse factorielle (AF) et l'analyse factorielle discriminante (AFD) sont deux techniques d'analyse qui peuvent se fonder sur une ACP. Dans l'analyse factorielle, on vise à extraire un nombre déterminé de facteurs qui portent un maximum de la variance des données. Les *communalités* des variables initiales correspondent à la proportion de leur variance prise en compte par l'ensemble des facteurs retenus. L'analyse factorielle discriminante vise à vérifier si des classes décrites par un caractère qualitatif sont différentes sur un ensemble de caractères quantitatifs. Il ne s'agit alors plus d'obtenir un caractère de variance maximum mais un caractère dont les valeurs soient les plus voisines possibles à l'intérieur des groupes et les plus différentes possibles entre les groupes.

Les techniques d'ordination permettent de réduire la masse de données initiale et parfois *via* des représentations graphiques de déterminer des

groupes d'individus homogènes ou des caractères quantitatifs répondant le mieux à une classification qualitative. Lorsque ces techniques ne permettent pas de distinguer des groupes homogènes, ou lorsque l'on veut réduire encore les informations en regroupant les individus en classes naturelles, il existe des outils de classification numérique.

b. Classifications numériques

Les techniques de classification numérique sont regroupées sous le terme de *cluster analysis* car elles cherchent à identifier des groupes (*clusters*) d'individus semblables entre eux et sensiblement différents de ceux des autres groupes. WEBSTER et OLIVER (1990) distinguent les classifications de type hiérarchique et celles de type non-hiéarchique.

Dans les classifications hiérarchiques, les individus appartiennent à des petits groupes, qui eux-mêmes appartiennent à des groupes plus vastes, qui eux-mêmes... Les niveaux de généralisation correspondant aux regroupements sont appelés des *catégories* et les différentes classes d'une catégorie sont normalement disjointes. La classification peut être ascendante (ou aggrégative, les individus sont regroupés progressivement) ou descendante (ou *divisive*, en groupes de plus en plus petits de la population).

Selon WEBSTER et OLIVER, les méthodes *divisives* ne sont pas satisfaisantes en sciences du sol car les risques d'hétérogénéité des groupes ou de séparation d'individus proches sont plus importants³¹. Les méthodes aggrégatives se basent sur une analyse de similarité et le calcul de matrices de distances. Elles varient selon le type de métrique utilisée et selon le mode de liaison des individus aux groupes.

La liaison simple (*single linkage* ou *nearest neighbour*) considère la distance entre deux grappes comme la distance minimum entre une observation de l'une et une observation de l'autre. Ce mode de liaison fonctionne bien quand les grappes sont distinctes mais a tendance à identifier de longues grappes en chaînes si les observations sont proches l'une de l'autre. Dans la méthode de liaison centroïde de Gower (*centroïd*), le groupe nouvellement formé devient un individu synthétique.

³¹ Parce que la fusion des groupes se réalise sur base de la similarité de l'ensemble des caractères tandis que la division des groupes est généralement fondée sur la différence de certaines variables discriminantes (WEBSTER et OLIVER, 1990).

que dont la position est définie par son centroïde. La méthode du centroïde prend en considération l'ensemble des membres du groupe mais n'est pas entièrement satisfaisante. En effet, les groupes qui possèdent le plus d'individus auront un poids plus important dans la détermination de la position du centroïde. Pour éviter que des groupes soient sous-représentés, on peut recourir à la méthode de la médiane (*median* ou *weighted centroïd*). Citons encore les méthodes de la moyenne (*group-average*) qui considèrent la distance moyenne entre les éléments d'un groupe et ceux de l'autre, les méthodes complètes (*complete linkage*) qui retiennent la distance maximum entre les éléments des deux groupes et les méthodes de Ward qui visent à minimiser la somme des carrés des écarts entre les éléments des groupes et leurs centroïdes. Les différentes étapes de la fusion des groupes peuvent être représentées par un dendrogramme (figure I.21).

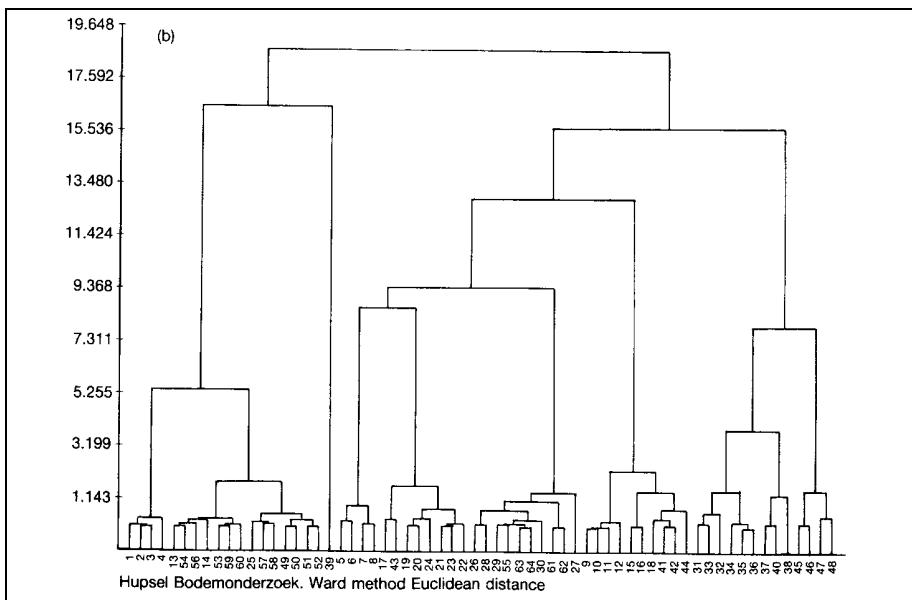


Figure I. 21: Exemple de dendrogramme représentant la structure du regroupement des individus(BURROUGH, 1986).

Il n'existe pas de règles infaillibles pour décider quelle mesure de distance et quelle méthode de liaison utiliser et deux méthodes différentes peuvent donner les mêmes résultats ou des résultats tout-à-fait différents en fonction de la structure des données. La seule façon *sûre* de pratiquer est de réaliser l'analyse par plusieurs méthodes et d'en comparer les résultats (WEBSTER et OLIVER, 1990).

Lorsque les données à classer ne présentent pas réellement de structure

hiérarchique, les méthodes de classification non-hiérarchisées peuvent se révéler plus appropriées. Ici les individus sont classés de telle façon qu'ils appartiennent à un et un seul groupe. Cela revient généralement à créer des classes à l'intérieur desquelles la variation est minimale et entre lesquelles les différences sont maximales. La méthode générale de classification non-hiérarchisée est encore appellée méthode des nuées dynamiques (*dynamic clustering*).

Les travaux de GIRARD et KING (GIRARD, 1983 et 1984 In KING, 1986; GIRARD et KING, 1988), axés sur la recherche *d'une méthode statistique adaptée aux contraintes d'étude de la couverture pédologique* (GIRARD et KING, 1988), ont abouti à la mise au point d'un algorithme de classification des horizons (DIMITRI - distance minimum de tri) fondé sur le principe des nuées dynamiques. Le processus de classification est décrit comme suit:

On choisit³² un certain nombre d'individus-type: les noyaux. Chaque individu est regroupé avec le noyau dont il est le plus proche. Si les individus-type correspondent à des références non remises en question on obtient un classement des individus. Par contre, si l'on se pose la question de la pertinence des noyaux, on ne peut pas s'arrêter là. On continue la démarche en redéfinissant chaque noyau à partir de la population statistique définie dans l'étape précédente. En continuant ainsi, jusqu'à ce que l'on obtienne une stabilité pour chaque noyau, on obtient une classification.

La procédure classification-classement est donc une question de choix du codage des variables, des noyaux initiaux et de la métrique de distance. La qualité de la méthode retenue peut être jugée par des critères de compacité des groupes (WEBSTER et OLIVER, 1990).

Les classifications non-hiérarchisées ont un avantage sur les hiérarchisées: les individus ne sont pas assignés de manière irrévocable à un groupe et de nouveaux individus peuvent être ajoutés aux groupes selon le même principe, ce qui est impossible avec une classification hiérarchisée.

³² Le choix initial des noyaux peut être effectué aléatoirement, selon une classification hiérarchique sur un sous-ensemble d'individus ou encore de manière empirique par le pédologue en fonction de ses observations de terrain ou de références régionales, nationales ou internationales déjà acquises (GIRARD et KING, 1988).

4.3.4 Conclusions

Les techniques abordées sous le titre 3.3 concernent essentiellement la détermination de références en tant qu'objets représentatifs d'un ou plusieurs groupes d'autres objets. Ces méthodes peuvent s'appliquer à des objets pédologiques caractérisés par leur contenu (références de constitution), et leur contenant (références d'organisation ou de représentativité spatiale). Ces références sont des références typologiques, elles permettent de situer des individus par rapport à des individus-type. D'autres types de références peuvent être acquises par observation ou mesure de processus; ce sont alors des références fonctionnelles acquises pour des individus dont on peut évaluer la ressemblance à un individu-type. Elles peuvent traduire un fonctionnement -on détermine par exemple que tel groupe d'horizons présente les mêmes comportements hydrodynamiques- ou encore une limite normative -"teneur acceptable", valeur d'intervention...³³-. Les mesures de processus étant souvent plus difficiles d'accès, les références fonctionnelles peuvent dans les limites de la régression être estimées via des règles de pédotransfert.

Les relations entre contenu et fonctionnement étant établies, ce sont les références typologiques qui permettent de spatialiser les références fonctionnelles.

L'analyse multivariable et les classifications numériques ne constituent pas des outils-miracle qui permettraient d'obtenir toutes les réponses à un problème par le seul jeu de calculs de moyennes, de corrélations et de distances mathématiques. Elles permettent de réduire les données et de formaliser des relations mais elles ne remplaceront jamais l'interprétation des mesures. La détermination des horizons et des relations entre ces horizons, par exemple, fera toujours appel à des observations et des mesures de terrain et en laboratoire.

Gardons le mot de la fin pour WEBSTER et OLIVER (1990): « It is best to regard the use of both³⁴ sets of techniques as voyages of discovery rather than as scheduled sailings with assured destinations. ».

³³ Il ne s'agit plus ici, à proprement parler, de références fonctionnelles mais de références normatives.

³⁴ ordination et classification numérique.

4.4 A propos des techniques d'interpolation et de prédiction

La prédiction de propriétés en des points de l'espace non-investigus se base sur l'exploitation d'une information existante. Deux grands groupes de techniques co-existent, celles fondées sur des systèmes typologiques et celles fondées sur l'interpolation à partir de mesures ou d'observations ponctuelles.

Lorsque l'information est présentée sous forme d'une carte choroplète³⁵, comme c'est le plus souvent le cas pour les cartes des sols, nous ignorons les variations à l'intérieur des polygones élémentaires. Pour prédire la valeur d'une propriété en un point non-échantillonné, on se référera alors à la valeur représentative du polygone qui contient ce point.

L'interpolation spatiale rassemble un ensemble de procédures permettant d'estimer la valeur d'une propriété en un site non-visité à l'intérieur de l'aire sur laquelle on dispose de points d'observations³⁶. L'extrapolation est une estimation d'une ou plusieurs propriétés en des sites non-visités à l'extérieur de l'aire couverte par les observations. L'esprit de l'interpolation et l'extrapolation se base sur l'observation qu'en moyenne les points les plus proches sont plus susceptibles de présenter des propriétés similaires que les points les plus éloignés (BURROUGH, 1986).

WEBSTER et OLIVER (2001) fournissent une équation générale pour la prédiction spatiale linéaire:

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i)$$

où x_0 est le point ciblé, les valeurs $z(x_i)$, $i = 1$ à n
sont les valeurs mesurées et λ_i les poids qui leur sont affectés.

Les spécificités de chaque méthode résident en fait dans la manière de répartir les poids (λ_i) entre les sources d'information. Ceci sera illustré dans les titres 3.4.1 et 3.4.2.

³⁵ Le terme « choroplète » au sens utilisé par BURROUGH (1986) s'applique aux cartes structurant les informations sous forme de surfaces d'égale valeur délimitées par des frontières franches.

³⁶ à l'intérieur du polygone convexe, obtenu en reliant les points extérieurs du domaine étudié (BOGAERT, 2000).

4.4.1 Prédiction spatiale et cartes des sols

Si la région étudiée R est classée en K unités de sols, pour chaque classe la valeur de Z en un point x_i peut être exprimée par:

$Z_{ik} = \mu + \alpha_k + \varepsilon_{ik}$ où μ est la moyenne générale, α_k la différence entre μ et la moyenne de la classe k (μ_k) et ε_{ik} un facteur aléatoire de moyenne nulle et de variance σ^2_k (= variance intra-classe).

En l'absence d'autre information, μ_k est le meilleur prédicteur de z pour tout point appartenant à la classe k.

$$z^*(x_0) = \hat{\mu}_k = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \text{ où } \lambda_i = \begin{cases} 1/n_k & \text{si classe k} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

La variance de prédiction correspond à l'espérance mathématique de la SCE entre valeurs vraies et valeurs prédites et est estimée par:

$$\sum_{k=1}^K A_k \hat{\sigma}_k^2 (1 + 1/n_k),$$

où A_k est la surface relative (par rapport à R) de la classe k (WEBSTER et OLIVER, 2001).

4.4.2 Principales méthodes d'interpolation spatiale

(*d'après BURROUGH, 1986; GOEVAERTS, 1999; BOGAERT, 2000; WEBSTER et OLIVER, 2001*)

4.4.2.1 Interpolations par limites nettes.

La polygonation de THIESSEN (ou de VORONOI, de DIRICHLET, *nearest neighbour* - figure I.22) est une méthode qui attribue à un point la valeur du point observé le plus proche, *i.e.:*

$$\lambda_i = \begin{cases} 1 & \text{si } x_i \in \text{voisinage} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Les inconvénients sont que (i) en fonction de l'échantillonnage, les polygones peuvent avoir des formes étranges, (ii) la valeur du polygone est estimée par un échantillon d'un seul individu, ce qui ne fournit aucune indication sur la variance de prédiction et (iii) la valeur d'un point non-échantillonné dépend uniquement de son appartenance à un polygone et on perd l'aspect selon lequel des points voisins ont des valeurs plus proches que des points éloignés.

Les avantages sont la simplicité de mise en oeuvre, principalement pour les variables qualitatives.

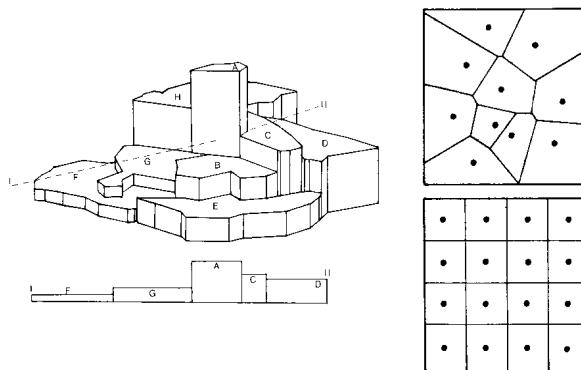


Figure I.52: Modèle de variation par palier (gauche); polygonations de THIESSEN (droite) (BURROUGH, 1986).

Cette technique conduit donc à un modèle en paliers qui ne convient pas pour exprimer des changements graduels (figure I.22).

4.4.2.2 Interpolations par changements graduels

Les changements spatiaux continus sont modélisés par des surfaces mathématiques. Ces méthodes peuvent être divisées en techniques universelles (ou globales) et techniques locales.

a. Méthodes globales

Les méthodes globales modélisent une surface à partir de toutes les observations réalisées dans l'aire d'étude. Les spécificités locales ne ressortant pas, ces techniques sont généralement utilisées pour modéliser des variations sur une large étendue.

La méthode dite *trend surface* consiste à construire par régression polynomiale une surface qui minimise les carrés des écarts entre valeurs observées et estimées. Les prédicteurs sont les coordonnées spatiales, ainsi:

$$z(x, y) = f(x, y) + \varepsilon.$$

Le terme d'erreur ε est de moyenne nulle et de variance σ^2_ε .

A deux dimensions (X et Y), les polynômes sont des surfaces dont les trois premiers ordres sont:

b_0 ,soit un plan horizontal,

$b_0 + b_1.x + b_2.y$,soit un plan incliné,

$$b_0 + b_1.x + b_2.y + b_3.x^2 + b_4.x.y + b_5.y^2$$

, soit une surface quadratique (figure I.23).

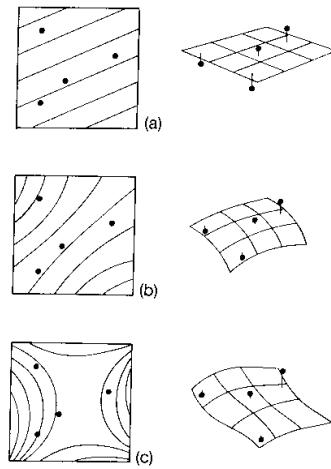


Figure I.63: Trend surfaces en deux dimensions spatiales (a) linéaire, (b) quadratique, (c) cubique (BURROUGH, 1986)

La valeur prédictée en un point x_0 non-investigué est:

$$z^*(x_0) = x_0 \mathbf{b} \quad \text{où } \mathbf{b} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{z}, \text{ i.e.}$$

le vecteur des coefficients b est obtenu par multiplication matricielle à partir des matrices de coordonnées des points (\mathbf{X}) et de valeurs observées (\mathbf{z}).

L'avantage de la méthode est qu'elle est relativement simple à comprendre. L'allure des données peut être grossièrement décrite par les modèles d'ordres les plus bas. Toutefois, selon WEBSTER et OLIVER (2001), la complexité de la variation spatiale dans les sols requiert une modélisation par des polynômes de très grand ordre. En outre, les méthodes polynomiales sont des fonctions de lissage qui passent rarement exactement sur les points d'observation et elles sont très sensibles aux *outliers* (BURROUGH, 1986). Un autre inconvénient des *trend surfaces* est l'autocorrélation des résidus de la régression qui empêche l'évaluation de la variance d'estimation de manière classique (WEBSTER et OLIVER, 2001).

Cette technique est principalement utilisée pour l'identification des tendances régionales. La signification statistique de ce type de surface peut

d'ailleurs être testée par une analyse de la variance, qui décomposerait celle-ci entre la tendance régionale et les résidus.

b. Méthodes locales

Les techniques locales estiment les valeurs à partir du voisinage du point. On peut dès lors prendre en compte des anomalies locales sans que cela n'interfère sur les autres points de la surface.

b.i Fonctions *spline*

Les fonctions *spline* sont des fonctions qui ajustent des surfaces de courbure minimum aux points d'entrée, à la manière de rubans en caoutchouc (ESRI, 1996). Les valeurs des points observés sont ajustées exactement et la surface entre ces points est continue. Il est donc possible de modifier une partie de la surface sans que cela n'en influence le reste. Ces fonctions polynomiales conviennent bien pour des surfaces *mollement* ondulées, moins pour des surfaces accidentées.

b.ii Moyennes mobiles

Une des méthodes les plus communes d'interpolation consiste à attribuer à un point la valeur moyenne des points compris à l'intérieur d'une fenêtre mobile, *i.e.* le voisinage local du point (V). La forme la plus simple est la suivante:

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \text{ où } \lambda_i = \begin{cases} 1/n & \text{si } x_i \in V \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Toutefois, cette façon de procéder donne autant de poids aux n points du voisinage quelle que soit la distance par rapport au point estimé. Pour pallier à cet inconvénient, il est possible d'attribuer une pondération à chacun des points en fonction de leur distance. Les moyennes mobiles pondérées selon des fonctions inverses de la distance prennent une forme du genre:

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \text{ où } \lambda_i = \begin{cases} 1/|x_i - x_0|^\beta & \text{si } x_i \in V \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \text{ avec } \beta > 0.$$

Les résultats de l'interpolation par moyennes mobiles dépendent de la fonction de pondération utilisée et de la taille de la fenêtre considérée. Les moyennes mobiles pondérées sont plus stables en fonction de la taille du voisinage que les moyennes mobiles (BOGAERT, 2000). Dans tous les cas, ces méthodes ayant des propriétés de lissage, les valeurs interpolées ne constitueront jamais des maxima ou des minima; elles seront toujours comprises entre les valeurs de deux points observés. Les

fonctions "distance inverse" sont toutefois des interpolateurs exacts, *i.e.* valeurs mesurées et prédites sont identiques aux points de mesure.

b.iii Interpolation optimale

Les techniques précédentes, quoi que satisfaisantes dans certains cas, suscitent quelques interrogations relatives à la taille et la forme à attribuer aux fenêtres de voisinage, aux fonctions de pondération à utiliser et aux incertitudes associées aux valeurs interpolées.

C'est pourquoi se développent des méthodes d'interpolation qualifiées d'"optimales"³⁷, introduites à l'origine par MATHERON et KRIGE pour des applications minières. Ces méthodes, qui relèvent de la géostatistique, reposent sur la reconnaissance que les variations de toute propriété géologique, pédologique ou hydrologique, encore nommées "variables régionalisées", sont trop irrégulières pour être modélisées par des fonctions de lissage mathématiques et seraient mieux décrites par des surfaces stochastiques (BURROUGH, 1986).

L'interpolation procède en trois phases, l'analyse de la variabilité spatiale, sa modélisation et l'interpolation proprement-dite ou krigeage.

b.iii.a *Analyse de la variabilité spatiale*

La théorie des variables régionalisées suppose que la variation spatiale d'une propriété peut être décomposée en une composante structurale, ou déterministe, associée à une moyenne ou une tendance constante et une composante aléatoire dont une partie est spatialement corrélée (figure I.24). Ce qui peut se traduire par l'équation:

$$Z(x_i) = \mu(x_i) + \varepsilon'(x_i) + \varepsilon''$$

où $Z(x_i)$ est la valeur de la propriété Z au point x_i , $\mu(x_i)$ une fonction décrivant la composante structurale, $\varepsilon'(x_i)$ le terme spatial de la variation stochastique locale et ε'' le terme résiduel.

³⁷ La méthode est optimale dans le sens que les pondérations λ_i sont choisies de manière à obtenir le meilleur estimateur (*Best Linear Unbiased Estimate- BLUE*) de la valeur d'une variable en un point.

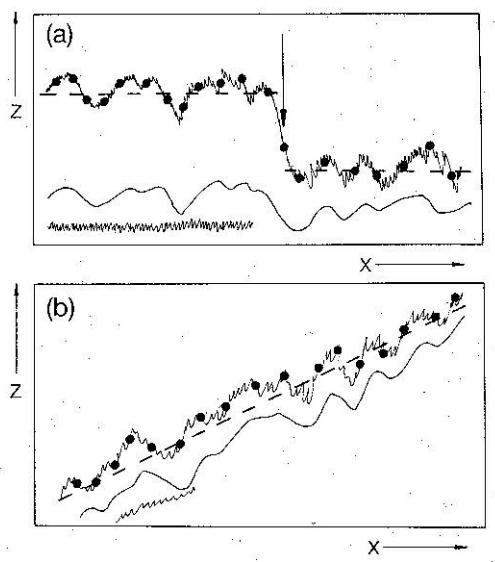


Figure I. 74: Composantes de la variation spatiale d'une propriété (BURROUGH, 1986). Les cercles noirs représentent les valeurs mesurées sur les sites échantillonnés, les lignes tiretées les composantes structurelles; les lignes ondulées représentent les composantes aléatoires spatiale (basse fréquence) et résiduelle (haute fréquence).

Dans un cadre probabiliste, les valeurs mesurées $Z(x_i)$ correspondent à une réalisation d'un processus aléatoire, modélisable par une fonction aléatoire.

L'hypothèse *d'ergodicité* implique que l'unique réalisation d'un phénomène, connue par les données de terrain, se comporte dans l'espace comme l'ensemble des réalisations du phénomène (DEMOUGEOT-RENARD et de FOUQUET, 2001). Ceci signifie que l'image à un instant t est représentative des relations ou des différences existants entre les différents points de mesure.

La composante structurale de la variation s'approche par régression. On peut alors écrire (BOGAERT, 2000):

$$Z(x_i) = X_i\beta + \varepsilon(x_i) \quad \forall i = 1, \dots, n^{38}$$

où $X_i\beta$ représente la composante déterministe de la variabilité (combinaison des coordonnées et des coefficients de régression) et $\varepsilon(x_i)$ la composante stochastique.

Deux conditions, ou *hypothèses de stationnarité*, sont requises pour

³⁸ La composante aléatoire de la variation est ici traitée comme un tout.

l'application de la théorie des variables régionalisées. La première est liée au concept de stationnarité de la moyenne. Celui-ci implique que l'espérance mathématique d'une variable Z au point x_i est constante et ne dépend pas de la position de x_i . Ce qui peut être exprimé par:

$$E[Z(x_i)] = \mu = E[Z(x_i) - Z(x_i + h)] \quad \forall h, x_i$$

La seconde hypothèse est que la covariance, ou dépendance linéaire, entre les variables $Z(x_i)$ et $Z(x_i + h)$ ne dépend que de h , *i.e.* de la position relative des points, il s'agit de la stationnarité de la variance.

$$\text{Cov}[Z(x_i), Z(x_i + h)] = C(h) \quad \forall h, x_i$$

Ces conditions étant parfois difficiles à vérifier, *l'hypothèse intrinsèque* constitue un cadre de travail moins contraignant. Il ne suppose la stationnarité que pour les différences entre $Z(x_i)$ et $Z(x_i + h)$; *i.e.* on peut attendre le même niveau de différence entre deux points situés à une distance h .

Les deux principes s'écrivent alors:

$$E[Z(x_i) - Z(x_i + h)] = 0 \text{ et}$$

$$E[\{Z(x_i) - Z(x_i + h)\}^2] = 2\gamma(h),$$

où $\gamma(h)$ est une fonction connue sous le nom de semi-variance.

Si les conditions de stationnarité des différences sont respectées, la semi-variance peut être estimée à partir des points observés:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \{z(x_i) - z(x_i + h)\}^2$$

où n est le nombre de paires de points situés à la distance h .

Le semi-variogramme est une représentation graphique de la relation entre la semi-variance et h (figure I.25a). La semi-variance est une fonction croissante de h , à l'inverse de la covariance. Le semi-variogramme est plus général que la fonction de covariance et il ne nécessite pas l'estimation de la moyenne (BOGAERT, 2000).

Le semi-variogramme est généralement caractérisé par la portée (*range*), *i.e.* la distance à partir de laquelle il n'y a plus de liaison entre les valeurs des points, et par le palier (*sill*) correspondant à la valeur maximale de la semi-variance (figure I.25b). Le palier correspond à la variance de la population, la portée à la distance limite d'autocorrélation spatiale.

Deux points confondus sont théoriquement caractérisés par les mêmes propriétés et la courbe du semi-variogramme devrait passer par l'origine du système d'axes. Toutefois, il fréquent que l'hétérogénéité à très courte distance soit importante. Cet "effet pépite" (*nugget variance* - figure I.25c et d) correspond à une semi-variance positive pour $h=0$. L'effet pépite contient la variabilité due aux erreurs de mesure, mais également et surtout la variabilité spatiale sur des distances inférieures au pas (*lag*) le plus petit.³⁹

Si la fonction de semi-variance augmente apparemment indéfiniment avec la distance (*unbounded variogram*, figure I.25e), la condition de stationnarité d'ordre 2 (*i.e.* de la variance) n'est pas satisfaite.

Dans certains cas, le variogramme peut présenter un *maximum⁴⁰ local* suivi d'*un minimum local* (figure I.25f). Ceci peut se produire en cas de données structurées avec des fluctuations régulières.

La variation spatiale n'est pas forcément isotrope. Si l'anisotropie géométrique -différences de portées selon les directions considérées- se corrige par transformation des coordonnées spatiales, l'anisotropie zonale -différences de paliers- est plus difficile à soigner.

³⁹ Le meilleur moyen pour affiner le semi-variogramme est alors de densifier l'échantillonnage.

⁴⁰ En terme de covariance, on parle de trou (*hole*).

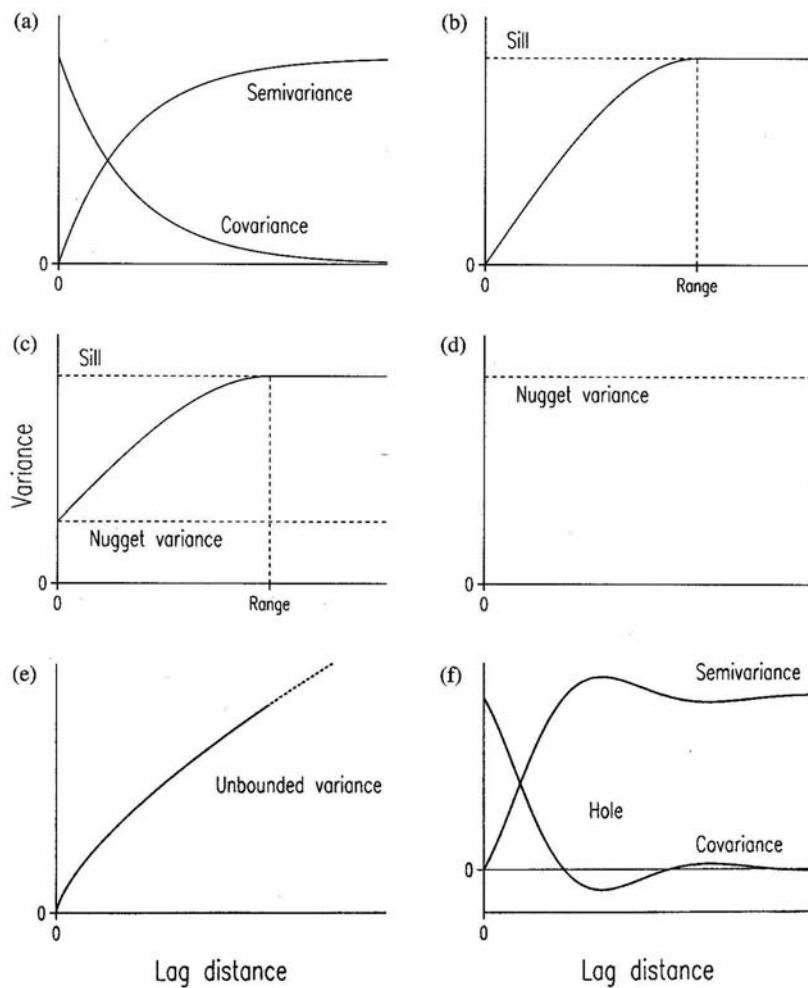


Figure I. 85:Formes typiques de semi-variogrammes (WEBSTER and OLIVER, 2001).

Les surfaces variographiques (figure I.26) sont des représentations de la variance sur un plan formé par deux axes X et Y perpendiculaires. Elles permettent de rapidement juger de la présence/absence de structure spatiale et d'évaluer le caractère isotropique de la relation $\gamma(h) - h$.

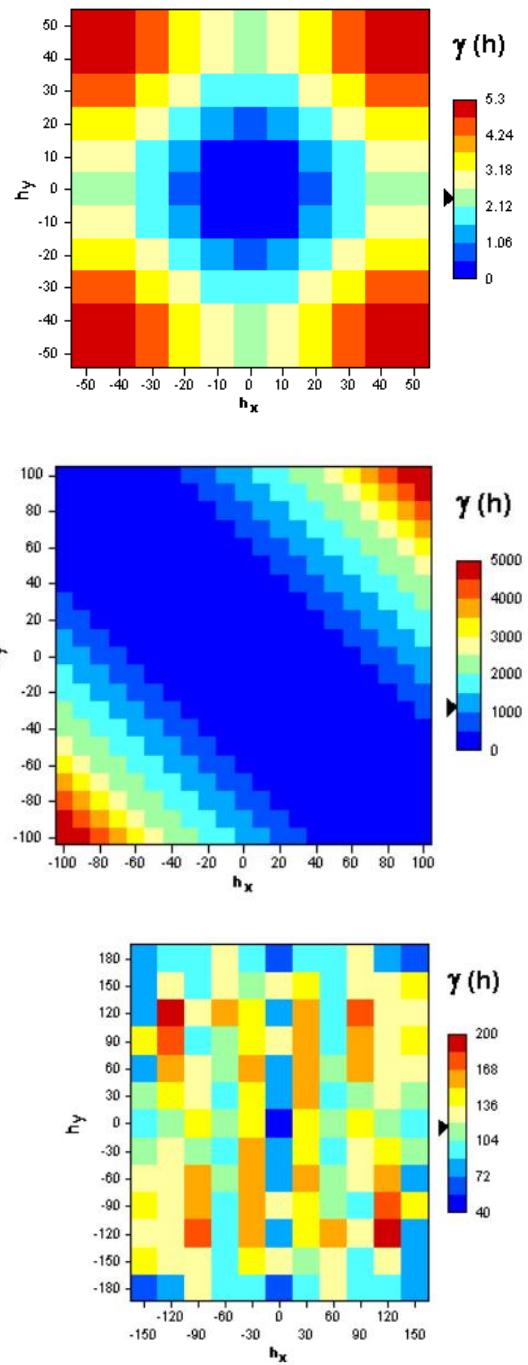


Figure I. 96: Exemples de surfaces variographiques: structure spatiale isotropique (haut), anisotropique (milieu) et absence de structure spatiale (bas).

b.iii.b Modélisation du variogramme

La modélisation de la semi-variance consiste à ajuster aux données observées du semi-variogramme une courbe théorique. Les modèles les plus courants sont:

- le modèle sphérique:

$$\begin{aligned}\gamma(h) &= c_0 + c_1 \{3h/2a - 1/2*(h/a)^3\} && \text{pour } 0 < h < a \\ &= c_0 + c_1 && \text{pour } h > a \\ \gamma(0) &= 0\end{aligned}$$

où a est la portée, h le pas, c_0 l'effet pépite et $c_0 + c_1$ est le palier; les valeurs de ces paramètres peuvent être estimées par méthode des moindres carrés pondérés ou par le maximum de vraisemblance;

- le modèle exponentiel:

$$\gamma(h) = c_0 + c_1 \{1 - \exp(-h/a)\};$$

- le modèle linéaire

$$\gamma(h) = c_0 + bh$$

où b est la pente de la droite; les modèles linéaires sont utilisés quand il ne semble pas y avoir de palier ou quand l'ampleur de la portée excède largement les distances d'interpolation.

D'autres modèles sont décrits par WEBSTER et OLIVER (1990), notamment.

Parfois, l'effet pépite est tellement important qu'il ne semble pas y avoir de tendance à l'augmentation de la semi-variance avec la distance. Dans ces cas, il vaut mieux ne pas appliquer de modèle d'interpolation.

b.iii.c Interpolation

Les variogrammes modélisés peuvent être utilisés pour l'interpolation. La procédure de krigeage est similaire à celle des moyennes mobiles pondérées excepté que les pondérations ne proviennent pas de fonctions déterministes mais d'une analyse géostatistique.

Dans la relation $[z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i)]$, les pondérations λ_i sont choisies pour que la valeur estimée $z^*(x_0)$ ne soit pas biaisée et que la variance sur l'estimation soit minimum.

Le krigage est un interpolateur exact (les valeurs interpolées coïncident avec les valeurs mesurées aux points observés). La cartographie des valeurs interpolées va fournir une grille de points (ou de cellules⁴¹) à résolution plus fine que la grille⁴² d'échantillonnage.

En outre, l'erreur sur l'estimation peut également être cartographiée et fournir une information précieuse sur la qualité des valeurs interpolées.

b.iii.d Types particuliers de krigage

Le krigeage universel est une technique adaptée aux données qui présentent des tendances locales⁴³ (augmentation ou diminution systématique d'une variable régionalisée dans une direction particulière) bien définies comme des toits de nappes souterraines ou des reliefs doux. L'intérêt de la technique serait moins grand pour les propriétés des sols, qui présentent souvent des erreurs résiduelles importantes. Le principe du krigage universel repose sur l'estimation d'une tendance locale, ou dérive (*drift*), au point x, le choix d'un modèle de semi-variogramme, souvent linéaire, pour les résidus et l'estimation de la taille du voisinage à considérer.

Dans certains cas, des données supplémentaires (soit plus abondantes que celles étudiées ou plus faciles d'accès, voire simplement d'autres mesures réalisées sur les mêmes échantillons) peuvent être utilisées pour améliorer les prédictions spatiales. Ces données, qualifiées de secondaires, sont supposées corrélées aux données primaires. La technique la plus appropriée est alors le cokrigage qui modélise non seulement les variogrammes des données primaires et secondaires mais également les variogrammes croisés entre ces données (SHIBLI, 1999).

A titre d'exemple, WEBSTER et al. (1994) ont analysé la variabilité spatiale des teneurs en 7 éléments-traces dans une région du Jura

⁴¹ Le krigage par blocs de plusieurs points moyenne la valeur de Z sur ces points, ce qui permet d'éviter les effets de pics du krigage par points dus à la forte variabilité à courte distance (effet pépite) (BURROUGH, 1986).

⁴² Si tant est que ce fut une grille, car d'autres schémas d'échantillonnage sont possibles.

⁴³ Dans le cas de l'existence d'une tendance générale sur l'ensemble de la zone étudiée, la composante structurale est modélisable par une surface polynomiale ou par un ensemble de moyennes de classes. Le variogramme est alors réalisé à partir des données après soustraction de la tendance.

suisse. L'analyse des variogrammes a notamment permis de distinguer deux groupes de comportements spatiaux. Le cobalt et le nickel présentaient des variogrammes caractérisés par une augmentation régulière de la semivariance jusqu'à la portée (1km environ), tandis celle des autres éléments augmentait rapidement jusqu'à deux cent mètres et lentement ensuite. Les variogrammes croisés présentaient la même configuration de structure spatiale bscalaire. La corégionalisation des variables a été modélisée par combinaison linéaire de deux modèles sphériques (pour traduire les courte et longue portées) et de l'effet pépite. La comparaison de la corégionalisation des variables avec les informations relatives à la géologie et à l'occupation des sols a permis de suspecter une origine géochimique à la structure spatiale de longue portée. Par contre, les variations à courte portée n'ont pu être clairement explicitées par cette approche.

Les principes du krigeage d'indicatrices peuvent être résumés comme suit. Soit une propriété Z disséquée en deux classes dont les valeurs sont soit inférieures soit supérieures ou égales à Z_c (pour *cut-off*). Si l'on attribue la valeur 1 aux points où $Z \leq Z_c$ et la valeur 0 aux points où $Z > Z_c$, on crée une variable disjointe, ou fonction indicatrice⁴⁴.

Une telle fonction indicatrice présente l'intérêt que son espérance est égale à la probabilité que $Z(x)$ soit inférieure ou égale à Z_c :

$$E[I(x, Z_c)] = P[Z(x) \leq Z_c].$$

Les étapes de la mise œuvre d'un krigeage disjonctif sont (i) le choix des différentes valeurs-seuils (valeurs représentatives de l'histogramme de la propriété ou seuils de toxicité); (ii) le calcul du variogramme; (iii) l'estimation spatiale de la fonction indicatrice I pour chacune des valeurs-seuils retenues par modélisation du variogramme et krigeage linéaire; (iv) l'estimation de la valeur de Z en tout point soit par calcul de l'espérance de la valeur de la propriété, soit par le maximum de probabilité.

Le krigeage d'indicatrices a également été utilisé pour l'interpolation de variables de type catégoriel (BIERKENS et BURROUGH, 1993; WALTER, 1993).

⁴⁴ D'où le nom krigeage d'indicatrices parfois utilisé pour le krigeage disjonctif.

4.4.3 Conclusions

Les cartes mettent en évidence les composantes spatiales importantes des phénomènes étudiés et jouent de ce fait un rôle important dans la représentation de la variabilité spatiale des propriétés du continuum pédologique.

Les méthodes d'interpolation s'appliquent à des ensembles de données ponctuelles. Ces méthodes sont variées et leur choix doit se fonder sur le type de données à interpoler, les résultats attendus et les limitations ou les exigences de la méthode.

BURROUGH (1986) a comparé les principales méthodes d'interpolation en usage. Quoique les recherches en matière d'application à la Science du sol aient continué de progresser (particulièrement celles portant autour du krigage), il existait déjà, il y a vingt ans, une grande variété de méthodes toutes plus ou moins adaptées à un contexte de données différent. C'est là probablement le plus gros avantage des méthodes d'interpolation; pour chaque situation il existe une méthode capable de donner des résultats.

LEGROS (1996) voit plusieurs limites au recours à la géostatistique: (i) elle suppose réalisées les différentes hypothèses, ce qui n'est pas toujours évident (les méthodes sont toutefois assez robustes par rapport aux hypothèses intrinsèques); (ii) elle s'applique mal aux cas des discontinuités brutales (il est néanmoins possible de soustraire les moyennes de part et d'autre de ces discontinuités brutales); (iii) elle est lourde d'emploi (au moins 150 à 200 points d'observations et largeur et longueur du périmètre étudié représentant chacune 2 à 3 fois la portée); (iv) elle s'applique surtout à des variables quantitatives (il existe toutefois des méthodes adaptées aux variables qualitatives); enfin, "il serait naïf de croire qu'elle puisse, en toutes circonstances, fournir des résultats aussi bons que ceux du cartographe utilisant en plus de ses sondages, les caractères de l'environnement, sa connaissance des lois de la pédologie, son expérience du milieu et ses photographies aériennes".

LEGROS (1996) reconnaît toutefois à la géostatistique son caractère utile pour les applications à grande échelle et cite parmi les domaines dans lesquels la géostatistique pourrait apporter un plus: la classification et l'analyse structurale -pour rendre objectives les interpolations entre les observations faites selon des verticales et reconstituer ainsi l'exakte position des volumes pédologiques dans l'espace. Certaines recherches s'orientent actuellement sur les combinaisons

d'approches afin d'en tirer de chacune les avantages. Ces approches combinées visent généralement à intégrer l'information de cartes (pédologiques, lithologiques...) existantes (soft data) à des données ponctuelles observées (hard data) -STEIN et al.,1988; BIERKENS et BURROUGH, 1993; GASCUEL-ODOUX et al., 1993; GOOVAERTS et JOURNEL, 1995; VOLTZ et al., 1997... Parmi ces approches, citons celle fondée sur le maximum d'entropie bayesien (BME), BOGAERT et D'OR (2002), D'OR et BOGAERT(2003). On voit ainsi se développer de nouvelles applications aux techniques d'interpolation et de prédiction des propriétés des couvertures pédo-logiques.

COMMUNAUTE FRANCAISE DE BELGIQUE
FACULTE UNIVERSITAIRE DES SCIENCES AGRONOMIQUES DE GEMBLOUX

**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

Deuxième partie – Etude des matériaux parentaux

Promoteur : Pr. L. BOCK

2003

Deuxième partie
Etude des matériaux parentaux

Liste des figures

Deuxième partie

Figure II.1:	Zones de minéralisations en Région limoneuse	122
Figure II.2:	Situation des points de prélèvements de l'inventaire MARTIN-SONDAG....	123
Figure II.3:	Premier plan factoriel relatif à l'inventaire MARTIN-SONDAG.	124
Figure II.4:	Zonage géographique des données de l'inventaire MARTIN-SONDAG	125
Figure II.5:	Classification hiérarchisée des variables de l'inventaire MARTIN-SONDAG	126
Figure II.6:	Teneurs moyennes en éléments totaux par familles lithologiques	129
Figure II.7:	Représentation schématique d'une coupe dans les limons quaternaires de Moyenne Belgique.....	131
Figure II.8:	Plan de situation de la coupe de Tongrinne.....	129
Figure II.9:	Vue de la coupe de Tongrinne et localisation des horizons identifiés.....	135
Figure II.10:	Rapports Al/Fe et Mg/K - coupe de Tongrinne.....	145
Figure II.11:	Relations entre les éléments sur base des coefficients de corrélation.....	149
Figure II.12:	Comparaison des teneurs en Mg, Cu, Ni, Argile, TRB et Mn dans la coupe de Tongrinne.....	150
Figure II.13:	Position des variables sur le plan factoriel principal de la coupe	152
Figure II.14:	Position des échantillons de la coupe sur le plan factoriel principal.	152
Figure II.15:	Classification hiérarchique ascendante des horizons de la coupe.....	153
Figure II.16:	Localisation des coupes quaternaires	158
Figure II.17:	Relation CEC - teneur en argile pour les échantillons des quatre coupes limoneuses	162
Figure II.18:	Relations Al-argile pour les 4 coupes limoneuses.....	165
Figure II.19:	Relation Al-Fe dans les quatre coupes limoneuses	166
Figure II.20:	Relation Cd-Mn dans les quatre coupes quaternaires.....	167
Figure II.21:	Relation Na-Mn dans les quatre coupes quaternaires.....	168
Figure II.22:	Position des variables sur le plan factoriel principal des quatre coupes	168
Figure II.23:	Position des échantillons des quatre coupes sur le plan factoriel principal	170
Figure II.24:	Position des échantillons des quatre coupes limoneuses selon les axes factoriels 3 et 4	171
Figure II.25:	Classification hiérarchique ascendante des horizons des quatre coupes.....	172
Figure II.26:	représentation des quatre coupes limoneuses sur le plan principal en analyse factorielle discriminante.....	174
Figure II.27:	localisation des profils de la base de données AARDEWERK et des planchettes de la Carte des sols de la Belgique utilisées pour le premier niveau de sélection	181
Figure II.28:	répartition des profils de la base AARDEWERK retenus pour l'analyse spatiale de la granulométrie	182
Figure II.29:	Histogramme des fréquences des teneurs en argile dans les horizons C limoneux de la base AARDEWERK	183

Figure II.30:	Evolution des teneurs en argile des matériaux parentaux selon la direction Ouest-Est.....	184
Figure II.31:	Evolution des teneurs en argile des matériaux parentaux selon la direction Nord-Sud.....	184
Figure II.32:	Variogramme omnidirectionnel de la teneur en argile dans les profils limoneux	185
Figure II.33:	Carte des teneurs estimées en argile du limon éolien, en Région limoneuse..	187
Figure II.34:	Importance des sols à profil p dans les planchettes étudiées	188
Figure II.35:	carte des teneurs estimées en sables du limon éolien en Région limoneuse ...	189
Figure II.36:	schéma de l'échantillonnage pour le transects O-E et N-S	191
Figure II.37:	localisation des sondages des transects O-E et N-S sur le découpage des cartes IGN au 1/10.000	191
Figure II.38:	plan factoriel principal relatif aux teneurs en éléments dans les horizons C "brabantiens"	198
Figure II.39:	relation entre les valeurs sur le premier axe factoriel et la proportion de la fraction "0-10 μ m" pour les horizons C "brabantiens"	198
Figure II.40:	Teneurs en argile de l'horizon C brabantien en fonction de la position géographique	199
Figure II.41:	variogrammes omnidirectionnels et nombre de paires de points: pH _{H2O} , fractions granulométriques.....	201
Figure II.42:	variogrammes omnidirectionnels et nombre de paires de points: Ca, Na, Al.	202
Figure II.43:	variogrammes omnidirectionnels et nombre de paires de points: Zn, Pb, Co.	203
Figure II.44:	représentation des teneurs en Na (g/100g) des limons "brabantiens"	204
Figure II.45:	Ecarts relatif entre les teneurs prédictes par les régressions ETMs-[0-2 μ m] des modèles BRAB et de la coupe de Tongrinne	211

Liste des tableaux	
Deuxième partie	
Tableau II.1:	Poids des variables selon les quatre premiers axes factoriels.....
Tableau II.2:	a) Statistiques relatives aux teneurs totales en éléments majeurs dans les familles lithologiques. Teneurs totales moyennes; écart-type groupé, part de la variance "expliquée" par la classification lithologique.....
Tableau II.2:	b) Statistiques relatives aux teneurs totales en éléments traces dans les familles lithologiques.....
Tableau II.3:	Description morphologique de la coupe de Tongrinne
Tableau II.4	a) Coupe de Tongrinne - paramètres pédologiques classiques
Tableau II.4	b) Coupe de Tongrinne - teneurs totales.....
Tableau II.5:	Matrice des corrélations de Pearson pour la coupe de Tongrinne
Tableau II.6:	Teneurs en Zr et Ti dans quelques horizons de la coupe de Tongrinne.....
Tableau II.7:	Importances relatives (en %) des formes des éléments Al, Fe, Mn pour quelques horizons de la coupe de Tongrinne
Tableau II.8:	Critères de pertinence de la classification des horizons de la coupe de Tongrinne en unités stratigraphiques
Tableau II.9:	Estimations du fond géochimique sur base de la coupe de Tongrinne
Tableau II.10:	Principales propriétés morphologiques des horizons des quatre coupes
Tableau II.11:	Amplitudes de variation dans les coupes
Tableau II.12:	Matrice de corrélations relative aux variables mesurées sur les 4 coupes
Tableau II.13:	Résultats de l'analyse factorielle sur l'ensemble des horizons des quatre coupes limoneuses: saturations et communautés
Tableau II.14:	Résultats des analyses de variance univariées et multivariées à un critère de classification sur les quatre coupes limoneuses.....
Tableau II.15:	Importance relative de l'effet "site" pour les quatre coupes quaternaires sur base de l'analyse de la variance à un critère
Tableau II.16:	Résultats de l'analyse de la variance à deux critères pour les quatre coupes quaternaires. Risque d'erreur de première espèce (α)
Tableau II.17:	Importance des effets "site" et "stratigraphie" pour les quatre coupes quaternaires sur base de l'analyse de la variance à deux critères.....
Tableau II.18:	Statistiques relatives à la teneur en argile pour les 793 profils.....
Tableau II.19 a:	Statistiques descriptives - pH, granulométrie
Tableau II.19 b:	Statistiques descriptives - éléments majeurs.....
Tableau II.19 c:	Statistiques descriptives - ETMs.....
Tableau II.20:	Evaluation du degré de signification de la variance observée dans les limons "brabantiens" par rapport à la variabilité opératoire
Tableau II.21:	Matrice des niveaux de signification des coefficients de corrélation entre les variables - horizons C "brabantiens"
Tableau II.22:	Variables "explicatives" utilisées dans les régressions
Tableau II.23:	Variance expliquée par les différentes régressions ETM - variables "explicatives" et comparaison de la variance résiduelle avec la variance opératoire
Tableau II.24:	Liste des facteurs intervenant dans les modèles de régression BRAB-VIII ...
Tableau II.25:	Variance expliquée par les régressions ETM -variables "factorielles" et comparaison de la variance résiduelle avec la variance opératoire

Table des matières

CHAPITRE 5 LE FOND MINERALOGIQUE ET GEOCHIMIQUE DU LIMON ROCHE-MERE	
5.1 APPROCHE LITHOLOGIQUE.	119
5.1.1 DONNÉES EXISTANTES	120
5.1.1.1 MINÉRALISATIONS NOTOIRES	120
5.1.1.2 LES DONNÉES DE LA CARTOGRAPHIE GÉOCHIMIQUE DES SÉDIMENTS ET LIMONS D'INONDATION EN BELGIQUE ET AU LUXEMBOURG (VAN DER SLUYS ET AL., 1997)	122
5.1.1.3 LES DONNÉES DE L'INVENTAIRE GÉOCHIMIQUE DU PALÉOZOÏQUE (MARTIN ET SONDAG, 1985)	122
5.1.2 ROCHES-MÈRES LIMONEUSES ET SUBSTRATS ANCIENS DANS LA VALLÉE DE L'ORNEAU	126
5.1.2.1 MATÉRIELS ET MÉTHODES	126
5.1.2.2 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	126
5.2 APPROCHE STRATIGRAPHIQUE	130
5.2.1 LA COUPE DE TONGRINNE	131
5.2.1.1 MATÉRIELS ET MÉTHODES	131
5.2.1.2 RÉSULTATS ET DISCUSSION	136
5.2.1.3 CONCLUSIONS	155
5.2.2 CORRÉLATIONS AVEC D'AUTRES COUPES QUATERNAIRES	156
5.2.2.1 MATÉRIELS ET MÉTHODES	156
5.2.2.2 RÉSULTATS ET DISCUSSION	158
5.2.3 CONCLUSIONS	177
5.3 APPROCHE RÉGIONALE (HORIZONS C)	178
5.3.1 EXPLOITATION DES DONNÉES EXISTANTES	178
5.3.1.1 SÉLECTION DES PROFILS DE LA BASE DE DONNÉES AARDEWERK	179
5.3.1.2 ANALYSE STATISTIQUE	180
5.3.1.3 RÉSULTATS ET DISCUSSION	180
5.3.1.4 CONCLUSIONS	188
5.3.2 TRANSECTS RÉGIONAUX	188
5.3.2.1 MATÉRIELS ET MÉTHODES	188
5.3.2.2 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	190
5.3.2.3 CONCLUSIONS	212
5.3.4 CONCLUSIONS RELATIVES À L'APPROCHE MATÉRIAUX PARENTAL	213

Chapitre 5 Le fond minéralogique et géochimique du limon roche-mère

Comme énoncé au titre 3.3., le fond géochimique dans les matériaux parentaux des sols de la région étudiée sera abordé à travers trois approches comparatives complémentaires. Dans l'approche lithologique, les matériaux limoneux seront comparés à d'autres types de roches susceptibles d'intervenir dans la zone étudiée en tant que matériau parental ou substrat. L'approche stratigraphique permettra d'effectuer un *zoom* sur les limons quaternaires, étudiés sur des coupes verticales profondes. Cette approche vise à comparer différentes générations de limons éoliens et de paléosols enfouis. Les limons roches-mères seront ensuite étudiés dans leur aspect régional. La troisième approche vérifiera en effet l'existence d'une différenciation géographique au sein de matériaux prélevés dans des positions topographiques équivalentes selon des transects est-ouest et nord-sud.

5.1 Approche lithologique.

Un inventaire minéralogique et géochimique des formations préquaternaires (roches-mères géologiques et altérites) dans la vallée de l'Orneau est ébauché. A l'heure actuelle, les grandes familles lithologiques représentées sont des roches sédimentaires: shales, calcaires, grès, argiles, sables... et leurs altérites. A l'instar de la Mehaigne pour la zone étudiée, l'Orneau entaille à la fois les sables "bruxelliens" (au nord de Gembloux), l'anticlinal du Brabant (entre Gembloux et Mazy) et le synclinorium de Namur (entre Mazy et Jemeppe/Sambre). Le bassin versant de l'Orneau constitue dès lors un cadre privilégié pour la collection d'échantillons représentatifs de familles lithologiques variées, sur une étendue relativement restreinte.

Dans un futur plus ou moins proche, la base de données géoréférencées, relativement modeste à l'échelle régionale, devrait s'enrichir de références supplémentaires acquises tant dans le bassin de l'Orneau que dans d'autres sites de références suivis par le Laboratoire de Géopédologie, ainsi que de manière plus extensive, en fonction des opportunités, sur l'ensemble du territoire wallon.

Dans l'immédiat, les références qui sont à notre disposition, permettent déjà une réflexion sur les teneurs rencontrées dans les principales formations lithologiques présentes au sein de la zone d'étude.

Seront d'abord évoqués les enseignements à tirer des données existantes, essentiellement des inventaires géochimiques. Ensuite, les roches-mères limoneuses et les substrats prélevés dans la vallée de l'Orneau seront comparés.

5.1.1 Données existantes

5.1.1.1 *Minéralisations notoires*

Les unités régionales définies sur base des géostructures, au sein de la zone d'étude, présentent également une spécificité en terme de minéralisation: (i) la partie Nord dominée par les dépôts cénozoïques est pauvre en minéralisations, quelques occurrences d'As dues à la présence d'arsénopyrite dans les quartzo-phyllades du socle calédonien, (ii) le bassin crétacé présente localement des gisements de phosphates et (iii) au sein du synclinorium de Namur, les matériaux gréseux du Dévonien supérieur contiennent des minéraux de fer, largement exploités dans le passé, et les minéralisations Pb-Zn (type "Mississippi Valley") seraient nombreuses (VAN DER SLUYS *et al.*, 1997). La figure II.1. localise les zones de minéralisations connues.

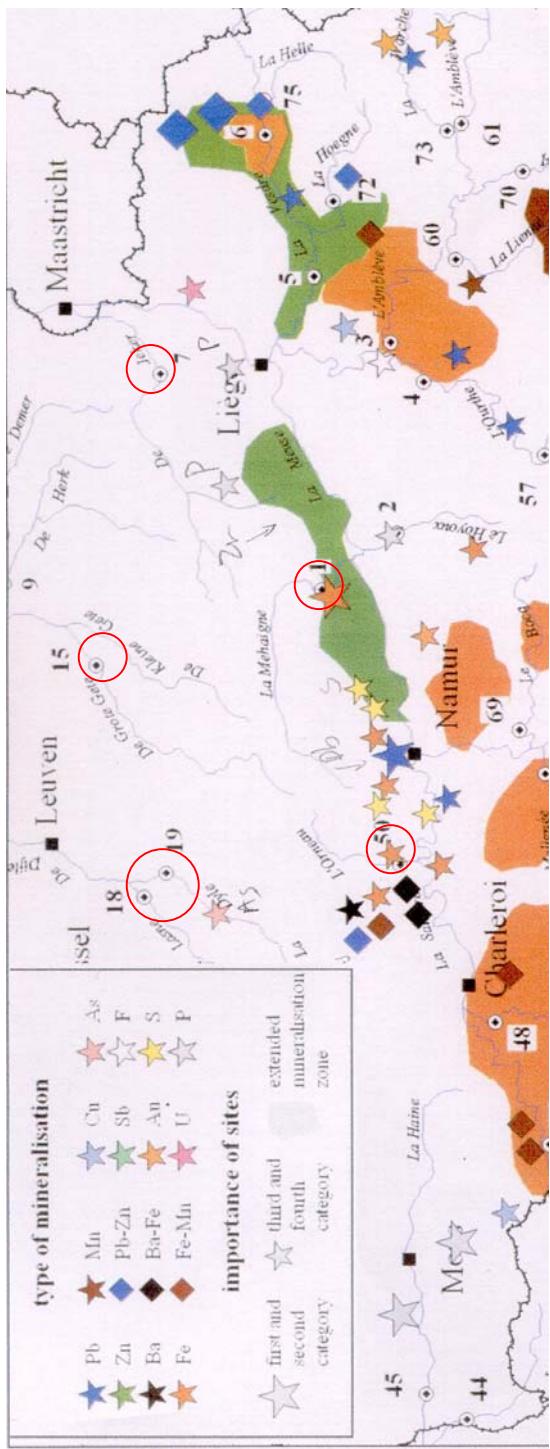


Figure II. 1: Zones de minéralisations en Région limoneuse (VAN DER SLUYNS et al., 1997)

Deuxième partie - 121

5.1.1.2 Les données de la cartographie géochimique des sédiments et limons d'inondation en Belgique et au Luxembourg (VAN DER SLUYS et al., 1997)

Six sites de prélèvement s'inscrivent dans la zone étudiée: trois pour la partie Nord (N° 15, 18 et 19), un pour le bassin du Geer (7), un sur la Mehaigne (1) et un dans le bassin de l'Orneau (50).

D'une manière générale, les teneurs mesurées pour ces sites sont faibles à moyennes par rapport à l'ensemble des sites échantillonnés. La comparaison des six sites entre eux ne permet pas clairement de mettre en évidence des processus locaux de minéralisation. Ceci pourrait être imputable à la densité trop faible de l'échantillonnage.

5.1.1.3 Les données de l'inventaire géochimique du paléozoïque (MARTIN et SONDAG, 1985)

Une quantité plus importante de prélèvements ont été effectués sur les berges des rivières et de leurs principaux affluents lors de l'inventaire du Paléozoïque (Figure II.2). Est logiquement vide de points de sondage le secteur nord-est, en raison de l'absence d'affleurements paléozoïques.

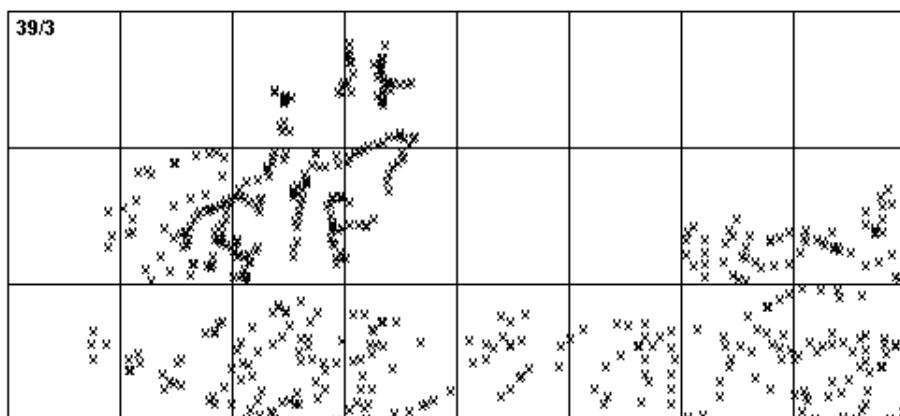


Figure II. 2: Situation des points de prélèvements de l'inventaire MARTIN-SONDAG (1985) sur le découpage des cartes IGN (coin supérieur gauche = carte 39/3).

Une analyse factorielle multivariée a été réalisée afin d'étudier le comportement des différentes variables relatives à la composition des échantillons. Le poids des différentes variables selon les quatres premiers axes factoriels (respectivement 22, 11, 10 et 7% de la variance totale) est illustré par la figure II.3 et le tableau II.1.

Tableau II. 1: Poids des variables selon les quatre premiers axes factoriels

Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3	Facteur 4
Cu (-0.737)	La (0.601)	As (0.521)	Nb (0.537)
Ni (-0.702)	Sr (0.582)	Mo (0.442)	Ce (0.504)
V (-0.674)	Y (0.500)	Zn (0.418)	
Fe (-0.658)	Mn (-0.410)		
Zn (-0.612)	Ni (-0.480)	La (-0.458)	Ti (-0.322)
	Fe (-0.556)	Y (-0.502)	Ba (-0.632)

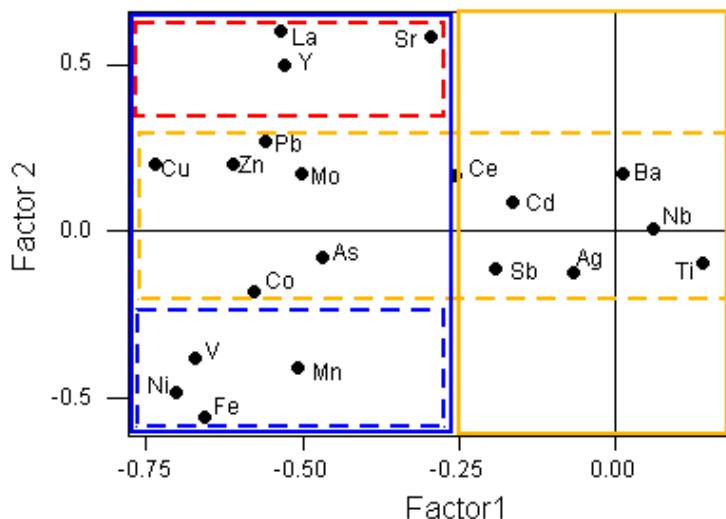


Figure II. 3: Premier plan factoriel relatif à l'inventaire MARTIN-SONDAG. Des zones de sensibilité aux facteurs sont identifiées par des bordures de couleur: rouge (sensibilité positive), orange (indifférence) et bleu (sensibilité négative). Les traits pleins se rapportent aux axes horizontaux, les pointillés aux axes verticaux.

Le premier facteur peut être interprété en terme géographique. Les éléments qui y contribuent présentent une différenciation nord-sud dont la limite de séparation (en rouge à la figure II.4) semble correspondre à celle entre l'anticinal du Brabant et le synclinorium de Namur, au sein duquel des sites riches en minéralisations du fer sont connus. On peut raisonnablement suspecter également l'influence des substrats tertiaires dont les sables pauvres en ETMs pourraient jouer un rôle de diluant dans les sédiments de la partie Nord pour expliquer cette première différenciation géographique.

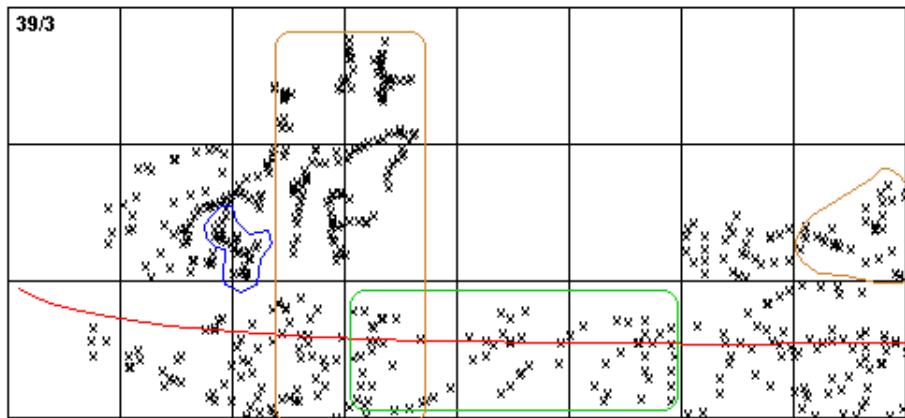


Figure II. 4: Zonage géographique des données de l'inventaire MARTIN-SONDAG en fonction des axes factoriels (1: rouge; 2: vert; 3: bleu; 4: brun).

Le second axe "oppose" les éléments La, Y et Sr, probablement liés à une phase résiduelle (SONDAG, 1985), au groupe Mn-Fe-Ni-V, dont les oxydes-hydroxydes traduisent l'état d'altération des matériaux lithologiques. Cela se traduit géographiquement par une zone (entourée de vert à la figure II.4) correspondant à l'étendue des planchettes 144W et 144E (carte des sols) plus l'est de la planchette 143E. Cette zone semble plus riche en éléments résiduels.

Le troisième axe est fortement influencé par la contamination anthropique notoire (MARTIN et SONDAG, 1985) de la thyle et du ruisseau de Gentissart entre Tilly et Court-Saint-Etienne (bleu sur la figure II.4) par une usine de traitement des métaux située en amont.

Le quatrième axe résulte de la distribution spatiale particulière de Ba d'une part (zone de concentration orientée nord-sud, de Jemeppe/Sambre à Grez-Doiceau, ainsi que la zone drainée par la Mehaigne) et Ce par ailleurs (faibles teneurs dans la vallée de la Mehaigne et concentration dans la zone des éléments résiduels montrée par l'axe 2).

Il est possible d'opérer un zonage géographique des sites de prélèvement sur base de leurs teneurs en éléments traces, ce qui pourrait témoigner de l'existence d'un facteur lithologique déterminant pour les sédiments de rivière.

Un regroupement des variables selon leur degré de ressemblance peut

être effectué par classification multivariée (figure II.5). Les résultats confirment (i) l'existence du groupe du fer (Fe, Mn, Ni, V, Co) et de celui des terres rares (La, Y, Ce) et du Strontium, (ii) le caractère particulier de certains éléments (Ba, Ti). Les résultats montrent également l'existence (i) d'un groupe que l'on qualifiera d'"invariant" car la grande majorité des teneurs sont inférieures aux limites de détection (Ag et Nb; Cd et Sb), ainsi surtout que (ii) d'un groupe d'éléments proche du groupe du fer (Zn, Pb, As, Cu et Mo).

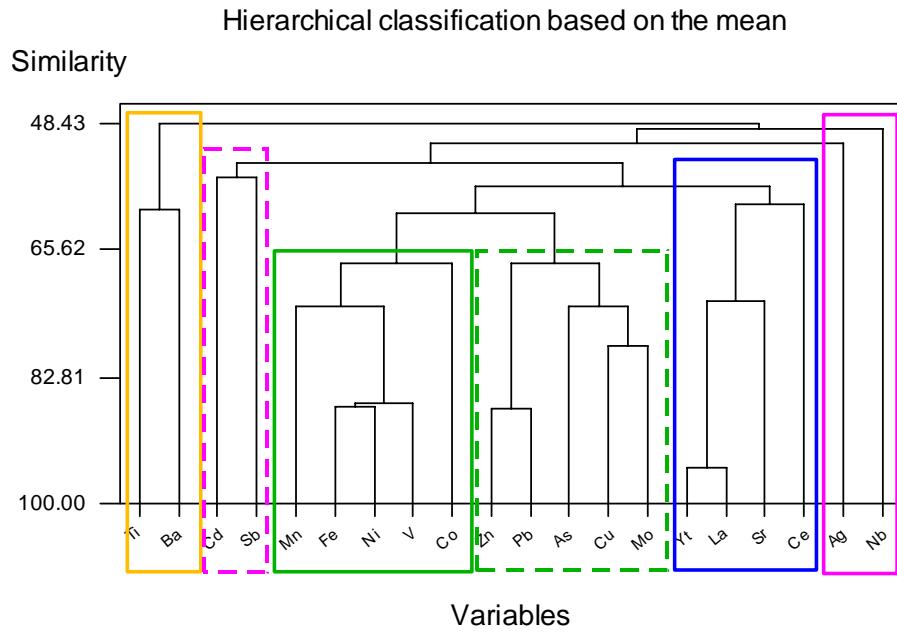


Figure II. 5: Classification hiérarchisée des variables de l'inventaire MARTIN (liaison par la moyenne, distance euclidienne)

On peut dès lors supposer que l'essentiel des ETMs que nous étudions présente une distribution liée à celles du fer et du manganèse dans le contexte géographique de la zone étudiée.

5.1.2 Roches-mères limoneuses et substrats anciens dans la vallée de l'Orneau

Les grandes familles lithologiques du bassin versant de l'Orneau ont été échantillonnées en vue (i) d'acquérir des références relatives à leur contenu géochimique -les gammes de teneurs fournies par la littérature sont larges et méritent d'être précisées pour le cadre de cette étude- et (ii) de comparer la variabilité des matériaux limoneux à l'intérieur de la variabilité lithologique.

5.1.2.1 *Matériels et méthodes*

a Positionnement stratigraphique des matériaux analysés

Chaque échantillon prélevé fait l'objet d'un repérage géographique (coordonnées X et Y en Lambert) et lithostratigraphique. Pour le bassin versant de l'Orneau, les échantillons ont été classés en neuf familles lithologiques: argiles, sables, loess et colluvions pour les matériaux meubles; grès, grès calcaires, calcaires, dolomies et shales pour les roches consolidées.

b Déterminations analytiques

Les caractérisations de laboratoire concernent uniquement les 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.

5.1.2.2 *Résultats et discussions*

Les résultats sont présentés par famille lithologique sous forme de paramètres de position et de dispersion au tableau II.2.

La proportion de la variance attribuée aux différences entre familles est également présentée en bas de tableaux. Pour rappel, la pertinence d'une classification se juge par l'importance de la variabilité prise en compte par le modèle et peut s'exprimer, à l'instar du coefficient de détermination pour la régression, par le complément de la *variance relative*: $(1 - s_{\text{rés}}^2 / s_T^2)$; où $s_{\text{rés}}^2$ est l'estimateur de la variance intra-classe et s_T^2 l'estimateur de la variance totale (BURROUGH, 1986; WEBSTER et OLIVER, 1990).

Tableau II. 2: a) Statistiques relatives aux teneurs totales en éléments majeurs dans les familles lithologiques. Teneurs totales moyennes (g/100g); écart-type groupé (g/100g), part de la variance "expliquée" par la classification lithologique.

	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe
Shale	0.47	1.16	4.26	0.46	9.76	4.86
Calcaire	34.47	0.44	0.36	0.10	1.07	0.57
Dolomie	18.88	11.34	0.04	0.04	0.09	0.16
Grès calcaire	25.46	0.30	0.19	0.04	0.74	2.20
Grès	0.22	0.18	1.13	0.15	2.68	1.31
Argile	1.73	0.72	2.69	0.38	6.83	3.43
Sable	0.16	0.16	0.61	0.22	2.01	1.64
Colluvion	0.40	0.34	1.66	0.68	4.24	2.09
Loess	0.38	0.48	1.70	0.62	4.90	2.64
Ecart-type groupé	1.52	0.17	0.74	0.15	0.97	0.70
Variance expliquée	97.6%	98.0%	66.1%	60.0%	84.7%	70.6%

b) Statistiques relatives aux teneurs totales en éléments traces dans les familles lithologiques. Teneurs totales moyennes (mg/kg); écart-type groupé (mg/kg), part de la variance "expliquée" par la classification lithologique.

	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co
Shale	460.4	31.8	107.5	66.4	61.5	24.5	22.6
Calcaire	425.8	9.4	31.6	21.5	10.5	4.6	3.5
Dolomie	141.9	5.8	32.0	30.7	20.2	ND	ND
Grès calcaire	5180.2	9.4	55.6	ND	50.9	ND	ND
Grès	267.0	9.5	32.6	ND	64.7	ND	ND
Argile	702.9	26.4	82.0	40.4	68.5	23.3	22.7
Sable	148.4	3.7	22.3	22.9	26.8	7.2	8.9
Colluvion	581.1	12.6	46.9	19.1	42.4	18.1	10.0
Loess	499.6	14.4	52.1	28.3	59.7	13.9	10.2
Ecart-type grou.	294.9	5.7	25.3	11.3	32.2	4.3	3.7
Variance expliquée	74.9%	61.8%	42.3%	32.9%	39.7%	37.9%	47.0%

ND : non déterminé

Les enseignements principaux de ces résultats sont:

- (i) chaque famille lithologique présente sa propre signature spectrale en éléments totaux (figure II.6), mais également, ce qui n'apparaît pas dans la figure II.6, sa propre distribution de teneurs pour chaque élément avec plus ou moins d'individus normaux et d'anomalies géochimiques;

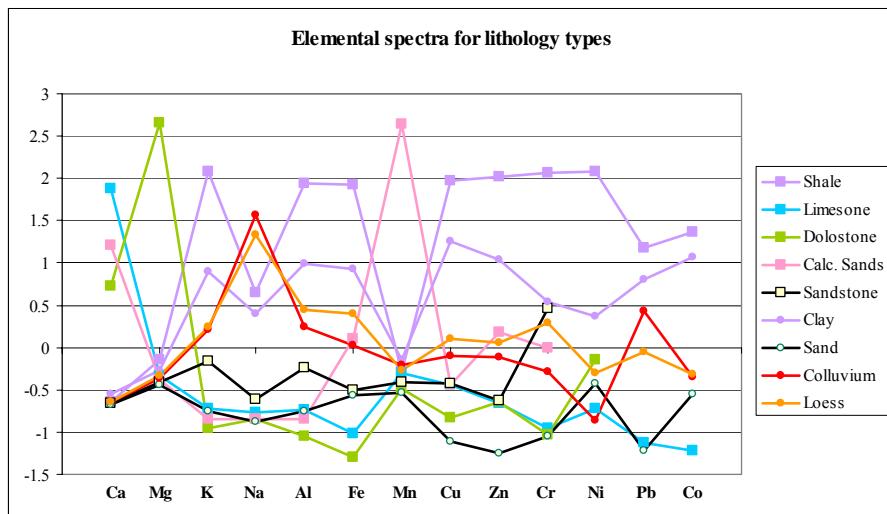


Figure II. 6: Teneurs moyennes (en valeurs centrées réduites) en éléments totaux par familles lithologiques (COLINET *et al.*, 2002a).

- (ii) une grande part ($> 60\%$) de la variance des éléments majeurs plus Mn est "expliquée" par la classification en familles lithologiques;
- (iii) la part de la variance des ETMs "expliquée" par la classification est proche de 40%, sauf Cu (60%);
- (iv) les valeurs des écarts-types groupés supérieures à celles de la variabilité opératoire¹ indiquent pour ces éléments une variation relativement importante au sein d'une même famille lithologique. Ceci avait déjà été clairement mis en évidence pour l'élément Cd au sein des calcaires du Jura suisse (DUBOIS *et al.*, 2002; STERCKEMAN et BAIZE, 2002).

Les valeurs élevées du critère de pertinence de classification peuvent s'expliquer pour Ca et Mg par le contraste très élevé entre formations carbonatées (teneurs élevées) et non-carbonatées (teneurs faibles). Pour les éléments Al, Fe et K, il s'agit de la différence entre calcaires et dolomies (teneurs faibles) d'une part et shales et argiles d'autre part (teneurs élevées). Pour Mn, l'influence des valeurs très élevées des échantillons de grès calcaires est importante. Pour les autres éléments, le

¹ Il faut toutefois rester prudent dans l'utilisation des valeurs du tableau I.18 dans ce cadre-ci car les matériaux non limoneux peuvent présenter des variabilités centimétriques (effet pépite...) d'un autre ordre, et en conséquence, des variabilités opératoires différentes.

schéma est à peu près identique à quelques nuances près: teneurs élevées dans les shales et les argiles, moyennes dans les matériaux limoneux et moyennes à faibles dans les matériaux carbonatés et les matériaux quartzeux.

On notera également que les matériaux limoneux (loess et colluvions) sont caractérisés par des teneurs en Na (indiquant des plagioclases) supérieures à celles des autres lithologies.

Ces conclusions ne sont pas de nature à révolutionner la géochimie. On savait effectivement déjà qu'un calcaire était différent d'un shale, et on se doutait bien qu'il pouvait également être différent d'un autre calcaire. Toutefois, des références sont maintenant disponibles sur les contenus en ETMs des différentes familles lithologiques rencontrées dans la zone étudiée. Ce qui n'était pas le cas avant cette étude. Cette ébauche d'inventaire litho-chimique devra néanmoins dans le futur être complétée d'autres analyses, notamment pour préciser les ordres de grandeur des variations pépitiques et des variations intra- et inter-familles lithologiques.

5.2 Approche stratigraphique

L'étude bibliographique relative à la stratigraphie du Quaternaire et aux propriétés des loess en Moyenne Belgique a été présentée au cours du travail de DEA (COLINET, 1999). Nous en retenons que:

- Le Système quaternaire est divisé en séries et étages sur base de la reconnaissance de glaciaires et interglaciaires successifs qui ont généré dans toute l'Europe des phases de dépôts de poussières éoliennes, de pédogenèse et de cryoturbation.
- On distingue de manière assez constante dans les formations limoneuses de Moyenne Belgique deux niveaux-repères: l'horizon à langues de Nagelbeek, entre les deux loess pléniglaciaires ("brabantien" et "hesbayen"), et le sol rouge de Rocourt formé dans le loess "hennuyen" (figure II.7).
- Localement, les épaisseurs de chacune des strates sont dépendantes des conditions de dépôt d'une part, mais également des conditions de leur conservation.

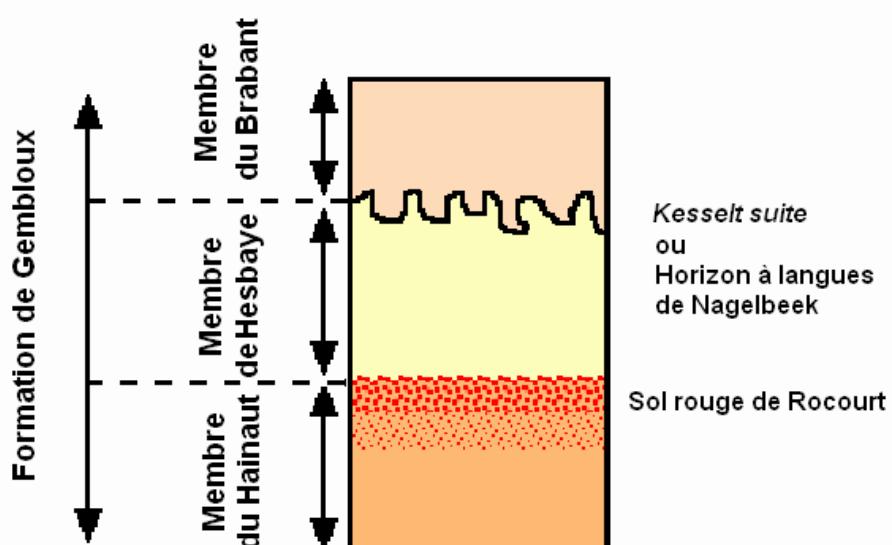


Figure II. 7: Représentation schématique d'une coupe dans les limons quaternaires de Moyenne Belgique

Une coupe profonde dans les limons (Tongrinne) a été décrite, échantillonnée et analysée afin d'étudier la variabilité existant entre les différentes générations de limons (titre 5.2.1). Cette coupe sera dans une deuxième phase comparée à trois autres coupes profondes afin d'en

évaluer la représentativité (titre 5.2.2).

5.2.1 La coupe de Tongrinne

5.2.1.1 Matériels et méthodes

a La coupe dans son environnement physique

La coupe stratigraphique a été décrite sur le site de l'ancienne briqueterie du Point du Jour à Tongrinne (figure II.8). Celui-ci a été creusé dans un étroit plateau cultivé, proche de l'interfluve entre les bassins de la Meuse et de l'Escaut.

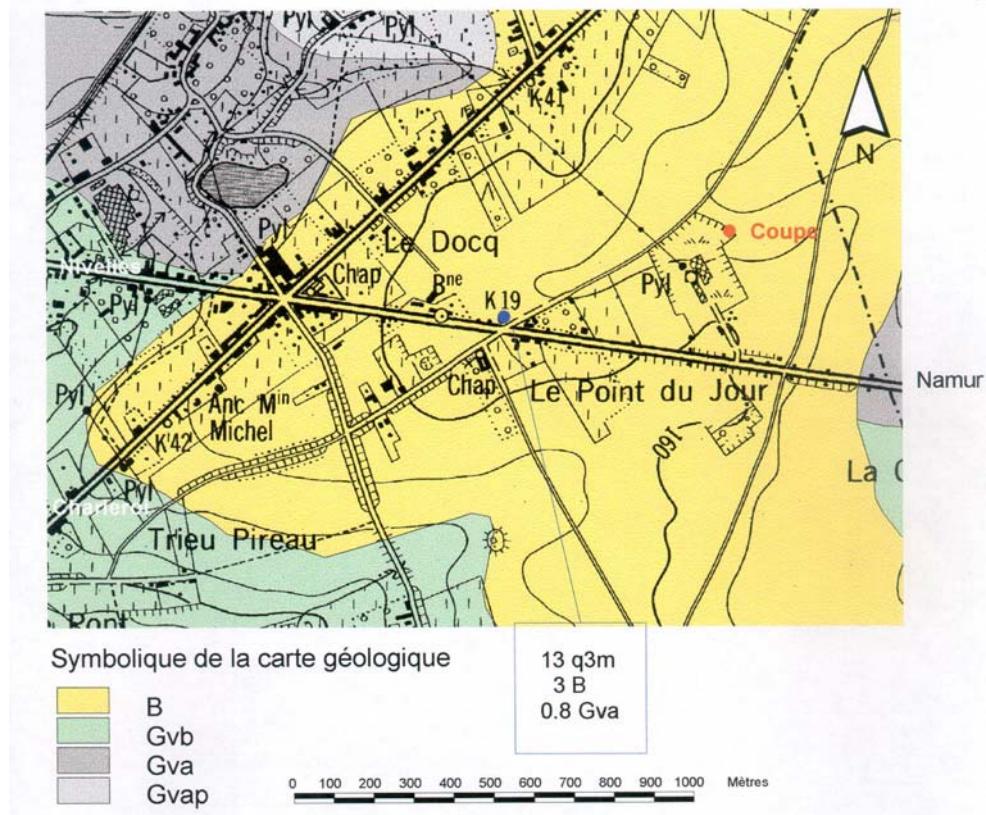


Figure II. 8: Plan de situation de la coupe de Tongrinne, sur base de la carte géologique 143 et de la carte topographique 47/1.

D'après la carte géologique N°143 (1/40 000), le site se trouve sur le bord nord du synclinorium de Namur à proximité du contact avec l'anticlinal du Brabant. Un sondage réalisé lors du levé de la carte près de la briqueterie renseigne 13 mètres de limons avec cailloutis à la base

(q3m), 3 mètres de matériau d'âge lutétien (B -sable quartzeux, calcaire, glauconifère...) reposant sur le calcaire givetien (Gva).

La carte des sols (143W) annonce le schéma *classique* en région limoneuse Aba ou Aba(b) – AbB – Abp. La coupe occupe une position de haut de versant convexe, caractérisée par une troncature du profil (série AbB - CSB).

La situation topographique et l'analyse des documents existants témoignent en faveur d'une certaine représentativité stratigraphique de la coupe. Celle-ci est d'ailleurs devenue une coupe majeure du Quaternaire suite aux travaux de PAEPE (1966), de THOREZ *et al.* (1970) et de JUVIGNE (1976).

b Description de la coupe

La coupe (figure II.9) a été décrite selon une méthodologie standardisée pour la description des sols (DELECOEUR et KINDERMANS, 1980). La fiche synthétique des observations se trouve au tableau II.2. Des horizons ont été délimités sur base de leur couleur (MUNSELL soil color chart), de leur texture, de leurs propriétés structurales (structure, compacité) et de l'expression de caractères liés aux processus d'oxydoréduction, ou à une activité biologique. Chacun des horizons a été échantillonné. Les plus épais ont été artificiellement découpés en deux sous-horizons.

c Déterminations analytiques

Les caractérisations de laboratoire sont les suivantes: pH_{H2O} et pH_{KCl}, carbone organique total (COT), granulométrie (neuf fractions), carbonates, CEC et cations échangeables, teneurs totales en Ca, Mg, K, Na, Al, Fe, Mn, Cu, Zn, Cr, Ni, Pb, Co, et Cd. Ces analyses ont été réalisées au sein du Laboratoire de Géopédologie, à l'exception des teneurs totales en Cr, Pb, Co et Cd qui furent réalisées par le Laboratoire d'analyse des sols de l'INRA d'Arras dans le cadre du TFE de CORDIER (1999). Les protocoles d'analyse figurent en annexe 3.

Des échantillons choisis sur base des descriptions morphologiques et des résultats analytiques ont également fait l'objet de déterminations particulières destinées à préciser le degré de diversité ou d'homogénéité minéralogique au sein de la coupe. Les teneurs en Ti et Zr ont été mesurées par fluorescence X. Les teneurs en Fe, Al et Mn ont été fractionnées par extraction séquentielle. Les fractions retenues étaient les suivantes (i) fraction dite "adsorbée" extraite à l'acétate de soude à pH 5.5, (ii) fraction "liée aux oxydes de Mn peu cristallisés" extraite par le

chlorhydrate d'hydroxylamine, (iii) fraction "liée aux matières organiques" extraite par le pyrophosphate de soude-, (iv) fraction "liée aux oxydes amorphes" extraite par le réactif de Tamm à l'obscurité, (v) fraction "liée aux oxydes cristallisés" extraite par le chlorhydrate d'hydroxylamine + acide acétique à 90°C et (vi) la fraction "des réseaux silicatés" mise en solution par un mélange triacide (HF+HClO₄+HCl). Le protocole détaillé figure en annexe 3. L'identification semi-quantitative des argiles a été réalisée sur base de diffractogrammes RX sur base du protocole utilisé par THOREZ *et al.* (1970).

L'interprétation statistique des résultats repose dans un premier temps sur les paramètres classiques de position et dispersion et sur la comparaison de la variation entre les résultats à l'échelle de la coupe et un témoin représentatif des horizons limoneux. Les relations entre variables seront analysées sur base de la matrice des coefficients de corrélation de Pearson. L'analyse multivariée permettra d'approfondir l'analyse et de visualiser les facteurs de variation entre les horizons de la coupe. Les représentations graphiques, les analyses de corrélation et multivariées ont été réalisées avec les logiciels MS Excel et MINITAB 13.



Figure II. 9: Vue de la coupe de Tongrinne et localisation des horizons identifiés.

Tableau II. 3: Description morphologique de la coupe de Tongrinne

Couches	Caractéristiques morphologiques des horizons	Symbol
Sol holocène	- horizon labouré Ap (0-30cm - non décrit); - horizon B textural (30-93/100cm); 7.5 YR 5/4, limon lourd; HCl(-); très compact; nombreuses galeries de vers de terre remplies d'un matériau sombre et brillant; transition graduelle vers le Bt/C; - horizon Bt/C (93/100-127cm); 7.5 YR 5/4, limon lourd; HCl(-); très compact; nombreuses galeries de vers de terre; taches d'oxydo-réduction et glosses dans la partie supérieure; transition graduelle vers C ₁ .	Ap Bt Bt ₁ Bt/C
loess brabantien	(93/127-194/200cm); 7.5 à 8.75 YR 5/4, limon; HCl(-); compact à légèrement compact; alternance de couches mullimétriques brunes et grises; fines racines; cutans dans les galeries et pores; taches d'oxydo-réduction diffuses et peu nombreuses à la base de l'horizon.	C ₁ C ₂
“Kessel suite”	(194/200-215/225cm) horizon cryoturbé présentant des involutions de l'horizon supérieur dans l'inérieur; légèrement compact.	C J; C ₁
loess hesbayen	(215/225-272/280cm); 10 YR 5/6; limon; HCl(-); très compact; nombreuses taches d'oxydo-réduction et concrétions Fe/Mn à la base; transition ondulée et nette avec le matériau sous-jacent; présence d'un crotovinas rempli de loess brabantien et traversant les sols de Wameton et Rocourt.	C ₁ C ₂
Sol de Wameton	(272/290-297/300cm); 10YR 5/4 à 5/6; limon; HCl(-); très compact; alternance de couches millimétriques brunes et grises; nombreuses concrétions de Fe-Mn à la base; limite inférieure ondulée et graduelle.	E Btg
Sol de Rocourt	(297/300-350/364cm) 7.5YR 5/6 à 5/8; limon lourd à angle limoneuse; HCl(-); très compact; nombreuses taches d'oxydo-réduction au sommet; base plus argileuse présentant des «irregular fine cracks filled up with red heavy clay» (PAEPE, 1966); transition graduelle et ondulée avec le loess hemayen.	Btg Bt ₁ Bt ₂
loess hemayen	(>350/364cm) 7.5 YR 5/6 à 6/6; limon; HCl(-); très compact; alternance de couches millimétriques brunes et grises; quelques taches d'oxydo-réduction.	C
	HCl(-); pas de réaction à HCl perceptible à l'œil nu	

5.2.1.2 Résultats et discussion

a paramètres descriptifs

Trois niveaux-repères ont été identifiés dans la coupe de Tongrinne, à l'instar des travaux précédemment réalisés en d'autres points de la briqueterie par PAEPE (1966), THOREZ *et al.* (1970) et JUVIGNE (1977).

Le premier niveau-repère à partir de la surface est l'horizon à langues de Nagelbeek² (20,000 BP en datation ¹⁴C - HAESAERTS, 1984). Il marque la transition entre les deux loess pléniglaciaires (les Membres du Brabant et de Hesbaye - Formation de Gembloux) d'âge weichselien. Cet horizon présente des manifestations visibles de cryoturbations et apparaît comme un horizon de mélange par involution entre limons brabantien et hesbayen.

Situé à la base des dépôts weichseliens, un ensemble d'horizons constitue le second niveau-repère. Cet ensemble présente des caractères similaires au *Sol de Warneton* décrit par PAEPE (1966) sur la même coupe, à l'*horizon humifère à la base des loess "hesbayens"* de la sablière de Rocourt (HAESAERTS *et al.*, 1981), ou encore le *Humiferous Complex of Remicourt* sur la coupe du même nom (HAESAERTS *et al.*, 1999). Ce complexe pédologique résulterait de processus pédogénétiques intervenus sous climat steppique durant les Interstades Amersfoort, Brørup et Odderade (entre 70,000 et 60,000 BP en datation ¹⁴C) (HAESAERTS *et al.*, 1981). L'horizon humifère décrit par PAEPE (1966) n'a pas été identifié, contrairement aux horizons grisâtres riches en concrétions Fe/Mn.

Le Sol polycyclique de Rocourt (HAESAERTS *et al.*, 1999), plus ancien, et le Sol de Warneton sont imbriqués. Le caractère morphologique le plus remarquable du premier est une coloration rougeâtre qui résulte de l'évolution des loess d'âge saalien (*i.e.* ce que nous nommons loess "hennuyens" dans le texte) durant l'Interglaciaire éemien. D'abord considérée comme le résultat de conditions climatiques méditerranéennes (GULLENTOPS, 1954 *In* HAESAERTS *et al.*, 1999; PAEPE, 1966), la pédogenèse du Sol de Rocourt comprendrait trois phases de développement de profil (deux luvisols et un greyzem) sous climat continental atlantique et humide, séparées par deux épisodes froids (HAESAERTS *et al.*, 1999).

² récemment renommé "*Kessel suite*".

Si l'on accepte l'idée que les reliques des loess pré-saaliens sont rares en Région limoneuse, les horizons échantillonnés à Tongrinne peuvent être considérés comme représentatifs des différents dépôts de loess du Pléistocène moyen et supérieur.

L'analyse morphologique permet d'une part le positionnement stratigraphique des horizons échantillonnés par la reconnaissance de paléosols, mais il permet également d'identifier des manifestations de processus d'oxydo-réduction, dont l'importance théorique sur la mobilité des ETMs a déjà été évoquée.

b caractérisations pédologiques de base

Les résultats des déterminations de laboratoire sont présentés aux tableaux II.4 a et b. Figurent également les amplitudes de variation sur la coupe de Tongrinne ainsi que les plus petites différences significatives (ppds; $\alpha = 0.95$) pour chaque paramètre. Présentées au titre 3.1.3, les ppds incluent les limites de précision des méthodes analytiques ainsi que la variabilité interne des échantillons. Les ppds correspondent aux limites aux-dessus desquelles la différence entre deux mesures peut être interprétée comme le résultat d'une différence de teneur moyenne de deux échantillons.

Les variations mesurées des paramètres $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, pH_{KCl} , CaCO_3 et COT étant inférieures ou équivalentes aux ppds, ces caractéristiques peuvent être considérées comme homogènes à l'échelle de la coupe. Celle-ci peut dès lors être qualifiée par les termes: pH-neutre, non-carbonatée et à faible teneur en carbone organique.

Si l'ensemble des horizons analysés présente une relative homogénéité dans la forme sigmoïde des distributions cumulées des fractions granulométriques, la teneur en argile est la fraction la plus variable: de 13.9% dans l'horizon éluvial du Sol de Warneton à 38.9% dans les horizons illuviaux du Sol de Rocourt. Les autres horizons présentent des valeurs intermédiaires: 25% pour les loess brabantien et hennuyen et environ 20% dans les limons "hesbayens" et du Sol de Warneton. La fraction 20-50 μm constitue la classe modale, ce qui est fréquent, pour ne pas dire général, dans les formations loessiques.

Tableau II. 4 a) Coupe de Tongrinne - paramètres pédologiques classiques

Membre/couche Horizon	pH (H ₂ O)	pH (KCl)	COT g/100g	Granulométrie			Complexe d'échange cmol/kg						
				CaCO ₃ g/100g	Argile 0-2μ	Sable >50μ	CEC	Ca	Mg	K	Na		
Holocène	BT ₂	7.2	5.6	0.2	tr.*	25.6	65.6	8.9	13.5	11.40	1.91	0.43	0.13
	BC	7.2	5.4	0.2	tr.	25.0	69.6	5.5	11.7	10.37	2.30	-	0.11
Brabantien	C ₁	7.2	5.4	0.1	0.15	22.1	68.5	9.4	11.8	7.58	3.22	0.22	0.10
	C ₂	7.2	5.3	0.2	tr.	24.1	71.9	4.2	12.4	7.51	4.00	0.53	0.12
Hesbayen	C ₁	7.3	5.1	0.2	tr.	19.1	76.5	4.6	9.8	6.18	4.10	0.19	0.08
	C ₂	7.3	5.3	0.2	0.15	21.0	74.1	5.0	10.2	6.01	4.01	0.28	0.06
Wantzen	E	7.2	5.5	0.2	tr.	15.0	81.4	3.6	6.8	4.15	2.65	0.07	0.06
	BTg	7.1	5.4	0.2	tr.	17.3	74.6	8.1	7.3	4.37	2.76	0.26	0.07
Rocourt	BT ₂	7.1	5.4	0.0	tr.	37.6	57.3	5.2	17.6	9.53	6.68	0.47	0.12
	BT ₃	7.1	5.3	0.1	tr.	27.1	67.4	5.6	13.2	7.68	5.37	0.35	0.07
Hermuyen	C	7.0	5.3	0.0	tr.	22.9	67.5	9.7	10.5	5.96	4.10	0.37	0.05
Amplitude de variation													
Tongrinne	0.3	0.5	0.2	0.3	22.6	24.1	6.1	10.8	7.25	4.77	0.46	0.08	
ppds***	0.2	0.3	0.4	N.D.	2.7	5.6	4.6	2.9	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	

* tr. traces, ** sat., saturé *** ppds: plus petite différence significative ($\alpha=0.05$)

b) Coupe de Tongrinne: teneurs totales (HF).

Membre/couche Horizon	Ca	Mg	K g/100g	Na	Al	Fe	Mn	Teneurs totales**						
								Cu	Zn	Ni	Cr*	Pb*	Co*	Cd
Holocène	BT ₁	0.44	0.55	1.96	0.68	5.10	2.94	532.7	173	59.3	30.1	-	-	-
	BT/C	0.45	0.56	2.01	0.71	5.37	2.88	537.4	172	59.9	28.9	57.6	17.4	11.0
Brabantien	C ₁	0.43	0.51	1.70	0.73	4.89	2.66	504.6	153	53.2	29.0	56.9	16.7	11.1
	C ₂	0.46	0.58	1.98	0.75	5.63	2.91	587.0	157	56.4	32.0	-	-	-
Hesbayen	C ₁	0.28	0.38	1.59	0.52	4.50	2.22	335.3	102	38.9	22.1	51.8	16.0	7.7
	C ₂	0.26	0.35	1.56	0.55	4.06	2.23	454.9	130	41.3	25.4	-	-	-
Waemeton	E	0.25	0.25	1.45	0.46	3.93	1.66	626.3	9.6	37.4	16.5	46.4	14.7	9.4
	BT ₂	0.24	0.26	1.50	0.44	4.03	1.88	787.4	9.7	40.8	25.1	-	-	-
Rocourt	BT ₂	0.29	0.55	1.61	0.38	5.95	3.60	399.0	16.6	73.4	36.2	-	-	-
	BT ₃	0.28	0.49	1.66	0.40	5.41	3.02	326.4	12.6	53.4	23.2	65.2	17.4	9.5
Hennuyen	C	0.31	0.43	1.75	0.51	5.06	2.60	377.0	14	45.9	24.7	55.1	16.5	10.2
Amplitude de variation														
Tongrinne		0.22	0.33	0.56	0.37	2.02	1.94	461.0	7.7	36.0	19.7	18.8	2.7	3.4
ppds***		0.07	0.07	0.21	0.11	0.68	0.30	58.4	2.6	7.5	11.8	N.D.	N.D.	N.I.

*: Cr, Pb, Co, and Cd ont été déterminés par le Laboratoire de l'INRA d'Arras (CORDIER, 1999).

** ppds: plus petite différence significative ($\alpha=0.05$)

La CEC présente une amplitude de variation 3 fois plus élevée que la ppds. Elle est très hautement significativement corrélée à la teneur en argile ($r = 0.96$). Le complexe d'échange est largement saturé en cations, principalement Ca et Mg. Dans le sol holocène, le rapport Ca_{éch.}/Mg_{éch.} est supérieur à 4, témoin des pratiques agricoles en bordure du site étudié. En profondeur, ce rapport est compris entre 1.4 et 1.6.

c teneurs totales en éléments

Pour ce qui concerne la composition élémentaire (tableau II.4.b), aucun des paramètres analysés au Laboratoire de Géopédologie ne peut être considéré comme homogène. Pour les teneurs en Cr, Pb, Co et Cd, déterminées à Arras, les ppds sont probablement différentes de celles du tableau I.18³. En effet, si les amplitudes de variation de ces éléments sont inférieures aux ppds du tableau I.18, ce qui signifierait une certaine homogénéité de ces teneurs, des corrélations entre Cr, Pb et Co et d'autres paramètres de la coupe de Tongrinne sont néanmoins trouvées (tableau II.5.b). Ceci plaide en faveur d'une variabilité significative à l'échelle de la coupe, mais également tend à montrer que les ppds sont surestimées dans ce cas et qu'il convient donc de les traiter comme des indicateurs et non comme des valeurs seuil absolues.

Les teneurs en Ca, Mg, K et Na, et à fortiori la réserve totale en "bases" (TRB en cmol/kg) varient peu à l'intérieur d'une "entité stratigraphique", mais les différences entre celles-ci sont relativement nettes. Les horizons holocènes et "brabantiens" sont plus riches (TRB > 180 cmol/kg), ensuite on retrouve les ensembles "hennuyens" (~150 cmol_c/kg), "hesbayens" (~140 cmol_c/kg) et de Warneton (~120 cmol_c/kg).

De la surface à la profondeur, les teneurs en Al et Fe évoluent parallèlement, en relation directe avec le taux d'argile. Le rapport Al/Fe semble marquer une relation inverse avec le taux d'argile.

Les teneurs en Mn semblent dépendre de la stratigraphie des dépôts limoneux: entre 500 et 600 mg/kg dans les dépôts "brabantiens", entre 350 et 470 mg/kg pour le membre hesbayen, entre 600 et 800 mg/kg dans le sol de Warneton, et entre 300 et 400 mg/kg dans le Sol de Roclourt. Au sein de chacune des unités, la variation des teneurs en Mn

³ On peut trouver chez LATRILLE (1998) des données relatives à *l'imprécision sur la mesure* du laboratoire d'Arras, sans que l'on sache s'il s'agit de variabilité analytique ou opératoire. De ces données, on peut estimer les ppds suivantes: 17 mg/kg pour Cr, 4.2 mg/kg pour Pb et Co, 0.14 mg/kg pour Cd.

semble répondre à une logique morphologique: plus les taches et concrétions de Fe/Mn sont nombreuses, plus élevées sont les teneurs en Mn. Celui-ci n'est corrélé de manière significative à aucun autre élément. Toutefois, le coefficient de corrélation entre Mn et Cd est de peu sous le seuil de signification à 5% (0.80 vs 0.81).

Tableau II. 5: Matrice des corrélations de Pearson pour la coupe de Tongrinne
a) tous les horizons (n = 11).

	A%	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Cu	Zn
Ca										
Mg	0.794	0.783								
K		0.895	0.771							
Na		0.851		0.788						
Al	0.930									
Fe	0.957					0.960				
Mn										
Cu	0.722	0.874	0.962	0.859			0.801	0.830		
Zn	0.935		0.877				0.939	0.932		
Ni	0.802	0.690	0.772	0.647			0.811	0.785		

A%: pourcentage d'argile

Degré de signification des corrélations: $\alpha= 0.05$; $\alpha = 0.01$; **$\alpha = 0.001$** .

b) horizons analysés à Arras (n = 6)

	A%	Ca	Mg	Al	Fe	Cu	Zn	Cr	Pb	Co	Cd
Cr	0.959		0.801	0.903	0.943						
Pb	0.975		0.957	0.954	0.992	0.767	0.892	0.916			
Co		0.779									

A%: pourcentage d'argile

Degré de signification des corrélations: $\alpha= 0.05$; $\alpha = 0.01$; **$\alpha = 0.001$** .

Les teneurs en Cu, Zn et Ni semblent globalement du même ordre de grandeur (respectivement 15, 60 et 25 mg/kg) dans les horizons "brabantiens" et "hennuyens". Les teneurs dans les horizons "hesbayens" et du Sol de Warnton sont inférieures: 10, 45 et 17 mg/kg). Ces trois éléments sont corrélés à la teneur en argile (tableau II.5), mais également pour Cu et Ni à la TRB.

Pour ce qui concerne les teneurs en Cr, Pb, Co et Cd, les éléments de différenciation suivants peuvent être notés: (i) l'influence pédologique est manifeste pour Cr et Pb avec des teneurs plus faibles dans l'horizon $3E$ et plus élevées dans l'horizon $4BT_3$; (ii) les teneurs en Co sont relativement homogènes, à l'exception de l'horizon "hesbayen" (teneur plus faible) mais on ne peut exclure que cette différenciation soit le fruit du

hasard analytique⁴; (iii) les teneurs en Cd sont deux fois moins élevées dans les horizons "hennuyens" que dans le reste de la coupe.

La composition élémentaire des différents horizons marque donc une certaine variabilité qui semble liée à un effet stratigraphique d'une part (un limon "brabantien" ne serait pas équivalent à un limon "hesbayen"...) et aux processus pédogénétiques d'autre part (influence des teneurs en argile et de la dynamique du Mn).

d indices stratigraphiques complémentaires

Les teneurs en Zr et Ti figurent au tableau II.6. Zr et Ti sont des éléments considérés comme très peu mobiles dans les sols et caractéristiques de phases porteuses relativement résistantes à l'altération⁵ (BREWER, 1976; BRAHY, 2000; HODSON, 2002).

Au sein d'un profil, des teneurs plus élevées par rapport au matériau parental s'expliquent par accumulation relative par départ des autres éléments (profils lessivés et profils d'altération) ou par migration mécanique (profils lessivés ou colluviaux). Par contre, des différences de teneurs entre matériaux parentaux limoneux sont à interpréter en terme de variabilité minéralogique originelle.

Tableau II. 6: Teneurs en Zr et Ti dans quelques horizons de la coupe de Tongrinne.

	Zr (mg/kg)	Ti (g/100g)
B/C	555	0.43
C ₂	558	0.45
₂ C ₁	690	0.46
₃ E	782	0.52
₃ BTg	795	0.52
₄ BT ₂	615	0.46
₄ BT ₃	705	0.47
₄ C	646	0.46

⁴ Pour rappel, la ppds estimée à partir des données de LATRILLE (1998) est supérieure à l'amplitude de la variation sur la coupe de Tongrinne.

⁵ Dans des contextes très particuliers, des preuves de mobilité d'éléments comme Zr ou Ti ont toutefois été rapportées (LATRILLE, 1998, HODSON, 2002).

Les deux éléments présentent sur l'épaisseur de la coupe des profils parallèles, avec une augmentation nette au niveau du Sol de Warneton. Cette discontinuité peut donc refléter (i) une abondance en minéraux porteurs de Zr et Ti du matériau parental, et/ou (ii) un état d'altération beaucoup plus marqué que dans le reste de la coupe.

On notera également les niveaux de teneurs en Zr différents de l'horizon C "brabantien": (~560 mg/kg) par rapport aux "hesbayen" et "hen-nuyen" (640 à 690 mg/kg).

Ceci est un argument supplémentaire en faveur d'un facteur stratigraphique déterminant pour la composition élémentaire des matériaux limoneux.

e indices qualitatifs relatifs à la fraction argileuse

La forte corrélation entre argile et CEC est un indicateur d'homogénéité dans les types d'argile présents dans les divers horizons de la coupe. Le rapport CEC/argile est compris entre 42 et 50 cmol_c/100g, à l'exception du ₃BT du Sol de Warneton (36 cmol_c/100g). Ces valeurs correspondent aux ordres de grandeurs de la CEC des illites et des minéraux de transformation de celles-ci par ouverture des feuillets (SCHROEDER, 1984).

L'interprétation semi-quantitative des diffractogrammes RX, en regard des résultats de THOREZ *et al.* (1970), confirme que: (i) l'illite domine dans l'ensemble des horizons; (ii) le contenu en kaolinite n'excède jamais 10% du total; (iii) la proportion de chlorite est relativement faible également (5%) sauf dans le ₃E de Warneton (20 à 30% sous forme d'interstratifié chlorite-smectite (d'après THOREZ *et al.*, 1970); (iv) la proportion de smectites est plus faible dans l'horizon ₃E et plus importante dans les horizons BT.

Les phases minérales porteuses de Mg dans les loess étant les chlorites primaires, les vermiculites et les smectites, principalement présentes dans les fractions granulométriques "fines", le rapport Mg/argile exprime l'importance de ces minéraux dans la fraction argileuse. D'une façon générale ce rapport est plus faible dans les horizons BT que dans les horizons C sous-jacents. Ceci peut s'expliquer par une translocation de minéraux argileux vers les BT, principalement des smectites résultant de la transformation des intergrades de chlorites et vermiculites (MAES *et al.*, 1999; BRAHY *et al.*, 2000b), mais également par une altération accrue des micas et des chlorites (VAN RANST *et al.*, 1982; HARDY *et al.*, 1999) dans les horizons supérieurs des profils tant holo-

cène que plus anciens.

Les rapports Mg/K et Al/Fe ont été utilisés par BOCK (1984), dans un autre contexte, pour *identifier des cortèges minéralogiques du type illitique ou smectitique*. Dans le cas de la coupe de Tongrinne, les faibles valeurs de Mg/K traduisent une proportion élevée d'illite, les valeurs élevées un accroissement de l'importance des chlorites, vermiculites et/ou smectites. Le rapport Al/Fe peut traduire l'importance des vermiculites d'une part (faible rapport), des kaolinites et intergrades alumineux d'autre part (rapport élevé). En première approximation, à l'échelle de la coupe ces deux rapports dépendent du pourcentage d'argile et une relation globale lie de manière linéaire Al/Fe à Mg/K (figure II.10). Plus le taux d'argile augmente, plus Mg/K augmente et Al/Fe diminue; ce qui signifierait que les BT sont proportionnellement plus riches en smectites et vermiculites.

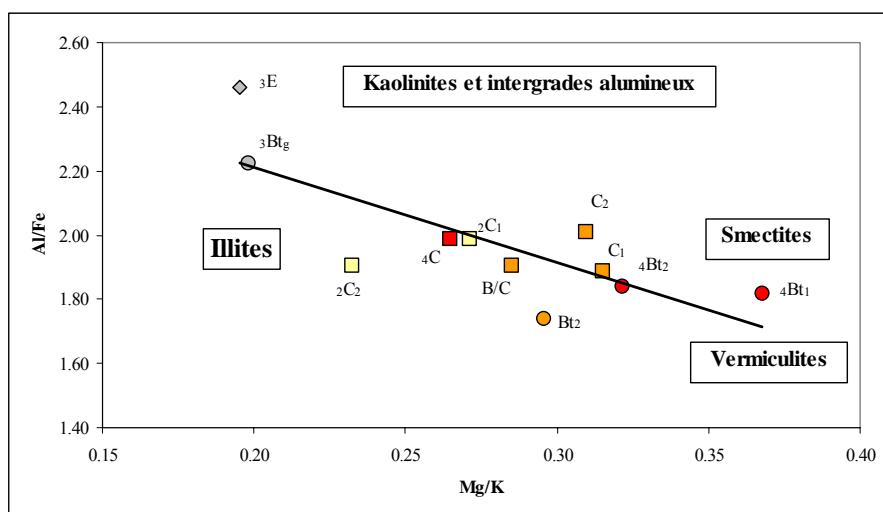


Figure II. 10: Rapports Al/Fe et Mg/K - coupe de Tongrinne

Comparés spécifiquement à leurs horizons C, les BT des sols holocène et de Warneton se distinguent davantage par le rapport Al/Fe que par celui de Mg/K. Les BT du Sol de Rocourt, quant à eux, suivent la loi générale évoquée plus haut.

L'ensemble de ces constatations plaide en faveur d'une relative homogénéité en termes de qualité des argiles. Les quelques différenciations semblent relever des processus d'illuviation avec une augmentation probable des proportions de smectites et vermiculites dans les différents horizons BT.

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

L'identification des phases porteuses des ETMs doit trouver un complément d'informations dans le fractionnement chimique de l'aluminium, du fer et du manganèse. Ces éléments sont en effet présents sous diverses formes dans les sols, en fonction de l'intensité et de la nature des processus de pédogenèse. Les résultats du fractionnement chimique par extraction séquentielle figurent au tableau II.7, sous formes de proportions par rapport au total extrait.

On constate que les formes I et II (respectivement les fractions "adsorbées" et "liées aux oxydes de Mn peu cristallisés") sont très peu importantes pour Al et Fe (< 1%). Pour Mn, la forme I représente 4% du total, alors que la forme II est logiquement la fraction la plus importante (30 à 40%).

Tableau II. 7: 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 de la coupe de Tongrinne.

	Al-I	Al-II	Al-III	Al-IV	Al-V	Al-VI
C ₂	0.0	0.1	1.6	1.5	3.2	93.5
₂ C ₁	0.0	0.1	4.5	2.2	3.5	89.7
₃ E	0.1	0.2	8.6	3.4	3.9	83.8
₃ BTg	0.1	0.2	6.9	3.8	5.3	83.8
₄ BT ₂	0.1	0.0	4.3	3.4	4.9	87.3
₄ C	0.1	0.1	4.9	2.3	4.3	88.3
	Fe-I	Fe-II	Fe-III	Fe-IV	Fe-V	Fe-VI
C ₂	0.0	0.3	4.3	4.8	19.8	70.7
₂ C ₁	0.0	0.4	10.8	11.4	20.2	57.1
₃ E	0.0	0.8	19.1	22.9	12.1	45.1
₃ BTg	0.0	0.8	13.9	19.1	18.4	47.7
₄ BT ₂	0.0	0.2	6.1	10.4	18.6	64.8
₄ C	0.0	0.3	7.5	7.0	20.6	64.6
	Mn-I	Mn-II	Mn-III	Mn-IV	Mn-V	Mn-VI
C ₂	3.8	41.9	20.1	4.9	7.0	22.3
₂ C ₁	4.4	43.9	13.2	8.7	6.1	23.7
₃ E	3.3	40.8	15.9	26.6	2.1	11.2
₃ BTg	3.4	39.6	19.2	24.0	3.4	10.3
₄ BT ₂	4.4	35.0	19.5	11.8	7.9	21.5
₄ C	3.5	31.0	24.6	6.4	7.9	26.6

Pour Al, les formes III ("liées à la matière organique"), IV ("liées aux oxydes amorphes") et V ("liées aux oxydes cristallisés"), sont globalement du même ordre de grandeur, soit des valeurs assez faibles compri-

ses entre 1,5 et 5%. Font toutefois exception les horizons du Sol de Warneton qui présentent des teneurs plus élevées pour la fraction liée à la matière organique.

Pour Fe, la forme III est également plus élevée dans le Sol de Warneton, de même que la forme IV (~20% contre 10 dans le loess "hesbayen" ou 5% dans le loess "brabantien"). La forme V vaut de l'ordre de 20% du fer total, sauf dans l'horizon 3E de Warneton (12%).

On retrouve le même singularisme du Sol de Warneton pour les formes IV (proportions plus élevées) et V (proportions moins élevées) de Mn .

L'importance de la forme VI, qui est censée traduire pour un élément l'importance de sa localisation à l'intérieur des silicates, est supérieure à 85% pour Al, de l'ordre de 60 à 70% pour Fe et de 20 à 25% pour Mn. Le sol de Warneton présente toutefois des proportions plus faibles en éléments sous la forme VI (Al: 84%; Fe: <50%; Mn: ~10%).

Le Sol de Warneton se distingue donc clairement des autres ensembles sur la base du fractionnement chimique. Il est caractérisé par une importance plus grande des fractions supposées "liées à la matière organique et aux oxydes amorphes" au détriment de celles liées aux oxydes cristallisés et aux réseaux silicatés . Ceci est le résultat du milieu d'altération différent pour le Sol de Warneton par rapport aux autres formations et paléosols.

On notera également que parmi les quatre autres horizons, c'est le loess "brabantien" (C_2) qui présente les proportions des formes VI d'Al et Fe les plus importantes. Ceci pourrait (i) signifier un degré d'évolution des matériaux "brabantiens" un peu moins avancé et (ii) s'expliquer par l'âge des matériaux limoneux.

g réserves en "bases" et granulométrie

Parmi les "bases", seul Mg présente une corrélation significative avec la teneur en argile. Pour ce qui concerne l'ensemble des fractions granulométriques, les coefficients de corrélation les plus élevés ont été trouvés pour Mg avec la fraction 0-10 μm , pour K avec la fraction 0-20 μm et pour Na avec la fraction 10-20 μm ; Ca ne présentant pas de relation linéaire apparente avec la granulométrie.

La relation Mg-"0-10 μm " s'explique par la présence de minéraux porteurs de Mg (chlorites, vermiculites...) dans les particules les plus fines. La relation K-"0-20 μm " exprime les influences conjointes des micas/illites et des feldspaths potassiques; les premiers étant présents dans

des particules plus fines que les seconds. La relation Na-"10-20 μ m" traduit la présence de plagioclases dans les limons fins.

Sachant que les processus d'illuviation sont reconnus dans l'ensemble des pédogénèses identifiées sur la coupe (HAESAERTS, 1999), les teneurs dans les horizons doivent être considérées par rapport aux matériaux parentaux respectifs. Il apparaît que les horizons BT présentent toujours des teneurs en Ca et Na inférieures aux horizons C; ce qui doit être perçu comme un effet de dilution des "feldspaths"⁶ par accumulation d'argile.

La TRB est donc le reflet de différences minéralogiques entre les générations de limons. Ces différences peuvent trouver leur source dans la composition originelle des loess et/ou dans les processus d'altération et de lessivage.

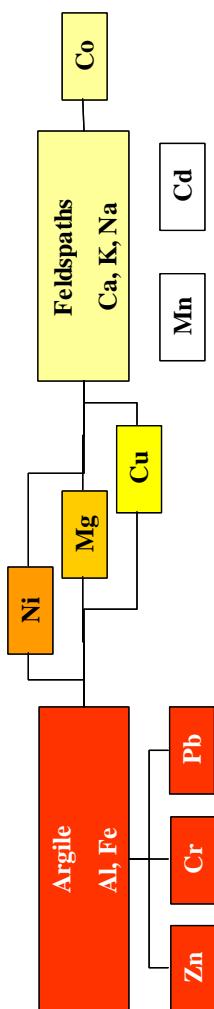
Il ressort des observations précédentes qu'il n'y a que le Sol de Warne-ton qui réunit un ensemble d'indices convergeant vers une différenciation des niveaux d'altération. Il serait tentant de considérer le degré d'altération des autres limons comme relativement homogène sur la coupe et d'imputer les différences actuelles de teneurs entre les horizons C "brabantiens", "hesbayens" et "hennuyens" à des différences géochimiques existant à l'origine. Toutefois, il faut garder à l'esprit que l'image actuelle des matériaux limoneux est le résultat de la superposition de nombreux processus d'altération, d'autant plus nombreux que les limons sont agés, qui se sont succédés et qu'il est impossible d'en revendiquer la maîtrise.

L'ensemble des résultats évoqués ci-avant suggère toutefois que (i) il existe un facteur stratigraphique déterminant pour la composition élémentaire des matériaux limoneux; (ii) les variations qualitatives dans les types d'argile rencontrés sont relativement peu marquées et n'ont pas d'influence notable sur les propriétés d'échange (CEC) des horizons; (iii) le Sol de Warne-ton se distingue par des caractères d'altération plus marqués que les autres ensembles limoneux; (iv) le contenu en "feldspaths" diffère d'un Membre limoneux à l'autre; (v) le rapport TRB/argile diminue de l'horizon C au BT, par un effet de dilution principalement de Ca et Na par l'argile illuvierée.

⁶ Faute de mesure quantitative directe des feldspaths, le raisonnement porte sur les teneurs totales en bases, ce que signifient les guillemets.

h facteurs de la distribution verticale élémentaire

Sur base de leurs coefficients de corrélation (tableaux II.5 a et b), des rapprochements entre éléments peuvent être entrepris. La figure II.11 illustre ces rapprochements.



Les teneurs en argile, Al, Fe, Zn, Cr et Pb forment un groupe à forte corrélation interne. Ils constituent dès lors un pôle "argile" ou "particules fines". Ces résultats sont cohérents par rapport aux travaux de BAIZE (1997) ou de LATRILLE (1998).

Les éléments Ni, Mg et Cu présentent également des corrélations significatives avec le pôle "argile". Toutefois, ils semblent en outre influencés par les teneurs en Ca, K et Na, regroupées en un second pôle, dénommé "feldspath" en raison de l'influence supposée de ce groupe minéralogique sur les teneurs en Ca, K et Na.

Les "feldspaths" ne sont pas réputés contenir de fortes proportions d'ETMs (HARDY, 2002). Il faut probablement voir dans les apparentes relations "feldspaths"-Cu, "feldspaths"-Mg, "feldspaths"-Ni, un effet stratigraphique. En effet, comme illustré à la figure II.12, les teneurs en Mg, Cu et Ni semblent présenter une variabilité entre les générations de limons nettement supérieure à celle existant à l'intérieur de chacune de ces générations. Et les limons les plus riches en ces éléments sont également les plus riches en "bases", comme en témoignent les valeurs de la TRB (en cmol_c/kg), et les plus riches en argile.

Figure II. 11: Relations entre les éléments sur base des coefficients de corrélation.

Les éléments Mn et Cd obéissent à leur propre logique pédogénétique indépendamment de ce schéma. Co semble lié à Ca, mais cette liaison relève d'un effet stratigraphique essentiellement.

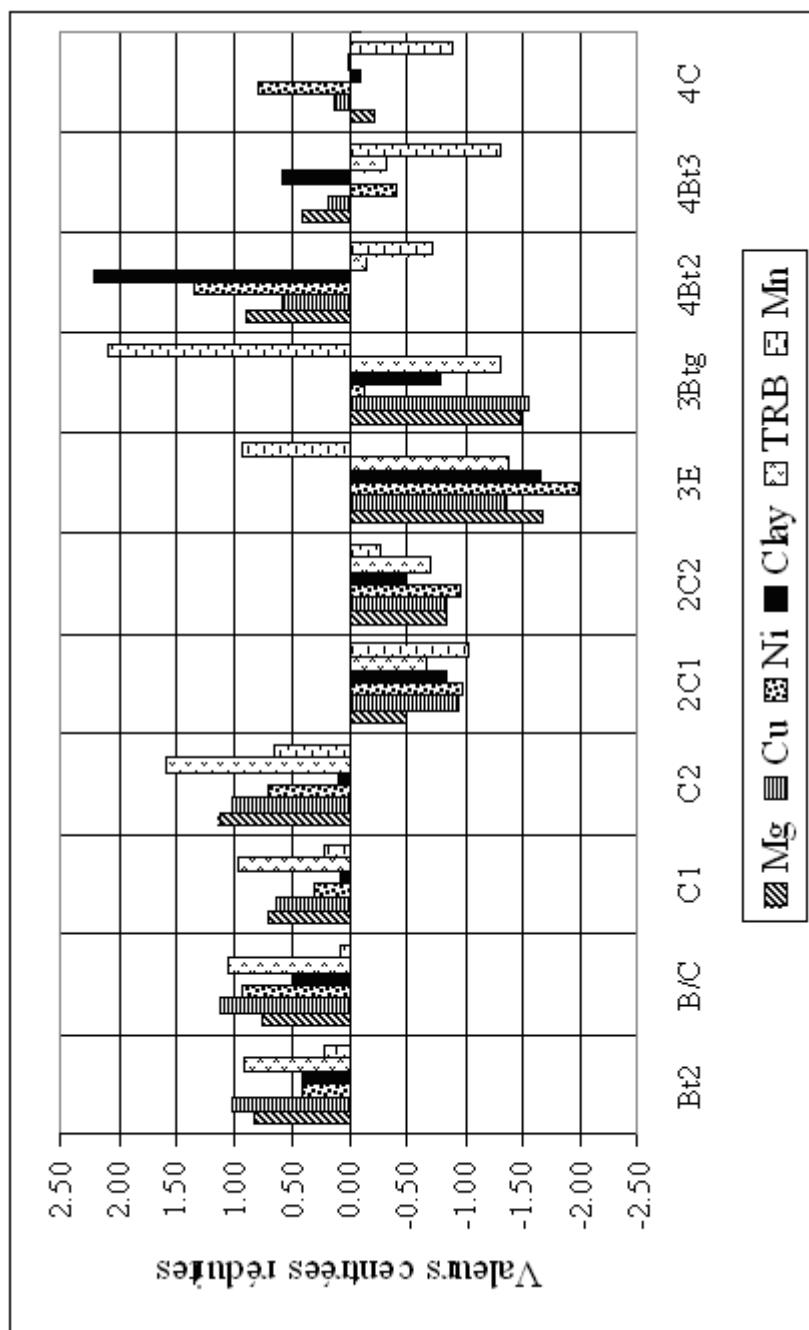


Figure II. 12: Comparaison des teneurs (centrées réduites) en Mg, Cu, Ni, Argile, TRB et Mn dans la coupe de Tongrinne.

Les principales variables explicatives de la distribution verticale des éléments dans la coupe de Tongrinne sont donc les teneurs en argile, en "bases" et en Mn; reflets de différenciations minéralogiques initiales et de processus pédogénétiques majeurs: migrations *per descendum* des argiles et redistributions des oxydes de Mn en fonction des conditions rédox.

L'analyse factorielle multivariée permet de (i) visualiser graphiquement les ressemblances de comportement entre les variables, (ii) d'illustrer les ressemblances entre horizons et (iii) de regrouper les horizons analysés en fonction de leurs ressemblances fonctionnelles.

Seules les variables relatives à la composition élémentaire ont été prises en considération, à l'exclusion de COT et Co qui sont considérées comme homogènes, de Cr, Pb et Cd en raison de valeurs manquantes. Parmi les éléments restant, certains sont clairement identifiés aux teneurs en argile (Al et Fe), à la composition minéralogique (Ca, Mg, K, Na) et aux processus d'oxydo-réduction (Mn).

Basée sur une analyse en composantes principales, dont seules les deux premières portent plus d'informations qu'une variable initiale (*eigenvalue* > 1), l'analyse factorielle fournit un plan factoriel (figure II.13) contenant 88% de la variation totale de l'ensemble des éléments sur toute la coupe. Ceci correspond à peu près au maximum de variation potentiellement explicable, eu égard aux coefficients de variation opératoires des différents éléments. Le plan factoriel exprime dès lors complètement l'influence des différents facteurs de la pédrogenèse; à savoir: composition initiale et processus d'altération, de lessivage ou d'oxydo-réduction.

Le premier axe factoriel (figure II.13) oppose Mn à l'ensemble des autres éléments; le second Fe et Al aux "bases" et à Mn. Voilà les trois pôles comportementaux évoqués plus haut. Mn possède une dynamique de mobilité propre, sensible aux conditions d'oxydo-réduction; Al et Fe présentent une mobilité moindre dans les conditions de la coupe, les mouvements étant associés aux migrations mécaniques de l'argile; enfin les "bases" Ca, K et Na font partie des réseaux cristallins des minéraux et n'ont probablement que peu été sensibles aux migrations verticales. Zn présente un comportement très proche de Fe et Al, alors que Cu, Mg et Ni semblent "tirés vers le haut" par le pôle "feldspaths".

Lorsque leur composition est exprimée en coordonnées factorielles (figure II.14), les horizons de la coupe de Tongrinne se répartissent dans les quadrants en fonction de leur "appartenance stratigraphique". Les

différences entre les générations de limons semblent en effet primer sur les redistributions au sein de chaque unité.

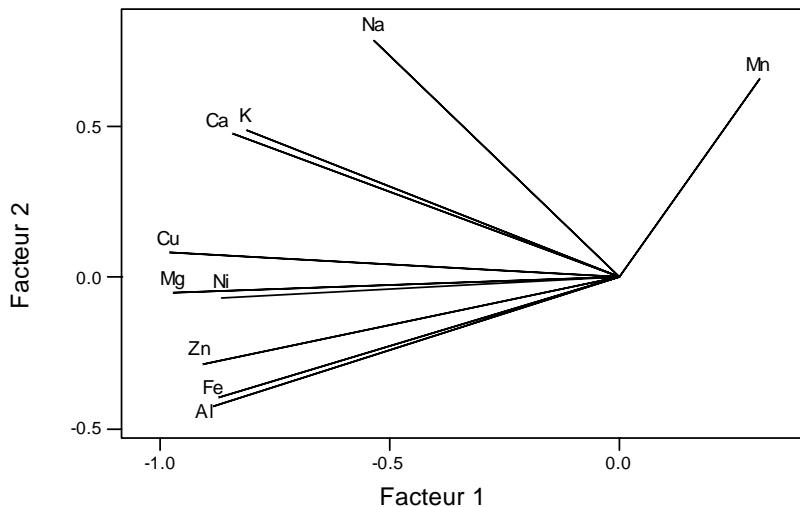


Figure II. 13: Position des variables sur le plan factoriel principal de la coupe de Tongrinne

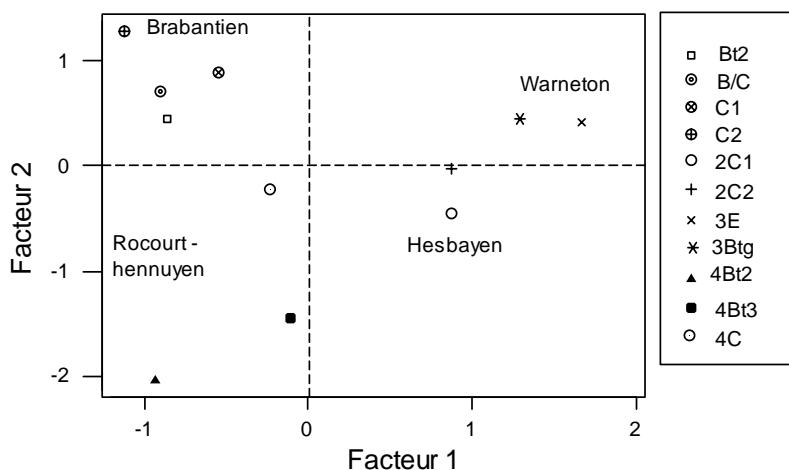


Figure II. 14: Position des échantillons de la coupe de Tongrinne sur le plan factoriel principal.

La primauté de l'effet stratigraphique est confirmée par (i) les résultats de la classification hiérarchique ascendante (figure II.15) réalisée sur base des variables précitées, et (ii) les proportions de variances "expliquées" par la stratigraphie des limons (tableau II.8).

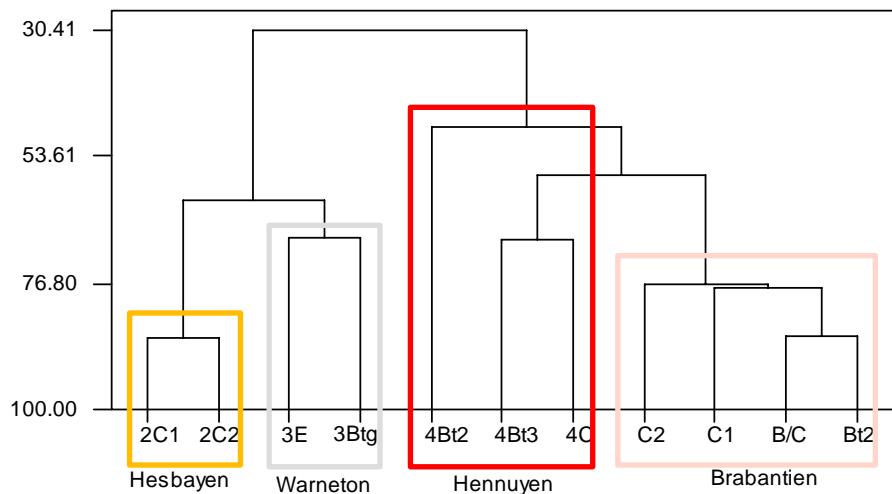


Figure II. 15: Classification hiérarchique ascendante des horizons de la coupe de Tongrinne (distance euclidienne - liaison par la moyenne). Les horizons se ressemblent davantage au sein d'une unité stratigraphique qu'entre deux unités.

Les résultats des analyses de variance univariées (modèle fixe), figurant au tableau II.8 sous formes de risques d'erreur (probabilité de se tromper lorsque l'on rejette l'hypothèse d'égalité des moyennes par unité stratigraphique) et de parts de variation prises en compte par la classification, sont révélateurs de l'importance des teneurs en éléments majeurs dans l'effet stratigraphique. Par contre, celui-ci est moins marqué pour les teneurs en argile et en ETMs y associés. Ceci s'explique par des redistributions d'argile au sein de chaque profil.

Tableau II. 8: Critères de pertinence de la classification des horizons de la coupe de Tongrinne en unités stratigraphiques.

	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Argile	
p	0.001	0.000	0.001	0.010	0.011	0.006	0.045	
classif. (%)	87.5	88.4	82.4	69.0	68.2	72.9	48.2	
	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co	Cd
p	0.002	0.000	0.011	0.053	0.365	0.206	0.044	
classif. (%)	81.0	95.8	68.1	49.1	ND	ND	ND	ND

p: probabilité associée au rejet de l'hypothèse d'égalité des moyennes.

classif (%): proportion de la variance "expliquée" par la classification.

ND : non déterminé en raison du faible nombre d'échantillons.

i décomposition de la variance et estimation du fond géochimique

Afin de réduire l'erreur sur une estimation, il peut être utile de décomposer la variance totale en une variance modélisée et une variance résiduelle. C'est alors cette dernière qui intervient dans le calcul de l'erreur de l'intervalle de confiance autour de la valeur estimée. L'évaluation de l'importance relative des composantes de la variance, et conséquemment de l'intérêt d'un modèle, peut être réalisée par l'intermédiaire du coefficient de détermination pour les relations quantitatives (DAGNELIE, 1973) et de l'analyse de la variance pour les classifications.

En vertu des corrélations observées (tableau II.5), la teneur en argile est potentiellement intéressante comme base d'un modèle de régression linéaire pour les éléments Mg, Al, Fe, Cu, Zn, Ni, Cr et Pb. L'importance de l'effet stratigraphique et l'intérêt d'une stratification sur cette base ont été démontrés (tableau II.8) pour l'ensemble des éléments, à l'exception de Cr et Pb.

En conséquence, l'estimation ponctuelle du fond géochimique sur base des résultats de la coupe de Tongrinne peut s'appuyer (i) sur l'ensemble des valeurs mesurées lorsque l'on ignore tout de l'âge du limon, (ii) sur les teneurs mesurées pour le limon correspondant de la coupe de Tongrinne lorsque l'âge du limon roche-mère est identifié ou (iii) sur base d'une relation linéaire avec un ou plusieurs paramètres "explicatifs" lorsque ceux-ci sont disponibles au point d'intérêt. Ces trois options ont fait l'objet d'une évaluation dont les résultats figurent au tableau II.9. Une teneur de fond géochimique en chaque élément est estimée en considérant que le matériau parental est (1) un limon, (2) un limon "brabantien" ou (3) un limon dont on a mesuré la teneur en argile.

Les résultats confirment (i) l'avantage de pouvoir identifier l'âge du limon pour l'ensemble des éléments et (ii) l'intérêt explicatif, plus ou moins marqué, de la teneur en argile pour la majorité des éléments aux exceptions de Na, Mn, Co et Cd.

Le resserrement des intervalles de confiance par rapport à l'option la plus générale traduit l'efficacité du modèle. Pour des limons "brabantiens", la stratification par la stratigraphie constitue le modèle le plus pertinent pour les éléments: Ca, Mg, K, Na, Mn, Cu, Ni, Cr, Co et Cd. Tous limons confondus, la régression avec la teneur en argile est utile pour les éléments: Mg, K Al, Fe, Cu, Zn, Ni, Cr et Pb.

Tableau II. 9: Estimations du fond géochimique sur base de la coupe de Tongrinne
a) éléments majeurs (en g/100g) et TRB (cmolc/kg)

	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	TRB
1. Tous limons confondus							
Moyenne	0.34	0.45	1.71	0.56	4.90	2.60	122.0
IC95	0.17	0.23	0.38	0.26	1.32	1.07	44.3
2. Par unité stratigraphique (ex. "brabantien")							
Moyenne	0.45	0.55	1.91	0.72	5.25	2.85	148.3
IC95	0.03	0.07	0.32	0.07	0.72	0.28	14.9
3. par régression avec la teneur en argile ($Y = a + b X$)							
a	NS	0.10	1.45	NS	2.57	0.52	NS
b	NS	0.0150	0.0110	NS	0.0998	0.0891	NS
IC95	NS	0.16	0.37	NS	0.69	0.35	NS

b) ETMs (en mg/kg)

	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co	Cd
1. Tous limons confondus								
Moyenne	497.1	13.7	50.9	26.7	55.5	16.5	9.8	0.08
IC95	266.1	5.6	21.4	10.2	11.6	1.9	2.3	0.05
2. Par unité stratigraphique (ex. "brabantien")								
Moyenne	547.2	16.4	57.2	30.0	57.3	17.1	11.1	0.11
IC95	76.6	2.3	6.9	3.2	1.2	1.2	0.2	0.03
3. par régression avec la teneur en argile ($Y = a + b X$)								
a	NS	5.5	10.7	10.1	31.3	12.3	NS	NS
b	NS	0.3511	1.7210	0.7083	1.049	0.1805	NS	NS
IC95	NS	4.1	8.6	6.5	3.5	0.4	NS	NS

IC95: demi-intervalle de confiance sur la valeur prédictive ($\alpha = 0.05$) ; pour les équations de régression, il s'agit de l'intervalle pour un x égal à la moyenne sur la coupe de Tongrimne, car l'IC95 d'une valeur estimée par régression dépend de la valeur de x.

NS : Non Significatif ($\alpha = 0.05$).

5.2.1.3 Conclusions

Une série de limons d'âges différents ont été étudiés sur la coupe de Tongrinne. Des différences de teneurs élémentaires, qui ne résultent pas uniquement de la variabilité opératoire, existent au sein des limons. Ces différences sont susceptibles de générer localement des différences dans la composition élémentaire ou les propriétés des horizons de surface. La majeure partie de cette variabilité résulte d'un effet stratigraphique et de la présence de paléosols. Elle est donc modélisable à l'échelle de la coupe par une série de caractéristiques directement perceptibles sur le terrain. Couleur, texture, présence de taches et concrétions liés aux phénomènes rédox permettent en effet de rattacher l'horizon à un ensemble stratigraphique et à une gamme de teneurs.

Pour ce qui concerne l'extrapolation aux matériaux limoneux non-issus de la coupe, un tableau d'estimation du fond géochimique ponctuel des sols limoneux selon trois scenarii est proposé.

Toutefois, spatialement, la prédiction de l'âge du limon roche-mère est impossible faute d'observations. Néanmoins, pour les sols limoneux décarbonatés, la connaissance de la teneur en argile et de l'importance des caractères rédox doit permettre l'estimation du fond géochimique en ETMs. L'incertitude spatiale sur le matériau parental loessique ne reste alors un problème que pour la prédiction de la TRB.

5.2.2 Corrélations avec d'autres coupes quaternaires

Dans une seconde phase de l'approche stratigraphique, la coupe de Tongrinne est comparée à trois autres coupes limoneuses profondes, qui ont été décrites et échantillonnées par CORDIER (1999). Les objectifs visés par cette comparaison sont (i) la vérification sur d'autres sites des résultats et conclusions relatifs à la coupe de Tongrinne ; (ii) l'évaluation de la représentativité des entités stratigraphiques décrites à Tongrinne par rapport à un ensemble d'horizons limoneux profonds; et (iii) l'évaluation de l'importance de "l'effet site". Le changement d'échelle opéré introduit en effet un facteur de variabilité potentiel qui est dû aux différences entre les sites; différences qui peuvent trouver leur origine dans la composition minéralogique et granulométrique des matériaux (d'autant plus probable que les sites sont éloignés les uns des autres) et dans les degrés et "directions" d'évolution de ces matériaux (en fonction de l'environnement physique du site principalement). L'importance de la position topographique et du drainage naturel sur la différenciation verticale des loess a été montrée par MANIL (1952); tandis que l'influence du site sur l'évolution minéralogique des argiles a été soulevée par THOREZ *et al.* (1970).

5.2.2.1 Matériels et méthodes

a localisation des coupes

Les coupes décrites par CORDIER (1999) (figure II.16), dans le cadre de la mise en place du RPG Nord-Pas-de-Calais, sont situées dans le prolongement occidental de la Région limoneuse belge. Les formations loessiques y ont été étudiées auparavant par PAEPE et SOMME (1970) et par JAMAGNE (1973), pour la partie méridionale du Nord-Pas-de-Calais. PAEPE et SOMME reconnaissent deux ensembles sous-régionaux (Haut-Pays et Bas-Pays) et une dizaine de petites régions naturelles (PRN). La partie méridionale a connu des conditions climatiques semblables à celles de Tongrinne (TONG), càd. favorables à la conservation de la séquence weichsélienne. Deux des trois coupes (Marcoing -MCG- et Busigny -BUS) sont situées dans cette sous-région, au sein de la PRN du Cambrésis. Dans la partie septentrionale, le climat aurait subi l'influence de la proximité de la mer: des conditions plus humides auraient intensifié les processus d'érosion. Les séquences de loess sont dès lors généralement incomplètes. La coupe de Lambres-Les-Aire (LLA) présente des loess weichséliens reposant directement sur un substratum de sables cénozoïques. Les sites retenus

occupent une position de plateau ou de haut de versant (BUS) car les séquences loessiques y présentent la plus forte probabilité d'être complètes. Les horizons de surface, potentiellement contaminés, n'ont pas été étudiés.

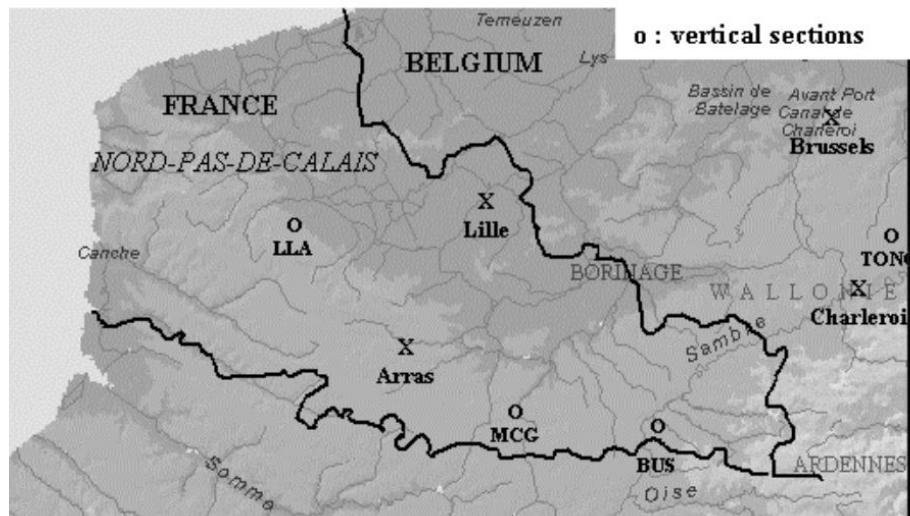


Figure II. 16: Localisation des coupes quaternaires de Tongrinne (TONG), Marcoing (MCG), Busigny (BUS) et Lambres-Les-Aire (LLA).

b description des coupes

A l'instar de la coupe TONG, les trois coupes de CORDIER ont été décrites sur les flancs d'anciennes briqueteries selon la méthodologie standardisée de description des sols de DELECOUR et KINDERMANS (1980).

c déterminations analytiques et méthodes statistiques

Les analyses -pH_{H2O}, COT, CaCO₃, granulométrie, CEC, teneurs totales (HF)- des trois coupes françaises ainsi que la détermination des teneurs totales de six horizons de la coupe TONG ont été réalisées par l'INRA d'ARRAS. Les méthodes d'analyse figurent en annexe 3.

Les méthodes statistiques comprennent (i) l'analyse de la distribution des valeurs variable par variable, en particulier de l'amplitude des variations par rapport à la variabilité opératoire, (ii) l'analyse des corrélations entre éléments, (iii) le recours à l'analyse factorielle discriminante pour l'interprétation en facteurs explicatifs et l'analyse des res-

semblances entre horizons et (iv) les analyses de la variance univariées et multivariées⁷ pour l'estimation de l'importance de l'effet site. Les méthodes statistiques ne constituent pas une fin en soi, mais doivent être perçues comme des outils pour vérifier des hypothèses conçues sur base d'une connaissance théorique et d'observations de terrain. Les représentations graphiques et calculs statistiques ont été réalisés avec les logiciels MS Excel et MINITAB 13.

5.2.2.2 *Résultats et discussion*

a paramètres descriptifs

La coupe de Marcoing (MAR) est décrite sur une épaisseur de 4 mètres. La séquence d'horizons (Tableau II.10) peut être décrite comme une succession d'horizons illuviaux (BT_1 , BT_2 , BT_3), brun-jaune mat, surmontant des horizons C brun-jaune non-carbonatés (C_1 , C_2), des horizons brun-jaune mat non-carbonatés et légèrement plus argileux ($_2BT$, $_2C_1$), un horizon C jaune-orange mat carbonaté ($_2C_{2ca}$), puis un horizon C brun-jaune légèrement carbonaté ($_2C_{3ca}$). Les autres caractéristiques morphologiques remarquables sont: (i) les horizons BT du sol supérieur présentent peu de caractères redox (taches et concrétions); (ii) l'importance de ces caractères dans les horizons C supérieurs augmente vers la profondeur, particulièrement au contact de l'horizon $_2BT$; (iii) un horizon supplémentaire a été observé à la tarière sous le $_2C_{3ca}$. Il présente les mêmes caractéristiques que l'horizon $_2C_{2ca}$. Par rapport à la coupe TONG, le sol holocène de la coupe MCG serait classé dans la même série de sols du système de classification de la Carte des sols de la Belgique.

La coupe de Busigny (BUS) atteint une profondeur de 360cm. Huit horizons ont été décrits. Les traits morphologiques principaux sont repris dans le tableau II.10. La description se résume comme suit: un horizon brun-jaune épais (C_1) présentant de nombreuses taches d'oxydo-réduction et quelques revêtements argileux en surface des agrégats, au-dessus d'un ensemble relativement homogène d'horizons jaune-orange mat (C_2 à C_7) peu à fort tachés d'oxydo-réduction, surmontant un horizon brun-jaune brillant plus compact (C_8). On notera (i) l'abon-

⁷ Des conditions d'application existent pour l'analyse de la variance multivariée: échantillonnage aléatoire et simple, multi-normalité des populations, égalité des matrices de variance et covariance. Nécessaires aux fins d'inférence statistique, elles perdent leur caractère strict dans un cadre descriptif (PALM, 2000).

dance des taches d'oxydo-réduction dans toute la coupe à l'exception de l'horizon C₄; (ii) la rareté des concentrations Fe/Mn par référence au point (i); (iii) la teinte de la matrice des horizons C₂ et C₄ plus pâle que dans le reste de la coupe; (iv) la texture relativement homogène; et (v) qu'aucun des horizons n'est carbonaté. Les processus redox semblent donc constituer le principal facteur de différenciation des horizons profonds de la coupe BUS.

Tableau II. 10: Principales propriétés morphologiques des horizons des quatre coupes dans les loess

Site / horizon	Profondeur (cm)	Classe texturale	Couleur Munsell	CaCO ₃	Caractères redox	Conc. Fe/Mn
Tongrinne						
B/C	100 - 127	Laf	7.5YR 5/4	(-)	**	*
C ₁	131 - 165	Lf	7.5YR 5/4	(-)	*	*
₂ C ₂	250 - 270	Lf	10YR 5/6	(-)	**	*
₃ BTg	280 - 285	Lf	10YR 5/4	(-)	*	***
₄ BT ₃	322 - 340	Laf	7.5YR 5/6	(-)	*	
₄ C	360 - ...	Lf	7.5YR 6/6	(-)	*	*
Marcoing						
BT ₁	44 - 76	Lf	10YR 5/6	(-)	*	*
BT ₂	76 - 105	Lf	10YR 5/4	(-)	*	*
BT ₃	105 - 135	Lf	10YR 5/4	(-)	*	*
C ₁	135 - 160	Lf	10YR 5/6	(-)	*	
C ₂	160 - 210	Lf	10YR 5/6	(-)	**	
₂ BT	210 - 255	Lf	10YR 5/4	(-)		
₂ C ₁	255 - 300	Lf	10YR 5/4	(-)		
₂ C _{2ca}	300 - 365	Lf	10YR 6/4	(++)	*	
₂ C _{3ca}	365 - 400	Lf	10YR 5/6	(+)	*	
Busigny						
C ₁	46 - 100	Lf	10YR 5/6	(-)	***	
C ₂	100 - 125	Lf	10YR 7/4	(-)	***	*
C ₃	125 - 173	Lf	10YR 6/4	(-)	**	
C ₄	173 - 192	Lf	10YR 7/4	(-)	*	
C ₅	192 - 230	Lf	10YR 6/4	(-)	**	
C ₆	230 - 280	Lf	10YR 6/4	(-)	***	*
C ₇	280 - 335	Lf	10YR 6/4	(-)	***	*
C ₈	335 - ...	Lf	10YR 6/6	(-)	**	
Lambres - les- Aire						
C ₁	40 - 62	Lf	10YR 5/3	(+)		
C _{2ca}	62 - 110	Lf	10YR 6/3	(++)	*	
C _{3ca}	110 - 165	Lf	10YR 6/3	(++)	*	
C _{3/2} C _{ca}	165 - 190	Lf	10YR 5/6	(++)	*	
₂ C	190 - >230	Lf	10YR 5/4	(+)	*	

Texture: Limon fin (Lf); Limon argileux fin (Laf).

CaCO₃: réaction visible à HCl nulle (-), faible (+) ou forte (++)

Caractères redox et Fe/Mn: pas (), peu (*), plutôt nombreux (**), nombreux (***)

Le site de Lambres-les-Aire (LLA) représente une région naturelle où les dépôts loessiques couvrent des sables et grès cénozoïques ou des craies crétacées. Suite à d'importants changements tectoniques durant la transition Miocène-Pliocène, les processus d'érosion ont profondément remanié les formations cénozoïques (SOMME *In CORDIER*, 1999). En conséquence, les silex sont fréquents dans les couches sableuses. En raison d'une exploitation extractive ancienne, seule la partie basse des dépôts loessiques subsiste dans la coupe LLA. La succession d'horizons est la suivante (tableau II.10): un horizon brun-jaune mat (C_1), faiblement carbonaté, recouvrant des horizons carbonatés jaune-orange mat (C_2 , C_3) et brun-jaune à sables fins et silex (C_2); l'horizon inférieur (C_3), brun-jaune mat, est plus argileux et plus compact; moins carbonaté mais contenant toujours des silex. Les taches d'oxydo-réduction sont très peu nombreuses à l'échelle de la coupe et les concrétions Fe/Mn absentes. Par rapport aux autres coupes, LLA se distingue par l'abondance des carbonates et l'influence du substratum tertiaire dans les horizons les plus profonds.

Quelques points importants se dégagent donc des observations de terrain de CORDIER (1999).

- Quelques horizons présentent une forte réactivité à HCl, ce qui présume une influence relativement importante de la teneur en carbonates et des propriétés liées à la valeur du pH sur la variabilité entre horizons.
- La texture, telle qu'elle peut être estimée sur le terrain, indique des teneurs plus élevées en argile ainsi qu'une plus grande différenciation entre horizons dans la coupe TONG. La coupe LLA montre une augmentation graduelle avec la profondeur des teneurs en sables fins en raison de la présence d'un substrat sableux sous les loess. La texture représente donc également un facteur potentiel de variation des teneurs en ETMs entre les horizons des différentes coupes.
- Les taches d'oxydo-réduction sont nombreuses dans la coupe BUS, sans pour autant que l'on observe de concentrations ferromanganiques. On peut suspecter que les processus redox ont été importants sans engendrer d'accumulations spectaculaires d'ETMs.

b caractéristiques pédologiques de base

Les amplitudes de variation sont reprises au tableau II.11.a. La variable COT, à l'instar des résultats de la coupe TONG, peut être considérée comme homogène. Les autres paramètres classiques des caractérisations pédologiques présentent des variabilités supérieures à la variabilité opératoire, à l'exception de la coupe BUS qui apparaît très homogène.

La comparaison des coupes confirme (i) la variabilité plus importante des paramètres liés à la basicité dans les coupes MCG et LLA, et (ii) la faible différenciation texturale des coupes MCG et BUS et la variabilité plus élevée des teneurs en argile dans la coupe TONG et en argile et en sables dans la coupe LLA.

Les amplitudes de la CEC sont du même ordre de grandeur dans les quatre coupes. Ceci pourrait signifier à première vue que la relation CEC/argile n'est pas la même d'un site à l'autre. Dans le cas de la coupe TONG, cela s'explique par la différence de méthodes de détermination de la CEC (acétate-NH₄ contre Co(NH₃)₆Cl₃ dans les trois autres coupes) et de l'analyse granulométrique (dispersant). Pour ce qui concerne, les trois coupes françaises, on peut considérer qu'il existe une relation linéaire simple entre CEC et teneur en argile (figure II.17) car un seul échantillon se singularise par une CEC trop faible par rapport à son pourcentage d'argile. Rien ne permet donc d'affirmer que les différents sites se caractérisent par des associations typologiques d'argiles spécifiques à chacun d'eux.

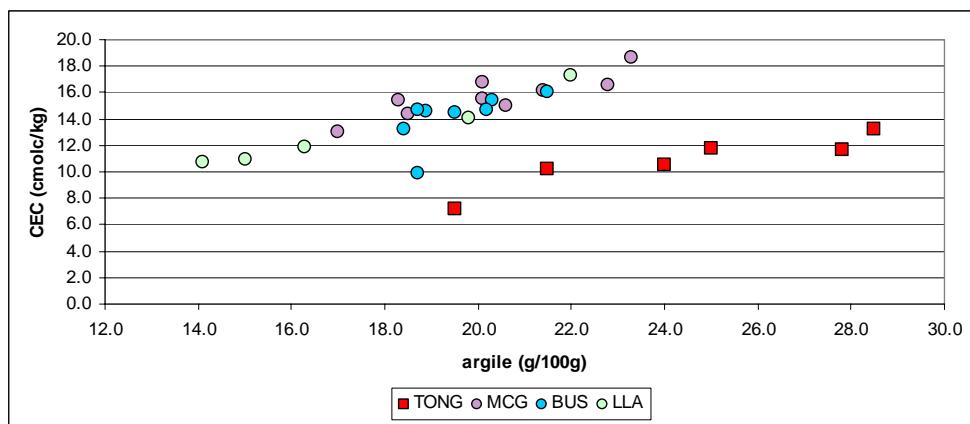


Figure II. 17: Relation CEC (cmolc/kg) - teneur en argile (g/100g) pour les échantillons des quatre coupes limoneuses.

Tableau II. 11: Amplitudes de variation dans les coupes de Tongrinne (TONG), Marcoing (MCG), Busigny (BUS) et Lambres-Les-Aire (LLA)
a) des déterminations analytiques de base

Coupe	pH (H ₂ O)	COT g/100g	CaCO ₃ g/100g	Granulométrie			CEC cmol _c /kg
				0-2µm	2-50µm	>50µm	
TONG	0.3	0.1	0.3	9.0	7.8	4.1	6.0
MCG	0.8	0.2	8.7	6.3	10.4	2.9	5.6
BUS	0.4	0.1	0.0	3.1	4.1	1.6	6.2
LLA	0.7	0.0	16.3	7.9	26.9	21.1	6.5

b) des teneurs totales (HF)

Coupe	Teneurs totales							
	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe		
	g/100g							
TONG	0.30	0.31	0.48	0.34	1.58	1.23		
MCG	3.13	0.22	0.30	0.34	1.56	0.78		
BUS	0.06	0.08	0.19	0.11	0.63	0.52		
LLA	6.16	0.46	0.35	0.40	1.45	1.09		
Coupe	Mn	Cu	Zn	Cr	Ni	Pb	Co	Cd
	mg/kg							
TONG	484.2	7.3	15.4	18.8	12.9	2.7	3.4	0.07
MCG	340.0	4.4	19.4	7.3	10.3	3.5	2.2	0.09
BUS	247.3	3.6	4.8	8.9	5.3	4.2	4.5	0.17
LLA	216.4	6.1	20.7	22.9	12.7	4.0	4.3	0.06

c teneurs totales en éléments

A l'exception des teneurs en Cr, Pb, Co et Cd, les amplitudes du tableau II.11.b sont, pour les coupes TONG, MCG et LLA, supérieures aux statistiques de la variabilité opératoire. La coupe BUS par contre, présente des variations aux limites de ces statistiques pour tous les paramètres mesurés sauf les teneurs en Fe et Mn.

Pour ce qui concerne la composition élémentaire, (i) Ca présente logiquement une différenciation plus importante en présence d'horizons carbonatés; (ii) les différenciations de teneurs en Mg, K, Fe, Cu, Cr et Ni répondent à celle des teneurs en argile; (iii) les amplitudes de variation de Na, Al, Zn et Cd sont similaires d'une coupe à l'autre pour TONG, MCG et LLA; (iv) Mn présente une amplitude de variation bien plus importante à TONG que dans les autres coupes; et enfin (v) BUS apparaît comme la coupe la plus homogène. Il appert de ces résul-

tats une certaine cohérence avec les observations de terrain.

d relations entre variables

Les relations entre variables sont partiellement exprimées dans la matrice de corrélation (tableau II.12). Par rapport à la coupe TONG, des changements peuvent être attendus dans les valeurs des coefficients de corrélation, voire dans leurs signes, étant donné que les facteurs de différenciation changent d'un site à l'autre.

Tableau II. 12: Matrice de corrélations relative aux variables mesurées sur les quatre coupes limoneuses (n = 28)

	"0-2µm"	"2-10µm"	">50µm"	pHH2O	CaCO3	Ca	Mg	K	Na
"2-10µm"									
">50µm"									
pHH2O				-0.854					
CaCO3	-0.642								
Ca	-0.575	-0.630			0.616				
Mg	-0.570	-0.616			0.646	0.998			
K									
Na							0.441		
Al								0.837	
Fe							-0.599	-0.575	0.721
Mn									0.481
Cu								0.689	
Zn								0.596	0.421
Ni								0.576	0.542
Cr									
Pb				0.607	-0.490		-0.634	-0.607	0.694
Co									0.484
Cd									0.549
	Al	Fe	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co
Fe	0.901								
Mn									
Cu	0.846	0.830							
Zn	0.823	0.831		0.760					
Ni				0.757	0.713	0.921			
Cr				0.518	0.640	0.410	0.734	0.721	
Pb					0.837	0.744	0.763	0.708	0.580
Co					0.656	0.692	0.592	0.585	0.717
Cd					0.505			0.409	0.473

On remarque : (i) les corrélations négatives entre CaCO₃ et la plupart des éléments qui indiquent un effet de dilution par les carbonates; (ii) les corrélations étroites existant entre Cu, Zn, Ni, Pb, Co et, dans une

moindre mesure, Cr et les teneurs en Al et Fe, mais n'existant pas pour les teneurs en argile; (iii) les relations entre ETMs et Mg ou K moins marquées en présence de carbonates; (iv) la faible corrélation entre Mn et les autres variables à l'exception de Cd et Na ($\alpha < 0.01$).

Les corrélations entre ETMs ou Al-Fe et argile sont beaucoup moins fortes que celles observées pour la coupe TONG. La figure II.18 illustre les relations entre teneurs en Al et en argile pour les quatre coupes.

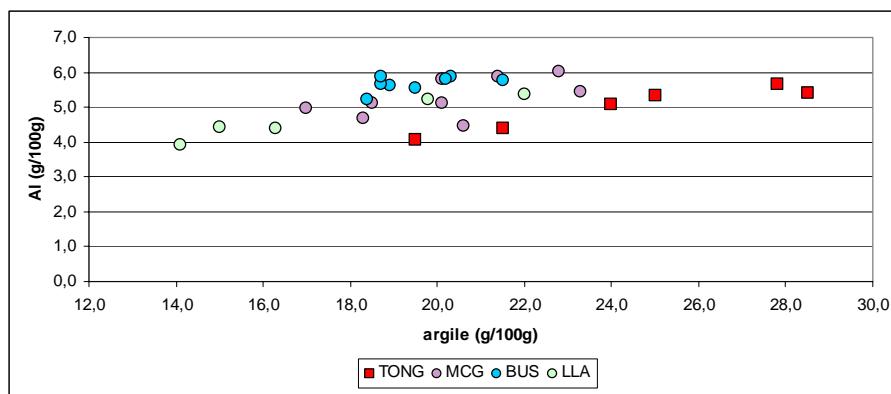


Figure II. 18: Relations Al-argile pour les 4 coupes limoneuses.

Pour les coupes TONG et LLA, la linéarité des relations est évidente. Pour les coupes MCG et BUS, la plus faible différenciation des teneurs explique l'importance relative plus élevée de la variabilité opératoire et la diminution concomitante du coefficient de corrélation. Toutefois, MCG et BUS s'inscrivent relativement bien dans la relation Al-argile de la coupe LLA. Le coefficient de corrélation entre ces deux variables considérées sur les trois coupes françaises est de 0.70 ($\alpha < 0.001$). La raison principale de la faiblesse de la signification de la relation entre Al (ou Fe) et argile semble due à la coexistence de deux relations, une pour TONG, l'autre pour les trois autres coupes. Deux explications sont possibles : (i) il s'agit d'un problème de biais dans les résultats des teneurs en argile dû à l'utilisation de deux méthodes différentes ; ou (ii) il existe réellement un facteur géographique (lithologique ou milieu d'altération) entre les coupes françaises et la coupe TONG. Ceci pose évidemment le problème de la comparaison de résultats issus de méthodes d'analyses différentes et l'incertitude actuelle ne pourra être levée qu'après la réalisation programmée de l'analyse granulométrique de l'ensemble des échantillons selon une seule méthode. En conséquence, dans l'immédiat, les régressions du tableau II.9 ne pourront pas être validées.

La corrélation entre les teneurs en Al et Fe, par contre, est très hautement significative (0.90), le rapport Al/Fe est proche de 2 (figure II.19). A noter toutefois, l'absence de corrélation statistiquement significative entre ces deux éléments pour la coupe BUS, qui présente les caractères d'homogénéité interne et d'oxydo-réduction les plus élevés. Alors, sont-ce les faibles amplitudes de variations ou des phénomènes de redistribution qui expliquent l'absence de corrélation? Probablement, les deux! Seuls les éléments Fe et Mn présentent des amplitudes significatives dans la coupe BUS et ces deux éléments ont leurs teneurs les moins élevées dans les deux horizons décolorés de la coupe.

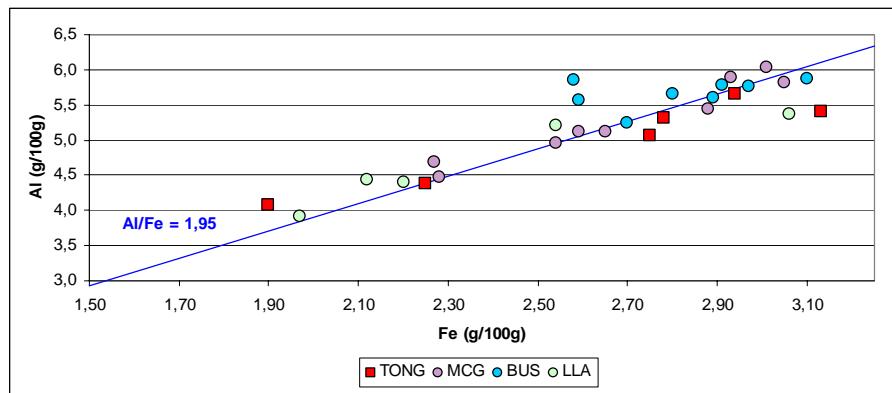


Figure II. 19: Relation Al-Fe dans les quatre coupes limoneuses.

Les éléments Cu, Zn, Ni, Cr, Pb et Co présentent des corrélations très hautement significatives avec Al et Fe (à l'exception de la relation Al-Cr qui n'est "que" hautement significative). Les ordres de grandeurs des corrélations sont comparables pour Al et pour Fe à l'échelle des quatre coupes et suivent l'ordre Pb > Cu = Zn > Ni > Cr = Co. Cet ordre n'est toutefois pas respecté à l'échelle des coupes individuelles et il est dès lors impossible de conjecturer sur les formes de ces éléments sans se perdre dans les tourbillons de la recherche du détail insignifiant.

Parmi les autres corrélations hautement significatives, figurent les relations entre Mn, Cd et Na. La relation Mn-Cd (figure II.20) confirme celle supposée pour la coupe de Tongrinne (titre 5.2.1.2.c). Ces deux éléments sont réputés parmi les plus mobiles des ETMs (BAIZE, 1997); une relation linéaire entre leurs teneurs dans les horizons ne semble dès lors pas illogique. Il faut noter que l'horizon de la coupe TONG le plus riche en concrétions ferro-manganiques n'entre pas dans cette relation linéaire, pas plus que l'horizon le plus profond de la coupe BUS, dont la teneur en Cd peut être qualifiée de suspecte.

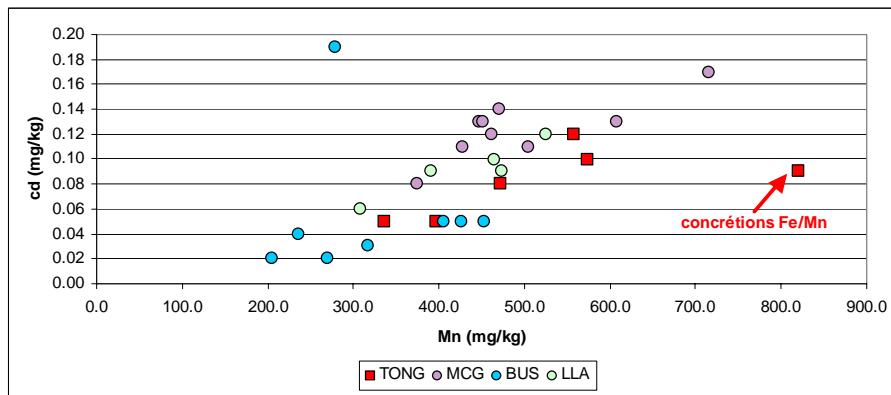


Figure II. 20: Relation Cd-Mn dans les quatre coupes quaternaires

Pour ce qui concerne la relation Na-Mn (figure II.21), les conclusions ne sont pas les mêmes. Plutôt qu'une relation linéaire, il faut voir dans le coefficient de corrélation un effet stratigraphique. Dans la coupe TONG, les horizons "brabantiens" présentent des niveaux de teneurs en Na et Mn supérieurs à ceux des limons plus vieux (titre 6.2.1.2c). Il semble que cela soit le cas également pour les coupes MCG et LLA. Dans la première, les cinq horizons qui présentent des teneurs en Na supérieures à 0.80 g/100g (figure II.21) sont les cinq horizons attribués au profil le plus jeune. Dans la seconde coupe, l'horizon C₁, de même que les horizons C_{2ca} et C_{3ca} si l'on considère les teneurs par rapport à la terre fine sans les carbonates, présentent des teneurs en Na similaires à celles des horizons "brabantiens" de la coupe TONG et du profil supérieur de la coupe MCG. Tous les autres horizons présentent des teneurs en Na comprises entre 0.50 et 0.70 g/100g.

On peut donc émettre l'hypothèse que le Na total dans les limons bien drainés constitue un marqueur stratigraphique, ou tout au moins un marqueur des limons du Weichselien supérieur. Ceux-ci composeraient le matériau parental des profils supérieurs des coupes TONG, MCG et LLA. Pour ce qui concerne la coupe BUS, par contre, les teneurs en Na sont du même ordre de grandeur que dans les limons anciens. Alors, Na est-il un marqueur? Y-a-t'il eu érosion des limons weichseliens de la coupe BUS? Est-ce le caractère hydromorphe de la coupe BUS qui explique les valeurs plus faibles des teneurs en Na? Nous ne possédons pas suffisamment d'arguments pour trancher actuellement, mais la question mérite peut-être un complément d'investigations à l'avenir.

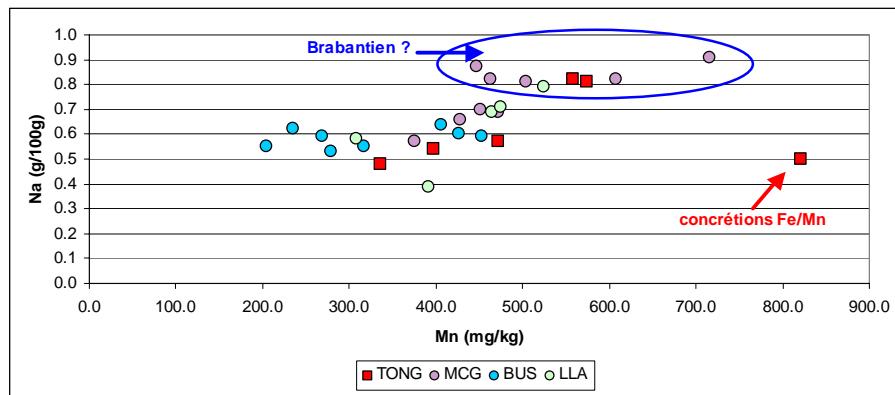


Figure II. 21: Relation Na-Mn dans les quatre coupes quaternaires

e facteurs de variation de la composition élémentaire

Une analyse factorielle a été réalisée sur l'ensemble des échantillons analysés afin de visualiser et hiérarchiser les facteurs de variation de leur composition élémentaire.

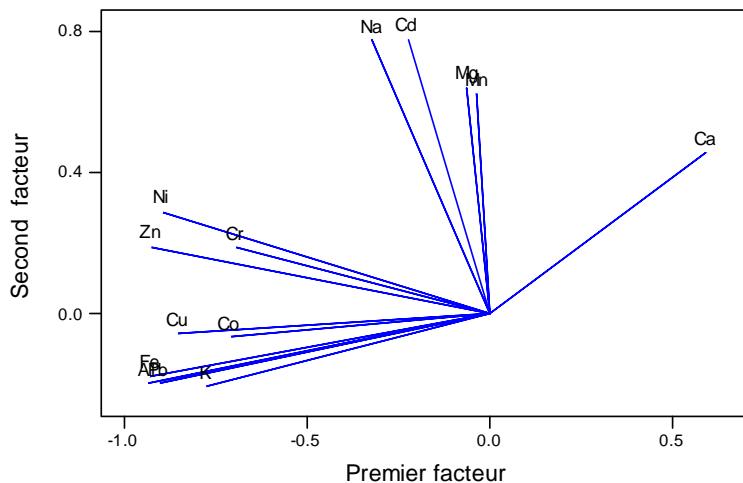


Figure II. 22: Position des variables sur le plan factoriel principal des quatre coupes limoneuses.

Les résultats de l'analyse factorielle (tableau II.13 et figure II.22) indiquent un premier axe factoriel portant 50% de la variation totale de composition élémentaire et opposant les carbonates (exprimés par la teneur en Ca) aux teneurs en éléments liés aux argiles. Il illustre l'effet diluant des carbonates sur la plupart des éléments. Le deuxième axe factoriel contient une information minéralogique (teneurs en carbonates

et plagioclases) et une information relative aux migrations de Mn et Cd, car devraient s'individualiser sur cet axe les horizons à accumulation relative ou absolue de ces deux éléments. Cet axe peut être qualifié de "stratigraphique" car il sépare les horizons "brabantiens", ou supposés tels au point précédent, des autres horizons (figure II.23).

Tableau II. 13: Résultats de l'analyse factorielle sur l'ensemble des horizons des quatre coupes limoneuses: saturations et communautés⁸.

Variable	saturations				communalité
	axe 1	axe 2	axe 3	axe4	
Ca	0.588	0.456	-0.627	0.083	0.953
Mg	-0.062	0.642	-0.721	0.060	0.938
K	-0.777	-0.207	-0.061	-0.444	0.846
Na	-0.324	0.774	0.047	-0.268	0.777
Al	-0.934	-0.196	-0.139	-0.057	0.933
Fe	-0.929	-0.177	-0.061	0.096	0.907
Mn	-0.035	0.623	0.450	-0.502	0.845
Cu	-0.854	-0.057	-0.418	0.057	0.910
Zn	-0.925	0.190	-0.009	0.145	0.913
Ni	-0.895	0.288	0.080	0.066	0.896
Cr	-0.696	0.187	0.387	0.474	0.894
Pb	-0.905	-0.198	0.019	-0.026	0.860
Co	-0.711	-0.067	-0.263	-0.211	0.624
Cd	-0.225	0.776	0.321	0.267	0.827
variance	7.041	2.523	1.648	0.913	12.125
var. relative	50.3%	18.0%	11.8%	6.5%	86.6%

L'axe 3 oppose principalement deux individus relativement pauvres en ETMs: l'horizon du Sol de Warneton (₃BT_g) d'une part, un horizon carbonaté de la coupe LLA d'autre part (figure II.24). Le premier est pauvre en Ca, Mg et Cu et riche en Mn. Le second est le plus riche en carbonates, Ca et Mg. Cet axe reflète quelque part un certain niveau d'altération des matériaux: décarbonatation, illuviation, "dégradation".

Le facteur 4 différencie les horizons d'accumulation de chacune des coupes (₄BT₃ à TONG, ₂BT à MCG, C₈ à BUS et ₂C à LLA). Deux sont des BT enfouis, deux autres des horizons d'accumulation de Cd. De l'autre côté de l'axe, se trouvent l'horizon riche en concrétions Fe/Mn (₃BT_g), ainsi que trois horizons caractérisés par des teneurs en K plus

⁸ Les saturations traduisent le poids des variables sur chacun des axes factoriels, les communautés correspondent à la part de la variance d'une variable exprimée par l'ensemble des axes.

élevées que les horizons environnantes. Etant donné la faible variance portée par cet axe, il n'y a pas lieu d'attacher trop d'importance à sa signification. Retenons qu'il caractérise des horizons qui ont, apparemment, accumulé certains éléments préférentiellement à d'autres. Si cela peut s'expliquer pour certains éléments et certains horizons par des migrations accompagnant le lessivage des argiles (Cr) ou sous forme soluble (Cd), il est d'autres combinaisons élément-horizon pour lesquelles le lien ne saute pas aux yeux. Ceci est d'autant plus normal que les axes factoriels portent de moins en moins de covariance entre éléments et que dès lors la variabilité opératoire prend de plus en plus d'importance.

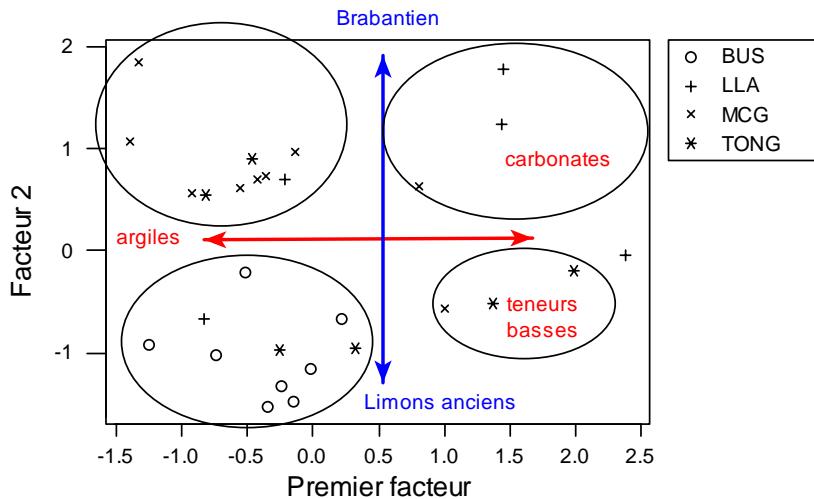


Figure II. 23: Position des échantillons des quatre coupes limoneuses sur le plan factoriel principal

La hiérarchie des facteurs de différenciation semble donc être: les teneurs en carbonates et en argile (facteur 1), la stratigraphie des matériaux (facteur 2) et leur degré d'altération (facteur 3). Quatre-vingt pour-cent de la variance totale étant portés par ces trois facteurs.

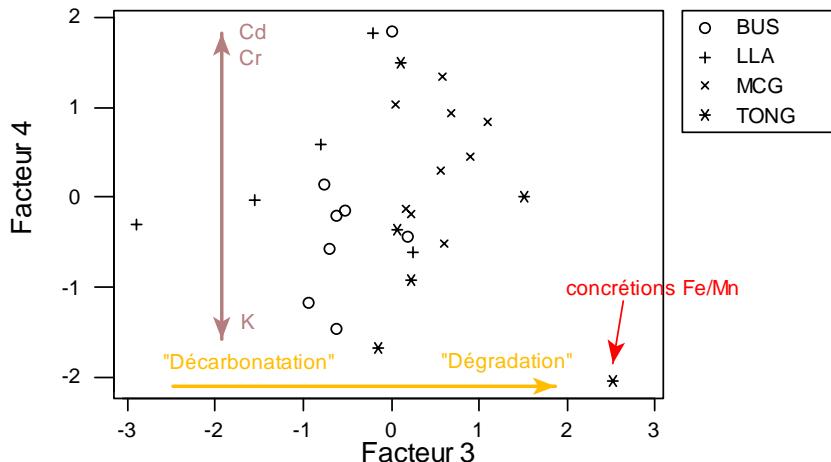


Figure II. 24: Position des échantillons des quatre coupes limoneuses selon les axes factoriels 3 et 4.

f représentativité de la coupe de Tongrinne

Une classification hiérarchique ascendante sur base de l'ensemble des variables permet de visualiser et de quantifier la ressemblance entre horizons, sur base de la totalité des résultats et non plus à partir d'un plan factoriel qui n'est jamais qu'une représentation tronquée (figure II.25).

Les résultats obtenus à partir d'une classification sur base de liaisons par la moyenne et des distances euclidiennes indiquent que (i) les horizons carbonatés (2, 3, 4 et 19) sont différents des non-carbonatés; (ii) les horizons de la coupe MCG et le C₁ de LLA sont très proches des horizons "brabantiens" de la coupe TONG; (iii) les horizons de la coupe BUS et l'horizon profond de la coupe LLA (2C) sont chimiquement proches des limons "hennuyens" de la coupe TONG; (iv) les quelques horizons (2C_{2ca} et 2C_{3ca} de la coupe MCG) qui s'écartent de cette bipartition présentent plus de similarités avec le limon hesbayen et l'horizon de Warneton (coupe TONG).

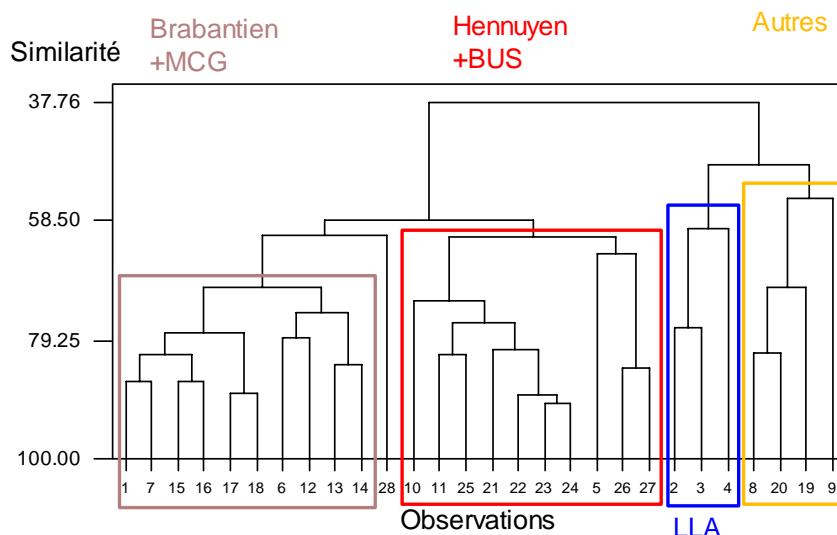


Figure II. 25: Classification hiérarchique ascendante des horizons des quatre coupes limoneuses (liaison par la moyenne - distances euclidiennes). Les observations 1 à 5 correspondent à LLA, 6 à 11 à TONG, 12 à 20 à MCG et 21 à 28 à BUS.

En conclusion, les coupes LLA et TONG apparaissent bien comme les plus différenciées chimiquement parlant, comme cela avait été supposé dès la phase d'observation sur le terrain. En outre, les unités stratigraphiques de la coupe TONG peuvent être considérées comme représentatives des teneurs naturelles dans les limons de profondeur non-carbonatés.

g Importance de l'effet site

Un regroupement clair des horizons par coupe traduit un facteur de différenciation locale ("effet site") important. La variabilité entre horizons d'une même coupe est alors moins importante que celle existant entre les horizons provenant de deux coupes différentes.

De la même façon que pour l'étude de la coupe TONG, l'analyse de la variance doit permettre d'estimer l'importance de ces variabilités. Dans le cas d'un modèle aléatoire -les sites retenus sont représentatifs d'une infinité de situations-, l'équation des écarts par rapport à la moyenne s'écrit:

$$X_{ik} - m = A_i + D_{ik} \text{ (DAGNELIE, 1975) où}$$

A_i = effet aléatoire (site) de moyenne nulle et d'écart-type σ_A et
 D_{ik} = effet résiduel de moyenne nulle et d'écart-type σ .

Il est clair qu'aucune analyse de la variance ni aucun test non-paramétrique ne sont nécessaires pour déterminer que les coupes sont différentes en raison de la répartition inégale des horizons carbonatés dans les coupes. L'analyse statistique a donc porté uniquement sur les horizons non-carbonatés (24 individus au lieu de 28). Ont été réalisées des analyses de la variance à un facteur (le site ou la coupe) pour chaque variable considérée individuellement, ainsi qu'une analyse de la variance sur base de l'ensemble des variables. Les résultats figurent au tableau II.14. sous la forme de probabilités associées au risque de se tromper en rejetant l'hypothèse d'égalité des moyennes entre coupes. Le détail des résultats peut être trouvé en annexe 4.

Tableau II. 14: Résultats des analyses de variance univariées et multivariées à un critère de classification sur les quatre coupes limoneuses.

Analyse (a) multivariée	Wilks	Lawley-Hotelling	Pillai	
- Site	0.000	0.000	0.000	
(b) univariée	Ca	Mg	K	Na
- Site	0.000	0.305	0.420	0.026
- Site	Fe	Mn	Cu	Zn
- Site	0.712	0.019	0.084	0.084
- Site	Ni	Pb	Co	Cr
- Site	0.054	0.018	0.155	0.000
			Cd	
			0.015	

Les conditions d'application de l'analyse de la variance à des fins d'inférence (note infrapaginale n°7) ne sont pas remplies. Toutefois, celles-ci ne sont pas strictement nécessaires pour déterminer si les coupes diffèrent les unes des autres (il faut alors se donner une marge de sécurité pour le risque de première espèce), ni pour estimer les moyennes ou les variances, contrairement aux intervalles de confiance sur ces estimations

Les résultats d'analyse des variances conduisent à considérer les coupes différentes (pour un niveau $\alpha < 0.04$ ⁹) pour les variables Ca, Na, Mn, Cr, Pb et Cd. En outre, tous les critères d'analyse multivariée convergent pour rejeter de la même manière l'hypothèse d'égalité des moyen-

⁹ DAGNELIE (1975a) estime que le niveau α de 0.05 peut devenir une fourchette de 0.04 à 0.07.

nes.

Ce sont les coupes MCG et BUS qui présentent le plus de dissimilarités entre elles (distances de MAHALANOBIS les plus élevées¹⁰), ainsi que le montre la figure II.26, résultat d'une analyse factorielle discriminante -*i.e.* qui tient compte de l'information relative au site pour l'examen des corrélations. Les coupes TONG et LLA sont très proches sur le facteur 1 mais nettement distinctes selon le facteur 2.

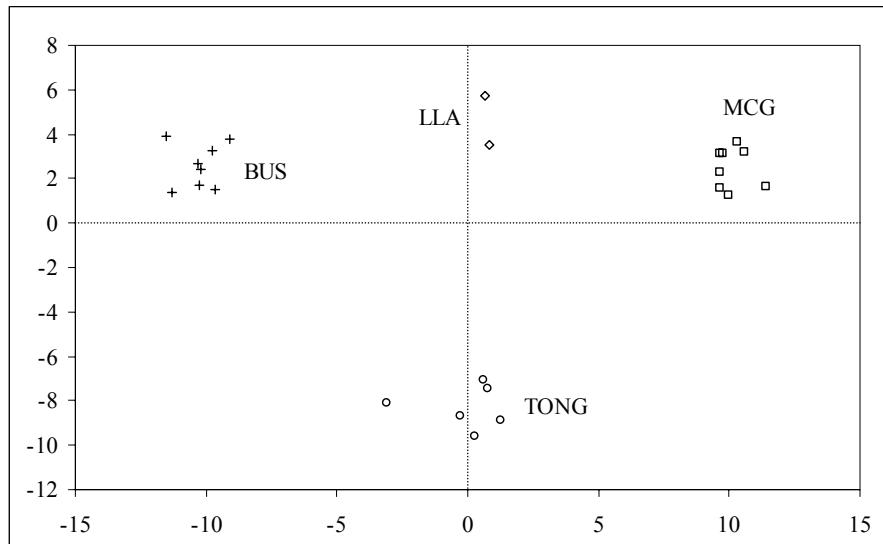


Figure II. 26: Représentation des quatre coupes limoneuses sur le plan principal en analyse factorielle discriminante.

L'effet "site" (A_i estimé par $\hat{\sigma}_A$) peut être considéré comme significatif. Il résulte principalement des variables Ca (59% de sa variabilité est liée aux différences entre les coupes - tableau II.15), Cr (52%), Na, Mn, Pb et Cd (25-30%).

Il apparaît que l'effet "site" concerne peu les variables liées à l'argile, comme Al, Fe, Cu, Zn, Ni ou Co. Ceci signifie que (i) des corrélations entre ETMs et teneurs en Al ou Fe sont d'application plus large que celle d'une coupe isolée; et (ii) le recours aux régressions ETMs-argile est théoriquement¹¹ envisageable pour la prédiction spatiale des teneurs en ETMs.

¹⁰ cf titre 4.3.2

¹¹ Pour peu que les différences entre la coupe TONG et les autres coupes soient en grande partie imputables à la différence de méthode analytique.

Tableau II. 15: Importance relative de l'effet "site" pour les quatre coupes quaternaires sur base de l'analyse de la variance à un critère. Ecart-type factoriel et complément de la variance relative.

Univarié	Ca	Mg	K	Na	Al
s_A $1 - (s_{\text{rés}}^2 / s_T^2)$	0.11	0.00	0.00	0.09	0.00
	0.593	0.000	0.000	0.268	0.000
s_A $1 - (s_{\text{rés}}^2 / s_T^2)$	Fe	Mn	Cu	Zn	Cr
	0.00	96.0	0.0	0.0	5.6
s_A $1 - (s_{\text{rés}}^2 / s_T^2)$	0.000	0.294	0.000	0.000	0.521
	Ni	Pb	Co	Cd	
s_A $1 - (s_{\text{rés}}^2 / s_T^2)$	0.0	0.9	0.0	0.11	
	0.000	0.297	0.000	0.312	

Une autre manière d'aborder l'effet "site" consiste à stratifier les horizons des coupes selon deux critères: le site et la stratigraphie. Il existe des indices morphologiques et analytiques permettant de diviser les coupes en ensembles stratigraphiques.

Le modèle d'analyse de la variance est dans ce cas un modèle mixte: le site est considéré comme un facteur aléatoire -les quatre coupes représentent une infinité de lieux possibles-, la stratigraphie comme un facteur fixe -on comparera un nombre limité de niveaux stratigraphiques. Le modèle théorique s'écrit:

$$X_{ijk} - m_{...} = a_i + B_j + C_{ij} + D_{ijk} \quad (\text{DAGNELIE, 1975}) \text{ où}$$

a_i = effet fixe (stratigraphique);

B_j = effet aléatoire (site) de moyenne nulle et d'écart-type σ_B ;

C_{ij} = terme d'interaction de moyenne nulle et d'écart-type σ_C ;

D_{ijk} = terme résiduel de moyenne nulle et d'écart-type σ .

Deux ensembles ont été retenus à TONG (brabantien et hennuyen), MCG (Bt_1 à C_2 et $2C_1$ à $2C_{3ca}$) et LLA (C_1 contre $2C$) et un seul à BUS. Le caractère stratigraphique se résume à "limon supérieur" (A) et "limon inférieur" (B). L'ensemble de la coupe BUS a été cataloguée "B", et la modalité BUS-(A) a été estimée par les teneurs moyennes des limons supérieurs des trois autres coupes. Les remarques relatives aux conditions d'application restent valables.

Les résultats des analyses de variance multivariée (tableau II.16) indiquent (i) un effet "site" probable, (ii) un effet "stratigraphie" significatif ($\alpha < 0.04$); et (iii) l'absence d'interaction entre effets "site" et "stratigraphie" ($\alpha >> 0.04$). Ce point signifie donc que les différences entre niveaux A et B sont globalement les mêmes quel que soit le site, mais également que les différences entre les coupes sont les mêmes pour les niveaux A et B.

Tableau II. 16: Résultats de l'analyse de la variance à deux critères pour les quatre coupes quaternaires. Risque d'erreur de première espèce (α).

Analyse multivariée	Wilks	Lawley-Hotelling	Pillai	
- Site	0.001	0.092	0.000	
- Stratigraphie	0.011	0.011	0.011	
- Interaction	0.127	0.263	0.425	
Univarié	Ca	Mg	K	Na
- Site	0.000	0.925	0.014	0.002
- Stratigraphie	0.000	0.023	0.011	0.000
- Interaction	0.104	0.886	0.390	0.044
	Fe	Mn	Cu	Zn
- Site	0.606	0.819	0.090	0.704
- Stratigraphie	0.421	0.003	0.570	0.377
- Interaction	0.238	0.753	0.101	0.237
	Ni	Pb	Co	Cd
- Site	0.503	0.413	0.605	0.373
- Stratigraphie	0.041	0.917	0.666	0.064
- Interaction	0.511	0.823	0.480	0.687

Les analyse univariées (tableau II.16) montrent la signification (i) de l'effet "site" pour les variables Ca, K, Na et Cr; (ii) de l'effet "stratigraphie" pour Ca, Mg, K, Na et Mn; et (iii) de l'interaction des effets uniquement pour le Cr, mais la différence A-B n'est particulière que pour la coupe BUS dont une des deux valeurs est estimée. Le premier point signifie que les niveaux de teneurs en "bases", à l'exception de Mg, ne sont pas identiques d'un endroit à l'autre, ou en d'autres termes que la distribution régionale des teneurs en "feldspaths" n'est pas homogène; le deuxième point que la distribution minéralogique dépend également de l'âge des limons; le troisième point que les différences de teneurs entre limons anciens et jeunes restent du même ordre de grandeur en tout lieu.

Comment interpréter ce dernier point si ce n'est par une stabilité temporelle des sources de limons éoliens des différents sites ou par le fait que le facteur stratigraphique reflète davantage l'action de processus évolutifs qu'une différence de richesse minéralogique originelle?

Les effets du modèle théorique sont estimés au tableau II.17. L'effet fixe est l'écart entre la moyenne d'une "modalité stratigraphique" et la moyenne générale. Etant donné qu'il n'y a que deux modalités possibles, les effets de ces deux modalités sont identiques en valeur absolue et de sens contraire. La valeur absolue figure au tableau II.17 pour les éléments dont l'effet est significatif ($\alpha < 0.04$). Les effets aléatoires sont exprimés par l'écart-type factoriel et l'écart-type d'interaction lors-

qu'ils sont significatifs. L'écart-type résiduel est estimé par la racine carrée du carré moyen résiduel de l'analyse de la variance si les effets factoriels sont significatifs, par l'écart-type de la population si aucun facteur de stratification n'est retenu.

Tableau II. 17: Importance des effets "site" et "stratigraphie" pour les quatre coupes quaternaires sur base de l'analyse de la variance à deux critères.

Univarié (g/100g)	Ca	Mg	K	Na	Al
- $ a_i $ (strat.)	0.11	0.05	0.04	0.16	0.00
- σ_B (site)	0.02	0.00	0.02	0.01	0.00
- σ_C (interaction)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
- σ (résiduel)	0.04	0.05	0.07	0.04	0.37
	Fe	Mn	Cu	Zn	Cr
- $ a_i $ (stratig.)	0.00	121.7	0.0	0.0	2.4
- σ_B (site)	0.00	0.0	0.0	0.0	0.2
- σ_C (interaction)	0.00	0.0	0.0	0.0	1.2
- σ (résiduel)	0.22	88.9	1.3	4.1	3.2
	Ni	Pb	Co	Cd	
- $ a_i $ (stratig.)	0.0	0.0	0.0	0.00	
- σ_B (site)	0.0	0.0	0.0	0.00	
- σ_C (interaction)	0.0	0.0	0.0	0.00	
- σ (résiduel)	2.8	1.4	1.2	0.04	

On notera (i) la faiblesse relative de l'effet "site" par rapport à l'effet "stratigraphie", (ii) l'effet "stratigraphie" très bien marqué pour Ca et Na et (iii) l'écart-type résiduel de Mn largement supérieur à la variabilité opératoire, signe qu'un autre facteur explicatif est à rechercher pour cet élément.

Par rapport à l'étude de la coupe TONG, les éléments présentent globalement les mêmes tendances: effet "argile" pour Al, Fe et les ETMs sauf Mn et Cd, effet stratigraphique pour Ca, Mg, K, Na et Mn.

L'effet "site", de prime abord important pour les éléments Ca, Cr, Na, Mn, Pb et Cd se révèle après la prise en compte d'un facteur stratigraphique nettement moins significatif, sauf pour Ca et Na. Si cela se confirmait, cela signifierait que le choix d'un site de référence importe peu pour les limons pourvu que l'on y reconnaisse plusieurs générations de limons.

5.2.3 Conclusions

Pour caractériser la variabilité des teneurs en ETMs dans les matériaux parentaux loessiques, une approche basée sur leur reconnaissance et leur caractérisation stratigraphiques et (paléo-) pédologiques, ainsi que sur une analyse statistique multivariée, a été mise en oeuvre. Malgré leur réputation d'homogénéité, les loess présentent une variabilité, à la fois stratigraphique et géographique. L'analyse multivariée a permis de (i) visualiser les facteurs de la variabilité et les corrélations entre éléments, (ii) de regrouper les individus sur base de leur composition et (iii) d'estimer l'importance de l'effet site. L'analyse statistique permet en outre de quantifier l'intérêt de stratifications sur base de la stratigraphie et de la pédologie.

Pour considérer la représentativité d'une coupe de référence, la plus grande attention devrait être prêtée à son environnement naturel (géologie, position topographique, historique d'occupation...), facteur déterminant pour la nature et l'intensité des processus de pédogenèse et morphogenèse. En ce qui concerne, la représentativité des Membres lithostratigraphiques identifiés sur la coupe de Tongrinne, tous les horizons non-carbonatés des trois autres coupes ont pu être rattachés à un des Membres de Tongrinne. Ces opérations de rattachement ne présentent pas de valeur stratigraphique stricte. Ils ne font qu'exprimer le caractère référentiel de la coupe de Tongrinne en matière de composition chimique des loess non-carbonatés.

Au sein d'une même coupe stratigraphique, la variabilité résulte principalement de la présence de paléosols enfouis. Les redistributions d'argile et les processus redox semblent être les facteurs-clés des différences entre horizons. Les caractéristiques et propriétés actuelles des limons anciens résultent toutefois d'un écheveau de processus complexe à démêler. Lorsque l'on compare plusieurs coupes profondes, l'influence du site d'étude sur la variabilité apparaît d'abord non négligeable pour quelques éléments (jusqu'à plus de 50% pour Ca et Cr). Toutefois, une stratification complémentaire sur base de la stratigraphie supposée des limons permet de nuancer cet effet "site". Celui-ci devient très faible, l'essentiel de la variation s'expliquant par l'âge des matériaux. Les principaux facteurs de variation entre les sites restent les teneurs en argile, les quantités de minéraux porteurs d'éléments et l'intensité des processus redox.

L'effet "site" concernant peu les variables liées à l'argile, comme Al, Fe, Cu, Zn, Ni, Pb et Co, (i) des corrélations entre ETMs et teneurs en Al ou Fe sont d'application plus large que celle d'une coupe isolée; et (ii) le recours aux régressions ETMs-argile est envisageable pour la prédiction spatiale des teneurs en ETMs dans les limons.

5.3 Approche régionale (Horizons C)

Après l'étude des substrats (5.1) et des limons en coupes profondes (5.2), la variabilité de la composition en ETMs des matériaux parentaux est abordée ci-après sous l'angle de la différenciation régionale des limons "brabantiens".

L'importance de l'effet stratigraphique ainsi que celle des redistributions d'argiles ont été montrées. L'objectif de cette partie de l'étude est (i) de vérifier si les corrélations entre ETMs, Al, Fe et teneurs en argiles constatées à un niveau ponctuel existent toujours à une échelle régionale et (ii) d'évaluer l'existence ou non de disparités ou de gradients régionaux. A l'échelle de la Belgique, un gradient granulométrique des dépôts de couverture existe du Nord au Sud. Il peut être intéressant de vérifier si ce gradient existe également à l'intérieur de la région limoneuse.

Un *zoom* stratigraphique est donc opéré sur les loess les plus jeunes en même temps qu'un "*travelling arrière*" depuis la coupe de Tongrinne vers la zone d'étude et la région limoneuse.

Un constat sera d'abord réalisé à partir des données existantes (Base de données AARDEWERK) relatives à la granulométrie des limons éoliens. Ensuite, les structures spatiales des teneurs en ETMs seront étudiées, en relation avec la granulométrie, sur base de transects Est-Ouest et Nord-Sud.

5.3.1 Exploitation des données existantes

La base de données relatives aux caractérisations de profils-types réalisées en complément du levé de la Carte des sols de la Belgique comprend les résultats d'analyse d'environ 70 000 horizons répartis en 13 000 profils (figure II.27). Certains paramètres comme la texture, particulièrement pour les horizons profonds, peuvent être considérés comme peu sujets à évolution temporelle. Ils sont donc potentiellement exploitables pour étudier la distribution spatiale des matériaux parentaux limoneux à une échelle régionale.

Il faut toutefois noter que les méthodes d'analyse granulométrique n'ont pas été identiques d'une planchette à l'autre (figure II.28). La nature du dispersant (NH_4OH , Na-acétate + $\text{NH}_4\text{-oxalate}$, Na-hexamétaphosphate) et l'appareillage de mesure (hydromètre à chaîne ou pipette ROBINSON) constituent une source de variation opératoire

additive. Il existe donc un biais potentiel d'une carte à une autre qui peut se marquer par une exagération (voire la création) de différences anecdotiques ou par une atténuation de différences réelles. L'information relative aux méthodes d'analyse utilisées n'est malheureusement pas disponible pour toutes les planchettes.

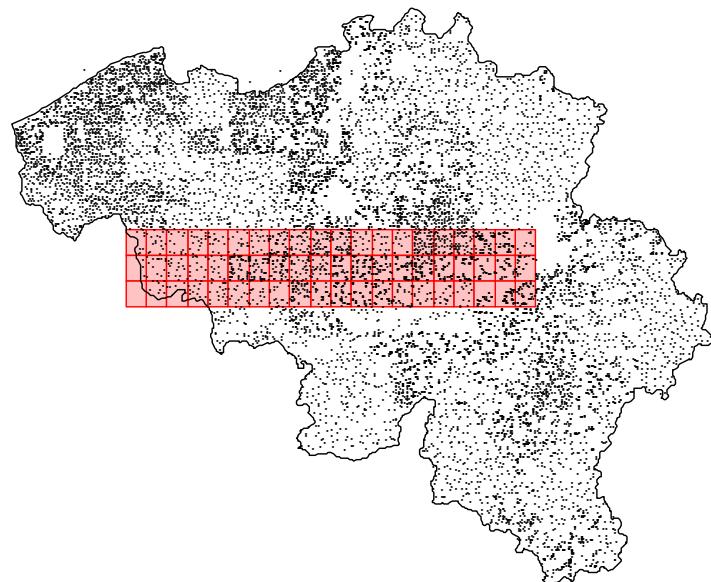


Figure II. 27: Localisation des profils de la base de données AARDEWERK et des planchettes de la Carte des sols de la Belgique utilisées pour le premier niveau de sélection.

5.3.1.1 Sélection des profils de la base de données AARDEWERK

Etant donné l'objectif poursuivi, une sélection doit être opérée parmi les profils de la base de données. Le premier facteur de tri est géographique: la zone délimitée par les planchettes 111W à 120E, 124W à 133E et 137W à 146E (figure II.28) correspond à peu près à la partie wallonne de la région limoneuse. 1 972 profils y ont été décrits. Parmi ceux-ci ne sont retenus que ceux susceptibles de présenter un horizon C "brabantien": soit les séries (CSB) à texture limoneuse (A) et développement de profil à horizon BT (a, a(b), c et B).

Une deuxième source de biais est due à la sélection initiale des profils décrits. L'objectif poursuivi étant l'illustration des principales typologies, le nombre de profils décrits par type de sols ne reflète que partiellement l'extension spatiale des différentes typologies.

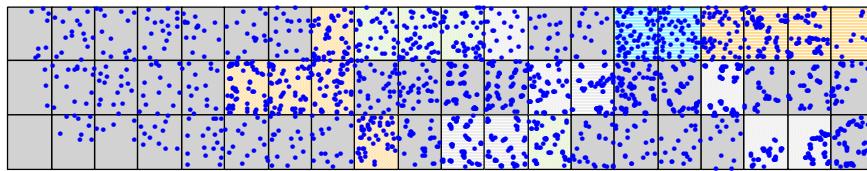


Figure II. 28: Répartition des profils de la base AARDEWERK (points bleus) retenus pour l'analyse spatiale de la granulométrie. En fond les méthodes d'analyse utilisées -dispersant: NH₄OH (bleu clair), mélange Na₂CO₃/Na-oxalate (orange), Na-hexamétaphosphate (vert), pas d'information (gris); appareil: pipette ROBINSON (lignes horizontales), hydromètre à chaîne (lignes obliques), pas d'information (fond uni).

5.3.1.2 Analyse statistique

L'analyse statistique des données concerne (i) l'étude de la normalité de la population des horizons retenus et (ii) l'étude géostatistique de la distribution des teneurs en argile.

Les analyses statistiques classiques ont été réalisées avec MINITAB 13.1, l'étude géostatistique avec VARIOWIN pour l'analyse du vario-gramme et ILWIS 2.2 pour le krigeage.

5.3.1.3 Résultats et discussion

a normalité de la population

953 horizons de 793 profils¹² ont servi à l'analyse spatiale de la granulométrie des limons éoliens. Les paramètres statistiques classiques figurent au tableau II.18. On notera les valeurs de la moyenne et la médiane légèrement différentes (respectivement 18.4 et 18.9), traduisant une faible dissymétrie négative. Le coefficient d'aplatissement (1.18) traduit un pic plus marqué que pour une courbe normale (figure II.29). La population ne peut d'ailleurs pas être considérée comme normale eu égard à la statistique du test de normalité (< 0.0005). Rappelons toutefois que le grand nombre d'échantillons augmente la sensibilité des tests de signification (WEBSTER, 2001), et que dans ce cas-ci il est plus judicieux d'examiner les coefficients de dissymétrie et d'aplatissement qui sont relativement faibles.

La répartition spatiale des profils à l'échelle de la région n'est pas homogène (figure II.28). Il s'agit d'une source de biais supplémentaire.

¹² Pour certains profils deux, voire trois, horizons répondent aux critères d'horizon C limoneux. Biais pour biais, nous avons choisi de ne pas choisir!

Celles-ci semblent nombreuses et elles doivent inciter à la prudence dans l'interprétation des données.

Tableau II. 18: Statistiques relatives à la teneur en argile pour les 793 profils

Moyenne	18.4	Minimum	3.0
Ecart-type	4.2	Q_1^a	16.0
Variance	17.90	Médiiane	18.9
CV (%) ^a	22.8	Q_3^a	21.0
Asymétrie	-0.24	Maximum	39.0
Aplatissement	1.18	N ^a	952
Normalité ^b valeur de p	0.000	ICméd95 ^a	18.0 - 19.0

^a CV: coefficient de variation; Q_1 : premier quartile; Q_3 : troisième quartile; N: effectif de la population; ICméd95: intervalle de confiance de la médiane sur base du test du signe à 1 échantillon.

^b Test de normalité: Anderson-Darling.

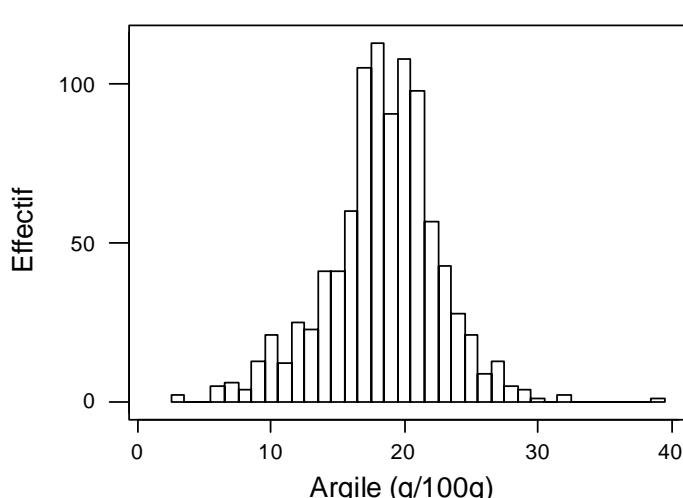


Figure II. 29: Histogramme des fréquences des teneurs en argile dans les horizons C limoneux de la base AARDEWERK.

b absence de gradients spatiaux

Les valeurs des teneurs argiles sont représentées par rapport à la position des profils selon un axe Ouest-Est (figure II.30) et un axe Nord-Sud (figure II.31). Ces représentations permettent de conclure à l'absence de gradient d'argile visible à l'échelle régionale. Les conditions

d'application de l'analyse géostatistique peuvent dès lors raisonnablement être considérées comme remplies. L'examen des figures II.30 et II.31 permet de supposer également que la composante aléatoire des teneurs en argile présente une certaine auto-corrélation spatiale (champ continu), mais également un effet de pépite important (brusques variations).

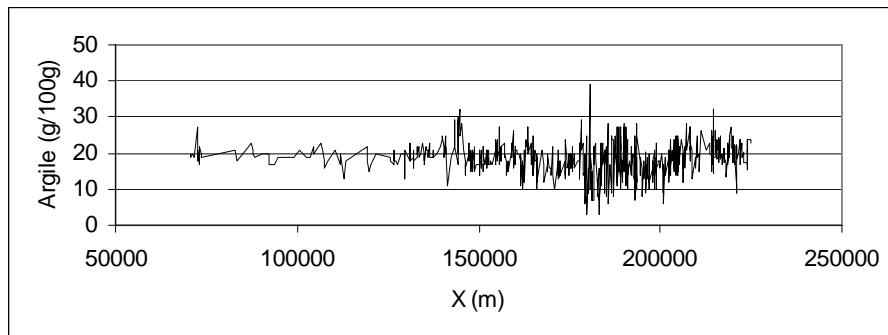


Figure II. 30: Evolution des teneurs en argile des matériaux parentaux selon la direction Ouest-Est.

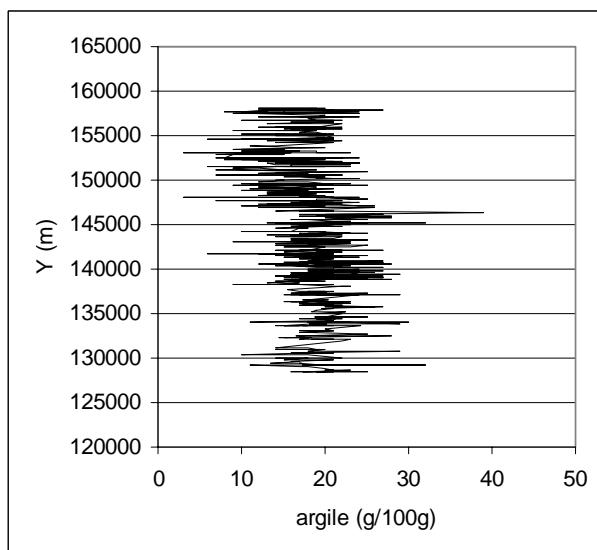


Figure II. 31: Evolution des teneurs en argile des matériaux parentaux selon la direction Nord-Sud.

c analyse variographique

L'analyse de la structure spatiale de la teneur en argile permet de conclure à l'isotropie de la semi-variance. Un modèle sphérique (pépite: 12.50; palier 22.84; portée: 12120m) peut être ajusté aux valeurs obser-

vées (figure II.32).

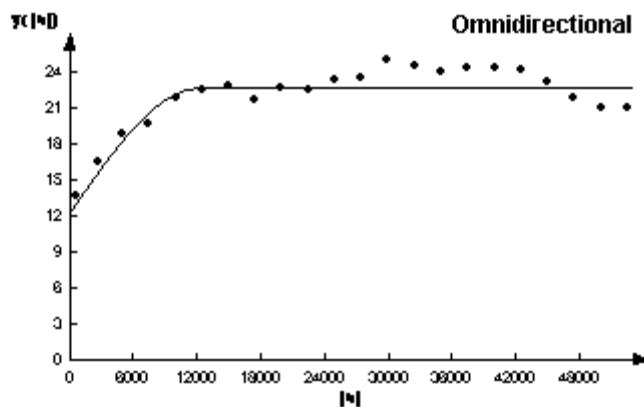


Figure II. 32: Variogramme omnidirectionnel de la teneur en argile dans les profils limoneux (modèle sphérique: 12.50; 22.84; 12120).

Le modèle retenu confirme (i) l'existence de l'auto-corrélation (la semi-variance augmente avec la distance entre les points de mesure) et (ii) l'importance de l'effet pépite (12.50 [g/100g]^2 par rapport à une variance totale de 22.84).

L'effet pépite contient la variabilité opératoire et la variabilité sur des distances inférieures aux distances observées (ici $< 600\text{m}$). La variabilité opératoire est difficile à estimer en raison du manque d'informations relatives aux méthodes et aux laboratoires d'analyse. Elle est certainement supérieure à celle qui accompagne les mesures effectuées au sein du seul Laboratoire de Géopédologie ($1 \text{ à } 3 \text{ [g/100g]}^2$). Toutefois, elle n'explique probablement pas la totalité de l'effet pépite et la variabilité aux échelles métrique à hectométrique ne peut être négligée.

La valeur du palier (22.84 [g/100g]^2) renseigne sur la "vraie" valeur de la variance totale, supérieure à celle obtenue au tableau II.18 sans tenir compte de la dépendance (spatiale) entre les points. Ceci signifie qu'il faut être prudent dans l'usage des statistiques classiques basées sur l'indépendance entre les points, en raison d'un biais potentiel dû à l'auto-corrélation.

La valeur de la portée (environ 12 kms) indique qu'au-delà de cette distance deux points peuvent être considérés comme indépendants. Pour réaliser une cartographie par interpolation, par contre, le voisinage d'un point à estimer contenant un minimum de points de mesure doit se baser sur des dimensions inférieures à cette distance.

d cartographie des teneurs en argile

Une carte obtenue par krigage sur base du variogramme modélisé est présentée à la figure II.33. L'absence de gradient granulométrique perceptible est clairement illustrée.

Les teneurs en argiles varient entre 9 et 30g/100g. Les teneurs inférieures à 9 et supérieures à 30 ont été "éliminées" par moyennage des horizons C d'un même profil. Une zone plus "pauvre" en argiles se singularise au Nord-Est de la carte. Elles correspondent à l'extension des planchettes 118 W et E.

Faut-il y voir un effet "analytique"? Peut-être, les échantillons analysés pour les cartes 118 ont été dispersés avec un réactif différent des autres planchettes.

On ne peut exclure *a priori* que la vallée de la Gette présente une épaisseur de limons moins importante en raison de processus morphogénétiques plus intenses. Les faibles teneurs en argile dans le limon éolien s'expliqueraient alors par l'influence du substrat sableux.

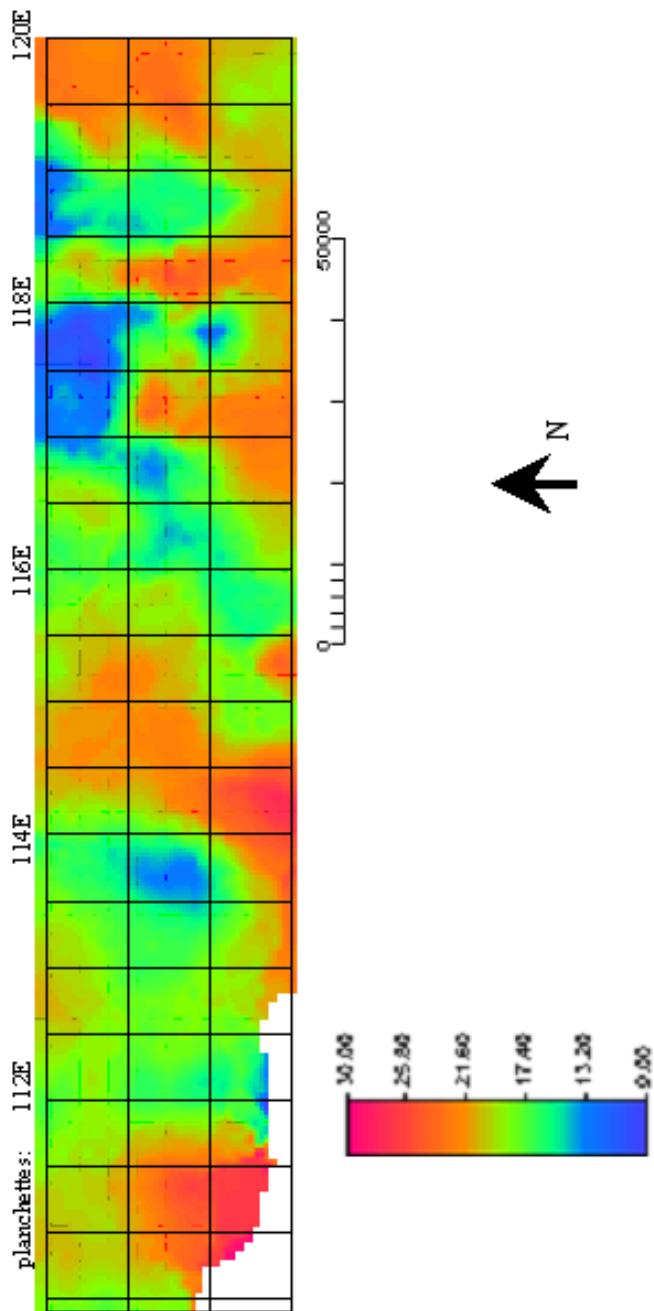


Figure II. 33: Carte des teneurs estimées en argile du limon éolien, en Région limoneuse.

Deuxième partie - 186

Toutefois, teneurs en argiles et teneurs en sables (figure II.35) ne convergent pas vers cette explication. On ne peut en effet considérer sur base des résultats d'analyse que les teneurs en sables soient plus élevées dans cette zone.

Pas plus d'ailleurs que les informations disponibles sur d'autres sources documentaires:

- les épaisseurs des limons renseignées sur la carte géologique 118 (1/40 000) ne sont pas inférieures à celles des cartes voisines 117 et 119, ce qui devrait être le cas si les processus d'érosion y avaient été plus intenses;
- l'analyse morphométrique (pentes) du relief d'après le MNT de la Région Wallonne sur l'étendue de la carte ne montre pas de singularisme par rapport aux régions voisines; et
- les statistiques relatives à l'importance spatiale des colluvions et alluvions sur les cartes 118 W et E ne diffèrent pas significativement des planchettes voisines (figure II.34).

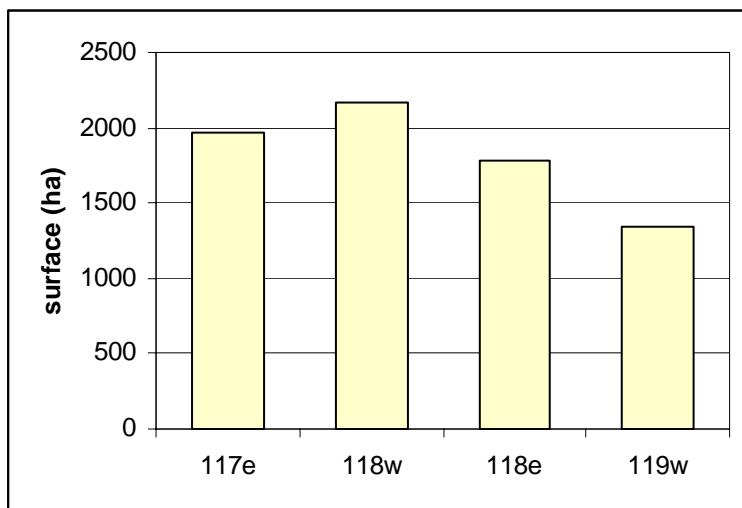


Figure II. 34: Importance des sols à profil p dans les planchettes étudiées.

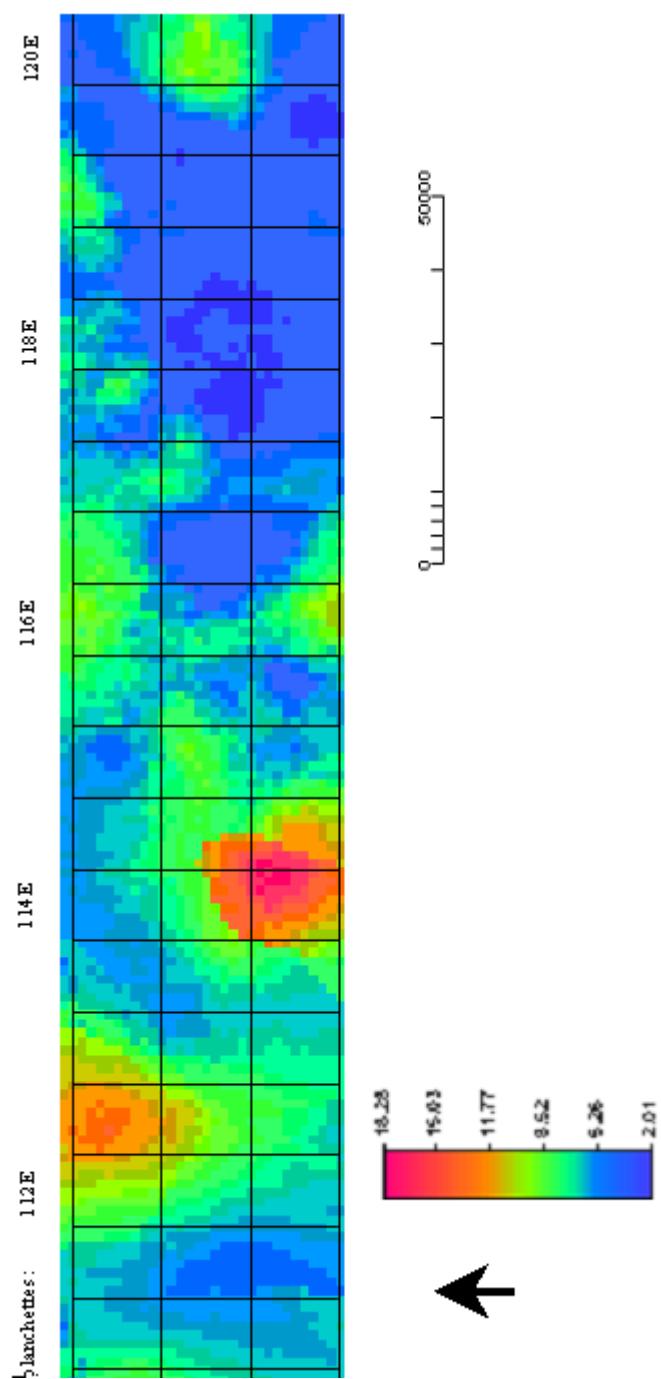


Figure II. 35: Carte des teneurs estimées en sables du limon éolien en Région limoneuse.

Deuxième partie - 188

5.3.1.4 Conclusions

L'analyse des données de la base AARDEWERK permet d'estimer des teneurs en argiles pour les limons éoliens de couverture. Ces données ne permettent pas de déceler de gradient granulométrique marqué selon les directions Ouest-Est ou Nord-Sud. Soit ces gradients n'existent pas, soit ils sont masqués par les différents biais existant dans le jeu de données.

L'exercice mené sur une zone présentant des valeurs estimées relativement faibles n'a pu apporter aucun argument explicatif. Il s'agirait soit d'un effet analytique, soit d'un effet aléatoire.

Les données existantes ne permettant pas de mettre en évidence de gradient granulométrique, la question sera poursuivie à travers l'analyse des données originales au titre suivant.

5.3.2 Transects régionaux

Une campagne d'échantillonnage, ciblée sur le loess brabantien, a été menée dans la zone d'étude. Des sondages ont été effectués jusqu'à une profondeur de deux mètres avec description et prélèvement des horizons caractéristiques. L'horizon C "brabantien" a été prélevé à une profondeur la plus proche possible de 150cm. Les sites ont été choisis en position de plateau ou de haut de versant à pente faible de façon à appréhender plusieurs échelles de variation spatiale.

Les objectifs de cette étude sont de vérifier, à travers l'analyse des structures spatiales de la granulométrie et des teneurs en ETMs, (i) l'existence ou l'absence de gradient granulométrique ou minéralogique et (ii) la validité des relations entre éléments établies à partir de la coupe de Tongrinne.

5.3.2.1 Matériels et méthodes

a localisation des transects

Des sites de prélèvements ont été identifiés sur base de la carte des sols pour comparer des échantillons d'horizons C prélevés en situations morphologiques et pédologiques comparables selon un axe Ouest-Est (du méridien de Nivelles à celui de Waremme) et un axe Nord-Sud (parallèles de Waremme et Jemeppe-sur-Sambre).

Le choix des sites a été opéré de manière aléatoire dans des parcelles

agricoles, en essayant de respecter une distance principale entre les sites de l'ordre de 2 000 mètres. En chacun des sites, un deuxième sondage a été réalisé, soit à 15 mètres, soit à 800 mètres du premier sondage dans une direction aléatoire (figure II.36). La distance de 800 mètres correspond à l'ordre de grandeur de la distance entre deux plateaux successifs.

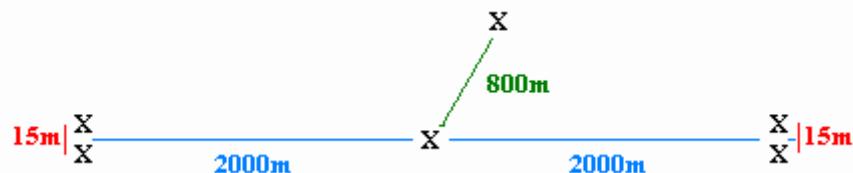


Figure II. 36: Schéma de l'échantillonnage pour les transects O-E et N-S .

Des prélèvements complémentaires ont été effectués afin de répartir les sondages sur les quatre coins de la zone étudiée (figure II.37).

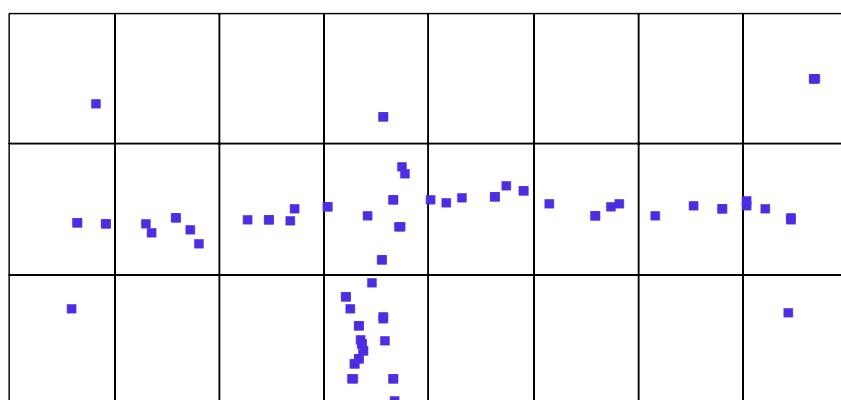


Figure II. 37: Localisation des sondages des transects O-E et N-S sur le découpage des cartes IGN au 1/10.000 (coin supérieur gauche = IGN 39/3).

b échantillonnage et description

Les sondages ont été décrits selon une méthodologie simplifiée et standardisée pour la description des sols. Un exemple de fiche synthétique des observations est repris en annexe 3. Les horizons ont été délimités sur base de leur couleur (MUNSELL soil color chart), de leur texture, de propriétés physiques (résistance, comportement, humidité) et de l'expression de caractères liés aux processus d'oxydo-réduction ou à une charge caillouteuse. En outre, chaque sondage fait l'objet d'un cadrage géomorphologique.

c déterminations analytiques

Les caractérisations de laboratoire sont les suivantes: pH_{H2O} et pH_{KCl}, granulométrie (neuf fractions), teneurs totales en Ca, Mg, K, Na, Al, Fe, Mn, Cu, Zn, Ni, Cr, Pb, et Co. Ces analyses ont été réalisées au sein du Laboratoire de Géopédologie, à l'exception du dosage des teneurs totales en Cr, Pb, et Co qui fut réalisé par le laboratoire du BEAGx. Les protocoles d'analyse figurent en annexe 3.

Les analyses statistiques classiques ont été réalisées avec MINITAB 13, les aspects géostatistiques avec VARIOWIN et ILWIS 2.2.

5.3.2.2 Résultats et discussions

a pH, granulométrie et teneurs totales en éléments majeurs

Les statistiques descriptives relatives aux pH, aux fractions granulométriques "0-2µm" (argiles), "0-10µm" (argiles + la plupart des minéraux feldspathiques) et ">50µm" (sables), ainsi qu'aux teneurs en éléments majeurs figurent au tableau II.19 a et b. Sont donnés dans le tableau les paramètres classiques de position et de dispersion, ainsi que les indices de dissymétrie, d'aplatissement, le risque d'erreur pour le rejet de l'hypothèse de normalité des populations, les limites de confiance de la médiane sur base du test du signe à 1 échantillon (cf MINITAB) et, en cas de normalité, les limites de confiance (95%) de la moyenne et de l'écart-type.

Les pH (H₂O et KCl) sont relativement homogènes, 50% des résultats sont compris dans les intervalles 7.3 / 7.8 et 5.7 / 6.3, respectivement. Les valeurs inférieures à 6.5 (2 occurrences) pour le pH_{H2O} apparaissent comme des valeurs aberrantes (*i.e.* inférieures à Q₁ - 1.5*[Q₃-Q₁] ou supérieures à Q₃ + 1.5*[Q₃-Q₁], selon les usages en vigueur [MINITAB; BAIZE, 1997]). Il en va de même pour les valeurs de pH_{KCl} inférieures à 4.8 (2 valeurs) ou supérieures à 7.2 (2 valeurs).

Les fractions granulométriques "0-2µm" et "0-10µm" présentent une variation relativement faible (CV<12%), contrairement à la fraction ">50µm" (CV = 56.5%). Pour ces fractions, les teneurs inférieures à 18.8% ("0-2µm"), à 27.1% ("0-10µm") ou supérieures à 18.2% (">50µm") constituent des valeurs aberrantes. En conséquence directe, les deux dernières fractions s'écartent de la normalité par une asymétrie droite modérée ("0-10µm") ou gauche prononcée (">50µm"). Celle-ci résulte essentiellement de deux sondages effectués à Waremme.

Tableau II. 19 a: Statistiques descriptives - pH, granulométrie

	pH		granulométrie		
	H ₂ O	KCl	0-2µm	0-10µm	>50µm
Moyenne	7.5	6.0	24.0	33.1	8.5
Ecart-type	0.39	0.5	2.4	3.7	4.8
CV (%) ^a	5.2	8.3	10.0	11.2	56.5
Dissymétrie	- 1.05	-0.65	-0.48	-0.95	2.29
Aplatissement	2.01	3.28	0.36	1.93	8.07
normalité - p ^b	0.006	0.001	0.115	0.001	0.000
IC μ 95% ^a	-	-	23.5 / 24.5	-	-
IC σ 95% ^a	-	-	2.0 / 2.8	-	-
Minimum	6.1	4.2	17.1	19.6	2.1
Q ₁ ^a	7.3	5.7	22.9	31.9	5.7
Médiane	7.6	6.1	24.1	33.2	7.6
Q ₃ ^a	7.8	6.3	25.5	35.1	10.7
Maximum	8.1	7.6	29.1	40.2	30.9
N ^a	82	82	82	82	82
ICméd95% ^a	7.4 / 7.6	6.0 / 6.2	23.7 / 24.6	32.8 / 34.0	6.4 / 8.7

b) éléments majeurs.

	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe
	g/100g					
Moyenne	0.48	0.48	1.69	0.72	5.11	2.58
Ecart-type	0.05	0.04	0.13	0.05	0.33	0.16
CV (%) ^a	10.4	8.3	7.7	6.9	6.5	6.2
Dissymétrie	0.38	-0.79	-0.25	0.22	-0.18	-0.40
Aplatissement	1.71	0.34	1.16	0.95	-0.49	0.26
normalité - p ^b	0.001	0.000	0.050	0.088	0.350	0.802
IC μ 95% ^a	-	-	1.65 / 1.71	0.71 / 0.73	5.04 / 5.18	2.55 / 2.62
IC σ 95% ^a	-	-	0.11 / 0.15	0.05 / 0.06	0.28 / 0.39	0.14 / 0.19
Minimum	0.34	0.37	1.33	0.59	4.42	2.10
Q ₁ ^a	0.45	0.46	1.61	0.69	4.91	2.47
Médiane	0.48	0.49	1.69	0.71	5.10	2.60
Q ₃ ^a	0.50	0.51	1.75	0.76	5.40	2.70
Maximum	0.65	0.56	2.04	0.90	5.72	2.94
N ^a	82	82	82	82	82	82
ICméd95% ^a	0.47 / 0.49	0.47 / 0.49	1.65 / 1.73	0.71 / 0.73	5.01 / 5.19	2.54 / 2.63

c) ETMs

	Mn	Cu	Zn	Ni mg/100g	Cr	Pb	Co
Moyenne	473.9	15.1	53.4	28.0	59.0	14.1	9.9
Ecart-type	66.7	1.8	5.0	3.4	10.4	1.88	1.5
CV (%)^a	14.1	11.9	9.4	12.1	17.6	13.3	15.1
Dissymétrie	1.43	-0.83	0.39	0.29	-0.30	-0.69	0.43
Aplatissement	7.02	0.30	1.63	0.02	-0.23	0.38	0.32
normalité - p^b	0.003	0.002	0.287	0.118	0.389	0.177	0.476
IC_{95%}^a	-	-	523 / 54.5	272 / 28.9	56.1 / 61.4	13.6 / 14.6	9.4 / 10.3
IC_{99.5%}^a	-	-	43 / 5.9	2.9 / 4.1	9.0 / 12.4	1.39 / 2.30	1.2 / 1.9
Minimum	315.1	9.9	42.6	20.5	30.3	8.9	7.0
Q₁^a	439.6	14.0	50.3	25.8	51.1	13.2	9.0
Médiane	464.5	15.4	54.0	27.6	59.5	14.2	9.7
Q₃^a	506.0	16.4	56.6	30.1	66.9	15.4	10.6
Maximum	807.6	18.2	71.7	37.1	78.8	17.2	14.0
N^a	82	82	82	68	75	75	41
ICméd95%^a	451.7 / 484.9	15.2 / 15.9	52.0 / 54.8	26.5 / 28.5	56.4 / 62.7	13.5 / 14.8	9.3 / 10.2

^a CV : coefficient de variation; Q₁ : premier quartile; Q₃ : troisième quartile; N : effectif de la population; IC_{95%} et IC_{99.5%}: intervalles de confiance de la moyenne et de l'écart-type; ICméd95%: intervalle de confiance de la médiane sur base du test du signe à 1 échantillon.

^b Test de normalité: Anderson-Darling.

On notera que la distribution des teneurs en argile est nettement décalée vers la droite (teneurs supérieures) par rapport à celle de la base AARDEWERK. Ceci peut être dû à un biais analytique et/ou au fait que la population d'horizon C "brabantiens" est plus homogène car ciblée sur un horizon reconnu sur le terrain, ce qui n'est pas possible avec la base AARDEWERK.

Les teneurs en éléments majeurs se caractérisent par des populations normales (K, Na, Al et Fe) ou non (Ca et Mg). Les variations sont à nouveau relativement faibles. Les coefficients de variation, inférieurs à 10.5%, sont pour chaque élément à peine supérieurs à ceux de la variabilité opératoire (tableau I.18). Les variances du jeu de données sont

néanmoins statistiquement différentes¹³ des variances opératoires (tableau II.20) sauf pour Na et Fe. Les amplitudes, par contre, sont nettement supérieures aux ppds, en raison de l'influence de quelques valeurs extrêmes.

Tableau II. 20: Evaluation du degré de signification de la variance observée dans les limons "brabantiens" par rapport à la variabilité opératoire.

Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn
[**]	[***]	***	NS	*	NS	[***]
Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co	0-2µm
[***]	***	NS	(NS)	(***)	***	***

NS: Non Significatif; Niveaux de signification: * = 0.05, ** = 0.01, *** = 0.001

(): variabilité inférieure à la variabilité opératoire; []: population non-normale.

Même si les variances sont différentes des variances opératoires, pour les distributions de fréquences groupées autour de la moyenne (et de la médiane), on peut supposer que la variabilité sera essentiellement d'ordre opératoire et que, dès lors, elle présentera au mieux une très faible structure spatiale.

b teneurs totales en ETMs

Les statistiques relatives aux ETMs sont présentées au tableau II.19.c. Les coefficients de variation sont légèrement supérieurs à ceux de la variabilité opératoire (tableau I.18) pour Mn, Cu, Zn et Co, et du même ordre de grandeur ou inférieurs pour Ni, Cr et Pb. Les variables Mn et Cu s'écartent de la normalité par quelques valeurs extrêmes qui peuvent être considérées comme aberrantes: <340.0 (2 occurrences) ou >605.6 mg/kg (2 occurrences) pour Mn et < 10.4 mg/kg pour Cu (2 occurrences). Les variables Zn, Ni, Pb et Co, bien qu'affichant une statistique p relative à la normalité plus élevée, présentent des valeurs aberrantes également; respectivement >66.0 (2), >36.6 (1), <10.0 (2) et >13.0 (1) mg/kg.

Les individus concernés par les aberrations dans les teneurs mesurées ne sont pas les mêmes d'une variable à l'autre, ce qui rend la recherche d'un facteur explicatif naturel plus difficile. En effet, à l'exception de Mn qui présente un comportement particulier, il est logique d'attendre

¹³ Les tests relatifs à la variance sont très sensibles à la non-normalité de la population. Toutefois, le degré élevé de signification obtenu pour Ca, Mg, Mn et Cu, les variables non-normales, est un gage de non-identité des deux variances.

d'un facteur naturel dans les limons un enrichissement (par illuviation...) ou un appauvrissement (par dilution par un substrat sableux...) généralisé à plusieurs éléments.

Exprimée en terme de variance, la variabilité des limons "brabantiens" est plus élevée que celle résultant de l'analyse (tableau II.20) pour Mn, Cu, Zn et Co, contrairement aux trois éléments qui présentent la variabilité opératoire la plus élevée (Ni, Cr et Pb).

D'une manière générale toutefois, les variations moyennes de composition élémentaire sont relativement faibles dans les limons "brabantiens"; toutes sont inférieures à celles observées à l'échelle de la coupe de Tongrinne.

c relations entre éléments

En raison de ce qui précède, c'd. l'importance relative de la variabilité opératoire dans la variabilité totale, on doit s'attendre à observer de faibles niveaux de corrélations entre les variables.

Le tableau II.21 regroupe les coefficients de corrélations (PEARSON) entre les variables mesurées sur les limons "brabantiens". Les valeurs de r sont toujours inférieures à 0.70, à l'exception de la relation entre les deux pH (0.80), et le plus souvent inférieures à 0.60. On notera:

- le niveau élevé de signification des relations entre certaines variables, ce qui est rassurant pour la qualité des analyses et tend une nouvelle fois à indiquer que les statistiques du tableau I.18 surestiment la variabilité opératoire, notamment pour Ni et Pb;
- Mg, K, Al, Fe, Cu, Zn, Ni et Co forment un groupe étroitement lié aux particules fines (0-10µm davantage encore que 0-2µm sauf pour Co);
- Ca présente une relation de constitution avec les particules fines et une relation fonctionnelle probable avec le pH.
- Pb montre également des teneurs à la fois influencées par la proportion de particules fines et par le pH;
- Cr et les teneurs en sables ne présentent aucune relation linéaire avec d'autres variables.

On retrouve donc apparemment la dépendance entre ETMs et argile malgré des niveaux de variation relativement faibles par rapport à la variabilité opératoire.

Tableau II. 21: Matrice des coefficients de corrélation entre les variables - horizons C "brabantiens".

	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co	O-2	O-10	S	pHeau
Mg	0.444																
K	0.331	0.707															
Na																	
Al	0.365	0.570	0.381														
Fe	0.314	0.626	0.560		0.512												
Mn	0.288	0.265	0.248		0.387	0.470											
Cu	0.392	0.666	0.555		0.557	0.536											
Zn	0.397	0.563	0.508		0.544	0.501		0.559									
Ni	0.367	0.363	0.375		0.374	0.321		0.512	0.507	0.365							
Cr																	
Pb	0.577	0.334			0.276	0.326		0.355	0.393	0.307							
Co		0.348			0.361	0.601		0.414	0.476								
O-2	0.367	0.426	0.354		0.486	0.468		0.531	0.368	0.256		0.303	0.607				
O-10	0.459	0.633	0.577		0.577	0.613		0.332	0.584	0.438	0.284		0.301	0.555	0.767		
S																	
pHeau	0.461																
pH _{KCl}	0.451																

L'analyse factorielle n'ajoute que peu d'information: toutes les variables, sauf Na et Cr, contribuent dans le même sens au premier axe factoriel (fig. II.38); celui-ci exprime l'importance relative des fractions granulométriques fines (fig. II.39).

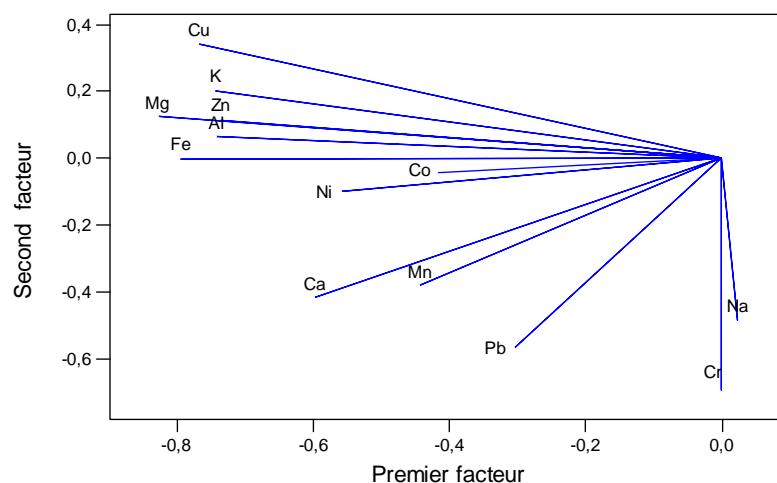


Figure II. 38: Plan factoriel principal relatif aux teneurs en éléments dans les horizons C "brabantiens".

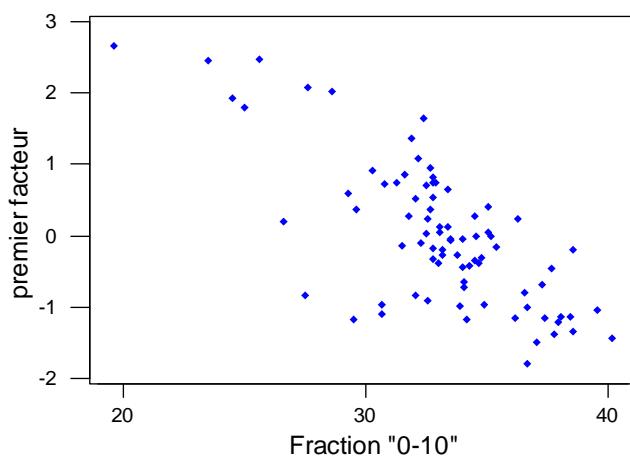


Figure II. 39: Relation entre les valeurs sur le premier axe factoriel et la proportion de la fraction "0-10µm" pour les horizons C "brabantiens".

d structures spatiales

La faiblesse relative de la variabilité de constitution élémentaire des horizons C "brabantiens" ainsi que l'influence de la teneur en argiles et limons fins sur celle-ci ont été constatées. La structure spatiale de ces éléments sera donc étudiée en relation avec celle des teneurs en argiles.

Dans un premier temps, l'examen des teneurs en argile de l'horizon C «brabantien» en fonction de la position géographique (figure II.40) ne montre pas de gradient d'argile quel que soit l'axe considéré.

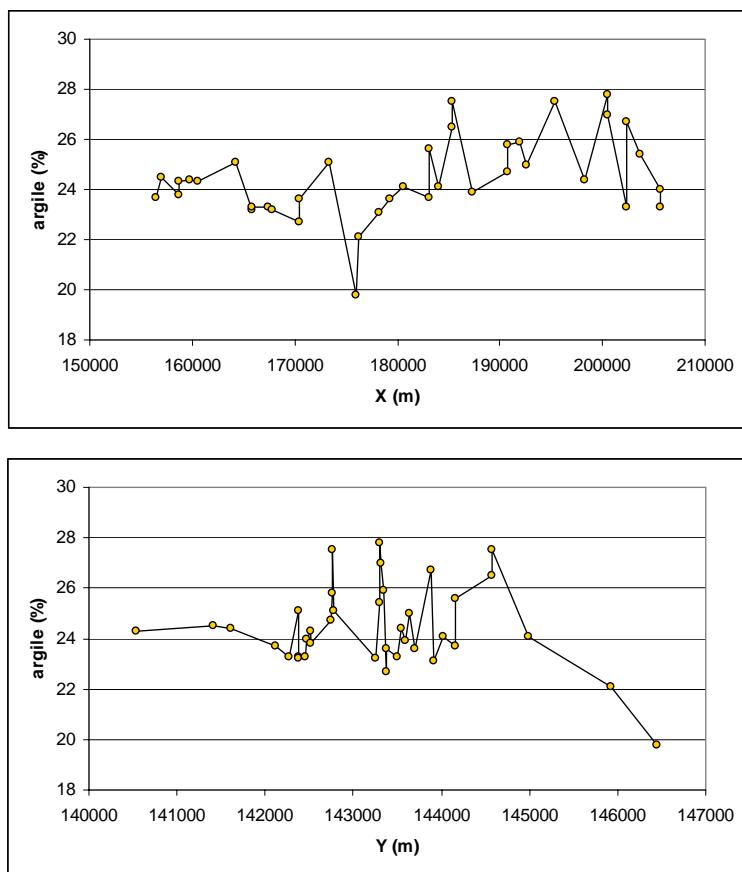


Figure II. 40: Teneurs en argile de l'horizon C «brabantien» en fonction de la position géographique (X et Y en mètres - coordonnées dans le système de projection Lambert 1972).

Pour ce qui concerne les teneurs totales en éléments, et particulièrement les éléments liés aux teneurs en argiles, aucun gradient géographique n'a pu être mis en évidence non plus, à l'exception des éléments Ni et Co. Ces derniers présentent en effet une relation linéaire avec la latitude de l'ordre de 0.1 mg/kg par kilomètre. Pour Co, la part de la variance

"expliquée" par la régression linéaire selon l'axe nord-sud (Y) vaut 27.6%, alors que pour Ni elle est inférieure à 7%.

Aucun gradient granulométrique ne contribue dès lors à expliquer de manière satisfaisante la distribution spatiale des éléments étudiés.

En absence de gradient marqué, la continuité spatiale des teneurs en éléments est analysée sur base des variogrammes omnidirectionnels, dont les plus représentatifs sont présentés dans les figures II.41 à II.43.

Pour ce qui concerne les variables $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, pH_{KCl} et les fractions granulométriques, on ne remarque aucune dépendance spatiale nette aux échelles considérées (figure II.41). Les variogrammes des pH sont très semblables; ceux des fractions "0-2 μm " et "0-10 μm " également.

Pour les pH, ces résultats n'ont rien de surprenant vu le degré d'homogénéité relativement élevé au sein de l'échantillon étudié. On peut s'interroger par contre sur les résultats relatifs à la granulométrie. Le variogramme de la figure II.41 est totalement différent de celui établi sur base des données AARDEWERK (figure II.32). Les différences majeures entre les deux jeux de données résident dans (i) l'effectif des échantillons et (ii) l'homogénéité des méthodes d'échantillonnage et d'analyse pour le transect régional. Il s'agit toujours du même type d'horizon reconnu sur le terrain par la même personne et analysé selon le même protocole. Les données de la base AARDEWERK, bien que plus nombreuses, sont plus hétéroclites et elles ne garantissent donc pas la représentativité des limons "brabantiens" mais plutôt celle d'un ensemble de matériaux limoneux "indifférenciés" au point de vue stratigraphique.

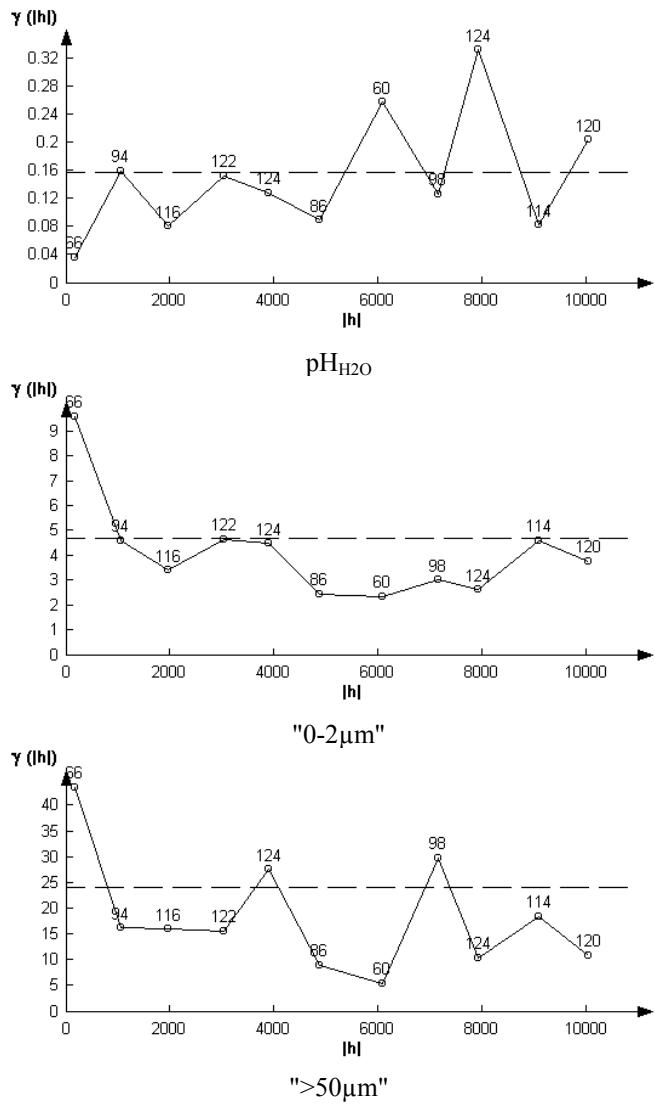
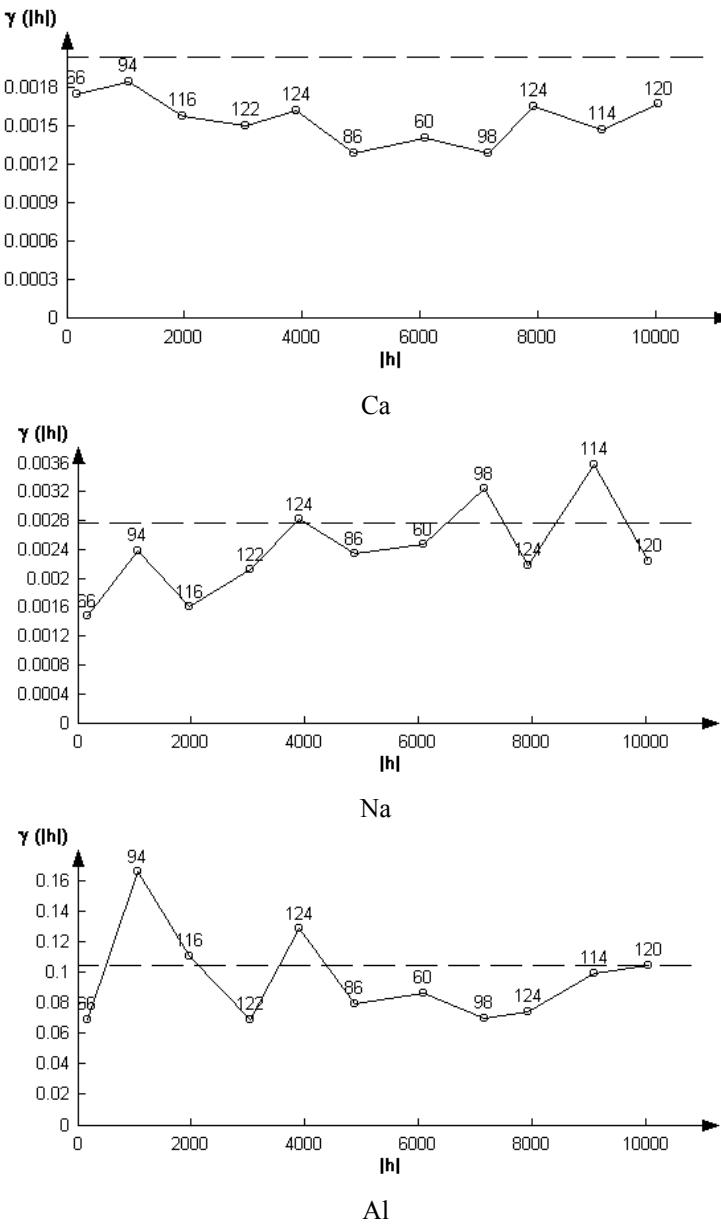


Figure II. 41: Variogrammes omnidirectionnels et nombre de paires de points. pH_{H2O}, fractions granulométriques ("0-2μm", ">50μm")

Pour les éléments majeurs, seul Na présente en apparence une certaine auto-corrélation spatiale, la semi-variance montrant une tendance à l'augmentation en fonction de la distance entre les points, jusqu'à une portée de l'ordre de 4000m. Cette auto-corrélation est en réalité due à la présence de valeurs extrêmes pour des sondages relativement isolés géographiquement (figure II.44), ce qui engendre une sous-estimation de la variabilité à courte distance.

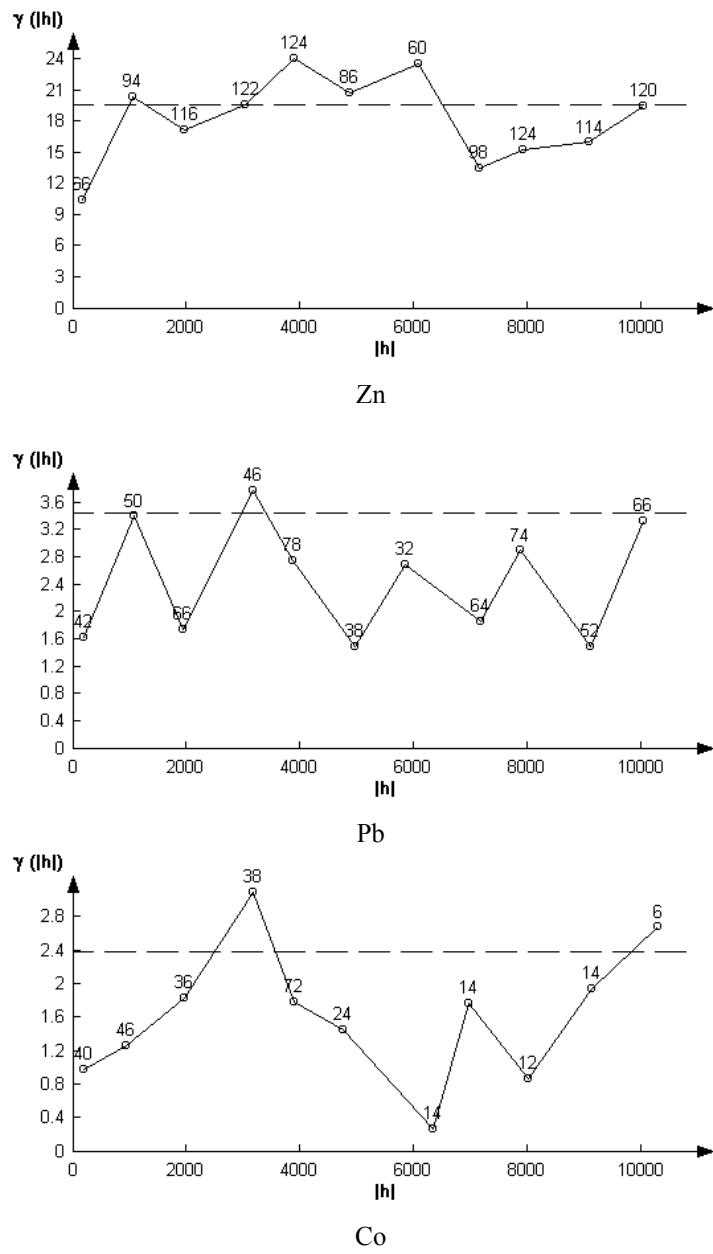
Le variogramme de Al est lui représentatif de ceux de Mg, K et Fe. La semi-variance décamétrique est du même ordre de grandeur que celles relatives à des distances plus importantes.



**Figure II. 42: Variogrammes omnidirectionnels et nombre de paires de points.
Éléments majeurs (Ca, Na et Al)**

Pour ce qui concerne les ETMs, Mn, Cu et Ni présentent des profils variographiques semblables à celui de la fraction "0-2µm", Zn un profil

similaire à celui du pH, Cr un profil linéaire horizontal, Pb un profil en dents de scie à base horizontale également. Co présente une auto-corrélation pour des gammes de distances inférieures à 4000m. La deuxième moitié du variogramme est malheureusement inutilisable en raison d'un nombre de paires de points trop faible.



**Figure II. 43: Variogrammes omnidirectionnels et nombre de paires de points.
ETMs (Zn, Pb et Co)**

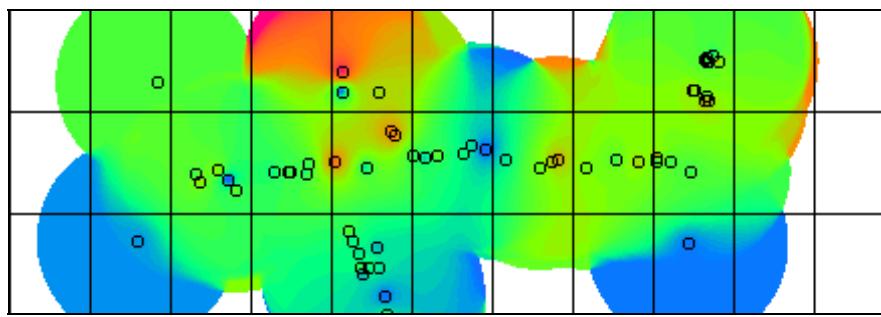


Figure II. 44: Représentation des teneurs en Na (g/100g) des horizons C "brabantiens" (interpolation de type moyenne mobile) sur le découpage des cartes des sols (coin supérieur gauche = 116E). Les couleurs traduisent des teneurs entre 0.60 (bleu) et 0.90 g/100g (rouge).

Les données relatives à l'échantillonnage régional ne montrent pas de gradient marqué dans la différenciation régionale des paramètres étudiés ni de dépendance spatiale aux échelles appréhendées.

e incidences sur l'estimation du fond géochimique

L'indépendance entre les échantillons, vérifiée par l'analyse spatiale, est une condition nécessaire pour un certain nombre d'opérations (estimation, comparaison, inférence...) relevant des statistiques "classiques".

Nous pourrons dès lors considérer comme valides les estimations des valeurs moyennes et des variances du tableau II.19, ainsi que les coefficients de corrélation entre éléments et variables "explicatives", dont les niveaux de signification figurent au tableau II.21.

Des régressions statistiques peuvent également être recherchées entre les teneurs en ETMs et les paramètres "explicatifs".

D'une manière générale, pour favoriser le caractère généralisable des relations, il est préférable de privilégier les équations de la forme:

$$[\text{ETM}] = a + \sum_{i=1}^n b_i * [\text{PP}_i] - \sum_{i=1}^k c_i * [\text{PD}_i]$$

où $\sum_{i=1}^n b_i * [\text{PP}_i]$ représente la somme des contributions des n phases porteuses (PP - fractions granulométriques fines, FeOOH...) et

$\sum_{i=1}^k c_i * [\text{PD}_i]$ la somme des contributions des k phases diluantes

(quartz, carbonates...).

Le recours à des variables indirectes qui ne sont pas assimilées à des phases porteuses ou diluantes présente des dangers:

- représentativité trop locale (coordonnées X et Y par exemple);
- différence de cinétique (le pH peut évoluer plus vite que les teneurs totales).
- ...

Toutefois, si les matériaux parentaux des sols sont différents d'une étude à une autre, les phases porteuses et diluantes peuvent y avoir des significations différentes également. On se gardera d'utiliser la fraction "0-2 μm " comme phase porteuse si les types d'argile sont très différents; de la même façon, il n'est pas pertinent d'utiliser la fraction "20-50 μm " comme phase diluante pour des sols développés sur shales, pour ne citer que cet exemple.

L'universalité des relations de régression dépend évidemment des paramètres utilisés. Si les matériaux parentaux sont hétérogènes, la régression doit se baser sur des critères minéralogiques. Dans les matériaux loessiques, la minéralogie peut *a priori* être traduite par des classes granulométriques. Dans une région donnée, on peut imaginer la présence d'un gradient granulométrique dans une ou plusieurs directions. Les coordonnées X et Y peuvent alors être utilisées à la place des classes granulométriques *etc.*

Quant à l'intérêt des régressions, il est forcément subordonné à la disponibilité des variables utilisées. Les variables mesurées dans le cadre de ce travail (pHs, fractions granulométriques, teneurs totales en Al, Fe, Ca, Mg, K ou Na) ne font pas forcément l'objet d'un inventaire systématique dans d'autres travaux.

Nous avons dès lors réalisé des analyses de régression avec les variables précitées, plus les coordonnées X et Y, selon plusieurs niveaux de disponibilité de ces informations :

- (i) toutes les variables "explicatives",
- (ii) l'ensemble des variables "explicatives" hors les "bases" Ca, Mg, K et Na,
- (iii) les variables "explicatives" disponibles dans la base AARDEWERK (soit X, Y, pH_{H2O}, pH_{KCl}, "0-2 μm ", "0-10 μm ", et ">50 μm "),

- (iv) les teneurs en argile,
- (v) les teneurs en Al_{HF} , Fe_{HF} et Mn_{HF} .

La procédure de régression comprend une analyse des meilleurs sous-ensembles de variables sur base des coefficients R^2 et $R^2_{\text{ajusté}}^{14}$. Une fois la sélection des variables effectuées, l'analyse en régression proprement-dite est réalisée. Un modèle de régression n'est retenu que si tous les coefficients de régression sont significativement différents de 0 ($\alpha = 0.05$).

Toutes ces régressions forment un ensemble de modèles trop lourd à présenter dans ce texte. Le détail des résultats figure donc en annexe 5. Les variables "explicatives" des différents modèles figurent au tableau II.22 tandis que leur adéquation à "expliquer" les variations de teneurs en ETMs fait l'objet du tableau II.23. Ces modèles permettent donc théoriquement d'estimer des teneurs géochimiques en ETMs dans les limons "brabantiens" pour plusieurs niveaux de richesse en information indirecte (ou secondaire).

La comparaison des carrés moyens résiduels, issus des régressions, à la variabilité opératoire est un moyen de déterminer dans quelle mesure la variabilité résiduelle porte encore de l'information "explicable" autrement que par les aléas analytiques. Elle peut s'effectuer de diverses manières: test de conformité de variance (ou test χ^2), test F, test de HARTLEY, test de BARTLETT (DAGNELIE, 1975). Les deux premiers tests ont été effectués. Le premier consiste à vérifier si une valeur déterminée (en l'occurrence $\hat{\sigma}_{\text{opér.}}^2$) est comprise dans l'intervalle de confiance autour de la variance résiduelle. Le nombre de degrés de libertés étant supérieur à 30, le test χ^2 peut être remplacé par un test u¹⁵. Le test F, par contre, est basé sur le rapport de deux variances¹⁶; il prend en considération l'incertitude sur l'estimation de la variance opératoire.

¹⁴ $R^2_{\text{ajusté}}$ prend en compte les degrés de libertés. En effet, si une variable est ajoutée à l'équation R^2 augmentera même si cette variable n'a pas de valeur réelle (MINITAB).

¹⁵ $u_{\text{obs}} = \left| \sqrt{2 \text{SCE} / \sigma_{\text{opér.}}^2} - \sqrt{2n - 3} \right|$ (DAGNELIE, 1975)

¹⁶ $F_{\text{obs}} = \frac{\hat{\sigma}_{\text{max}}^2}{\hat{\sigma}_{\text{min}}^2}$ (DAGNELIE, 1975)

Tableau II. 22: Variables "explicatives" utilisées dans les régressions.

	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co
I	[K - Na - Al - 0-2μ - 0-10μ - S - Y]	[K - Al]	[Al - Fe]	[Ca - K - Al - 0-2μ - Y]	-	[Ca]	[Mg - Fe - S - X - Y - pH ₁₄₂₀ - pH _{CC}]
II	[Fe]	[Al - Fe - S]	[Al - Fe]	[Al - Y]	-	[pH ₁₄₂₀ - Al]	[Fe - S - Y]
III	[0-2μ - 0-10μ]	[0-10μ]	[0-10μ]	[0-10μ]	-	[pH ₁₄₂₀]	[0-2μ - Y]
IV				[0-2μ]			
V				[Al - Fe - Mn]			
VI				[Al - Fe]			
VII				[Fe]			

Tableau II. 23: Variance expliquée (R^2) par les différentes régressions ETM - variables "explicatives" et comparaison de la variance résiduelle avec la variance opératoire (probabilités d'après les statistiques u et F).

ETM	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co
Variance totale (mg/kg) ²	4443.56	3.21	24.80	11.56	107.95	3.52	2.20
Régression ^a		R^2 et (nombre de paramètres hors la constante)					
I	48.5 (7)	44.8 (2)	36.3 (2)	35.8 (5)	NS	33.3 (1)	84.4 (7)
II	22.1 (1)	43.0 (3)	36.3 (2)	18.6 (2)	NS	19.6 (2)	67.4 (3)
III	15.4 (2)	34.1 (1)	19.2 (1)	8.1 (1)	NS	12.8 (1)	45.7 (2)
IV	NS	28.2	13.6	6.6	NS	9.2	36.9
V [Al, Fe, Mn]	-	49.3	NS	NS	NS	NS	NS
VI [Al, Fe]	NS	39.6	36.3	NS	NS	NS	NS
VII [Fe]	22.1	28.7	25.1	10.3	NS	10.6	36.1
Régression		Niveaux de probabilité sur base de u_{obs} ^b					
I	***	NS	NS	NS	IND	(***)	(**)
II	***	NS	NS	NS	IND	(***)	NS
III	***	**	***	NS	IND	(**)	NS
IV	IND	***	***	NS	IND	(**)	NS
V [Al, Fe, Mn]	-	NS	IND	IND	IND	IND	IND
VI [Al, Fe]	IND	*	NS	IND	IND	IND	IND
VII [Fe]	***	***	**	NS	IND	(**)	NS
Régression		Niveaux de probabilité sur base de F_{obs} ^b					
I	*	NS	NS	NS	IND	(***)	(**)
II	***	NS	NS	NS	IND	(**)	NS
III	***	NS	NS	NS	IND	(*)	NS
IV	IND	NS	NS	NS	IND	(*)	NS
V [Al, Fe, Mn]	-	NS	IND	IND	IND	IND	IND
VI [Al, Fe]	IND	NS	NS	IND	IND	IND	IND
VII [Fe]	***	NS	NS	NS	IND	(*)	NS

a: Régressions: (I) sur base de toutes les variables explicatives; (II) idem I moins Ca, Mg, K et Na; (III) idem II moins Al et Fe; (IV) sur base de la teneur en argile granulométrique et (V) sur base des éléments Al, Fe et Mn.

b: niveaux de probabilité: * = $p < 0.05$; ** = $p < 0.01$; *** = $p < 0.001$.

NS: Non significatif; IND: indéterminé ; () : variance inférieure à la variance opératoire.

On notera que:

- Cr ne présente de relation linéaire avec aucune variable "explicative", ce que l'on savait déjà de l'analyse de la matrice des corrélations;
- à l'exception de Co, les proportions de variances "expliquées"¹⁷ les plus favorables restent inférieures à 50%;
- au niveau I¹⁸, les "bases" Ca, Mg, K et Na interviennent comme variables "explicatives" dans les régressions de tous les ETMs sauf Cr et Zn, mais jamais toutes ensembles (K et Na pour Mn, K pour Cu, K et Ca pour Ni, Ca pour Pb et Mg pour Co);
- le nombre de paramètres entrant dans les régressions est relativement faible eu égard au nombre total de paramètres possibles (13), ce qui traduit des modèles relativement simples, en particulier pour Pb (régression en fonction de Ca uniquement), Cu et Zn (régressions avec K et Al pour Cu, Al et Fe pour Zn); les modèles pour Mn et Co sont par contre plus complexes ;
- au niveau II, les R^2 diminuent nettement pour Ni, Pb et Co; pour Ni et Co, cette diminution va de pair avec une simplification accrue des modèles; les fractions granulométriques interviennent peu en tant que variables "explicatives" (">50µm" pour Cu et Co);
- au niveau III, le meilleur prédicteur est sans conteste la fraction "0-10µm" qui intervient pour Mn (avec la fraction "0-2µm" comme co-facteur), Cu, Zn et Ni (comme seul facteur) ;
- au niveau IV (ETM-"0-2µm"), les coefficients de régression sont significatifs pour tous les éléments sauf Mn et Cr ;
- Au niveau V, Fe est un "meilleur" estimateur que la fraction "0-2µm" pour Mn et Zn, mais du même acabit pour les autres éléments; la nuance existante entre argile granulométrique et teneurs en Al et Fe totaux semble particulièrement importante pour Zn;

¹⁷ On peut toutefois s'interroger sur la pertinence de certaines de ces équations dont les niveaux de $R^2_{\text{ajusté}}$ semblent trop élevés, eu égard à l'importance de la variabilité opératoire. Comment croire, en effet, que l'on puisse expliquer 80% de la variance totale en Co par une combinaison de variables alors que la variabilité opératoire doit être comprise entre 25 et 45% de celle-ci? Ce constat doit donc inciter à la prudence quant au caractère extrapolable de ces équations!

¹⁸ Les modèles de régression relatifs aux limons "brabantiens" seront dénommés BRAB-I, BRAB-II... selon les niveaux présentés au tableau II.22.

- Mn est un facteur "explicatif" pour Cu ;
- les niveaux de signification des variances résiduelles par rapport aux variances opératoires obtenus par les tests F sont inférieurs à ceux des tests u ; sur base des premiers, toutes les régressions "expliqueraient" chacune tout ce qui est "explicable" à l'exception de Mn; les résultats des tests u sont plus nuancés;
- les variances résiduelles des régressions aux niveaux I et II ne sont pas significativement différentes des variances opératoires à l'exception de Mn;
- pour Pb et Co au niveau I et Pb aux niveaux II à IV, toutefois, les variances résiduelles sont inférieures aux variances opératoires. Pour Co, la cause réside dans la complexité du modèle I qui à force d'arguments "explique" des variations par des covariations qui ne sont probablement que fortuites; pour Pb, il s'agit plus vraisemblablement d'une manifestation de la surestimation de la variabilité opératoire;
- aux niveaux III et IV pour Cu et Zn, selon le test u, les fractions granulométriques "n'expliqueraient" pas toute la variabilité factorisable;
- Aux niveaux V à VII, le constat est le même pour Fe considéré en tant que seul facteur; tandis que la combinaison [Fe-Al] suffit à "expliquer" la variance de Zn.

La figure II.45 illustre les différences existant dans les prédictions entre les modèles BRAB-IV (ETMs-"0-2 μ m") et ceux de la coupe de Tongrinne. Pour Cu, les écarts sont relativement faibles (1.0 mg/kg pour une teneur en argile de 20%); les teneurs sont systématiquement plus élevées avec le modèle BRAB. Pour Zn, les écarts sont relativement faibles dans la zone de validité des teneurs en argile, *i.e.* dans la gamme des teneurs des points utilisés pour les régressions. Par contre, hors de cette zone, les divergences deviennent très importantes. Les teneurs prédites en Ni et Pb par les modèles BRAB-IV tendent vers les valeurs des modèles TONG pour des teneurs en argile supérieures à 40%. Dans la gamme des teneurs en argile des limons BRAB, les écarts entre les deux séries de modèles sont de l'ordre de 3 et 5mg/kg pour Pb et Ni, respectivement, ce qui reste très raisonnable.

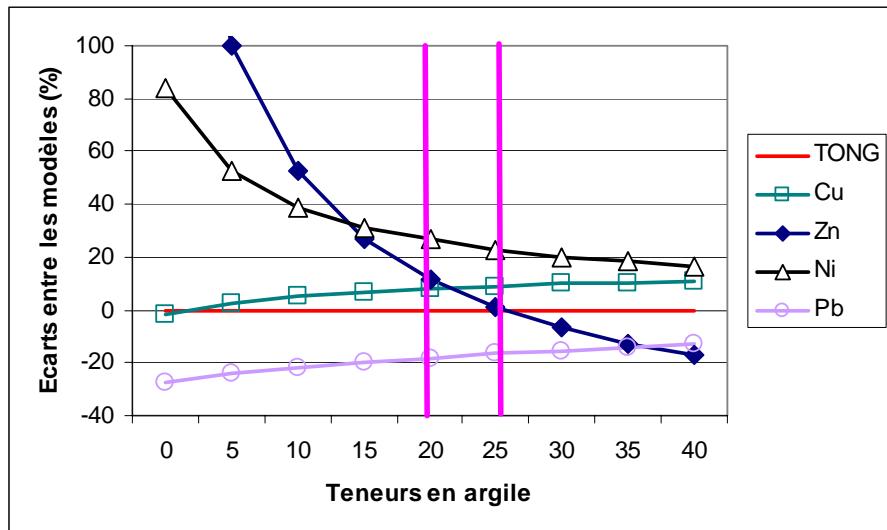


Figure II. 45: Ecarts relatif entre les teneurs prédictes par les régressions ETMs-[0-2µm] des modèles BRAB et de la coupe de Tongrinne (TONG): $100 \times ([\text{BRAB}]-[\text{TONG}])/\text{TONG}$. En rose, teneurs en argile entre lesquelles les modèles ont été calibrés.

En dehors de la gamme des teneurs en argile utilisées pour calibrer les modèles, les modèles BRAB-IV et TONG pour les différents éléments sont très différents, à l'exception de ceux pour Cu. Cela pose des questions quant à leur validité pour exprimer des relations en-dehors du domaine dans lequel ils ont été réalisés. Sans préjuger de leur qualité, les modèles BRAB sont basés sur de nombreuses données peu différenciées et les modèles TONG ont été établis à partir de peu de données bien différencierées.

Une remarque générale peut être formulée à l'encontre des modèles BRAB qui font intervenir plusieurs variables "explicatives". Celles-ci ne sont pas indépendantes et la prise en considération de leur corrélation rend parfois délicate la distinction entre phases porteuses et phases diluantes dans les modèles.

Un moyen de s'affranchir de la dépendance entre les variables "explicatives" réside dans leur factorisation. Une analyse factorielle a été menée sur les variables principales (Ca, Mg, K, Na, Al, Fe, Mn, "0-2µm", ">50µm", pH_{H2O} et pH_{KCl}) afin de créer des facteurs indépendants entre eux qui synthétisent l'information contenue dans ces variables. Les analyses de régression entre les ETMs et les facteurs sont alors menées (BRAB-VIII dans la suite du texte).

Quatre facteurs ont été construits, qui portent 75% de la variabilité totale entre les variables "explicatives". Le détail de l'analyse peut être trouvé en annexe X. Le premier facteur oppose les phases porteuses fines ($<2\mu\text{m}$) à la phase diluante des sables ($>50\mu\text{m}$), le deuxième facteur correspond au niveau d'acidité/basicité du milieu, le troisième facteur exprime les phases porteuses des "bases" qui ne se trouvent pas dans la fraction granulométrique "0-2 μm ", *i.e.* les minéraux des fractions limoneuses fines, et le quatrième facteur est lié aux teneurs en Mn principalement.

L'examen du tableau II.24 confirme l'importance des phases porteuses fines et diluantes sableuses sur les teneurs en ETMs, le facteur 1 étant présent dans tous les modèles sauf le Cr. En outre, il constitue le seul facteur pour Zn, Ni et Pb. Cu et Cr apparaissent influencés par le niveau d'acidité/basicité (facteur 2), alors que Co est sous l'influence des facteurs 3 et 4, *i.e.* des "feldspaths" et des processus rédox. La liaison de Co au groupe "feldspaths" avait déjà été remarquée lors de l'étude de la coupe de Tongrinne et interprétée comme une manifestation de la stratigraphie. Ce constat mériterait peut-être un complément d'investigation dans le futur. Les seuls points réellement nouveaux sont les apparentes relations entre les éléments Cu et Cr et le niveau de pH.

Tableau II. 24: Facteurs intervenant dans les modèles de régression BRAB-VIII

ETM	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co
Facteur						
1	OUI	OUI	OUI	-	OUI	OUI
2	OUI	-	-	OUI	-	-
3	-	-	-	-	-	OUI
4	-	-	-	-	-	OUI

Les régressions sont évaluées au tableau II.25 sur le même principe que celles du tableau II.22.

Les niveaux de R^2 atteints par les régressions BRAB-VIII sont équivalents à ceux de BRAB-I (Cu et Zn), BRAB-II (Ni et Pb) ou BRAB-III (Co), et une régression significative a été établie pour Cr. Les variances résiduelles ne sont pas statistiquement supérieures aux variances opératoires ce qui signifie que toute la variance "explicable est "expliquée". La factorisation présente l'avantage de rendre les relations plus claires avec les différentes phases porteuses et les conditions de milieu en tenant compte des corrélations entre les variables explicatives. Elle a le désavantage de ne pas supporter les données manquantes. La factorisation évaluée ici n'est malheureusement pas applicable à des jeux de

données pour lesquels au moins une des variables utilisées (Ca, Mg, K, Na, Al, Fe, Mn, "0-2 μ m", ">50 μ m", pH_{H2O} et pH_{KCl}) serait manquante.

Tableau II. 25: Variance expliquée (R^2) par les régressions ETM -variables "factorielles" et comparaison de la variance résiduelle avec la variance opératoire (probabilités d'après les statistiques u et F).

ETM	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co
R^2	49.3	34.6	20.9	8.5	20.1	47.8
Niveau de p de u_{obs}^a	NS	NS	NS	NS	(***)	NS
Niveau de p de F_{obs}^a	NS	NS	NS	NS	(**)	NS

a: niveaux de probabilité: * = $p < 0.05$; ** = $p < 0.01$; *** = $p < 0.001$.

NS: Non significatif; () : variance inférieure à la variance opératoire.

Les équations qui font l'objet d'une évaluation aux tableaux II.23 et II.25 présentent un intérêt car elles réduisent toutes la variabilité du jeu de données étudié. Toutefois, ces modèles ne sont jusqu'à présent validés que pour le jeu de données étudié, représentatif des horizons C du loess "brabantien".

Il est légitime de s'interroger sur le champ de validité des modèles "brabantiens". Faut-il restreindre les résultats aux horizons "brabantiens" ou peut-on au contraire élargir leur portée à d'autres matériaux limoneux et, de ce fait, s'affranchir de la stratigraphie et de son incertitude spatiale? La reconnaissance du caractère brabantien dans les solums bruns lessivés n'est pas toujours une tâche aisée, pas plus d'ailleurs que la distinction entre un "véritable" horizon C et un horizon de transition entre horizons BT et C. Dès lors un modèle applicable aux horizons de profondeur moyenne¹⁹ dans les solums bruns lessivés, voire dans les sols limoneux au sens large, présenterait plus d'intérêt pratique. Une première comparaison entre les modèles BRAB-IV et TONG a montré que l'extrapolation des modèles n'est pas si évidente.

Il semble toutefois opportun de d'abord examiner l'influence de la pédogenèse sur la différenciation spatiale des teneurs en ETMs avant de vérifier si les horizons des solums obéissent aux mêmes lois que les

¹⁹ i.e. sous l'horizon de surface et à portée de tarière de cartographe (plus une allonge d'un mètre pour les plus courageux!). Ces horizons seront qualifiés de "profonds" entre guillemets dans la suite du texte, laissant le terme profond sans guillemet pour les horizons situés à une profondeur supérieure à 2 mètres.

matériaux parentaux limoneux. Ceci sera l'objet du prochain chapitre.

5.3.2.3 Conclusions

Dans l'ensemble, les paramètres mesurés sur cet échantillon représentatif de la population des horizons C "brabantiens" présentent une homogénéité relativement importante. La variabilité opératoire constitue dès lors un facteur "explicatif" majeur des différences observées.

L'analyse des corrélations et l'analyse factorielle multivariée confirment néanmoins l'importance des teneurs en argile sur celles en Mg, K, Al, Fe, Cu, Zn, Ni et Co.

Un gradient granulométrique (diminution de la fraction "0-2 μ m" et augmentation de la fraction ">50 μ m" du Sud vers le Nord) est suspecté mais il ne se traduit pas ou peu (Co et Ni) en effets sur les teneurs en éléments traces.

L'analyse géostatistique a permis de conclure à l'absence d'autocorrélation spatiale aux échelles d'observation prises en considération (d'une dizaine de mètres à plusieurs kilomètres) pour la majorité des éléments étudiés. Les techniques d'interpolation ne se justifient donc pas pour la spatialisation des teneurs en ETMs dans les horizons C "brabantiens". La teneur moyenne est l'estimateur le plus pertinent au niveau régional.

A l'échelle ponctuelle, les analyses en régression uni- ou multivariée permettent de donner des estimations des teneurs naturelles dans les horizons C des loess "brabantiens", *i.e.* du fond géochimique du solum le mieux représenté en Région limoneuse, sur base de variables ancillaires. La factorisation de celles-ci a confirmé l'importance, dans l'ordre décroissant, de la fraction "0-2 μ m", du pH, des minéraux des fractions limoneuses fines et enfin des processus rédox (perçus par l'intermédiaire des teneurs en Mn). Mn et Cr ne suivent toutefois pas ce schéma ; la teneur moyenne restant le meilleur prédicteur. Ces constatations convergent vers celles réalisées sur la coupe de Tongrinne. Au moins, un point reste en suspens pour l'instant, celui qui concerne la validation des régressions, tant BRAB que TONG, pour des horizons limoneux "profonds" indifférenciés. Cette question fera l'objet d'un développement au cours du prochain chapitre.

5.4 Conclusions relatives à l'approche matériau parental

La première partie de l'étude des matériaux parentaux a consisté en l'acquisition d'un certain nombre de références relatives tant aux matériaux limoneux qu'aux substrats anciens. Cette ébauche d'inventaire lithochimique devra dans le futur être complétée d'autres analyses, notamment pour préciser les ordres de grandeur des variations pépitiques, de première importance pour l'estimation de la variabilité opératoire, et des variations dans et entre les grandes familles lithologiques.

Une série de limons d'âges différents ont ensuite été étudiés sur la coupe de Tongrinne. Des variations significatives de teneurs élémentaires ont été constatées. Ces différences sont susceptibles de générer localement des différences dans la composition élémentaire ou les propriétés des horizons de surface. La majeure partie de cette variabilité résulte d'un effet stratigraphique et de la présence de paléosols. Un tableau d'estimation du fond pédogéochimique ponctuel des sols limoneux selon trois scenarii est proposé. Il illustre notamment les gains de précision apportés soit par la reconnaissance du membre auquel appartient le limon, soit par la mesure de la teneur en argile.

Il en résulte que si spatialement, la prédiction de l'âge du limon roche-mère est impossible faute d'observations, la connaissance de la teneur en argile et de l'importance des caractères rédox doit néanmoins permettre l'estimation du fond pédogéochimique en ETMs. L'incertitude spatiale sur le matériau parental loessique ne reste alors un problème que pour la prédiction des éléments de la TRB.

Malgré leur réputation d'homogénéité, les loess présentent une variabilité, à la fois stratigraphique et locale, en témoignent les résultats obtenus sur trois autres coupes quaternaires.

Pour considérer la représentativité d'une coupe de référence, la plus grande attention devrait être prêtée à son environnement naturel (géologie, position topographique, historique d'occupation...), facteur déterminant pour la nature et l'intensité des processus de pédogenèse et morphogenèse. En ce qui concerne la représentativité des membres identifiés sur la coupe de Tongrinne, tous les horizons non-carbonatés des trois autres coupes ont pu être rattachés chimiquement à un des membres de Tongrinne.

L'analyse multivariée des quatre coupes a permis de (i) visualiser les facteurs de la variabilité et les corrélations entre éléments, (ii) de regrouper les individus sur base de leur composition et (iii) d'estimer l'importance de l'effet site. Au sein d'une même coupe stratigraphique, la variabilité résulte principalement de la présence de paléosols enfouis. Les redistributions d'argile et les processus redox sont les facteurs-clés des différences entre horizons. Lorsque l'on compare plusieurs coupes profondes, l'influence du site d'étude sur la variabilité apparaît d'abord non négligeable pour quelques éléments (jusqu'à plus de 50% pour Ca et Cr). Toutefois, une stratification complémentaire sur base de la stratigraphie supposée des limons permet de nuancer cet effet "site". Celui-ci devient alors très faible, l'essentiel de la variation s'expliquant par l'âge des matériaux. Les principaux facteurs de variation entre les sites restent les teneurs en argile, en carbonates et en "feldspaths" ainsi que l'intensité des processus redox.

L'effet "site" concernant peu les variables liées à l'argile, comme Al, Fe, Cu, Zn, Ni, Pb et Co, (i) des corrélations entre ETMs et teneurs en Al ou Fe sont d'application plus large que celle d'une coupe isolée; et (ii) le recours aux régressions ETMs-argile est envisageable pour la prédiction spatiale des teneurs en ETMs.

Une approche régionale a été menée sur les horizons C des limons de couverture afin de vérifier les conclusions tirées de l'analyse des coupes quaternaires. L'analyse de données existantes (AARDEWERK) ou originales n'a permis de mettre en évidence, à l'échelle de la région étudiée, ni gradient granulométrique ni continuité spatiale dans les loess du Membre du Brabant.

Les horizons C "brabantiens" présentent une homogénéité relativement importante et la variabilité opératoire constitue dès lors un facteur "explicatif" majeur des différences observées. L'analyse des corrélations et l'analyse factorielle multivariée ont néanmoins confirmé l'importance des teneurs en argile sur celles en Mg, K, Al, Fe, Cu, Zn, Ni et Co.

Les techniques d'interpolation ne se justifient pas pour la spatialisation des teneurs en ETMs dans les horizons C "brabantiens". La teneur moyenne est l'estimateur le plus pertinent au niveau régional. A l'échelle ponctuelle, par contre, des analyses en régression uni- ou multivariée permettent de donner des estimations des teneurs naturelles dans les horizons C des loess "brabantiens", *i.e.* des estimations du fond géochimique du solum le mieux représenté en Région limoneuse, sur base de variables ancillaires. La factorisation de celles-ci a confirmé

l'importance, dans l'ordre décroissant, de la fraction "0-2 μ m", du pH, des minéraux des fractions limoneuses fines et enfin des processus rédox (perçus par l'intermédiaire des teneurs en Mn). Mn et Cr ne suivent toutefois pas ce schéma ; la teneur moyenne restant le meilleur prédicteur.

Pour que l'incertitude relative à l'âge des matériaux limoneux ne se traduise pas en incertitude spatiale, il faut disposer d'un maximum de données ancillaires spatialisées. Les variables corrélées à l'argile sont théoriquement spatialisables par l'intermédiaire de bases de données granulométriques (moyennant toutes les précautions d'usage). Toutefois, les modèles régressifs ETMs-"0-2 μ m" doivent encore faire l'objet d'une validation pour être extrapolés à des horizons limoneux stratigraphiquement indifférenciés, comme on en trouve dans la base de données AARDEWERK. Un élément comme Mn, par contre, ne présente pour l'instant de relation évidente avec aucune variable "explicative" et l'information utile à sa spatialisation se résume à la teneur moyenne et à l'écart-type de la population BRAB.

Table des matières

CAPITRE 5 LE FOND MINERALOGIQUE ET GEOCHIMIQUE DU <i>LIMON ROCHE-MERE</i>	
119	
5.1 <i>Approche lithologique</i>	119
5.1.1 Données existantes.....	120
5.1.1.1 Minéralisations notoires	120
5.1.1.2 Les données de la cartographie géochimique des sédiments et limons d'inondation en Belgique et au Luxembourg (VAN DER SLUYS et al., 1997)	122
5.1.1.3 Les données de l'Inventaire géochimique du paléozoïque (MARTIN et SONDAG, 1985)	122
5.1.2 Roches-mères limoneuses et substrats anciens dans la vallée de l'Orneau	126
5.1.2.1 Matériels et méthodes.....	126
5.1.2.2 Résultats et discussions	126
5.2 <i>Approche stratigraphique</i>	130
5.2.1 La coupe de Tongrinne.....	131
5.2.1.1 Matériels et méthodes.....	131
5.2.1.2 Résultats et discussion	136
5.2.1.3 Conclusions	155
5.2.2 Corrélations avec d'autres coupes quaternaires	156
5.2.2.1 Matériels et méthodes.....	156
5.2.2.2 Résultats et discussion	158
5.2.3 Conclusions.....	177
5.3 <i>Approche régionale (Horizons C)</i>	179
5.3.1 Exploitation des données existantes.....	179
5.3.1.1 Sélection des profils de la base de données AARDEWERK	180
5.3.1.2 Analyse statistique.....	181
5.3.1.3 Résultats et discussion	181
5.3.1.4 Conclusions	189
5.3.2 Transects régionaux	189
5.3.2.1 Matériels et méthodes.....	189
5.3.2.2 Résultats et discussions	191
5.3.2.3 Conclusions	213
5.4 <i>Conclusions relatives à l'approche matériau parental</i>	214

COMMUNAUTE FRANCAISE DE BELGIQUE
FACULTE UNIVERSITAIRE DES SCIENCES AGRONOMIQUES DE GEMBLOUX

**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 pH _{H2O} 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 pH _{H2O} 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 pH _{H2O} 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 II 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_F2.....	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>écart-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 prélevement	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 essayerons 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-LANOE (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 facies 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° et 18° 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; DELECOEUR 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 (DELECOEUR 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; DELECOEUR 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'anthropisation 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 antropisation, "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'elles ne sont pas plus anthroposées 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 VLIEGT 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 fluxs 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 solums 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 colluvions 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'historique 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; DELECOEUR 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 DELECOEUR, 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).

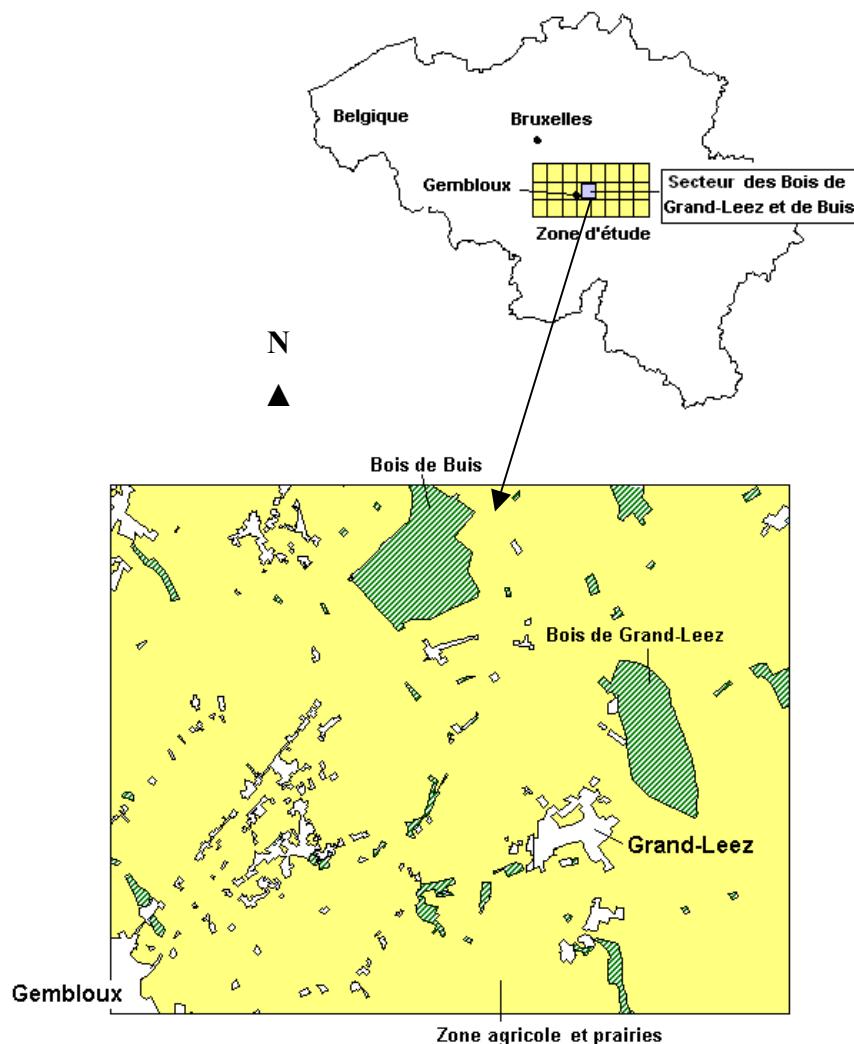


Figure III. 1:: Localisation du secteur étudié pour l'approche "solum". Occupation des sols: agricole (jaune), boisée (vert) ou habitat (blanc)

L'influence du facteur drainage sur la différenciation verticale des teintes 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

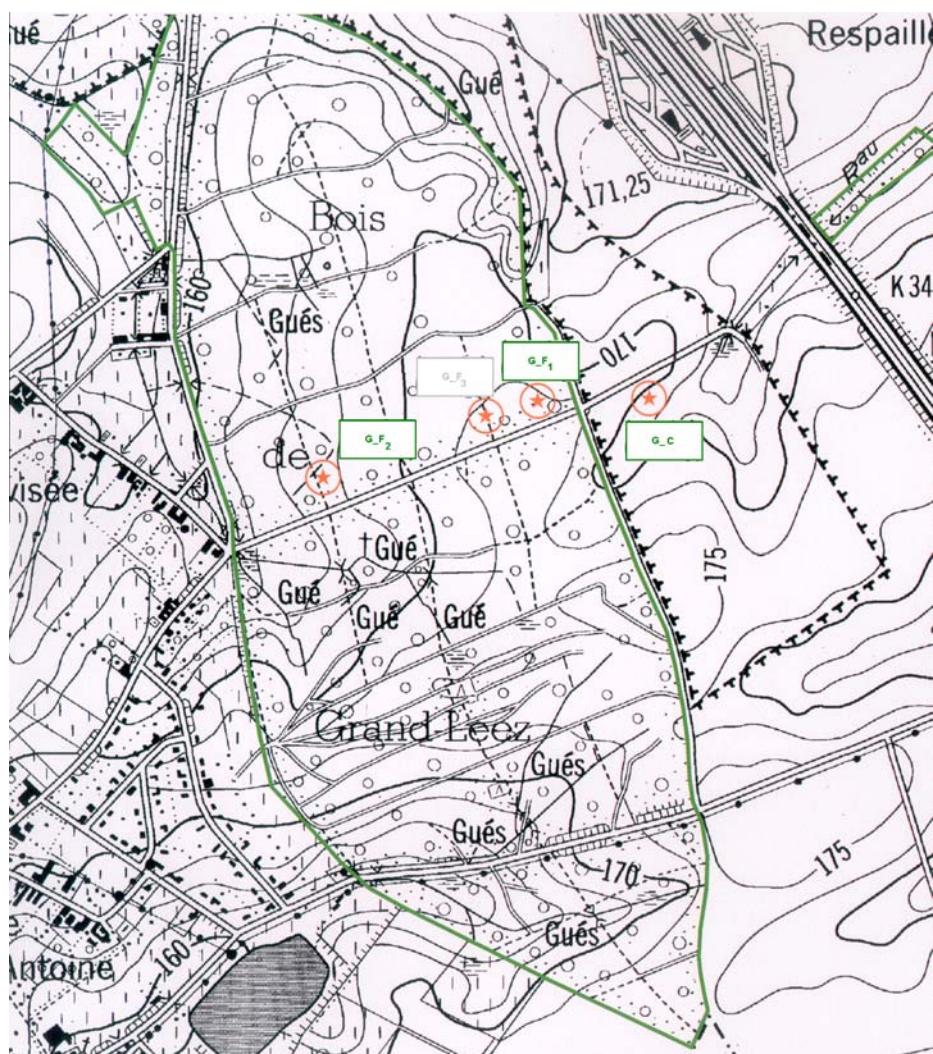


Figure III. 2: Localisation des points de prélèvement au Bois de Grand-Leez. En vert, les fosses décrites dans le texte. En gris, solum additionnel. Carte IGN 40/7. Echelle: 1/10 000.

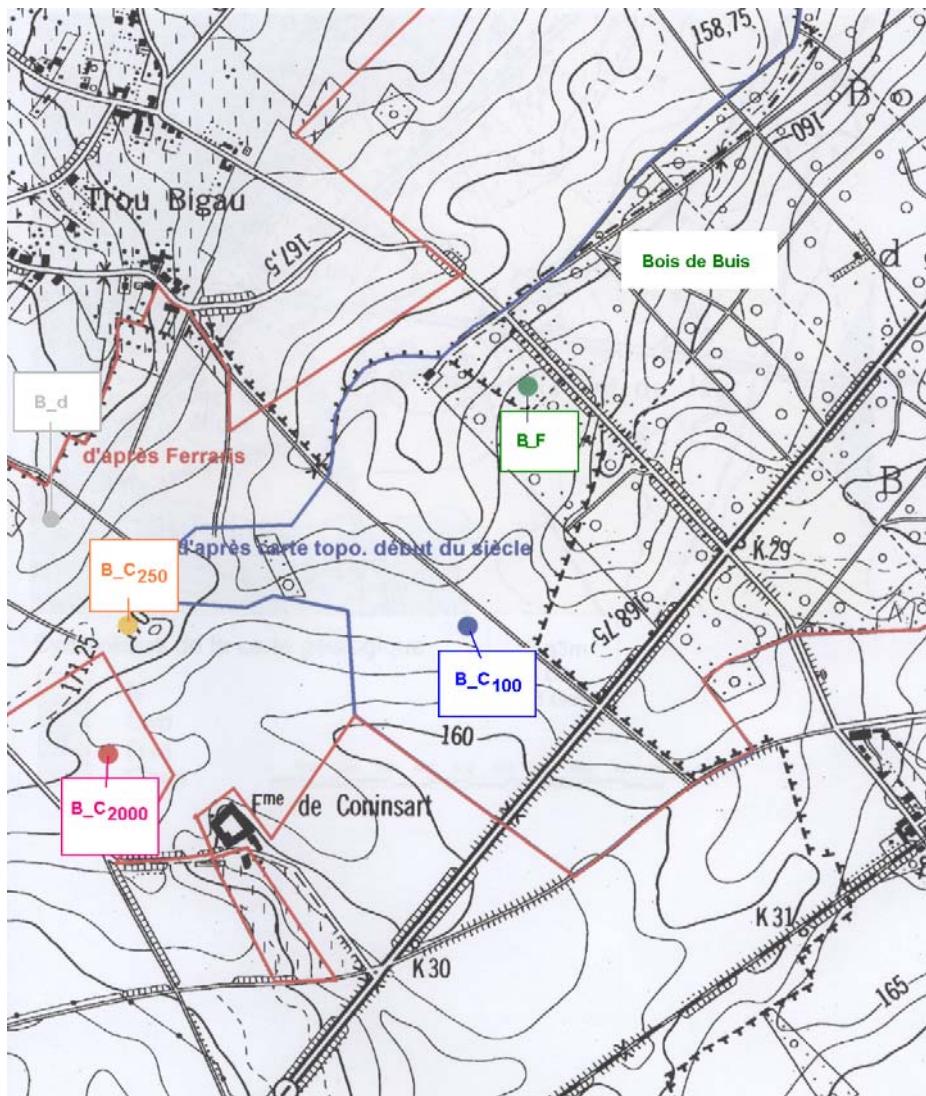


Figure III. 3: Localisation des points de prélèvement au et autour du Bois de Buis. Paires de sondages: B_F - sous forêt; B_C₁₀₀ - zone défrichée depuis moins d'un siècle; B_C₂₅₀ - zone défrichée depuis le levé de la carte de FERRARIS (1750); B_C₂₀₀₀ - zone déjà en culture à l'époque du levé de la carte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

6.3. 1.2 Cadre 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.

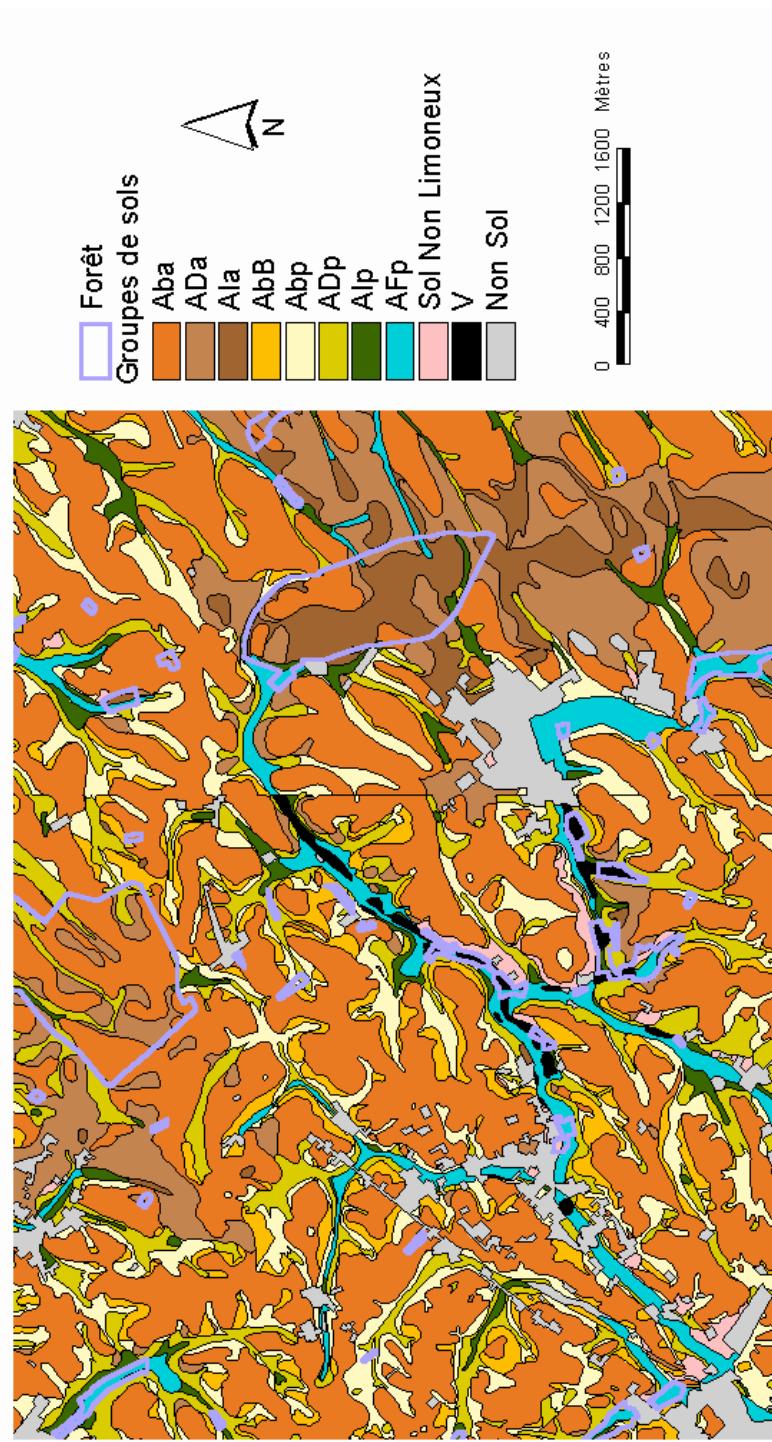


Figure III. 4: Cartographie des groupes de sols sur le secteur des Bois de Grand-Leez et de Buis.

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.

Caractères morphologiques Aba(b) sous forêt	
<i>Horizon O:</i>	litière peu épaisse
<i>Horizon AhI:</i>	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.
<i>Horizons E:</i>	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.
<i>Horizons BT:</i>	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 ferrromanganiques 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.
<i>Horizons B/C :</i>	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.
<i>Horizons C:</i>	140 à plus de 180 cm : limon brun-jaune terne (10YR 5/4), à taches d'OR (2 à 20%) et concrétions(< 2%) dominuant avec la profondeur; structure massive; compact; à pores très fins devenant plus nombreux en profondeur; racines très peu nombreuses, fines et obliques.



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

Horizon Prof (cm)	pH (H ₂ O)	Mat. organique		Granulométrie			Complexe d'échange					
		COT g/100g	Nt g/100g	Argile 0-2μ	Limon 2-50μ	Sable >50μ	CEC cmol/kg	Ca %	Mg %	K %	Na %	V %
Ah	0-10	3.6	3.0	6.8	0.40	15.5	75.8	8.7	22.6	1.42	0.38	0.06
E ₁	10-20	4.0	3.2	1.4	0.12	15.2	76.9	7.9	9.5	0.66	0.15	0.03
E ₂	20-35	4.1	3.5	1.2	0.08	10.9	82.4	6.8	7.4	0.26	0.10	0.02
E ₃	35-45	4.0	3.5	0.7	-	10.7	80.7	8.6	6.4	0.14	0.06	0.02
BT ₁	45-60	4.1	3.5	0.1	-	13.1	80.7	6.3	6.4	0.22	0.09	0.20
BT ₂	65-72	4.0	3.3	0.1	-	19.4	75.2	5.4	10.6	0.34	0.21	0.30
BT ₂	72-90	4.1	3.3	0.1	-	26.8	63.5	9.7	13.3	0.47	0.26	0.39
BT ₃	90-115	4.3	3.2	0.1	-	23.0	70.8	6.2	13.0	1.39	0.66	0.38
B/C ₁	115-140	4.5	3.3	0.2	-	20.0	76.4	3.6	13.1	3.19	1.68	0.35
B/C ₂	140-150	4.6	3.3	0.2	-	21.4	69.5	9.1	12.7	3.55	2.29	0.28
C ₁	150-165	4.7	3.4	0.0	-	19.3	72.7	8.1	12.7	3.98	2.37	0.21
C ₂	165-175	4.7	3.4	0.1	-	22.9	69.0	8.2	12.5	4.05	2.33	0.21
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
ppds*		0.2	0.2	0.3	N.D.	2.0	4.0	3.2	2.9	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)	Ca g/100g	Mg g/100g	K cm ol/kg	Na cm ol/kg	TRB	Al g/100g	Teneurs totales			Mn mg/kg	Cu mg/kg	Zn mg/kg	Ni mg/kg	Cr mg/kg	Pb mg/kg	Co mg/kg
							Al	Fe	Teneurs totales g/100g							
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	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	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	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	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	
Br	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	
Br	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	
Br	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 ₁	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	232	1.55	303.5	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 $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ 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.

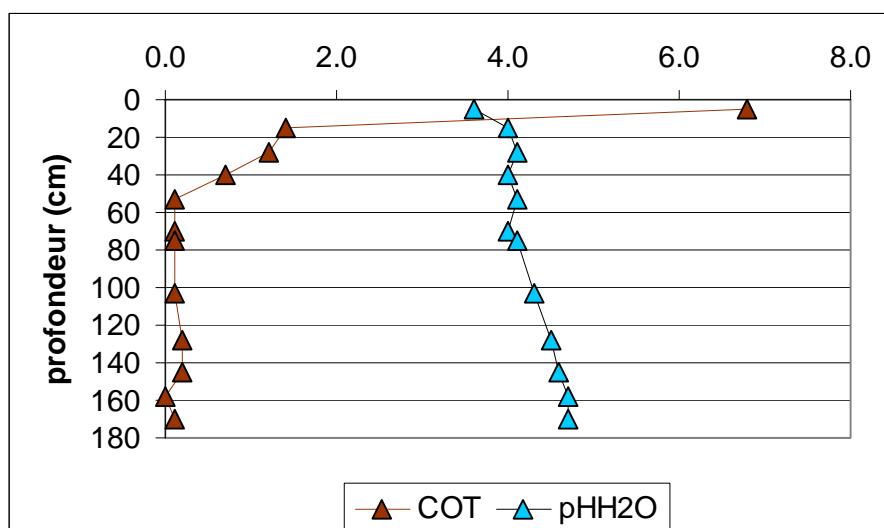


Figure III. 5: Profils du pH et du COT (g/100g) dans le sol Aba(b) sous forêt.

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.

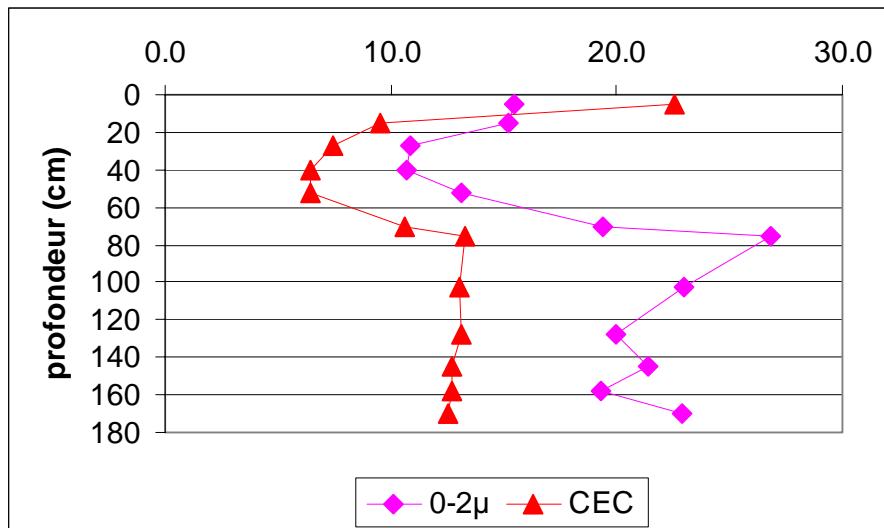


Figure III. 6: Profils de la teneur en argile (g/100g) et de la CEC (cmolc/kg) dans le sol Aba(b) sous forêt.

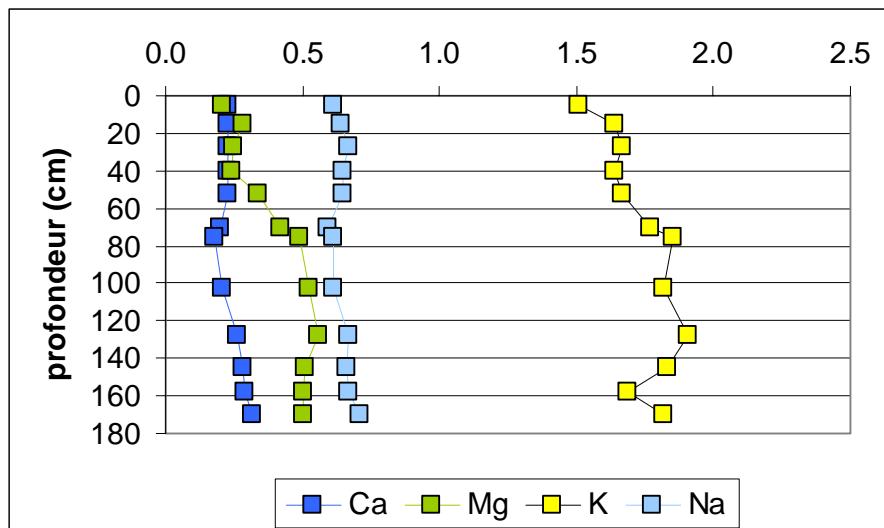
La CEC présente un profil sous la double influence de COT et de la teneur en argile (figure III.6). En surface, les deux contribuent à une CEC supérieure à 20 cmolc/kg; en profondeur les teneurs évoluent parallèlement à celles de l'argile entre 6.5 et 13.3 cmolc/kg. En profondeur, les ordres de grandeur 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.



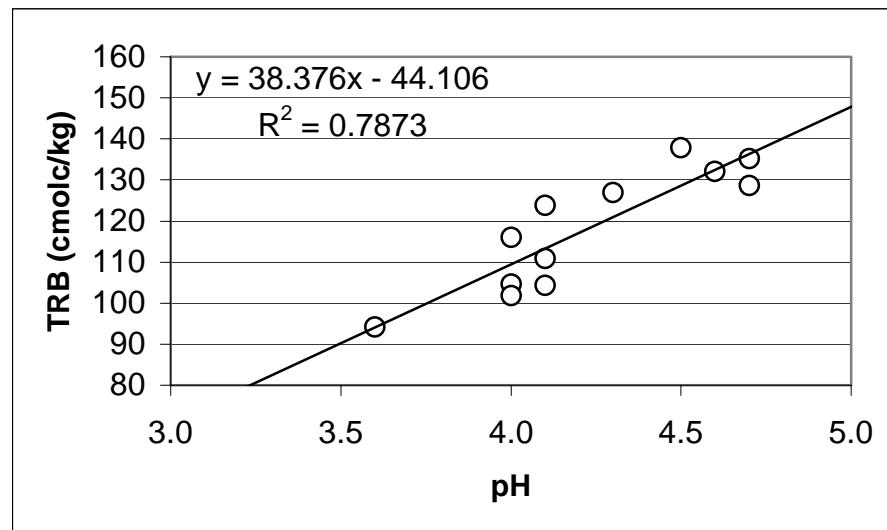


Figure III. 8: Relation entre TRB (cmolc/kg) et $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ dans le profil Aba(b) sous forêt.

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.

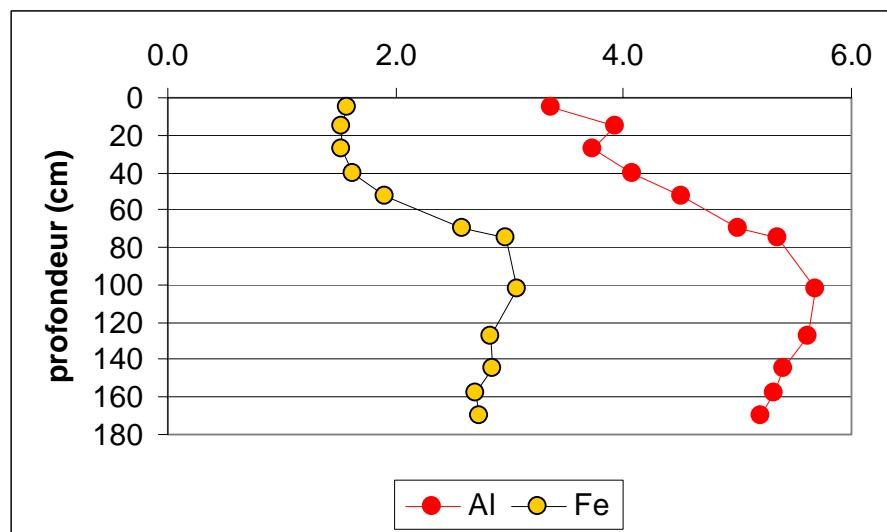


Figure III. 9: Profils des teneurs totales en Al et Fe (g/100g) dans le sol Aba(b) sous forêt.

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.

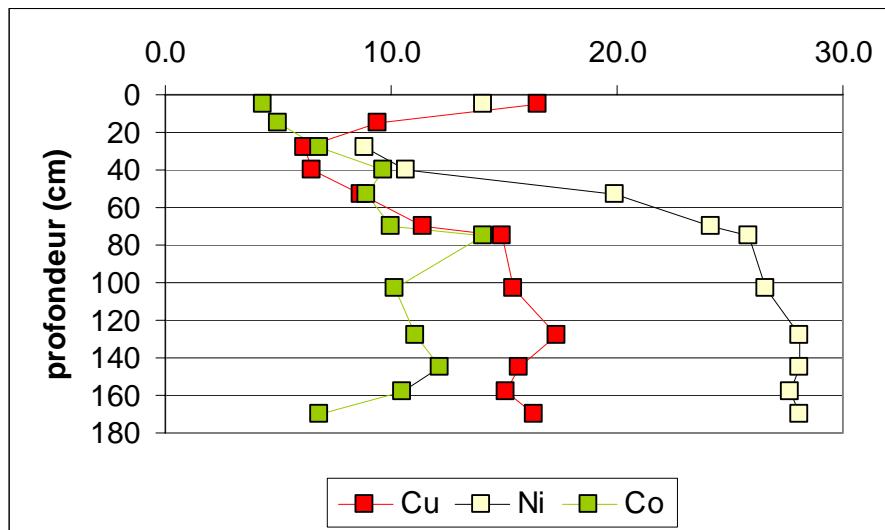


Figure III. 10: Profils des teneurs totales en Cu, Ni et Co (mg/kg) dans le sol Aba(b) sous forêt.

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.

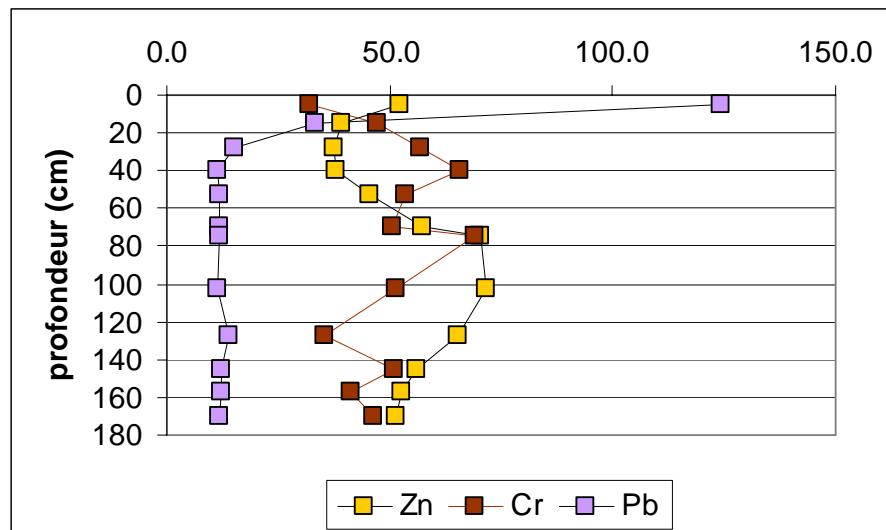


Figure III. 11: Profils des teneurs totales en Zn, Cr et Pb (mg/kg) dans le sol Aba(b) sous forêt

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 "0-10µm". 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"	">50µm"	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 (liées 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.

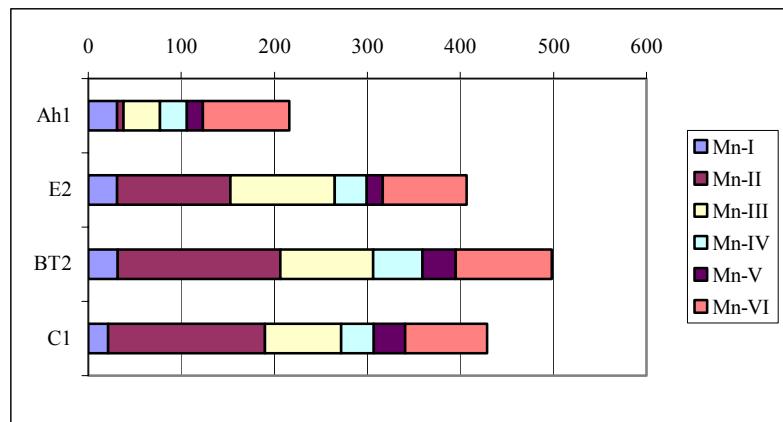


Figure III. 12: Fractionnement chimique du Mn (fractions I: Na-acétate, II: Hydroxylamine-HCl, III: Na-pyrophosphate, IV: Tamm, V: Hydroxylamine-HCl 90°C, VI: triacide) pour quelques horizons du solum Aba(b) sous forêt. Teneurs absolues en mg/kg.

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 frasnien)

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	
<i>Horizons Ap:</i>	0 à 28/30 cm, limon brun-jaune terne (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.
<i>Horizons BT:</i>	de 28/30 à 105 cm, limon lourd brun terne 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.
<i>Horizons B/C:</i>	de 105 à 159 cm, limon brun terne (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).
<i>Horizon C:</i>	> 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

Caractères morphologiques - Aba(b) sous culture	
<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 (7,5YRS/6), très nombreuses taches d'oxydo-réduction irrégulières et en langues verticales, 2 à 5% de concréctions 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 concréctions 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 concréctions 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 $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ sont neutres pour le solum G_C et basiques pour le solum I_C. Le profil de $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ 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.

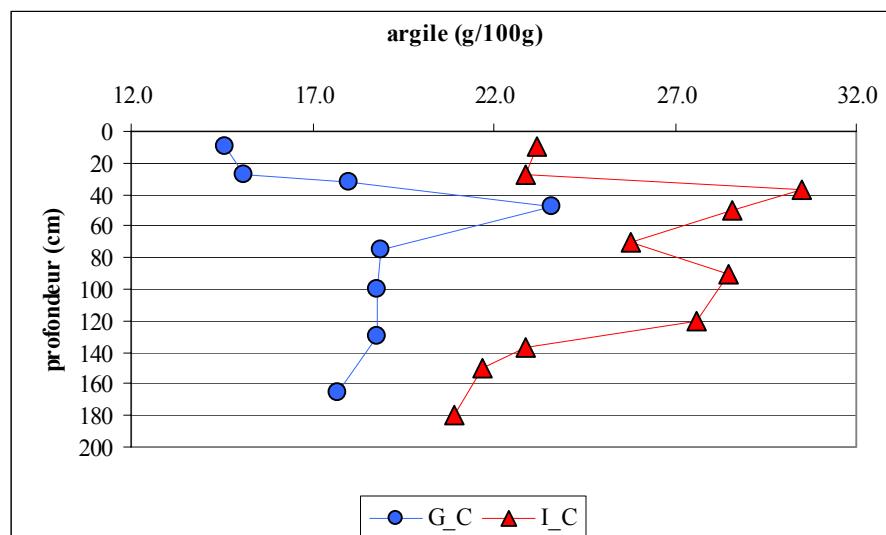


Figure III. 13: Profils des teneurs en argile dans les deux solums Aba(b) sous culture.

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

Horizon G C	pH (H ₂ O)	pH (KCl)	COT g/100g	Nt g/100g	Argile 0-2u	Limon 2-50u	Sable >50u	CEC cmol/kg	C _a mol/kg	Mg %	K %	Na %	V %
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	sa
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	0.32	0.13	sa
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	sa
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	sa
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	sa
BT ₃ 56-80	8.0	6.4	0.2	-	25.8	67.2	7.0	11.4	11.49	0.91	0.02	0.11	sa
B/C ₁ 80-98	7.9	6.3	0.3	-	28.5	68.5	3.0	11.9	12.89	1.03	0.02	0.03	sa
B/C ₂ 111-130	7.9	6.3	0.1	-	27.6	66.9	5.5	12.3	12.32	1.08	0.07	0.07	sa
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	sa
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	8.0
I_C	0.3	0.8	1.0	0.01	9.6	8.4	9.8	3.8	5.97	0.77	0.32	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 G_C	Prof. (cm)	Teneurs totales										mg/kg	Co
		Ca g/100g	Mg g/100g	K cmol/kg	Na cmol/kg	TRB	Al g/100g	Fe Mn	Cu Zn	Ni Cr	Pb		
Ap	0-20	0.42	0.35	1.75	0.64	122.9	4.30	2.07	530.9	126	59.5	178	63.1
Ap	25-30	0.45	0.38	1.74	0.68	128.3	4.37	2.21	534.2	112	60.6	170	64.1
BT ₁	30-35	0.39	0.41	1.81	0.62	127.0	4.94	2.47	474.2	133	52.2	19.1	70.4
BT ₂	35-60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BT ₂	60-90	0.42	0.53	1.97	0.69	145.7	5.48	2.98	540.4	157	53.2	252	52.6
BT ₂	95-105	0.38	0.52	1.83	0.80	144.0	4.69	2.55	541.2	152	50.1	264	64.5
BIC ₂	115-145	0.48	0.47	1.68	0.72	137.5	4.74	2.49	398.3	136	46.3	359	65.5
C ₁	160-170	0.43	0.5	1.73	0.77	141.0	5.01	2.67	471.75	117	47.6	269	50
I_C													
Ap	0-22	0.44	0.39	1.73	0.70	129.3	4.12	2.46	467.0	155	70.9	23.3	39.8
Ap	22-30	0.45	0.40	1.76	0.71	131.8	4.52	2.42	474.2	153	65.9	25.1	45.0
BT ₁	30-44	0.39	0.50	1.79	0.70	137.5	4.64	2.89	423.2	67.0	31.2	48.3	-
BT ₂	44-56	0.39	0.47	1.71	0.70	132.9	5.11	2.93	466.8	166	61.6	34.3	46.5
BIC ₁	56-80	0.39	0.47	1.67	0.57	126.3	5.00	2.68	440.9	155	53.9	27.2	38.3
BIC ₂	80-98	0.40	0.52	1.82	0.71	140.9	5.47	2.95	488.3	174	62.3	30.5	43.1
BIC ₃	111-130	0.49	0.55	1.86	0.71	148.9	5.51	2.84	508.5	157	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	126	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	126	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	118	54.9	22.9	39.6
Amplitude de variation													
G_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
I_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
ppd*	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

* ppd: 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" ($\text{Ca}^{++}/\text{Mg}^{++} > 5$; 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 évoqué; l'analyse des profils sera donc réalisée pour tous les éléments.

D'une manière générale, les teneurs en "bases" sont peu différencierées 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).

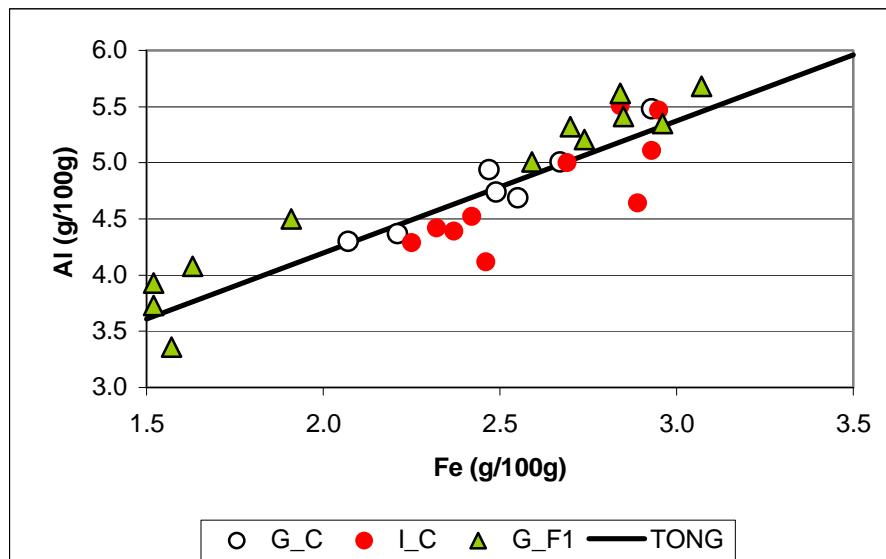


Figure III. 14: Relations Al-Fe dans les trois solums Aba(b) et la coupe de Tongrinne.

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.

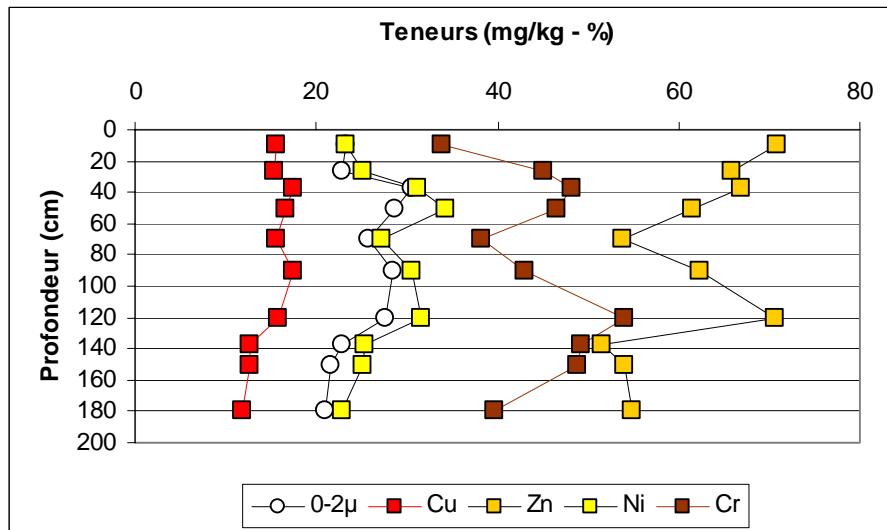


Figure III. 15: Profils des teneurs en argile (%) et en Cu, Zn, Ni et Cr (mg/kg) dans un Aba(b) sous culture (I_C).

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"	>50µm	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 diffèrent 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 phasées 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, DELECOM 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.

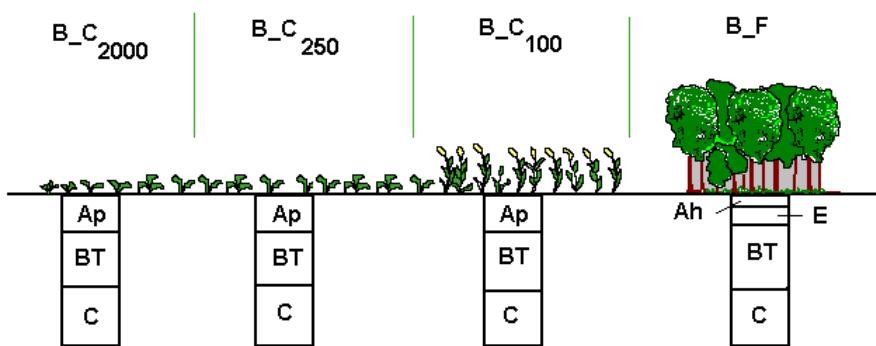


Figure III. 16: Schéma de prélèvement des échantillons le long de la séquence chronospatiale.

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 Prélevement (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 cmol/kg	K %	V %
B F												
Ah	0-10	3.9	2.9	3.9	0.25	16.9	74.4	8.7	17.9	0.52	0.22	0.04
E	10-30	4.4	3.5	1.2	0.08	15.6	72.6	11.8	11.2	0.11	0.09	0.03
BT	60-75	4.4	3.4	0.2		24.5	65.9	9.7	13.6	0.41	0.34	0.05
C	150-165	5.2	3.5			19.5	70.4	10.2	13.1	4.05	2.18	0.22
B C ₀												
Ap	0-30	6.1	4.7	1.1	0.08	13.4	76.4	10.4	7.7	4.03	0.78	0.47
BT	60-75	5.3	3.9	0.2		21.9	69.6	8.6	11.3	4.97	0.66	0.50
C	150-165	5.5	3.9			19.3	71.2	9.7	11.3	5.76	2.43	0.26
B C ₀₀												
Ap	0-30	6.7	5.5	1.1	0.09	15.6	75.2	9.2	9.4	6.35	0.86	0.57
BT	60-75	6.4	4.9	0.2		23.5	67.0	9.6	12.4	7.97	0.74	0.38
C	150-165	6.6	5.0			19.7	71.6	8.9	11.5	7.78	2.16	0.25
B C ₀₀₀												
Ap	0-30	7.3	6.2	1.2	0.11	18.3	72.8	9.0	11.4	9.04	1.14	0.64
BT	60-75	7.8	6.1	0.4		24.6	65.9	9.6	14.0	11.48	0.81	0.27
C	150-165	7.7	6.0			21.5	71.6	7.1	12.4	9.60	2.02	0.24

b) Teneurs totales - Bois de Buis

Horizon Rélevément (cm)	C _a	Mg	K	Na	TRB*	Al	Teneurs totales								
							Fe	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co	
	g/100g	mmol/kg			g/100g	mg/kg									
B_F															
Ah	0.10	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	10-30	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	60-75	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	150-165	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	0-30	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	60-75	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	150-165	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 ₃₀₀															
AP	0-30	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	60-75	0.39	0.32	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	150-165	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 ₃₀₀₀															
AP	0-30	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	60-75	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	150-165	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 ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} < 4.2$). 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 ($\text{COT} \sim 4\text{g}/100\text{g}$) 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.

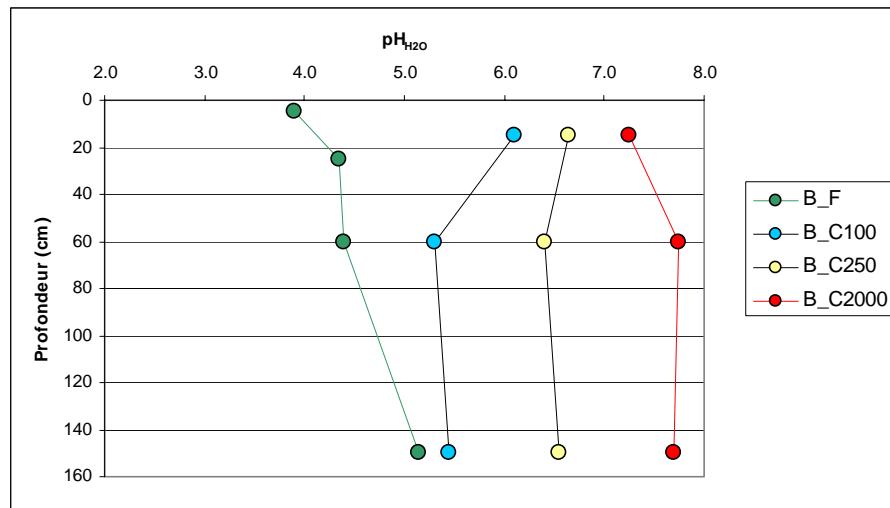


Figure III. 17: Profils moyens, par site de la chronoséquence, des $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ en fonction de la profondeur

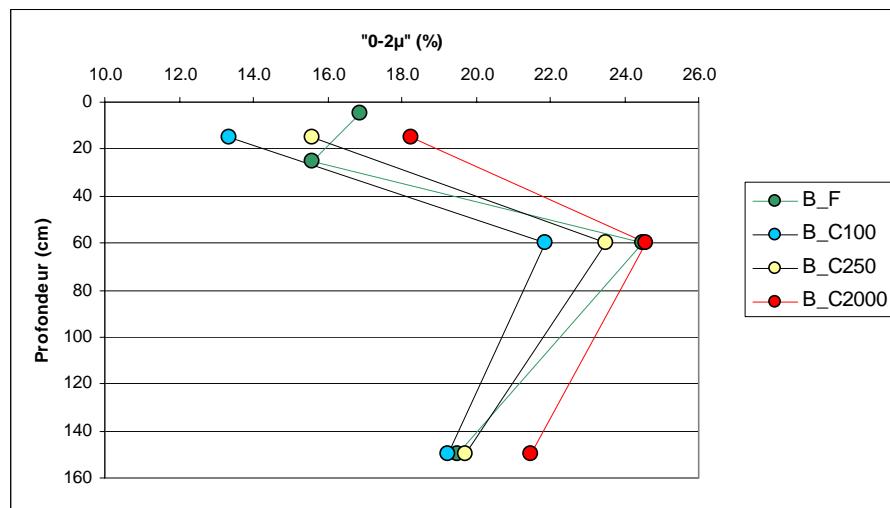


Figure III. 18: Profils moyens, par site de la chronoséquence, des teneurs en argile (%) en fonction de la profondeur.

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).

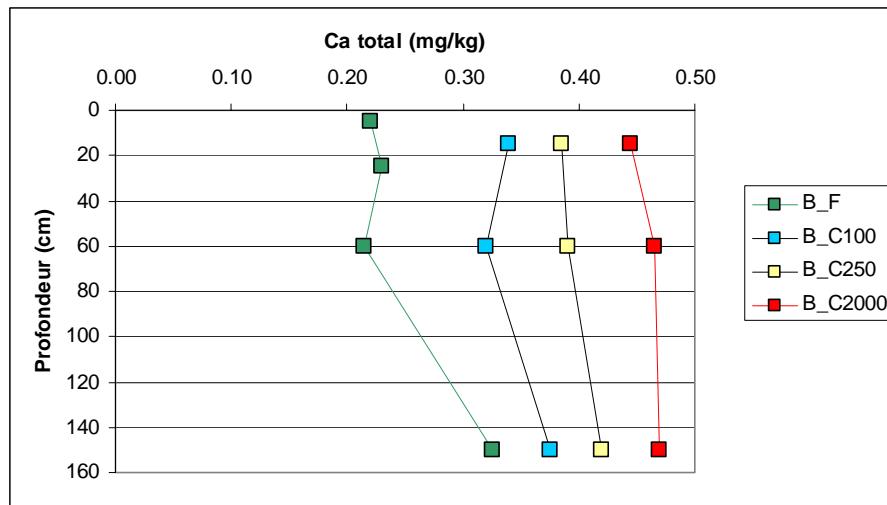


Figure III. 19: Profils moyens, par site de la chronoséquence, des teneurs en Ca total (g/100g) en fonction de la profondeur.

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.

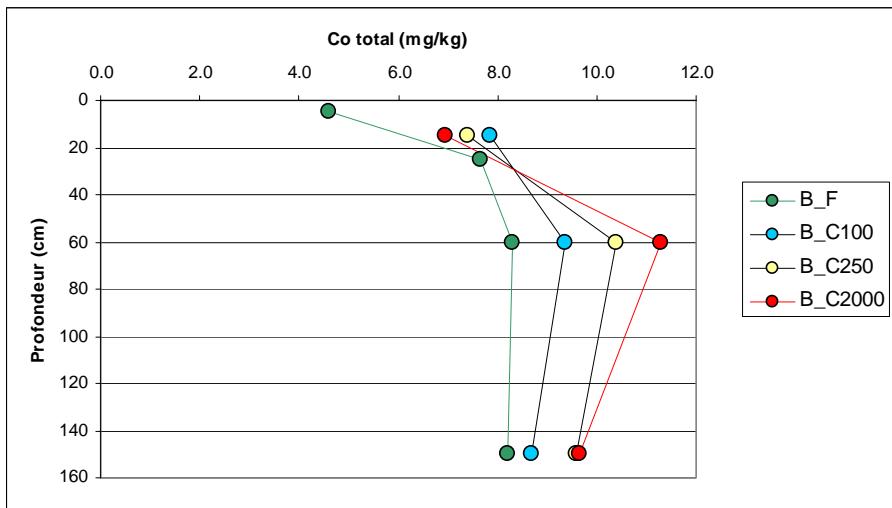


Figure III. 20: Profils moyens, par site de la chronoséquence, des teneurs en Co total (mg/kg) en fonction de la profondeur

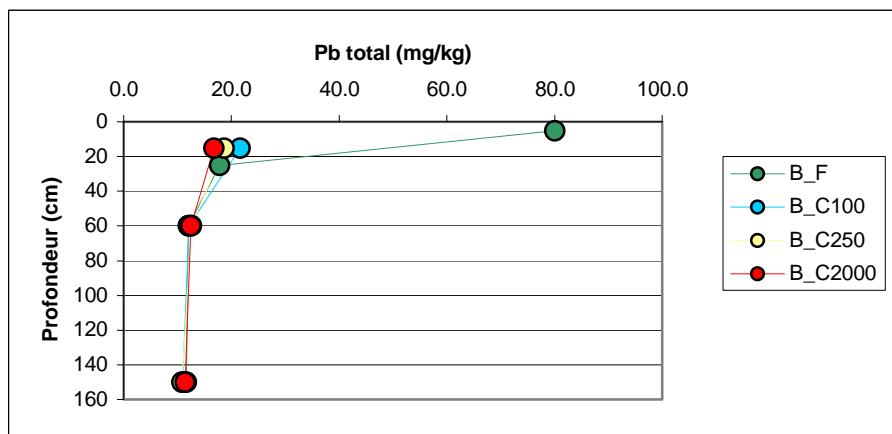


Figure III. 21: Profils moyens, par site de la chronoséquence, des teneurs en Pb total (mg/kg) en fonction de la profondeur

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.

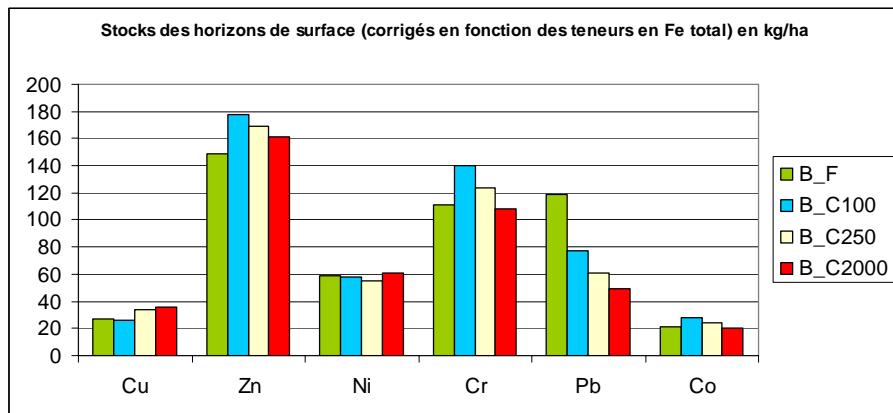


Figure III. 22: Estimations de "stocks" par unité de surface (kg/ha) pour les horizons supérieurs des sites de la chronoséquence (B_F: forêt; B_C100, B_C250; B_C2000: sites cultivés depuis 100, 250 ou 2000 ans). Une correction a été effectuée en fonction des teneurs en fer total.

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 nivelingement 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, épidystrique

RP: Néoluvisol-Rédoxisol subsaturé

USDA: Glossaqualf

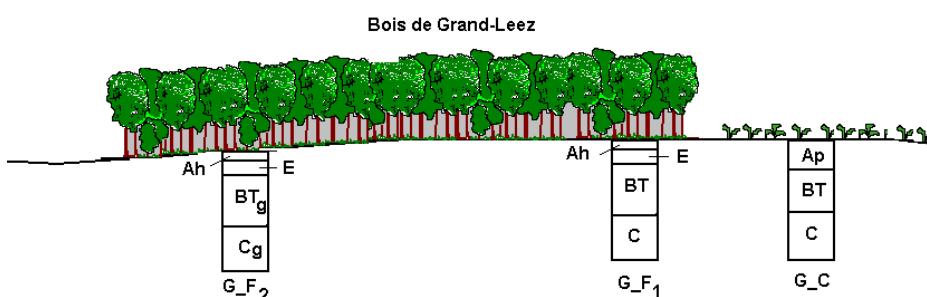


Figure III. 23: Schéma de position des fosses pédologiques dans et autour du Bois de Grand-Leez.

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.

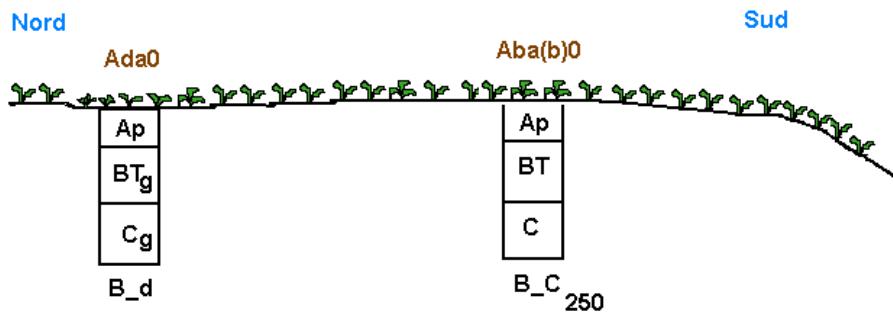


Figure III. 24: Sschéma de position des sondages B_d près du Bois de Buis.

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 draîné (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.

Caractères morphologiques - Aha sous forêt	
<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 terne (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 terne (10YR 6/4) au brun jaunâtre (10YR 5/8); les taches d'oxydo-réduction sont très nombreuses (>50%) et de forme irrégulièrre; 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 C. g:</i>	187 à > 202 cm, limon jaune-orange terne (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).

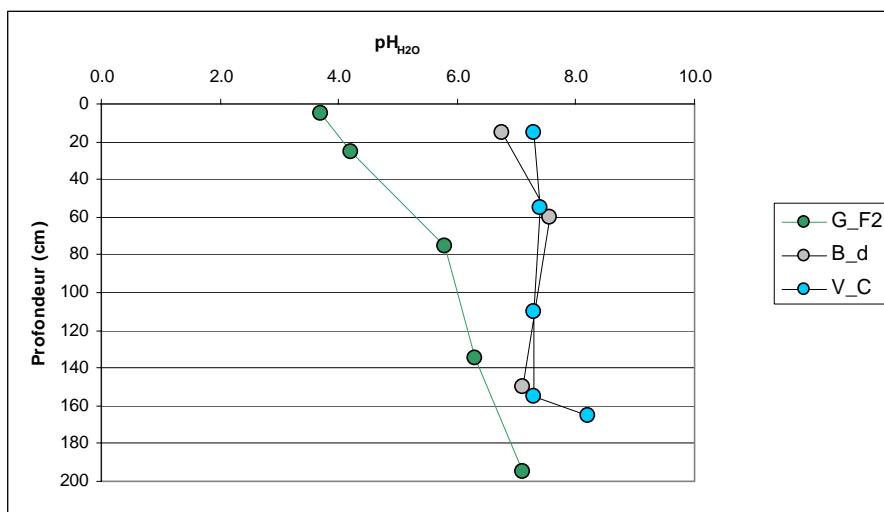


Figure III. 25: Profils des pH_{H2O} en fonction de la profondeur pour les solums mal drainés.

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 coincident avec ceux des solums précédemment analysés.

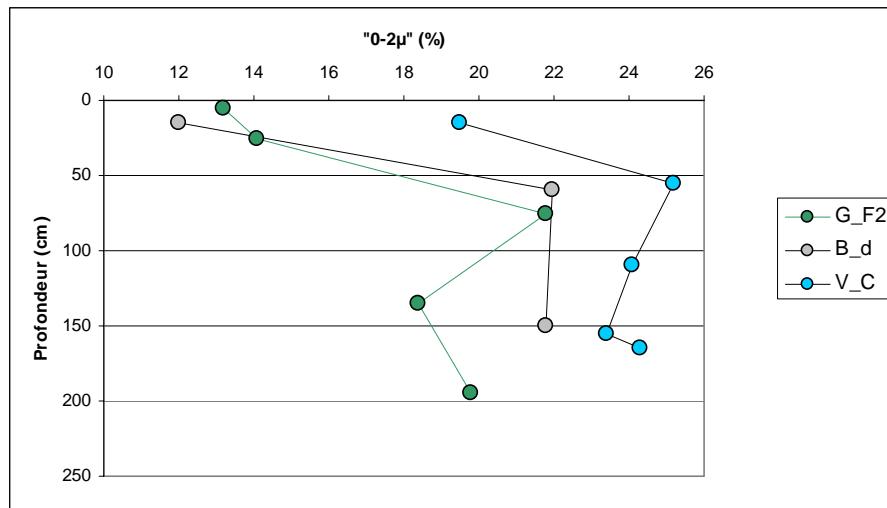


Figure III. 26: Profils des teneurs en argile (%) en fonction de la profondeur pour les solums mal drainés.

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	Limon 2-50μ	Sable >50μ	CEC	Ca cmol/kg	Mg cmol/kg	K Na	V (%)
	G_F	Ah	E	Bt	BC	C	B_d*	Ap	Bt	BC	C	V_C
Ah	0.10	3.7	2.9	8.0	0.49	13.2	78.3	8.5	26.4	1.39	0.46	0.05
E	20-30	4.2	3.5	0.7	-	14.1	78.5	7.4	7.6	2.22	0.09	0.15
Bt	65-90	5.8	4.0	0.1	-	21.8	69.4	8.8	13.2	8.80	1.87	0.02
BC	120-150	6.3	4.5	0.1	-	18.4	70.3	11.3	12.9	9.74	1.85	0.08
C	190-200	7.1	4.8	-	-	19.8	67.2	13.0	12.2	10.52	1.25	0.04
B_d*												
Ap	0-30	6.8	5.9	1.3	0.11	12.0	76.2	11.9	9.3	6.99	1.17	0.57
Bt	50-65	7.6	5.9	-	-	22.0	68.2	9.9	12.3	9.93	0.88	0.24
BC	150	7.1	5.2	-	-	21.8	67.6	10.6	12.3	8.69	2.47	0.10
C	160-170	8.2	7.5	-	-							
V_C												
Ap	0-30	7.3	6.5	1.1	0.12	19.5	72.3	8.2	-	-	-	-
Bt	50-60	7.4	6.2	-	-	25.2	70.0	4.8	-	-	-	-
BC	100-120	7.3	6.0	-	-	24.1	67.0	8.9	-	-	-	-
C	150-160	7.3	6.1	-	-	23.4	69.1	7.5	-	-	-	-
C	160-170	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

Péleversants (cm) G_F ₂	Ca g/100g	Mg g/100g	K mol/kg	Na mol/kg	TRB g/100g	Al g/100g	Teneurs totales mg/kg						
							Fe	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb
Ah	0-10	0.25	0.23	1.38	0.62	94.0	4.00	1.75	192.7	16.3	49.5	11.5	37.5
E ₂	20-30	0.26	0.24	1.59	0.69	103.8	3.97	1.69	239.7	5.8	42.3	13.6	49.9
Bt ₂	65-90	0.43	0.50	1.87	0.67	140.2	5.14	2.83	631.6	14.8	56.2	58.1	66.8
B/C ₁	120-150	0.47	0.50	1.64	0.77	140.7	5.04	2.66	522.2	12.6	53.3	28.4	51.8
C	190-200	0.57	0.51	1.8	0.76	150.2	5.05	2.28	433	14.1	50.3	21.7	71.7
B_d*													
A _P	0-30	0.42	0.35	1.60	0.68	120.3	3.95	1.70	557.6	9.6	51.2	12.2	32.6
Bt ₂	50-65	0.41	0.45	1.73	0.67	131.0	5.01	2.55	472.8	13.8	51.5	27.0	61.1
B/C ₂	150	0.44	0.52	1.77	0.75	143.0	5.18	2.61	533.7	16.9	54.1	22.5	60.4
V_C													
A _P	0-30	0.46	0.35	1.78	0.61	124.3	4.51	2.36	534.7	16.3	75.9	19.3	39.5
Bt ₂	50-60	0.45	0.49	1.93	0.94	133.7	5.53	2.79	583.1	15.6	55.3	25.4	51.8
B/C	100-120	0.49	0.49	2.18	0.96	163.0	5.48	2.76	516.1	17.0	54.0	33.2	45.6
C ₁	150-160	0.52	0.50	1.73	0.63	139.4	5.33	2.74	498.0	16.6	55.3	29.7	56.3
C ₂	160-170	0.44	0.46	1.65	0.67	131.8	4.95	2.71	482.3	17.8	56.8	28.1	18.2

*: 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.

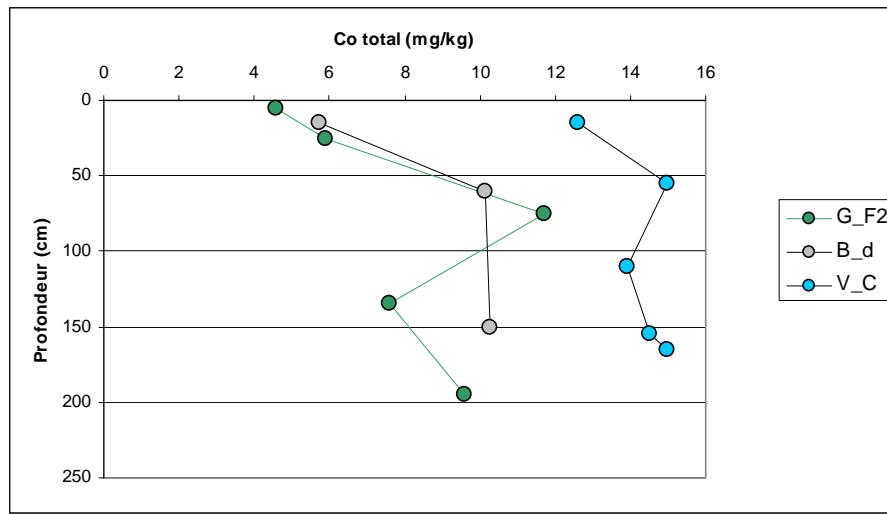


Figure III. 27: Profils des teneurs en Co total (mg/kg) en fonction de la profondeur pour les solums mal drainés.

Tableau III. 16: Matrice de corrélation relative aux teneurs totales (HF) et variables "explicatives" pour les solums 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 pédo-logique 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.

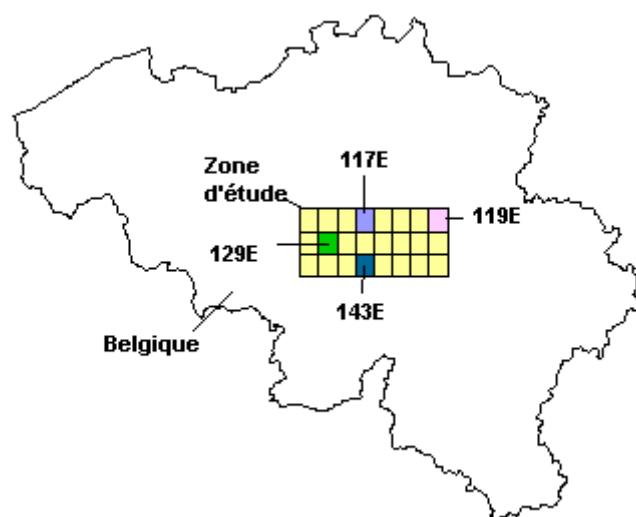


Figure III. 28: Localisation des séquences limoneuses. Séquence I: carte des sols 143E; séquence II: carte 117E; séquence III: carte 129E; séquences IV à VII: carte 119E.

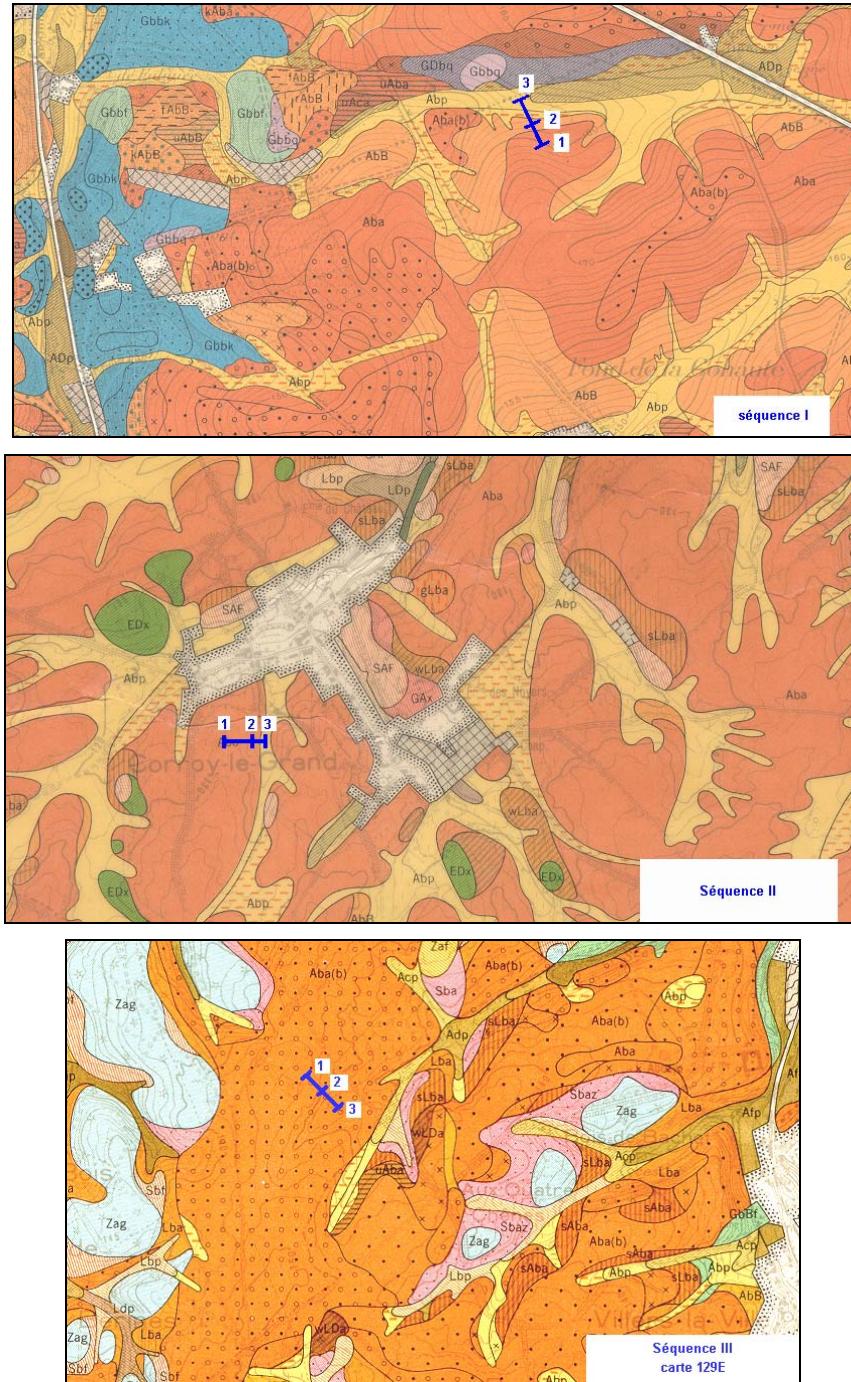


Figure III. 29: Séquences I, II et II positionnées sur la carte des sols de la Belgique (échelle de reproduction: 1/30 000)

Troisième partie - 284

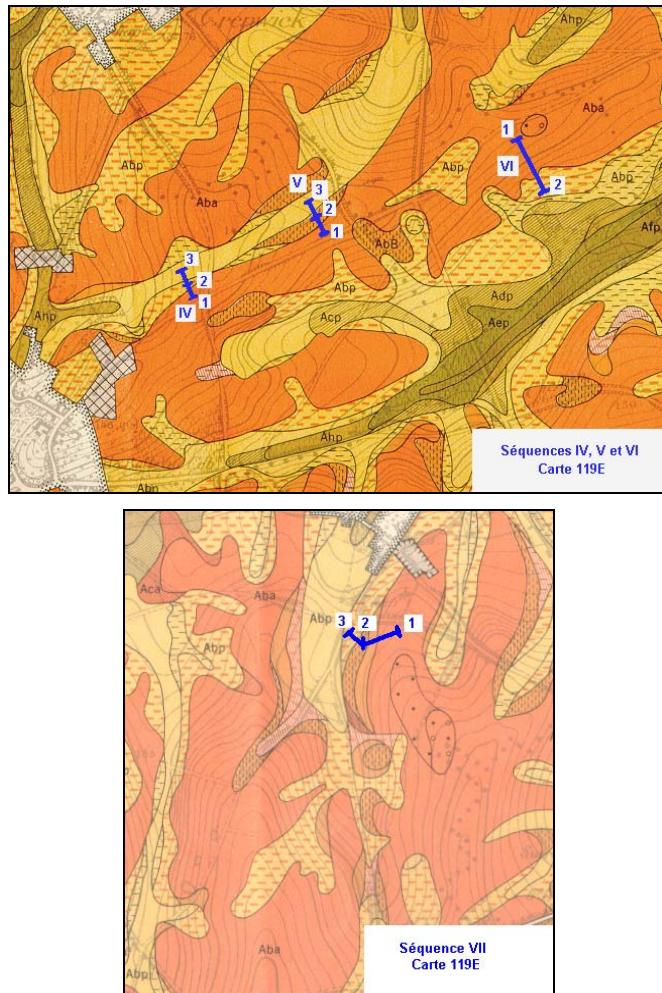


Figure III. 30: Séquences IV, V, VI et VII positionnées sur la carte des sols de la Belgique (échelle de reproduction: 1/30 000)

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 frasnien et viséens, schistes et grès frasnien et famennien, 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 substrat-

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 échantillonées (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)
(iii)
(iii)
(iii)
(vi)
(ii)
(v)
interaction

séquence moyenne

solum ou séquence

profondeur série

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 empruntes d'une prudence inversément 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 caractérisatiques 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 (H ₂ O)	pH (KCl)	COT g/100g	Nt	Granulométrie			CEC cmol _c /kg
					Argile 0-2µm	Limon 2-50	Sable >50µm	
Aba (n = 7)								
Ap	7.3	6.6	1.1	0.11	19.5	64.2	16.3	12.9
	0.4	0.5	0.2	0.01	3.0	6.7	5.4	2.7
BT	7.2	6.0	0.4	-	25.2	62.3	12.6	14.9
	0.3	0.5	-	-	2.1	9.6	7.9	1.4
B/C	7.1	6.0	0.3	-	21.7	64.1	14.3	11.7
	0.5	0.9	-	-	2.8	6.6	7.7	1.3
AbB (n = 5)								
Ap	7.3	6.6	1.1	0.10	19.5	70.5	10.0	13.4
	0.5	0.6	0.2	0.01	0.8	3.3	3.6	1.5
BT	7.3	6.0	0.6	-	22.6	69.9	7.5	11.2
	0.4	0.9	-	-	3.6	1.7	2.4	2.9
C	7.5	7.0	0.1	-	17.4	66.1	16.5	8.7
	0.3	0.6	-	-	5.8	5.7	6.6	0.3
Abp (n = 8)								
Ap	7.4	6.9	1.2	0.11	14.3	69.0	16.7	10.2
	0.2	0.3	0.2	0.02	2.6	6.7	8.2	1.6
C	7.4	6.5	1.0	-	14.8	69.7	15.4	8.5
	0.2	0.5	0.5	-	2.5	8.5	9.0	1.2
2C	7.3	6.2	0.2	-	18.1	66.4	15.4	10.6
	0.5	0.7	-	-	3.6	6.0	4.7	2.8
Ecarts-types moyens dans les solums et dans les séquences								
Aba	0.3	0.6	0.5	-	3.5	4.7	4.8	1.9
AbB	0.3	0.6	0.5	-	3.2	2.8	3.0	2.2
Abp	0.2	0.4	0.5	-	2.2	5.1	5.0	1.6
Séq.	0.3	0.6	0.5	-	4.3	6.0	5.7	2.4
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
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 0.12	0.39 0.04	1.53 0.15	0.69 0.04	128.2 9.1	4.60 0.49	2.27 0.27
BT	0.44 0.06	0.47 0.06	1.64 0.17	0.67 0.05	132.5 10.2	5.17 0.32	2.69 0.21
B/C	0.44 0.05	0.46 0.06	1.60 0.22	0.68 0.05	130.8 11.9	5.17 0.32	2.50 0.30
AbB (n = 5)							
Ap	0.50 0.09	0.42 0.03	1.63 0.15	0.72 0.08	132.4 6.8	4.55 0.30	2.28 0.15
BT	0.49 0.09	0.48 0.06	1.68 0.14	0.74 0.07	139.7 3.4	4.92 0.44	2.58 0.24
C	0.44 0.08	0.44 0.08	1.48 0.12	0.74 0.12	121.6 12.9	4.45 0.77	2.36 0.36
Abp (n = 8)							
Ap	0.43 0.07	0.31 0.05	1.51 0.11	0.73 0.08	117.8 8.8	4.02 0.56	1.82 0.23
C	0.38 0.07	0.31 0.06	1.52 0.28	0.73 0.07	115.4 13.6	3.99 0.56	1.83 0.31
² C	0.38 0.07	0.36 0.08	1.59 0.06	0.73 0.09	121.4 7.2	4.60 0.56	2.19 0.44
Ecarts-types moyens dans les solums et dans les séquences							
Aba	0.07	0.06	0.14	0.04	8.1	0.46	0.31
AbB	0.05	0.05	0.07	0.03	8.1	0.49	0.26
Abp	0.05	0.05	0.13	0.04	7.4	0.35	0.22
Séq.	0.18	0.08	0.14	0.05	16.0	0.60	0.39
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
Ecarts-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.

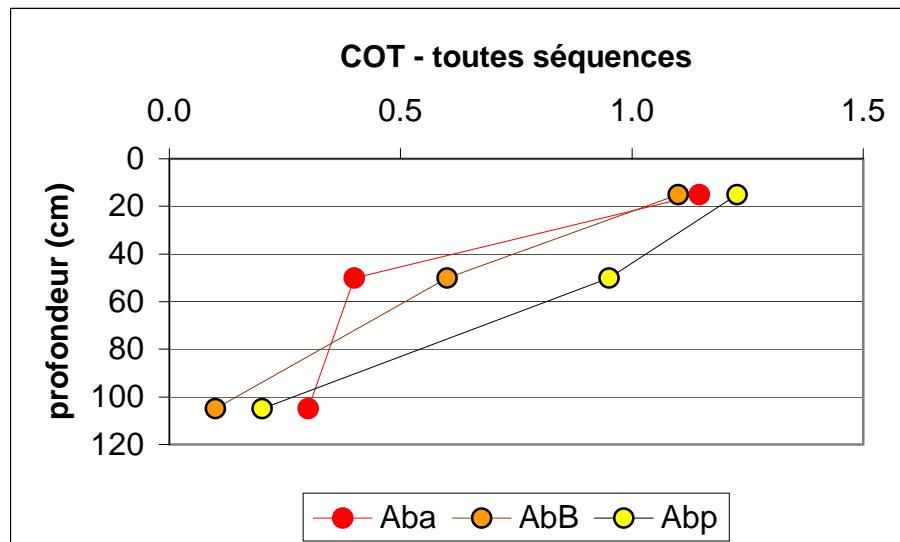


Figure III. 32: Profils en COT -moyennes des 7 séquences.

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 ₂C 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.

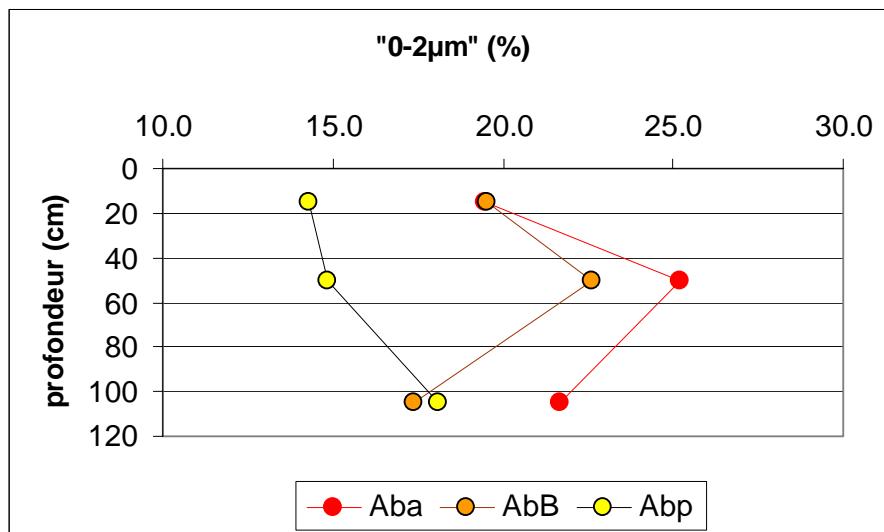


Figure III. 33: Profils des teneurs en argile -moyennes des sept séquences.

Les teneurs en sables, à l'instar du $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, 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.

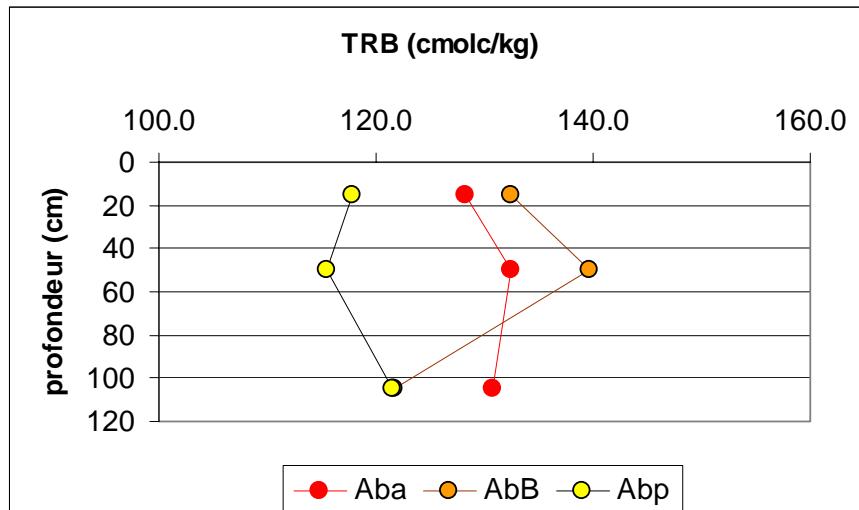


Figure III. 34: Profils des TRB -moyennes des sept séquences.

Conformément à nos précédents résultats, les teneurs en Al et Fe sont
Troisième partie - 294

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

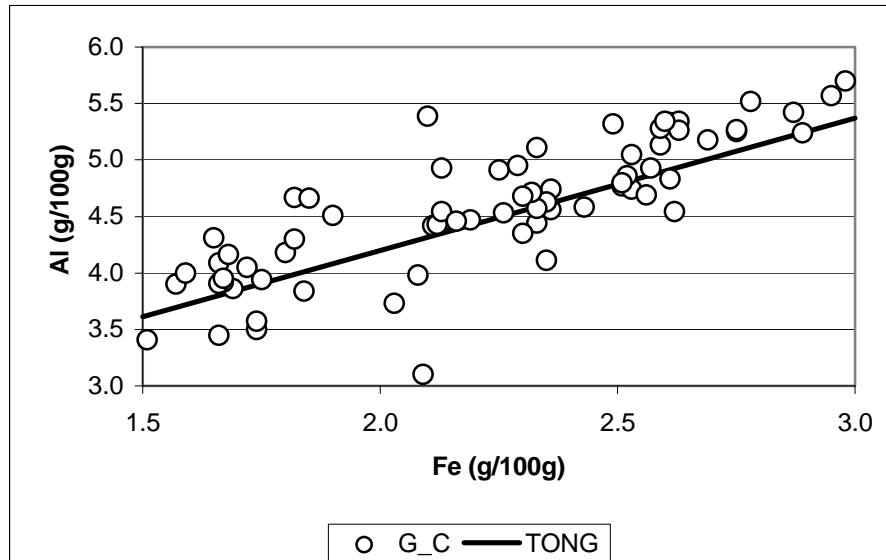


Figure III. 35: Relation Al-Fe dans les horizons des séquences limoneuses par rapport à celle de Tongrinne.

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.

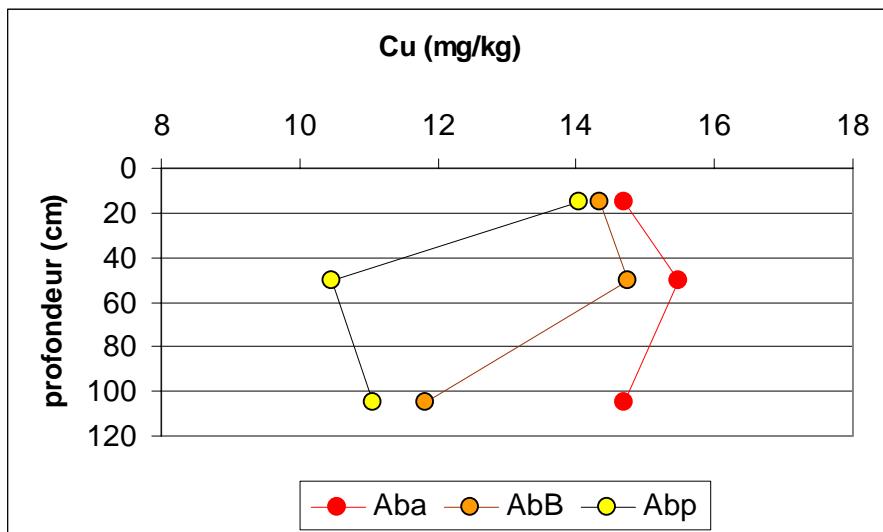


Figure III. 36: Profils des teneurs en Cu -moyennes des sept séquences.

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 solum;
- il existe un effet "série de sols", principalement pour les horizons intermédiaires et de profondeur ($\text{Abp} < \text{AbB} < \text{Aba}$); en surface, on constate une certaine homogénéisation comme dans le cas de Cu.

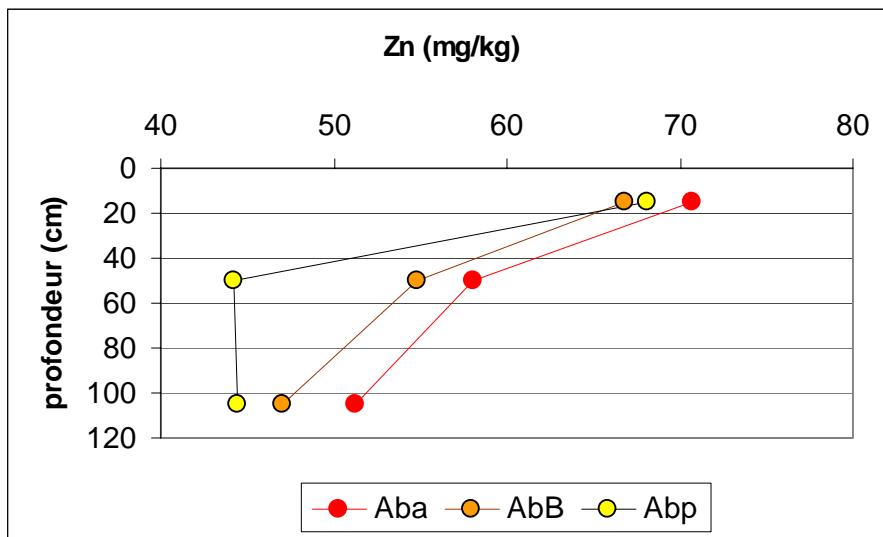


Figure III. 37: Profils des teneurs en Zn -moyennes des sept séquences.

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.

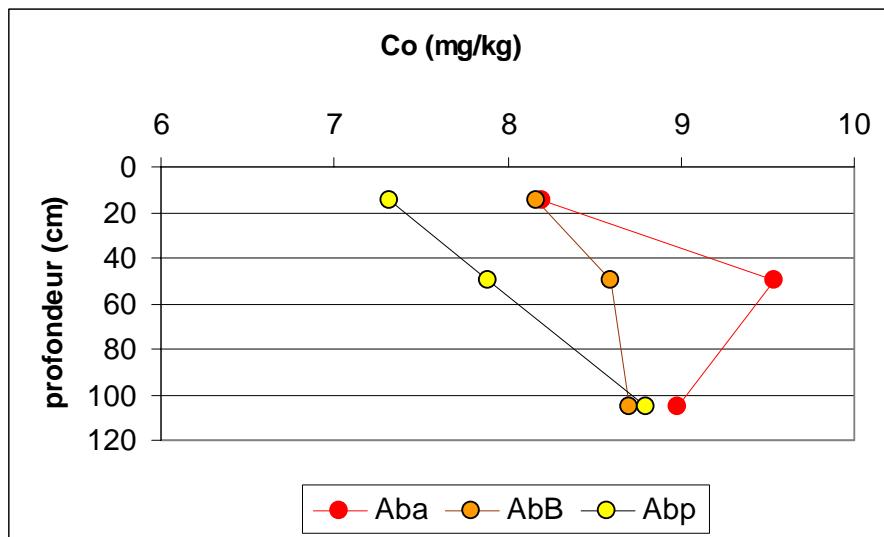


Figure III. 38: Profils des teneurs en Co -moyennes des sept séquences.

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>	0.377
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>
Pb		<i>-0.357</i>	-0.272			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.

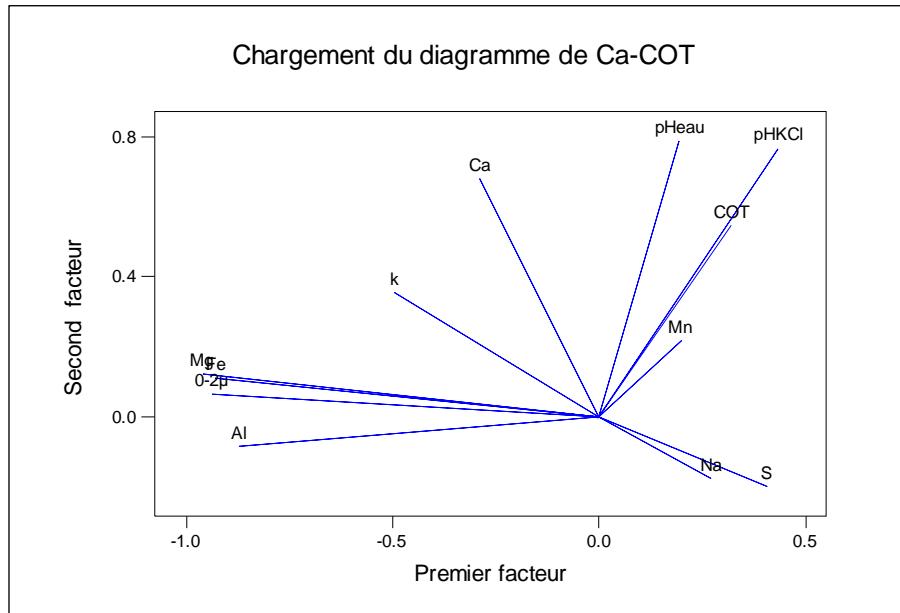


Figure III. 39: Poids des variables "explicatives" dans le premier plan factoriel relatif aux horizons des séquences limoneuses.

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 artefact 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 "0-2µm" et ">50µm" (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-"0-2µm" (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 prédictes 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 anomaliqes. En outre, dans le contexte de la Région limoneuse, 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 -.

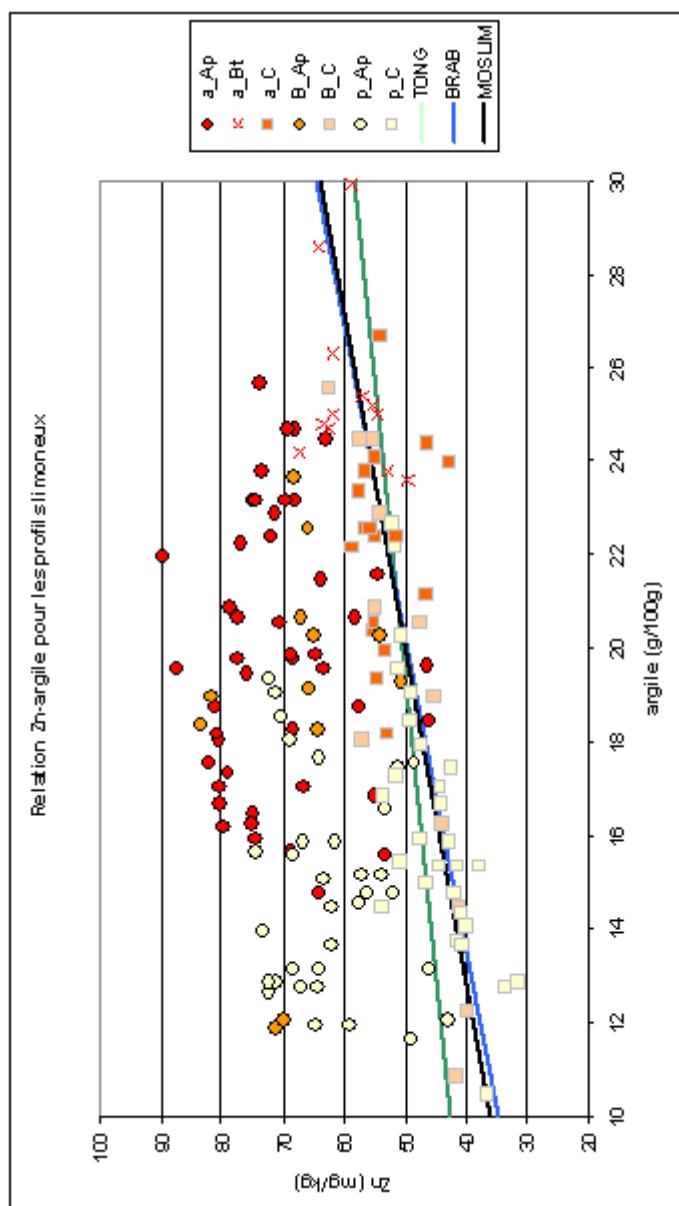


Figure III. 40: Relation Zn-argile dans des sols "limoneux". Les horizons sont distingués sur base du développement de profil du solum (a, B ou p) et du type d'horizon (Ap, BT ou C). Une relation fonctionnelle existe pour le fond pédogéochimique, modélisable par régression (TONG, BRAB, MOSLIM). Les teneurs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

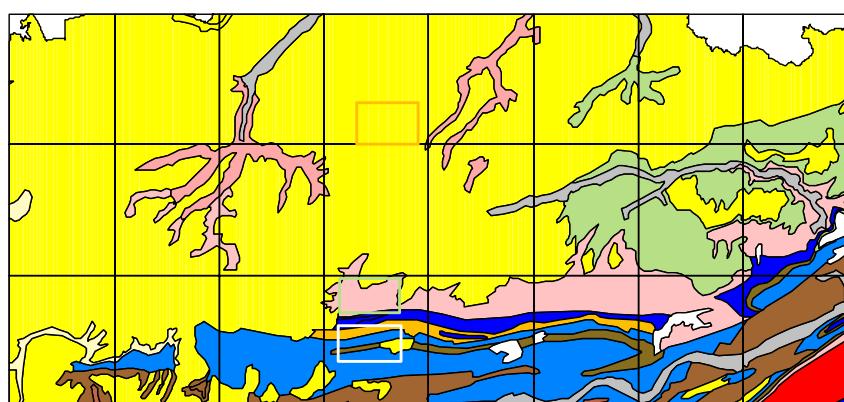


Figure III. 41: Position des secteurs étudiés sur une carte lithologique simplifiée de la zone d'étude. (légende : teintes roses, oranges, brunes: shales et grès, teintes bleues = calcaires et dolomies, vert : craies, jaune = sables et argiles, gris : alluvions). Secteur sur calcaire -blanc-, sur shale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

La caractérisation, principalement les paramètres pédologiques de base, ont fait l'objet de travaux d'étudiants: secteurs "limons sur calcaire" et "limons sur shale": WARIN (2000); secteur "limons sur sable": VERSTRAETE (1994).

Les secteurs sont présentés ci-après du sud au nord, sans souci d'ordre chronostratigraphique.

b la séquence des "limons sur calcaire"

Dans le bassin versant de l'Orneau, les calcaires sont présents dans une bonne partie de l'ensemble géostructural du synclinal de Namur. Les nombreuses formations carbonatées du Givetien au Viséen sont parfois entrecoupées par des dépôts terrigènes de moindre puissance. Sur l'extrait de la carte des sols (figure III.42), les sols limono-caillouteux à charge calcaire correspondent aux plages bleues (Gbbk). Le calcaire appartient principalement aux Formations de Mazy, de Bovesse et de Rhisnes. Les plages Gbbr (en rose au nord de la carte) sont des sols limono-caillouteux à charge "schisto-gréseuse" développés sur la Formation de Bossière; les plages Gbbf (en vert au sud), des sols limono-caillouteux à charge schisteuse sur la Formation de Franc-Waret. Ces sols sont généralement occupés par la forêt ou la prairie.

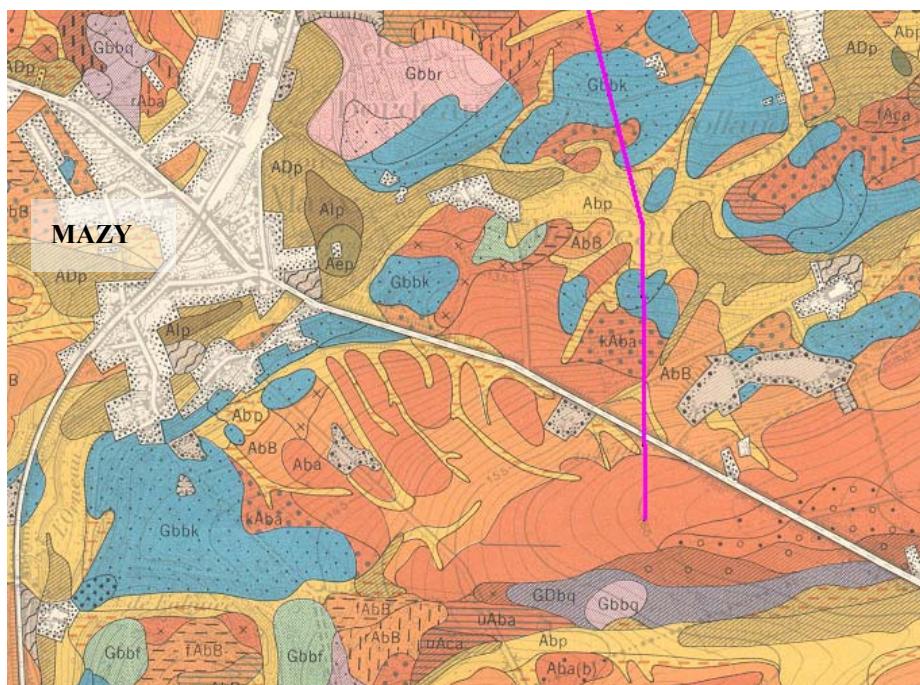


Figure III. 42: Extrait de la carte des sols de la Belgique - substratum calcaire (échelle approximative: 1/20 000). En rose, la séquence illustrative.

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.

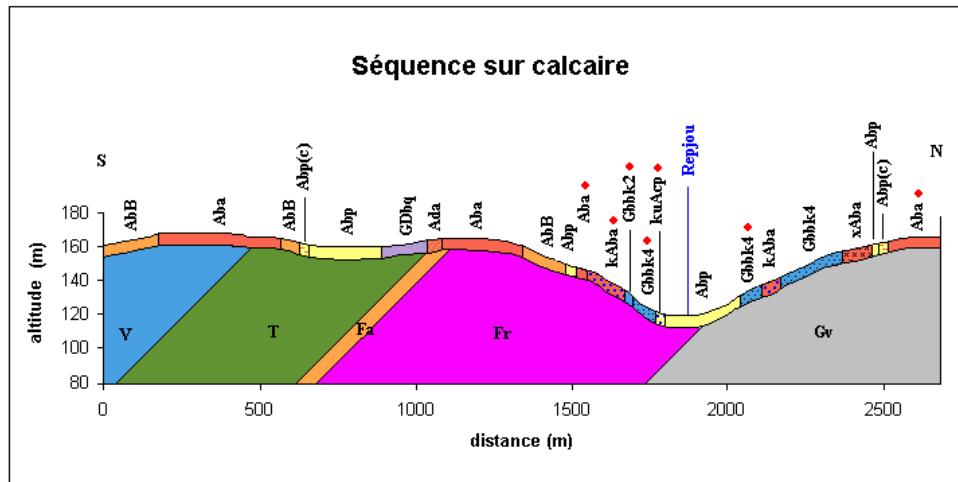


Figure III. 43: Toposéquence illustrative des relations géologie-relief-sols en secteur "limons sur calcaire". En rouge, les séries de sols échantillonnées.

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

$\text{Aba} \Rightarrow \text{kAba}^{14} \Rightarrow \text{Gbbk2} \Rightarrow \text{kuAcp}$ sur le versant exposé au nord, et

$\text{Aba} \Rightarrow \text{Gbbk4}$ 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 calcaire 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-calcaire à faible profondeur (colluvions).

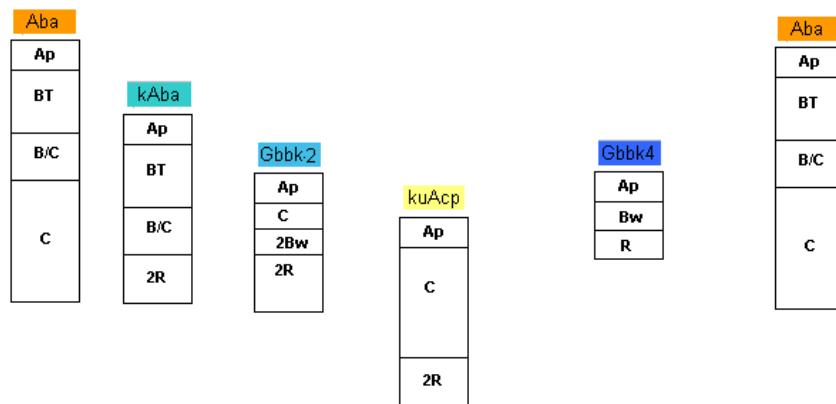


Figure III. 44: Schéma des solums étudiés dans la séquence "limons sur calcaire".

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.

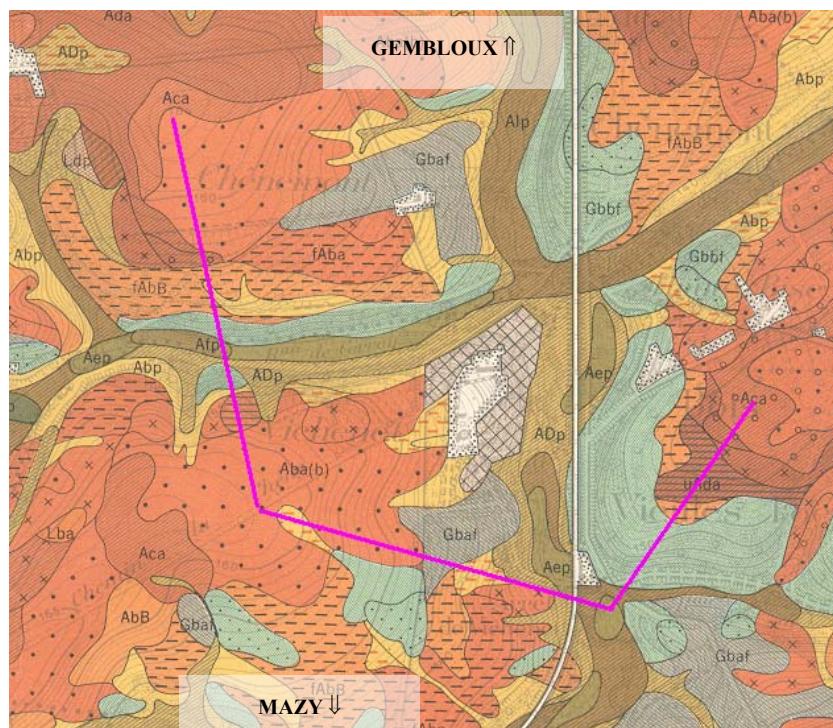


Figure III. 45: Extrait de la Carte des sols de la Belgique - substratum de shales (échelle approximative: 1/20 000). En rose, le tracé de la séquence illustrative.

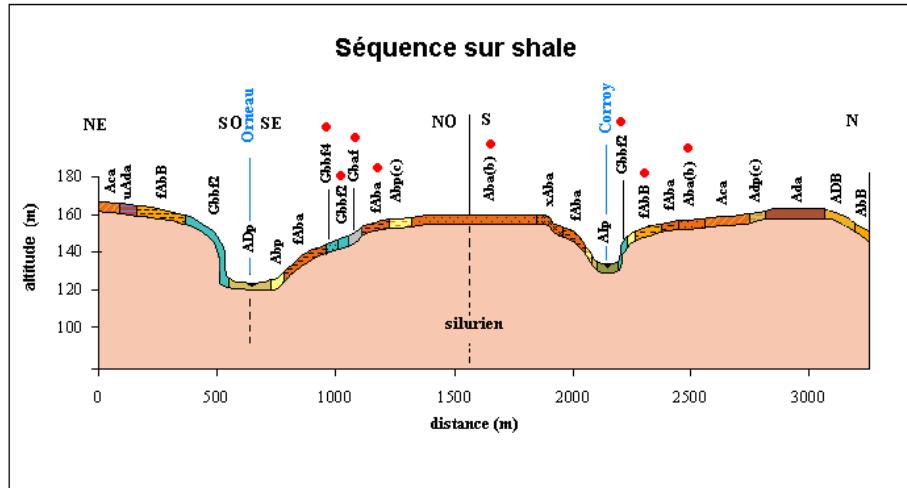


Figure III. 46: Toposequence représentative des relations géologie-relief-sols en secteur "limons sur shale". En rouge, les séries de sols échantillonnées.

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 émargent 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.

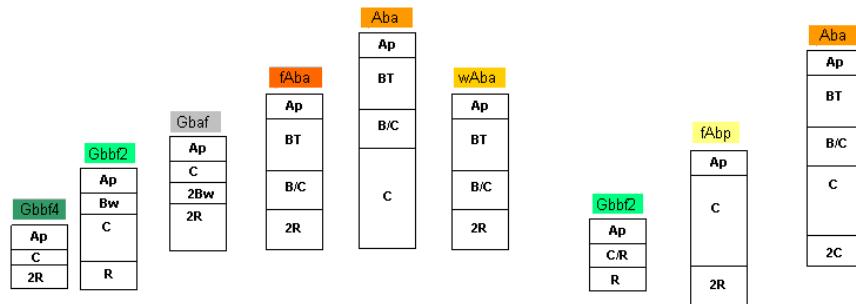


Figure III. 47: Schéma des solums étudiés dans la séquence "limons sur shale".

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).

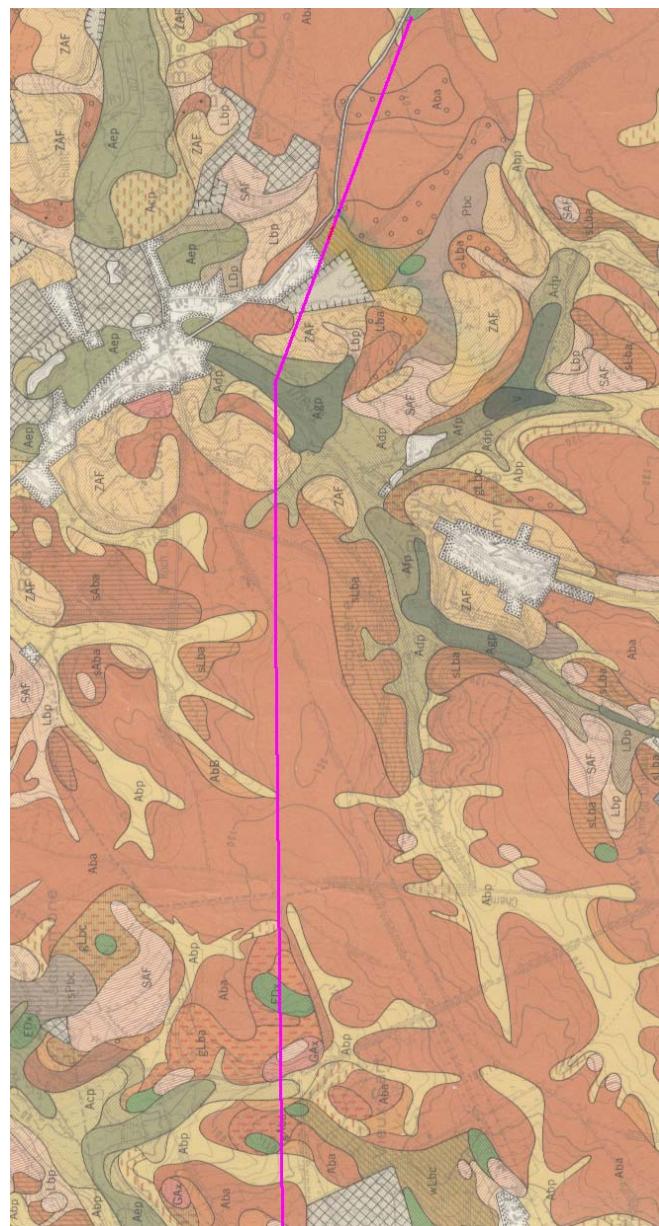


Figure III. 48: Extrait de la Carte des sols de la Belgique - substratum de sable (échelle approximative: 1/25 000). En rose, le tracé de la séquence illustrative.

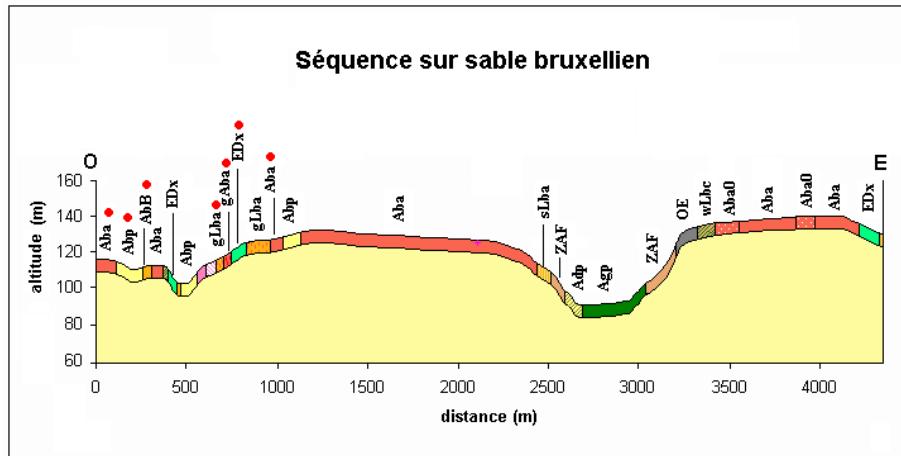


Figure III. 49: Toposéquence représentative des relations géologie-relief-sols en secteur "limons sur sable". En rouge, les séries de sols échantillonnées.

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:

$\text{Aba} \Rightarrow \text{AbB} \Rightarrow \text{Abp} \Rightarrow \text{sAba}$ ¹⁶ et

$\text{Aba} \Rightarrow \text{gLba} \Rightarrow \text{gLba} \Rightarrow \text{EDx}$.

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;

gLba: sol limoneux à horizon BT à substrat caillouteux à faible profondeur

gAba: sol sablo-limoneux à horizon BT à substrat caillouteux à faible profondeur;

EDx: sol argileux modérément gleyifié à développement de profil non défini.

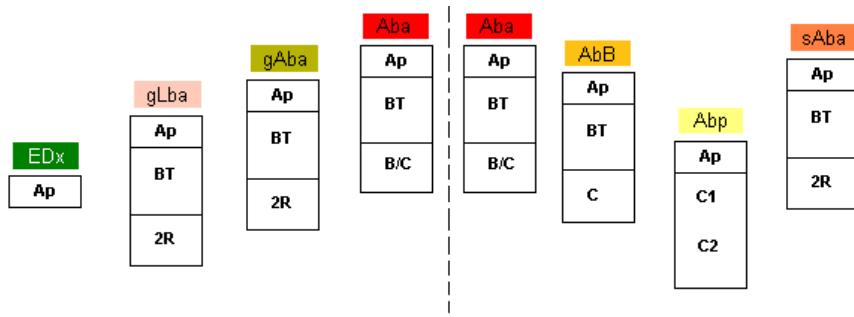


Figure III. 50: Schéma des solums étudiés dans la séquence "limons sur sable"

e méthodes d'analyse et de présentation des résultats

Deux solums ont été étudiés sur fosses, les autres par des sondages à la tarière de cartographe. Les solums ont été décrits selon la méthodologie standardisée de description des sols de DELECOEUR 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_{H2O} 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 solums.

6.4.2.2 Résultats et discussions

a caractéristiques pédologiques classiques

Tous les horizons analysés dans chacune des séquences présentent un $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ 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 limoneuse 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).

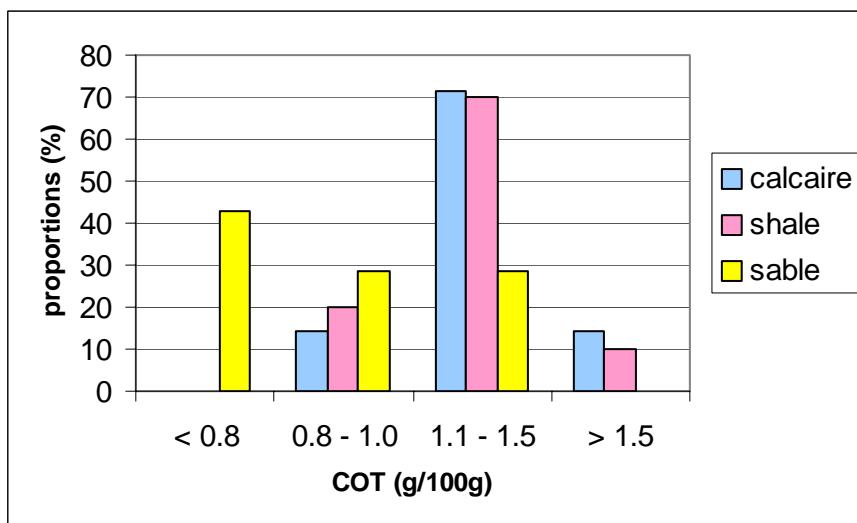


Figure III. 51: Pourcentages d'horizons de surface par classe de COT et par séquence.

Pour ce qui concerne la granulométrie, l'importance des fractions " $0\text{-}2\mu\text{m}$ " et " $>50\mu\text{m}$ " 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 limoneux" 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").

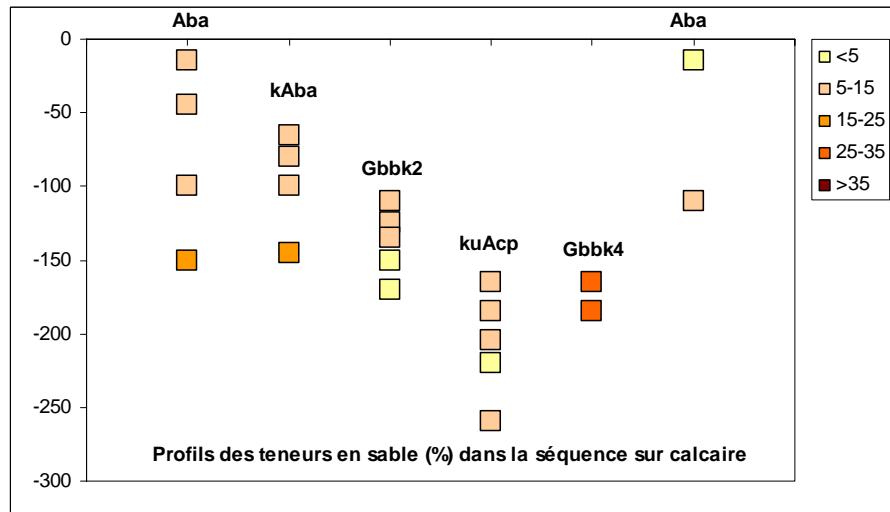
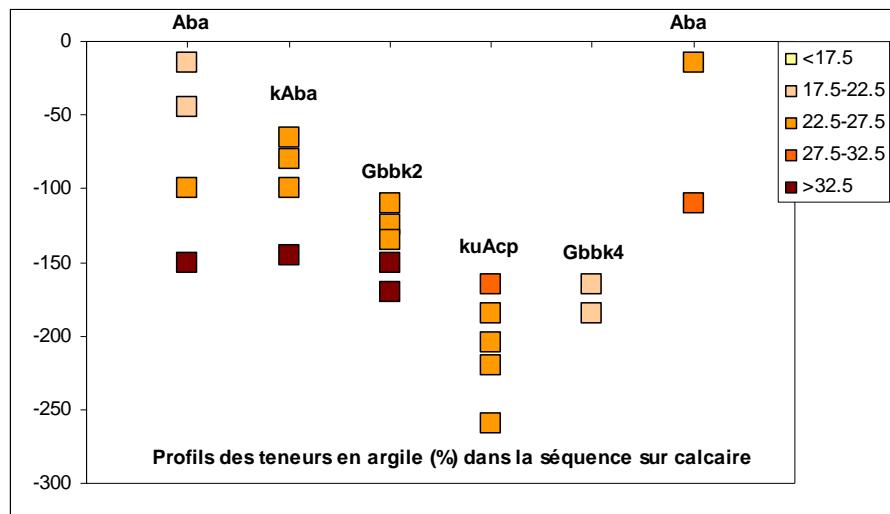
Pour la teneur en sable: "<5%" (faibles teneurs), "5-15" (valeurs typiques pour les horizons limoneux), "15-25" (teneurs élevées pour des limons), "25-35" et ">35%" (ces deux dernières traduisent le mélange en proportion croissante avec un matériau sableux).

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.



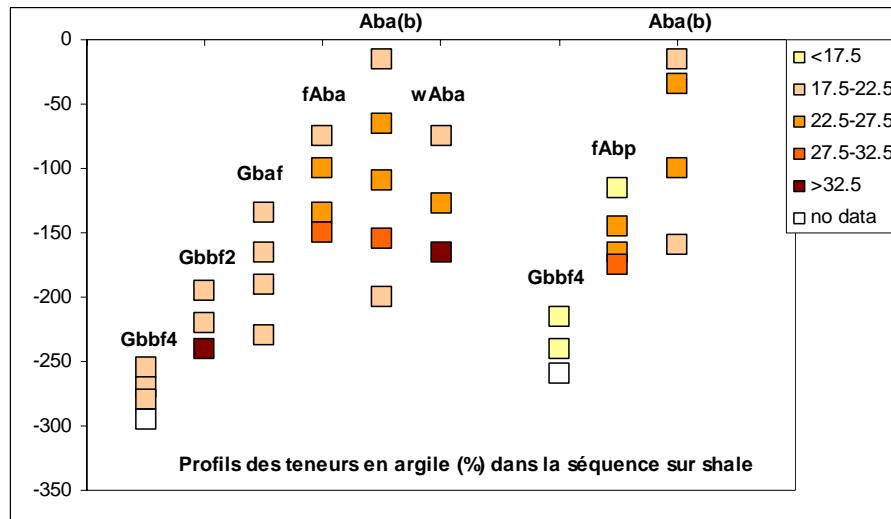


Figure III. 54: Profils des teneurs en argile (%) dans la séquence de limons sur shale. Les profondeurs, en ordonnées, sont relatives et idéalisées pour la représentation.

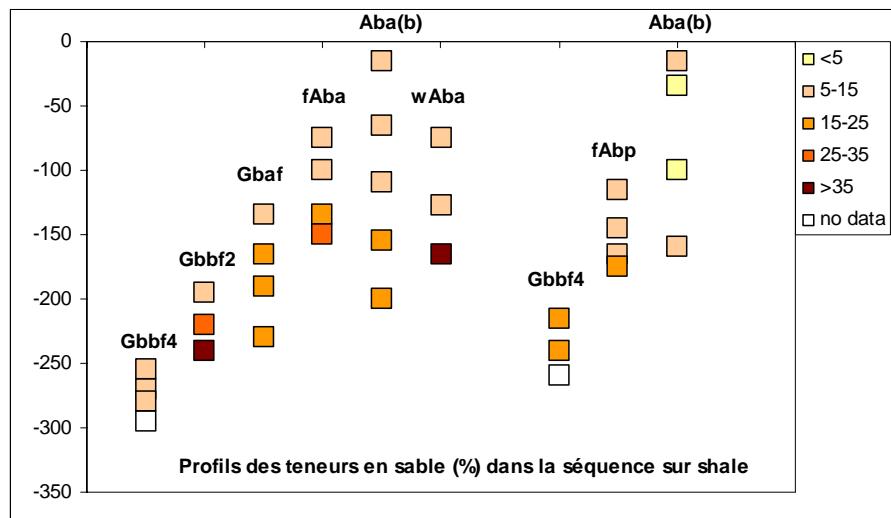


Figure III. 55: Profils des teneurs en sable (%) dans la séquence de limons sur shale. Les profondeurs, en ordonnées, sont relatives et idéalisées pour la représentation.

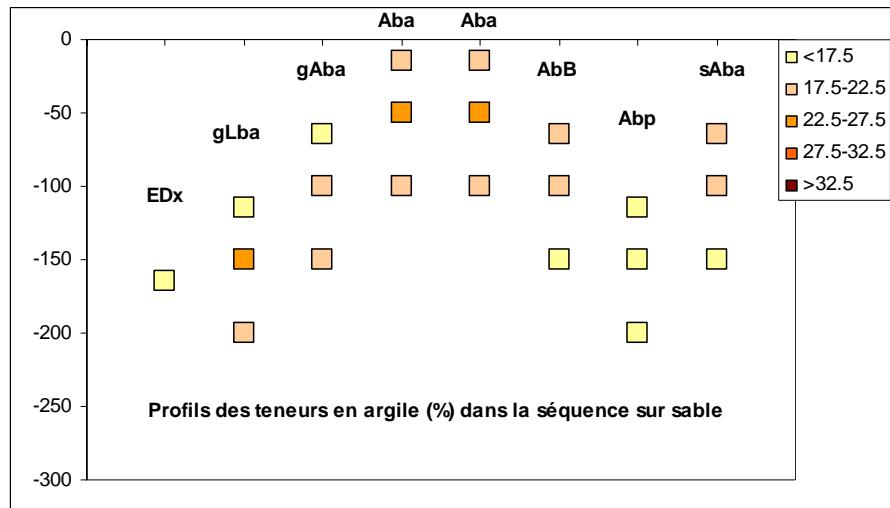


Figure III. 56: Profils des teneurs en argile (%) dans la séquence de limons sur sable. Les profondeurs, en ordonnées, sont relatives et idéalisées pour la représentation.

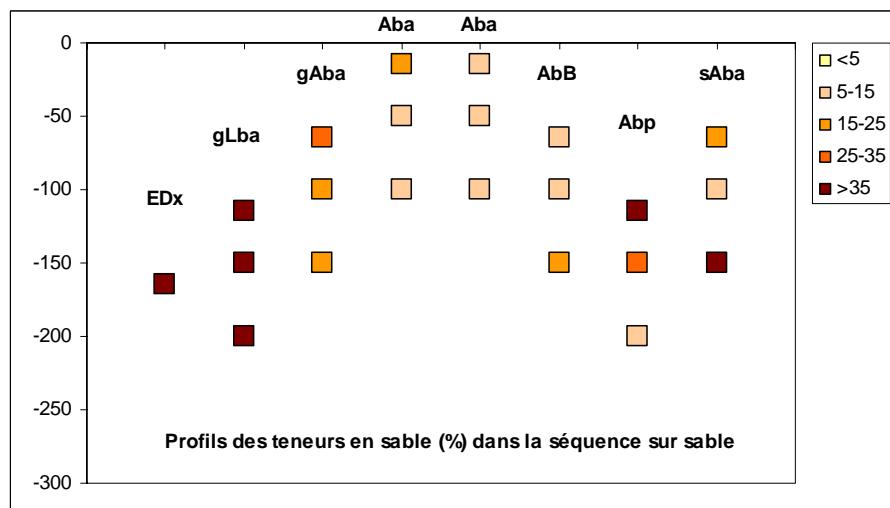


Figure III. 57: Profils des teneurs en sable (%) dans la séquence de limons sur sable. Les profondeurs, en ordonnées, sont relatives et idéalisées pour la représentation.

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.

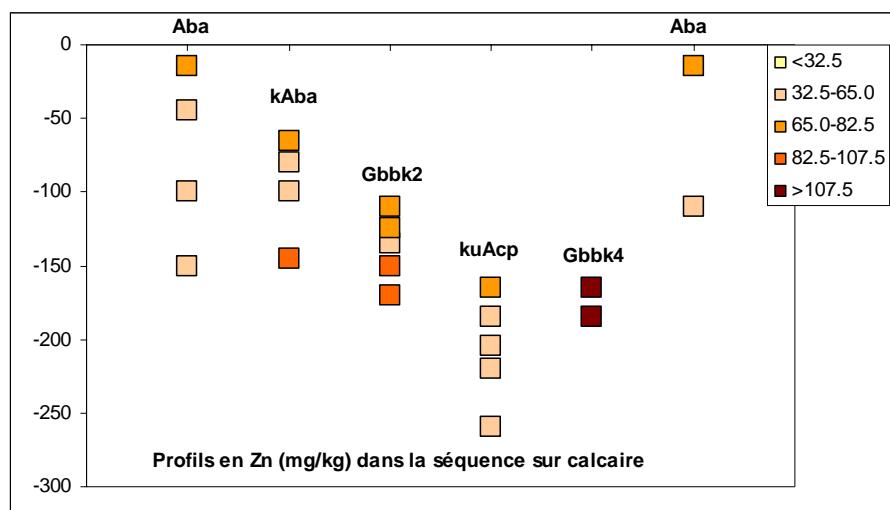


Figure III. 58: Profils des teneurs en Zn (mg/kg) dans la séquence de limons sur calcaire. Les profondeurs, en ordonnées, sont relatives et idéalisées pour la représentation. Hormis pour le solum Gbbk4, il n'y a pas de lien direct entre les teneurs dans les horizons de surface et les teneurs dans le 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.

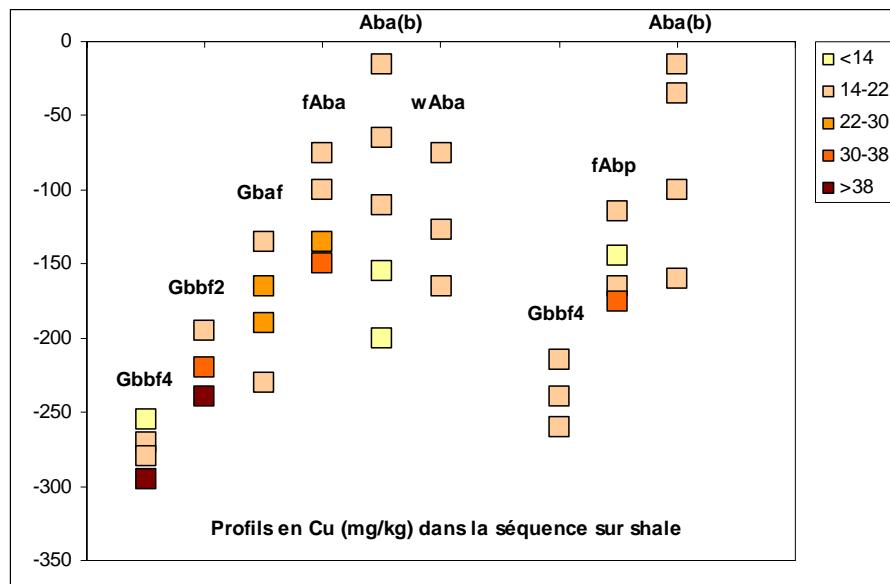


Figure III. 59: Profils des teneurs en Cu (mg/kg) dans la séquence de limons sur shale. Les profondeurs, en ordonnées, sont relatives et idéalisées pour la représentation. Il n'y a à nouveau pas de lien direct entre teneurs en Cu dans l'horizon de surface et teneurs dans les shales ou leurs altérites.

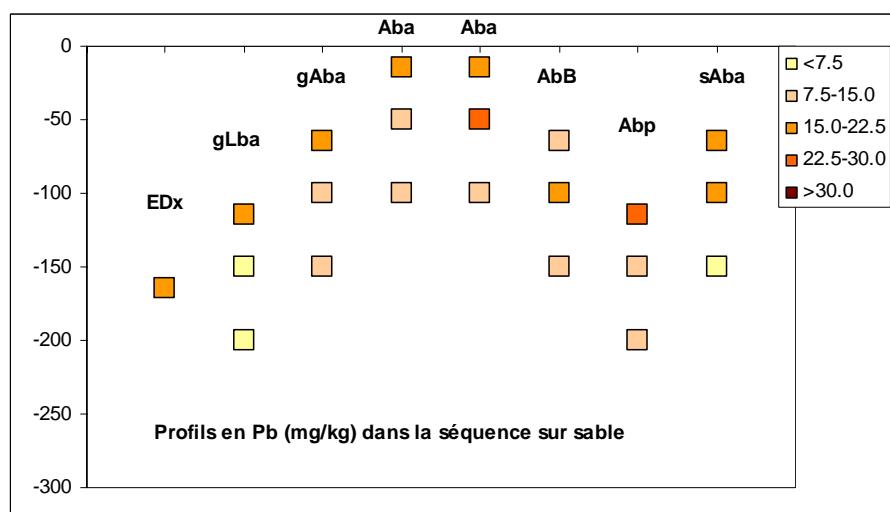


Figure III. 60: Profils des teneurs en Pb (mg/kg) dans la séquence de limons sur sable. Les profondeurs, en ordonnées, sont relatives et idéalisées pour la représentation. Les niveaux de teneurs sont relativement faibles dans les horizons limoneux et surtout les horizons sableux. On notera l'accumulation, 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 " $>50\mu\text{m}$ ".

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.

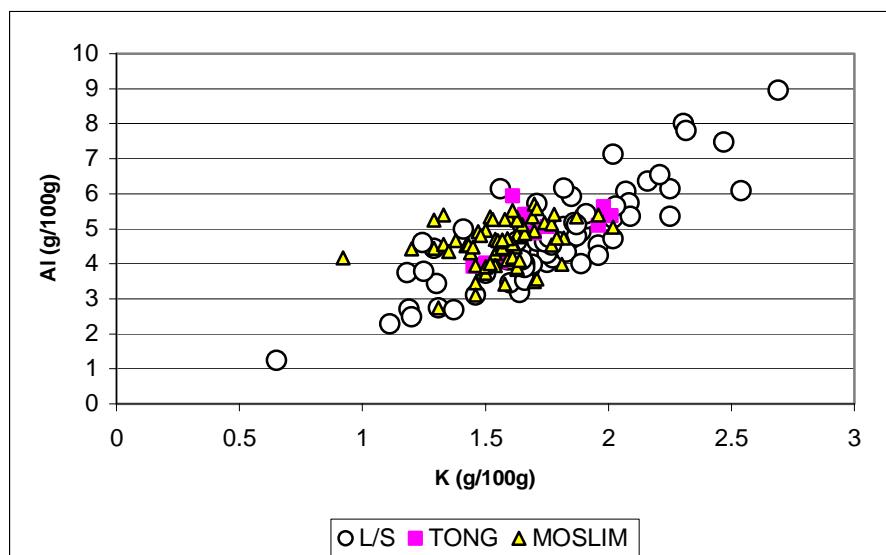


Figure III. 61: Relations Al-K dans les séquences limons sur substrat (L/S), la coupe de Tongrinne (TONG) et les séquences limoneuses (MOSLIM).

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 " $0-2\mu\text{m}$ " principalement et " $>50\mu\text{m}$ " 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).

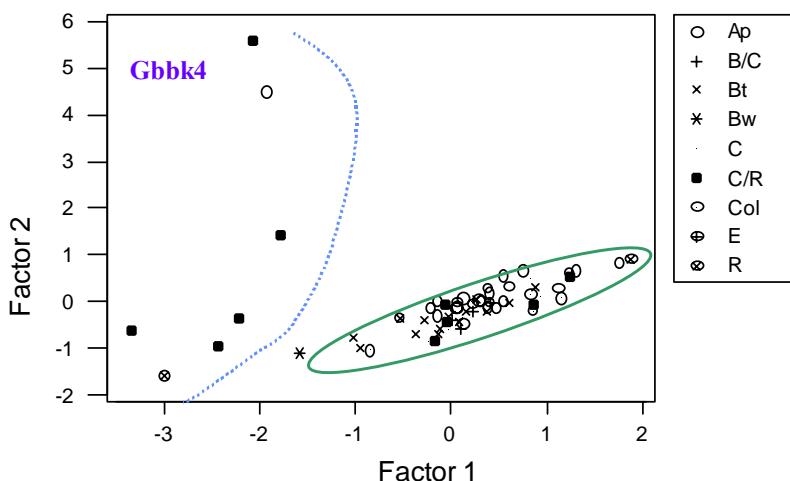


Figure III. 62: Représentation de la composition élémentaire des horizons des séquences "limons sur substrat" dans le premier plan factoriel. Les horizons limoneux et sableux forment un groupe (ellipse verte) dont la différenciation est dictée par la granulométrie. Les horizons profonds correspondant 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.

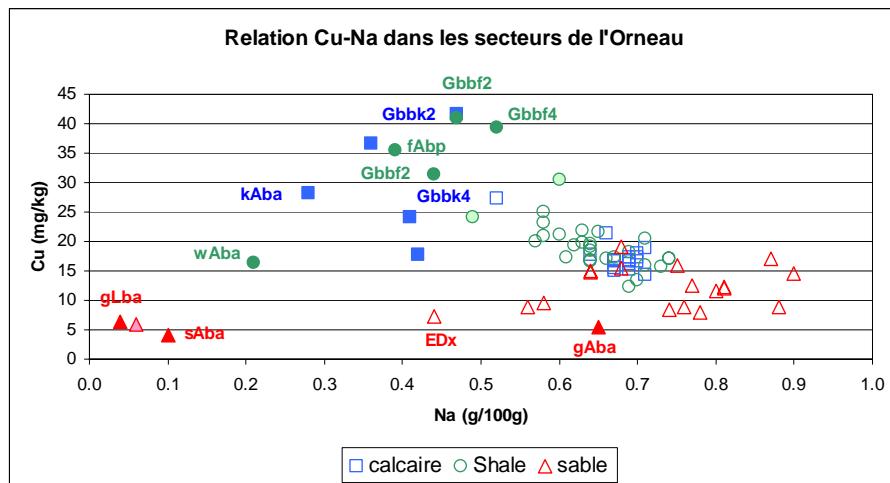


Figure III. 63: Relations Cu-Na dans les séquences des secteurs sur substrat. Les sigles creux correspondent aux horizons de surface et de profondeur intermédiaire. Les sigles pleins correspondent aux horizons profonds non-limoneux.

6.4.2.3 conclusions partielles

Les caractéristiques mesurées pour les sols de cette approche sont évidemment nettement plus différencierées 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 ">50µm" agit comme une phase diluante. Les niveaux de teneurs sont dès lors moins élevés dans les sols à texture sableuse. Toutefois, les relations ETM-"0-2µm" 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.

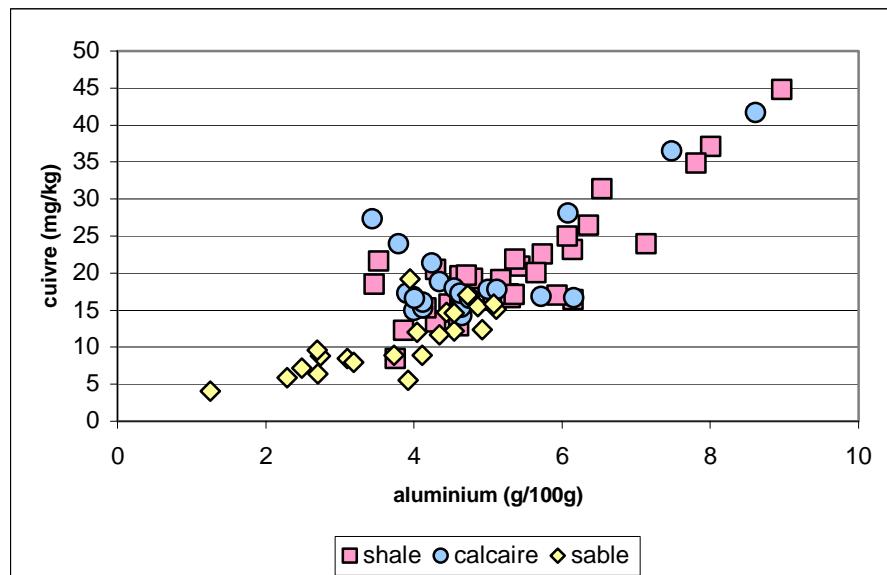


Figure III. 64: Relations Al-Cu dans les séquences "limons sur substrat". L'ensemble des horizons s'inscrit dans une relation générale, à l'exception de quatre horizons : ceux du solum Gbbk4 (bleu) et deux horizons de surface (rose) pour lesquels on peut soupçonner une source de Cu anthropique.

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.

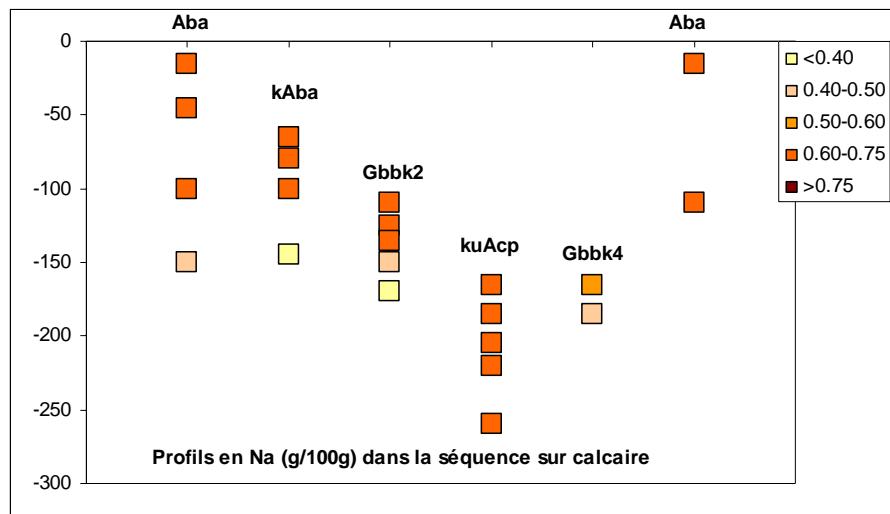


Figure III. 65: Profils des teneurs en Na (g/100g) dans la séquence des limons sur calcaires. Le dualisme entre limons et substrats est clair et confirme qu'il y a eu peu de mélange entre les premiers et les seconds.



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 morphogenèse 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 pédo-géochimique 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 pédo-géochimique 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 pédo-géochimiques 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 pédo-géochimique 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.

COMMUNAUTE FRANCAISE DE BELGIQUE
FACULTE UNIVERSITAIRE DES SCIENCES AGRONOMIQUES DE GEMBLOUX

**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

**Quatrième partie – référentiels agricoles
conclusions**

Promoteur : Pr. L. BOCK

2003

Quatrième partie
Référentiels agricoles

Liste des figures

Figure IV.1:	Représentation de l'exactitude et la précision des différents modèles de régression BRAB pour Cu	339
Figure IV.2:	Représentation de l'exactitude et la précision des différents modèles de régression BRAB pour Pb	339
Figure IV.3:	Relations argile-Fe selon les différents jeux de données "limons".	341
Figure IV.4:	Relations entre Ni et Fe dans les différents jeux de données "limons"	342
Figure IV.5:	Relations entre Cu et Fe dans les différents jeux de données "limons"	343
Figure IV.6:	Exactitude des prédictions des teneurs en ETMs dans le jeu de données LIM par rapport à la moyenne de ces données	350
Figure IV.7:	Précision des prédictions des teneurs en ETMs dans le jeu de données LIM par rapport à la prédiction sur base de la moyenne des données	351
Figure IV.8:	Position des variables sur le plan factoriel principal: horizons labourés	357
Figure IV.9:	Position des variables sur le plan factoriel principal: teneurs "résiduelles" dans les horizons labourés	358
Figure IV.10:	Localisation des secteurs de l'Orneau, de Corroy, de Waremme, ainsi que de la parcelle de Boëlle par rapport à la zone d'étude	369
Figure IV.11:	Semi-variogramme expérimental relatif à la catégorisation du développement de profil pour les horizons labourés	370
Figure IV.12:	Carte des teneurs mesurées en Zn dans la zone étudiée.	371
Figure IV.13:	Cartes des teneurs mesurées en Fe dans la zone étudiée. .	372
Figure IV.14:	Cartes des teneurs "résiduelles" en Zn dans la zone étudiée	372
Figure IV.15:	Cartes des résidus de la régression de Zn (mg/kg) par Fe et COT.	373
Figure IV.16:	Semi-variogramme modélisé et données expérimentales relatifs aux teneurs en argile pour les horizons de surface	375
Figure IV.17:	Semi-variogramme modélisé et données expérimentales relatifs aux teneurs en COT pour les horizons de surface	376
Figure IV.18:	Semi-variogrammes modélisés et données expérimentales relatifs aux teneurs en Zn à courte distance et à longue distance	377
Figure IV.19:	Extraits de carte topographique et de carte des sols relatifs à la parcelle de Boëlle	381
Figure IV.20:	Cartes des teneurs mesurées en Zn et en Pb dans la parcelle de Boëlle	382
Figure IV.21:	Relations entre teneurs en ETMs et la latitude	383
Figure IV.22:	Semi-variogrammes des résidus des régressions Zn-Y et Pb-Y	383
Figure IV.23:	Teneurs estimées et intervalles de confiance pour les teneurs en Zn et en Pb dans la parcelle de Boëlle	384
Figure IV.24:	Grille d'échantillonnage et séries de sols pour le secteur de Corroy-le-Grand	385
Figure IV.25:	Résultats relatifs à la prédiction spatiale des teneurs en Mn dans le secteur de Corroy-le-Grand	386
Figure IV.26:	Résultats relatifs à la prédiction spatiale des teneurs en Ni dans le secteur de Corroy-le-Grand	387
Figure IV.27:	Identification de teneurs anormales en Ni dans le secteur de Corroy-le-Grand	388
Figure IV.28:	Cartes des teneurs "résiduelles" calculées pour Cu et Zn	390

Figure IV.29: Semi-variogramme des teneurs en Fe à l'échelle régionale	391
Figure IV.30: Carte des unités pédo-géochimiques réalisée à partir des planchettes 130E et 143E de la carte des Sols de la Belgique	395
Figure IV.31: Détails de la carte pédo-géochimique et explicitation de la légende.	396
Figure IV.32: Schéma de principe de la cartographie des teneurs en ETMs à l'échelle régionale selon une approche par régression	398
Figure IV.33: Illustration de l'approche BME	400
Figure IV.34: Teneurs en Cu par traitement et par bloc dans l'expérimentation CRAgX	403
Figure IV.35: Relations entre les teneurs en Cu et en Fe différencierées par type de traitement	404
Figure IV.36: Relations entre les teneurs en Zn et en Fe différencierées par parcelle agrobiologique	406
Figure IV.37: Relations entre les teneurs en Zn et en COT différencierées par parcelle agrobiologique	406
Figure IV.38: Relation entre les teneurs en Cu dans les données 2002 et 1992.	408
Figure IV.39: Relations Cu-Fe différencierées par jeu de données	408

Liste des tableaux

Tableau IV. 1: Résultats de l'évaluation des modèles BRAB pour la prédiction des teneurs en ETMs dans des horizons limoneux "profonds"	337
Tableau IV. 2: Equations des droites de régression argile-Fe dans les jeux de données BRAB, TONG, LIM, RPG et ASPI	341
Tableau IV. 3: Critères d'exactitude et de précision du modèle général Fe-Ni pour la prédiction des teneurs en Ni dans les jeux de données "limons".	343
Tableau IV.4: Matrices des critères d'exactitude et de précision des modèles "limons" par rapport aux différents jeux de données - Cu	344
Tableau IV.5: Matrices des critères d'exactitude et de précision des modèles "limons" par rapport aux différents jeux de données - Zn	345
Tableau IV.6: Matrices des critères d'exactitude et de précision des modèles "limons" par rapport aux différents jeux de données - Ni	345
Tableau IV.7: Matrices des critères d'exactitude et de précision des modèles "limons" par rapport aux différents jeux de données - Cr	346
Tableau IV.8: Matrices des critères d'exactitude et de précision des modèles "limons" par rapport aux différents jeux de données - Pb	346
Tableau IV.9: Matrices des critères d'exactitude et de précision des modèles "limons" par rapport aux différents jeux de données - Co	347
Tableau IV.10: Equations des droites de régression argile-Fe dans les jeux de données BRAB, TONG, LIM, RPG et ASPI	348
Tableau IV.11: Critères d'exactitude et de précision des équations générales pour les différents jeux de données "limons" et les différents ETMs pour lesquels la régression avec Fe est significative	349
Tableau IV.12: Estimations du fond pédo-géochimique minéral des sols limoneux, modèles, intervalles de confiance (IC95) et limite supérieure (Lim_95)	353
Tableau IV.13: Statistiques relatives à la population des horizons labourés limoneux	355
Tableau IV.14: Moyenne, écart-type, indice de concentration (Conc.), vibrisse supérieure et fonction de répartition à 0.95 [F(0.95)] des teneurs "résiduelles"	355
Tableau IV.15: Différenciation du fond pédo-géochimique modélisé et des seuils de teneurs totales habituelles dans les sols limoneux en fonction des séries	364
Tableau IV.16: Sensibilité du référentiel ETMs à détecter une évolution des teneurs	367
Tableau IV.17: Semi-variances relatives, à différentes échelles spatiales, pour les variables Fe, argile, sable, COT et pHH2O	374
Tableau IV.18: Semi-variances relatives, à différentes échelles spatiales, pour les teneurs en ETMs	376
Tableau IV.19: Différences de teneurs en argile et en ETMs dans l'horizon labouré entre Aba et Abp à l'échelle de la parcelle agricole	380
Tableau IV.20: Analyses de bases et teneurs totales en Fe, Cu et Zn dans les parcelles d'agrobiologie	405

Table des matières

CHAPITRE 7 FOND PEDO-GEOCHIMIQUE ET ANTHROPISSATION	
DE L'HORIZON LABOURE	333
7.1 <i>Introduction</i>	333
7.2 <i>Approches régionales</i>	334
7.2.1 Modélisation du fond pédo-géochimique des sols limoneux	336
7.2.1.1 Validation des modèles BRAB pour le fond pédo-géochimique des horizons profonds des sols limoneux.	336
7.2.1.2 Comparaison de modèles de prédiction du fond pédo-géochimique en sols limoneux.	340
7.2.1.3 Conclusions relatives à la modélisation du fond pédo-géochimique des sols limoneux.	351
7.2.2 Interprétation des teneurs dans l'horizon labouré	354
7.2.2.1 Approche globale non stratifiée	354
7.2.2.2 Approche par régression	356
7.2.2.3 Approche typologique	360
7.2.3 Conclusions	365
7.3 <i>Approche spatiale du fond pédo-géochimique et du niveau d'anthropisation</i>	368
7.3.1 Analyse des structures spatiales	371
7.3.1.1 Visualisation des données	371
7.3.1.2 Echelles spatiales de variabilité	374
7.3.1.3 Variabilité à l'échelle de la station	378
7.3.1.4 Variabilité à la parcelle	379
7.3.1.5 Variabilité à l'échelle du secteur	385
7.3.1.6 Variabilité régionale	389
7.3.2 Evaluation de la faisabilité d'une cartographie du fond minéral et de l'état d'anthropisation	392
7.3.2.1 cartographie directe	393
7.3.2.2 cartographie typologique	394
7.3.2.3 cartographie par régression	397
7.3.2.4 approches mixtes	399
7.3.3 Conclusions	401
7.4 <i>Approches ponctuelles et locales</i>	402
7.4.1 Expérimentations CRAGx	402
7.4.2 Agriculture biologique	404
7.4.3 Bilan de 10 années d'irrigation avec des eaux résiduaires d'une industrie agro-alimentaire (Waremme)	407
7.4.4 Conclusions	409

Chapitre.7 Fond pédo-géochimique et anthropisation de l'horizon labouré

7.1 Introduction

L'horizon labouré par sa position d'interface environnemental et sa fonction de production agricole occupe une place particulièrement importante. Milieu anthropisé par excellence, les étapes de l'étude des différenciations d'origine pédogénétique en ont relevé la spécificité.

Deux types de questions se posent par rapport aux teneurs en ETMs dans l'horizon labouré: (i) "Est-ce qu'une teneur mesurée peut être considérée comme naturelle ou normale?" et (ii) "A quelle teneur puis-je m'attendre en tel endroit?". La première question relève de la problématique de détection des contaminations; la seconde de la prédiction spatiale.

Pour rappel, les travaux de D. BAIZE ont montré qu'il ne fallait pas rechercher une solution unique au problème de détection des contaminations. Au cas par cas selon l'élément considéré, la quantité et la qualité d'information ancillaire à disposition, l'une ou l'autre des démarches qu'il propose s'avérera plus pertinente.

Dans le même esprit, l'objectif de cette quatrième partie est d'exploiter les acquis des phases précédentes pour construire un référentiel spatialisé des teneurs en ETMs dans l'horizon labouré.

Dans une première partie, plusieurs voies de structuration d'un référentiel-ETM seront évaluées. Le référentiel-ETMs peut se construire (i) sur base des teneurs elles-mêmes, (ii) sur base de la carte des sols, et (iii) sur base d'un modèle de régression avec des variables quantitatives, et ce à plusieurs échelles spatiales d'observation.

Les aspects spatiaux seront spécifiquement abordés dans une deuxième partie et quelques exemples d'évaluation de modes de gestion particuliers de la matière organique recadrés par rapport au référentiel dans une troisième et dernière partie.

7.2 Approches régionales

Pour rappel, l'importance de la phase porteuse "0-2 μm " nous a conduit à proposer de distinguer un fond pédo-géochimique lié aux teneurs argile, estimé par régression. La différence entre teneur prédictive et teneur totale mesurée pour l'horizon labouré constitue lorsqu'elle est significative une teneur "nômiale", dont le caractère "prédictible" sera évalué postérieurement à celui du fond pédo-géochimique.

Au cours du chapitre 5, des modèles de prédiction des teneurs en ETMs dans le matériau parental "brabantien" ont été obtenus par régression uni- ou multivariée (modèles BRAB). Nous nous sommes interrogés sur le champ de validité de ces modèles et en particulier sur leur généralisation à d'autres matériaux limoneux, indépendamment de la stratigraphie.

Les différentes étapes de l'étude des différenciations pédogénétiques ont permis de confirmer certaines relations, avec l'argile granulométrique, Al, Fe.... pour les horizons minéraux. Ces relations sont donc à priori exploitables dans le cas de l'horizon labouré pour estimer des concentrations en ETMs liées à la matrice minérale.

Il apparaît ainsi opportun de comparer les résultats des différents modèles BRAB, qui correspondent à différents niveaux de disponibilité en variables ancillaires, pour la prédiction des teneurs en ETMs dans les sols "limoneux". Il est en outre nécessaire de comparer les modèles BRAB à des modèles formalisés à partir d'autres jeux de données afin d'analyser leurs différences et d'en retenir le plus universel, si tant est que cela ait un sens.

Nous avons déjà souligné le problème de validité des modèles de régression au chapitre 5, dans lequel deux modèles basés sur les teneurs en argile (BRAB-IV et TONG) pouvaient donner des résultats très différents en-dehors du champ des données ayant servi à la calibration des modèles.

L'analyse des modèles de prédiction des teneurs relatives au fond pédo-géochimique sera menée en plusieurs phases. Dans un premier temps, les équations obtenues au chapitre 5 (BRAB-I à VIII) seront appliquées sur un jeu de données indépendant présentant des valeurs mesurées pour chaque variable d'entrée des modèles. Ensuite, des équations établies sur d'autres jeux de données seront évaluées et comparées aux modèles BRAB sur base des données acquises au cours de ce travail. Nous tenterons enfin de déterminer un ou plusieurs modèles, en fonc-

tion des disponibilités en variables ancillaires, dont la portée soit la plus générale possible tout en satisfaisant à des critères d'exactitude et de précision.

La pertinence des modèles de régression sur les différents jeux de données sera évaluée sur base:

- de l'erreur moyenne (EM) définie par $\frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n (obs_i - préd_i) \right]$ qui mesure le biais de la prédiction (TRIANTIFILIS *et al.*, 2001; D'OR et BOGAERT, 2003);
- de la racine carrée de la moyenne des carrés des erreurs (RMSE) calculée par $\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (obs_i - préd_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$, paramètre fréquemment utilisé (SINOWSKI et AUERSWALD, 1999; CHAPLOT *et al.*, 2000; BISHOP et McBRATNEY, 2001; TRIANTAFILIS *et al.*, 2001; D'OR et BOGAERT, 2003) qui renseigne sur la précision de la méthode de prédiction;
- du coefficient de corrélation entre données estimées et observées (r), qui traduit la linéarité de la relation, et
- du rapport écart-type des valeurs mesurées / écart-type des valeurs estimées ($s_y/s_{\hat{y}}$), qui doit montrer si le modèle reproduit, exagère ou atténue ($s_y/s_{\hat{y}} = 1, < 1$ ou > 1) la différenciation moyenne des teneurs observées.

On trouve également d'autres indices d'évaluation des régressions dans la littérature: l'erreur absolue moyenne, la statistique F ou le niveau de probabilité p (CHAPLOT *et al.*, 2000; TRIANTAFILIS *et al.*, 2001), ainsi que l'écart-type du carré des écarts (VAN MEIRVENNE, 1998) ou encore la variance d'estimation moyenne (D'OR et BOGAERT, 2003). Mais ceux-ci n'apportent rien de plus que les indices déjà retenus.

7.2.1 Modélisation du fond pédo-géochimique des sols limoneux

7.2.1.1 Validation des modèles BRAB pour le fond pédo-géochimique des horizons profonds des sols limoneux.

Pour valider les modèles obtenus à partir des horizons C "brabantiens", nous les avons testés sur un jeu de données constitué d'un ensemble d'horizons limoneux "profonds" qui n'ont pas été utilisés pour l'élaboration des droites de régression et pour lesquels nous disposons de toutes les variables d'entrée des différents modèles. Ce jeu de données sera nommé LIM dans la suite du texte.

Seuls les modèles de prédiction des éléments Cu, Zn, Ni, Pb et Co sont évalués, en raison du manque ou de la faiblesse des relations linéaires entre Cr ou Mn et les variables "explicatives". Les modèles BRAB sont comparés à la prédiction par la teneur moyenne des horizons BRAB.

Les résultats des évaluations figurent au tableau IV.1. Pour rappel, les différents modèles correspondent à des régressions sur base de toutes les variables ancillaires (I), de toutes les variables sauf les "bases" (II), des variables disponibles dans AARDEWERK (III), de la teneur en argile (IV), des teneurs en Al, Fe et Mn (V), en Al et Fe (VI), en Fe (VII) et sur base de variables factorisées (VIII).

Tableau IV. 1: Résultats de l'évaluation des modèles BRAB pour la prédiction des teneurs en ETMs dans des horizons limoneux "profonds", par rapport à l'utilisation de la teneur moyenne (MOY).

	BRAB								
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	MOY.
Cu (mg/kg)									
EM	-0.5	-0.1	-0.3	-0.1	0.2	-0.1	-0.5	-0.1	-1.0
RMSE	2.1	1.8	2.2	2.2	2.5	1.8	1.8	1.7	3.2
r	0.75	0.81	0.68	0.68	0.78	0.81	0.82	0.83	
sy/sŷ	1.37	1.04	1.63	1.50	0.78	1.03	1.17	1.11	
Zn (mg/kg)									
EM	1.3	-	0.3	0.5	-	-	0.1	1.9	-1.2
RMSE	5.1	-	6.2	6.2	-	-	4.9	5.4	8.4
r	0.81	-	0.70	0.70	-	-	0.81	0.79	
sy/sŷ	1.08	-	2.14	2.13	-	-	1.22	1.34	
Ni (mg/kg)									
EM	-3.0	-2.4	-2.9	-2.7	-	-	-2.8	-1.9	-3.5
RMSE	8.2	5.7	6.4	6.1	-	-	5.2	5.1	7.4
r	0.12	0.69	0.62	0.70	-	-	0.82	0.74	
sy/sŷ	1.65	2.60	4.09	3.59	-	-	2.23	2.12	
Pb (mg/kg)									
EM	2.2	1.9	1.5	1.3	-	-	1.0	1.5	-1.1
RMSE	4.7	4.7	4.3	4.3	-	-	4.7	4.6	4.0
r	0.077	-0.043	0.086	-0.113	-	-	-0.267	-0.131	
sy/sŷ	2.07	1.98	2.29	3.18	-	-	2.10	2.24	
Co (mg/kg)									
EM	0.9	0.4	0.8	0.9	-	-	0.5	0.7	0.2
RMSE	2.7	2.2	1.9	2.1	-	-	2.3	2.1	2.1
r	0.45	0.52	0.54	0.45	-	-	0.43	0.47	
sy/sŷ	0.83	0.90	1.38	1.27	-	-	0.97	1.16	

EM: erreur moyenne; RMSE: *root mean square error*; r coefficient de corrélation; sy/sŷ: rapport des écarts-types relatifs aux valeurs observées et prédictes.

Pour ce qui concerne Cu, tous les modèles BRAB, excepté BRAB-V (régression Cu-[Al,Fe,Mn]) tendent à surestimer (EM < 0) les teneurs dans les horizons "profonds", en moyenne de moins de 0.5 mg/kg, ce qui est relativement peu. La RMSE est toujours inférieure à celle obtenue à partir de la prédiction sur base de la teneur moyenne. Les coefficients de corrélation indiquent un certain degré de linéarité et les rapports sy/sŷ indiquent une légère tendance à la sous-représentation de la variance des données. Tous les modèles sont moins biaisés et plus précis que la teneur moyenne des horizons BRAB. Des meilleurs résultats sont obtenus en prenant en compte Al et Fe, ou la fraction "0-2μ" que

Fe tout seul.

Les modèles BRAB sous-estiment les teneurs en Zn de 0.1 à 2 mg/kg tandis que la teneur moyenne les surestime. Les RMSE sont toutes du même ordre de grandeur (5 à 6 mg/kg) et inférieures à celle de la moyenne. La linéarité des relations est très hautement significative et les rapports $sy/s\hat{y}$ sont compris entre 1.08 et 2.14. On notera que la régression sur base du Fe total présente les meilleurs résultats et que les modèles granulométriques (BRAB-III et -IV) sont moins précis mais restent très peu biaisés.

Pour ce qui concerne les teneurs en Ni, la tendance générale est à la surestimation des teneurs (entre 2.0 et 3.0 mg/kg, soit moins de 10% de la teneur moyenne des horizons limoneux); les RMSE sont inférieures à celle de la moyenne, sauf pour BRAB-I (Ni-[Ca, K, Al , "0-2", Y]) qui cumule les indices défavorables (EM, RMSE et r), ce qui traduit bien que les modèles les plus compliqués ne sont pas pour autant les plus généralisables. Les rapports $sy/s\hat{y}$ sont relativement élevés. Le "meilleur" modèle pour cette évaluation est le modèle factorisé.

Pour les éléments Pb et Co, les constats se ressemblent: sous-estimation des teneurs (respectivement de 1 à 2 et de 0.4 à 0.9 mg/kg), RMSE supérieures ou égales à celle de la moyenne, coefficients de corrélation plus faibles (particulièrement pour Pb) que pour Cu et Zn. La différence majeure entre Pb et Co réside dans les rapports $sy/s\hat{y}$ proches de l'unité pour Co et supérieurs à 2 pour Pb. Même si pour ce dernier, les régressions sur base des fractions granulométriques sont un peu meilleures que les autres régressions, la meilleure prédiction des teneurs en Pb est fournie par la teneur moyenne des horizons "brabantiens" (*i.e.* 14.1 mg/kg). Pour Co, tous les modèles se valent en terme de précision, mais la teneur moyenne (9.9 mg/kg) est l'estimateur le moins biaisé.

D'une manière générale, les performances des modèles de régression pour la prédiction des teneurs dans les horizons "profonds" limoneux se valent (exemple pour Cu, figure IV.1). Pour la prédiction d'un élément, ils se différencient principalement par l'erreur moyenne. Tous les modèles sont biaisés, toutefois pour Cu et Zn, l'erreur moyenne est inférieure à 5% de la teneur moyenne. Pour Ni et Co le biais est de l'ordre de 10% et pour Pb de 15%. Pb et Co présentent en outre une précision inférieure ou égale à celle de la prédiction par la teneur moyenne (exemple Pb, figure IV.2). Pour ces deux éléments, les régressions BRAB ne présentent donc pas d'intérêt. Pour Cu, Zn et Ni, les résultats obtenus en tenant compte de Al, Fe et "0-2μ"(seuls ou en associations) sont satisfaisants. Il ne semble donc pas utile de

compliquer davantage les modèles.

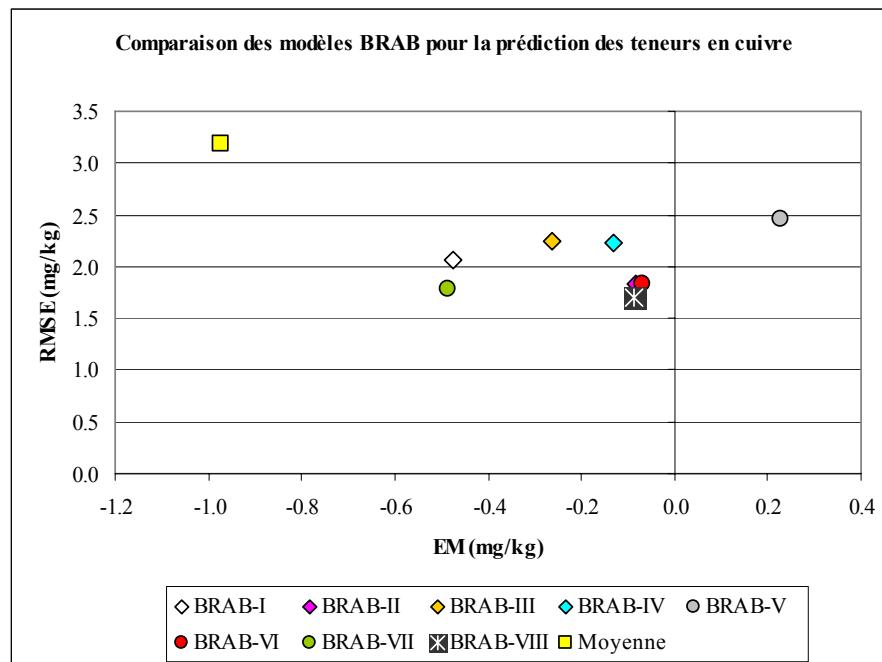


Figure IV. 1: Représentation de l'exactitude (EM) et la précision (RMSE) des différents modèles de régression BRAB pour Cu.

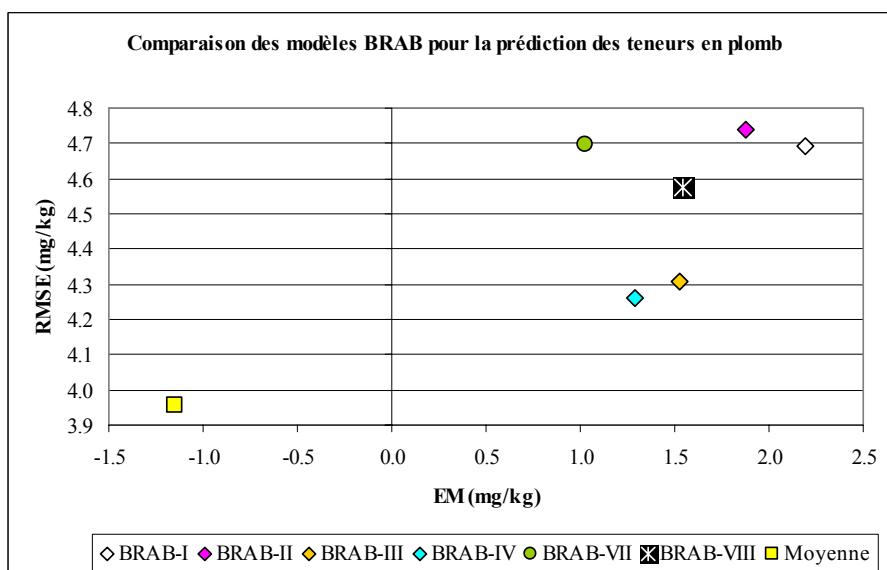


Figure IV. 2: Représentation de l'exactitude (EM) et la précision (RMSE) des différents modèles de régression BRAB pour Pb.

7.2.1.2 Comparaison de modèles de prédiction du fond pédo-géochimique en sols limoneux.

Le gain de précision apporté par les régressions BRAB, par rapport à la prédiction sur base de la teneur moyenne, est surtout évident pour les éléments Cu, Zn et Ni. Les modèles BRAB vont faire l'objet d'une évaluation complémentaire par comparaison avec d'autres modèles acquis sur des jeux de données différents.

Nous disposons de plusieurs jeux de données dont les seules variables "explicatives" communes sont les teneurs en argile et en Fe. Ces jeux de données sont: la coupe de Tongrinne (données TONG, N=12), un ensemble d'horizons peu humifères de sols limoneux (données LIM, N=184), les données de l'inventaire régional réalisé par CORDIER (1999) dans le cadre de la mise en place du RPG Nord-Pas-de-Calais (données RPG, N= 46) et des données relatives aux limons de plateaux en France fournies par D. BAIZE (données ASPI, N= 88).

Les données RPG comprennent des horizons de coupes profondes (i.e. MCG, BUS et LLA présentées au chapitre 5), d'un inventaire régional (prélèvement à une profondeur proche de 150cm) ainsi que d'une topo-séquence réalisée dans une parcelle agricole (10 prélèvements espacés de 30m à une profondeur de 100cm). Les données ont été présentées par CORDIER (1999).

Les données ASPI ont été mesurées sur deux "Familles pédo-géologiques" limoneuses: les Luvisols Dégradés issus de limons anciens et les Néoluvisols du Vexin, dont la caractérisation a été présentée par BAIZE (1997). Si la seconde famille semble très proche morphologiquement parlant des sols visés dans ce travail, les sols dégradés sont caractérisés par une exacerbation des processus d'hydromorphie et de lessivage. Les profils des teneurs en argile sont plus différenciés que pour "nos" sols limoneux, les horizons E sont fortement blanchis et les concentrations ferro-manganiques abondantes.

a comparaison des jeux de données

Les relations argile-Fe (détail des régressions en annexe 8) ont fait l'objet d'une comparaison pour vérifier l'absence de biais entre les jeux de données mentionnés *supra*. Des biais peuvent en effet résulter des méthodes et outils d'analyse utilisés pour l'acquisition des données ainsi qu'éventuellement de spécificités régionales. Les paramètres des droites de régression argile-Fe figurent au tableau IV.2 tandis que les droites sont représentées à la figure IV.3.

Tableau IV. 2: Equations des droites de régression argile-Fe dans les jeux de données BRAB, TONG, LIM, RPG et ASPI (voir explications dans le texte).

Données	Equations (Fe et argile en g/100g)
BRAB	Fe = 1.82 + 0.032 * [argile]
TONG	Fe = 0.52 + 0.089 * [argile]
LIM	Fe = 0.95 + 0.071 * [argile]
RPG	Fe = 0.67 + 0.106 * [argile]
ASPI	Fe = 0.19 + 0.089 * [argile]

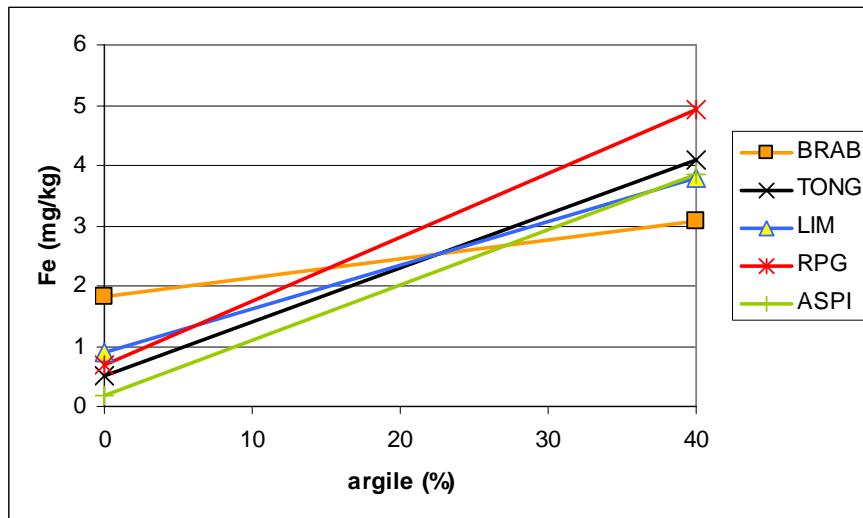


Figure IV. 3: Relations argile-Fe selon les différents jeux de données "limons".

Au premier regard, les régressions BRAB et RPG apparaissent différentes des autres. Toutefois, la relation entre les pentes et les ordonnées à l'origine des équations BRAB, TONG et LIM est tout-à-fait linéaire. Ces trois équations qui se coupent en un même point ne diffèrent pas à cause d'un biais analytique mais en raison de différences d'amplitudes de variation des données sources. La relation argile-Fe la plus vraisemblable doit être proche de l'équation LIM, car les données y sont les plus nombreuses et les plus différencierées. La régression ASPI présente une pente proche de celles de TONG et LIM, toutefois l'ordonnée à l'origine plus faible traduit un biais systématique par rapport aux équations TONG et LIM. Pour une teneur en argile de 20g/100g, les teneurs en Fe estimées valent 2.06 (ASPI), 2.30 (TONG), 2.40 (LIM), 2.45 (BRAB) et 2.79g/100g (RPG). L'équation RPG se distingue par une pente plus forte qui induit une "surestimation" des teneurs en Fe, par rapport à TONG et LIM, d'autant plus importante que les teneurs en argile sont élevées.

Il y a donc clairement un biais entre les différents jeux de données pour ce qui concerne les relations argile-Fe, sans que l'on sache si le biais concerne les teneurs en argile, en Fe ou les deux. Ce biais rend illusoire le principe de régression argile-ETMs valide pour l'ensemble des jeux de données. Néanmoins, nous pouvons considérer qu'il en existe une pour les données BRAB, TONG et LIM, i.e. les données acquises dans le cadre de cette étude.

En complément, les relations Fe-ETMs ont été analysées de la même façon. Fe et ETMs sont en effet dosés dans les mêmes "jus", ce qui enlève une source de biais par rapport aux relations argile-Fe.

Comme on peut le constater visuellement à la figure IV.4 pour la relation Fe-Ni, l'ensemble des données suit assez bien une relation générale représentée par la droite orange, avec un coefficient de détermination (r^2) pour l'ensemble valant 0.68. Les résultats pour les éléments Zn, Cr et Co vont dans le même sens. Les critères d'exactitude et de précision de ce modèle pour la prédiction des teneurs en Ni dans les différents jeux de données figurent au tableau IV.3.

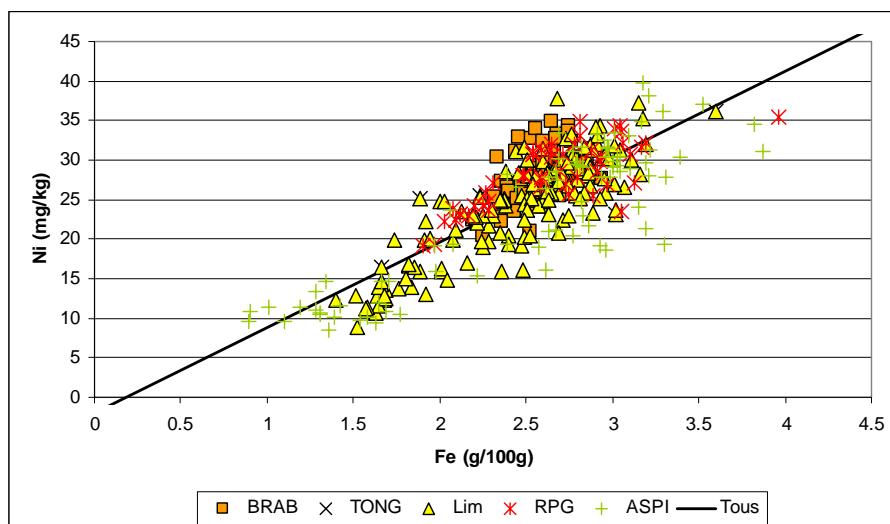


Figure IV. 4: Relations entre Ni (mg/kg) et Fe (g/100g) dans les différents jeux de données "limons". Les données suivent une relation unique (en noir).

Tableau IV. 3: Critères d'exactitude (EM) et de précision (RMSE) du modèle
Quatrième partie - 342

général Fe-Ni pour la prédition des teneurs en Ni dans les jeux de données "limons".

	EM	RMSE
TONG	0.5	3.4
BRAB	2.0	3.4
LIM	-0.4	3.3
RPG	1.5	3.2
ASPI	-1.8	4.7

On peut considérer que le modèle général pour Ni est satisfaisant car le biais est inférieur ou égal à 2mg/kg (~7% de la teneur moyenne) et la précision inférieure ou du même ordre de grandeur que l'écart-type opératoire¹ (tableau I.17).

Par contre pour ce qui concerne les teneurs en Cu (figure IV.5) et en Pb, on constate une divergence entre les données ASPI et les autres jeux de données. Un modèle unique n'est donc pas applicable.

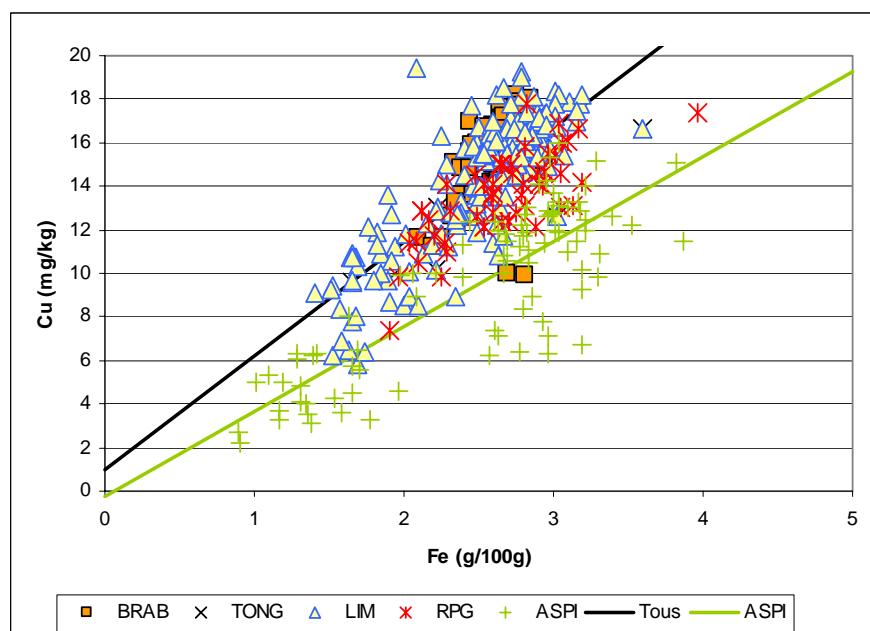


Figure IV. 5: Relations entre Cu (mg/kg) et Fe (g/100g) dans les différents jeux de données "limons". Il existe un biais entre les données ASPI et les autres.

¹ avec la réserve que ces deux paramètres ne sont pas calculés exactement de la même façon.

Nous considérerons dans la suite de ce travail qu'il n'y a pas de biais analytique entre les différents jeux de données pour les teneurs en Zn, Ni, Cr et Co. Par contre, un biais a été constaté pour les teneurs en Cu (systématiquement inférieures) et en Pb (systématiquement supérieures) du jeu ASPI.

b Modélisation du fond pédo-géochimique sur base des teneurs en argile

Les régressions BRAB-IV, TONG et LIM entre argile et ETMs (voir détail en annexe 8) ont été appliquées aux jeux de données éponymes.

Les résultats sont présentés par élément aux tableaux IV.4 à IV.9.

Tableau IV.4: Matrices des critères d'exactitude (EM) et de précision (RMSE) des modèles "limoneux" (BRAB, TONG, LIM) par rapport aux différents jeux de données – prédition des teneurs en Cu

EM (mg/kg)	Modèles			RMSE (mg/kg)	Modèles		
	BRAB	TONG	LIM		BRAB	TONG	LIM
Données				Données			
BRAB	0.0	1.2	0.1	BRAB	1.5	1.9	1.5
TONG	-1.1	0.0	-1.0	TONG	2.3	2.0	2.3
LIM	-0.1	0.9	0.0	LIM	2.2	2.4	2.2

Les teneurs en Cu prédites par les modèles BRAB et LIM sont exactes sauf pour les données TONG, où le biais est de l'ordre de 1mg/kg. En terme de précision, les trois modèles peuvent être considérés comme équivalents. Ils sont tous trois plus précis que l'estimation sur base de la teneur moyenne.

Pour ce qui concerne les teneurs en Zn (tableau IV.5), le modèle BRAB est le moins biaisé. Le modèle TONG sous-estime les valeurs des deux autres jeux de données, mais le biais reste en moyenne inférieur à 8%. Le classement par précision décroissante est LIM > BRAB > TONG, mais les deux premiers sont fort proches l'un de l'autre.

Tableau IV.5: Matrices d'exactitude (EM) et de précision (RMSE) des modèles "limoneux" (BRAB, TONG, LIM) par rapport aux différents jeux de données – prédition des teneurs en Zn

EM (mg/kg)	Modèles			RMSE (mg/kg)	Modèles		
	BRAB	TONG	LIM		BRAB	TONG	LIM
Données				Données			
BRAB	0.0	1.4	1.3	BRAB	4.6	5.3	4.9
TONG	-2.0	0.0	-3.1	TONG	7.1	4.1	6.1
LIM	0.5	4.0	0.0	LIM	6.2	7.6	5.9

Tableau IV.6: Matrices des critères d'exactitude (EM) et de précision (RMSE) des modèles "limoneux" (BRAB, TONG, LIM) par rapport aux différents jeux de données – prédition des teneurs en Ni

EM (mg/kg)	Modèles			RMSE (mg/kg)	Modèles		
	BRAB	TONG	LIM		BRAB	TONG	LIM
Données				Données			
BRAB	0.0	1.0	1.4	BRAB	3.3	3.5	3.7
TONG	-1.2	0.0	-0.5	TONG	3.9	3.1	3.3
LIM	-2.7	-1.0	0.0	LIM	6.1	4.9	4.7

Le modèle BRAB surestime les teneurs en Ni (tableau IV.6) dans les deux autres jeux de données. Les deux autres modèles sont meilleurs tant en terme d'exactitude que de précision.

Précédemment, les modèles BRAB ont été jugés pertinents pour la prédition des teneurs en Cu, Zn et Ni dans les horizons "brabantiens". Les comparaisons BRAB-TONG-LIM montrent que les régressions BRAB restent appropriées pour la prédition de Cu et Zn dans les horizons des sols limoneux, indépendamment de toute considération stratigraphique. La prédition des teneurs en Ni, par contre, peut être améliorée par l'utilisation du modèle TONG ou LIM.

Tableau IV.7: Matrices des critères d'exactitude (EM) et de précision (RMSE) des modèles "limoneux" (BRAB, TONG, LIM) par rapport aux différents jeux de données – prédiction des teneurs en Cr

EM (mg/kg)	Modèles			RMSE (mg/kg)	Modèles		
	BRAB	TONG	LIM		BRAB	TONG	LIM
Données				Données			
BRAB	-	0.2	4.0	BRAB	-	11.2	11.4
TONG	-	0.0	0.1	TONG	-	6.5	7.2
LIM	-	-1.3	0.0	LIM	-	14.7	14.4

Le modèle TONG pour la prédiction des teneurs en Cr (tableau IV.7) est meilleur que le modèle LIM en terme d'exactitude. Les deux sont relativement égaux en terme de précision. Les RMSE sont relativement élevées, en raison de la variabilité opératoire plus grande pour cet élément. On notera toutefois que les statistiques sont meilleures sur le jeu de données TONG là où les corrélations entre argile et Cr sont les mieux marquées. Ceci confirme qu'outre la variabilité opératoire, l'argile est le facteur principal de différenciation des teneurs en Cr.

Tableau IV.8: Matrices des critères d'exactitude (EM) et de précision (RMSE) des modèles "limoneux" (BRAB, TONG, LIM) par rapport aux différents jeux de données – prédiction des teneurs en Pb

EM (mg/kg)	Modèles			RMSE (mg/kg)	Modèles		
	BRAB	TONG	LIM		BRAB	TONG	LIM
Données				Données			
BRAB	0.0	-1.0	0.1	BRAB	4.2	3.9	3.8
TONG	-1.6	0.0	-3.6	TONG	1.9	3.5	3.7
LIM	-1.3	-1.6	0.0	LIM	4.3	4.3	3.9

Les modèles TONG et LIM sont plus précis que le modèle BRAB et le modèle LIM présente un minimum de biais sur le plus grand nombre de prédictions. Or le modèle LIM est celui qui se rapproche le plus d'une prédiction par la teneur moyenne, car la pente de la régression est faible. Le modèle TONG traduit une plus grande liaison entre Pb et argile mais il surestime le fond pédo-géochimique minéral en moyenne de 1 à 1.6mg/kg, ce qui reste raisonnable.

Tableau IV.9: Matrices des critères d'exactitude (EM) et de précision (RMSE) des modèles "limoneux" (BRAB, TONG, LIM) par rapport aux différents jeux de données – prédition des teneurs en Co

EM (mg/kg)	Modèles			RMSE (mg/kg)	Modèles		
	BRAB	TONG	LIM		BRAB	TONG	LIM
Données				Données			
BRAB	0.0	-0.1	-0.7	BRAB	1.2	1.3	1.4
TONG	0.3	0.0	-0.5	TONG	1.1	0.7	0.9
LIM	0.9	0.4	0.0	LIM	2.1	1.9	1.8

Pour Co, c'est le modèle TONG qui présente les indices d'exactitude et de précision les plus favorables.

L'intérêt des modèles BRAB n'avait pas été jugé significatif pour la prédition des teneurs en Cr, Pb et Co dans les limons "brabantiens", notamment en raison d'un manque de différenciation. Pour ces éléments, le recours aux modèles TONG s'avère pertinent pour la prédition d'un fond pédo-géochimique lié à l'argile.

Lorsque l'on fait le bilan des régressions argile-ETMs, on se rend compte que celles qui ont été établies sur base de la coupe de Tongrinne, soit peu de mesures mais bien différenciées, sont tout-à-fait satisfaisantes pour la prédition des teneurs en ETMs, sauf peut-être pour Zn dont un modèle BRAB ou LIM prédirait mieux les teneurs.

c Modélisation du fond pédo-géochimique minéral sur base des teneurs en Fe

Conformément à ce qui fut écrit au titre 7.2.2.1, une relation générale a été recherchée entre Fe et chaque ETM. Les équations figurent au tableau IV.10. Il n'y a pas de relation significative entre Fe et Pb à l'échelle générale. Celle qui figure au tableau IV.10 est celle établie sur base de la coupe de Tongrinne ($R^2 = 0.99$). La relation Fe-Cu a été établie sans tenir compte du jeu de données ASPI pour lequel un biais a été constaté.

Tableau IV. 10: Equations des droites de régression argile-Fe dans les jeux de données BRAB, TONG, LIM, RPG et ASPI (voir explications dans le texte).

Elément	Equations (Fe : g/100g ; ETMs : mg/kg)
Cu ^a	$Cu = 1.0 + 5.23 * [Fe]$
Zn	$Zn = 13.1 + 15.62 * [Fe]$
Ni	$Ni = -1.7 + 10.76 * [Fe]$
Cr	$Cr = 18.8 + 14.30 * [Fe]$
Pb ^b	$Pb = 11.4 + 2.02 * [Fe]$
Co	$Co = 3.3 + 2.71 * [Fe]$

^a Equation obtenue sans les données ASPI

^b Equation obtenue à partir des données de la coupe TONG.

Ces équations générales ont été appliquées aux différents jeux de données (BRAB, TONG, LIM, RPG, ASPI). Les résultats sont affichés en termes de critères d'exactitude (EM) et de précision (RMSE), de pourcentage de variance modélisée (R^2) et d'indice $sy/s\hat{y}$, au tableau IV.11.

La prédiction des teneurs en ETMs par l'intermédiaire de Fe n'est que légèrement biaisée et la précision est satisfaisante pour la majorité des éléments dans les différents jeux de données. On notera:

- l'absence de biais pour Zn, sauf pour les données TONG;
- les statistiques intéressantes pour Cr qui confirment les résultats obtenus sur les régressions avec l'argile;
- le manque d'intérêt de la régression Fe-Pb de la coupe TONG; Pb est prédit de façon plus précise dans un jeu de données par la teneur moyenne de ce jeu;
- dans les données BRAB, les moins différenciées, la régression générale est moins précise que la teneur moyenne pour Ni, Cr et Pb;
- les variabilités de Cu, Zn, Ni et Cr sont globalement bien reproduites pour les jeux de données TONG, LIM, RPG et ASPI.

Tableau IV.11: Critères d'exactitude (EM), de précision (RMSE) des équations générales pour les différents jeux de données "limoneux" (BRAB, TONG, LIM, RPG, ASPI) et les différents ETMs pour lesquels la régression avec Fe est significative ; pourcentage de la variance "expliquée" par la régression (R^2) et rapport des écarts-types mesurés et prédits.

EM	BRAB	TONG	LIM	RPG	ASPI
Cu	0.7	-0.8	0.1	-1.3	-
Zn	0.0	-2.9	0.1	0.0	0.1
Ni	2.0	0.3	-0.2	1.4	-1.9
Cr	3.3	0.9	-1.3	-0.1	-0.4
Pb	-0.7	0.0	-1.7	0.8	6.4
Co	-0.4	-0.3	0.0	0.1	0.2
RMSE	BRAB	TONG	LIM	RPG	ASPI
Cu	1.6	1.9	1.7	1.9	-
Zn	4.3	4.9	4.9	3.9	8.0
Ni	3.8	3.3	4.4	3.2	4.7
Cr	11.0	2.4	13.4	5.1	4.3
Pb	3.9	0.1	4.4	1.4	7.3
Co	1.3	1.3	1.9	0.9	5.3
R^2	BRAB	TONG	LIM	RPG	ASPI
Cu	0.29	0.67	0.68	0.57	-
Zn	0.25	0.88	0.65	0.63	0.76
Ni	0.10	0.67	0.62	0.57	0.74
Cr	0.00	0.89	0.17	0.49	0.69
Pb	0.01	0.98	0.07	0.68	0.00
Co	0.36	0.22	0.18	0.53	0.52
$s_y/s_{\hat{y}}$	BRAB	TONG	LIM	RPG	ASPI
Cu	2.15	1.01	1.34	0.97	-
Zn	2.00	1.28	1.23	1.01	1.22
Ni	1.98	0.89	1.52	0.94	1.07
Cr	4.56	0.78	2.38	1.28	1.08
Pb	11.90	0.90	4.35	2.10	2.09
Co	3.40	0.82	1.76	1.29	2.90

En rouge, RMSE supérieures ou égales à celles obtenues à partir de la prédiction par la teneur moyenne du jeu de données.

Par rapport aux régressions avec l'argile, les résultats des modèles Fe-ETMs sont caractérisés par des indices d'exactitude et de précision semblables (Ni, Cr, Co) ou plus favorables (Cu, Zn). La seule exception est Pb, pour lequel la régression sur base de l'argile présente une pertinence que n'a pas la régression avec Fe.

d synthèse relative aux comparaison de modèles.

Une dernière comparaison de modèles, appliqués sur le jeu de données LIM (les données les plus différencierées relatives aux sols limoneux de la région étudiée) fera office de synthèse générale. Ont été retenues la teneur moyenne du jeu de données, la régression avec l'argile pour le jeu de données, celle relative à la coupe de Tongrinne (la première référence au cours de ce travail), la régression générale avec Fe, une régression avec Fe élaborée sur les données ASPI (pour illustrer le biais existant entre certains jeux de données), ainsi qu'une régression multivariée élaborée pour les "sols loessiques" de la Région Nord-Pas-Calais (STERCKEMAN *et al.*, 2002b).

Les résultats des modèles peuvent être comparés en terme d'exactitude et de précision aux figures IV.6 et IV.7. Les résultats bruts se trouvent en annexe 8.

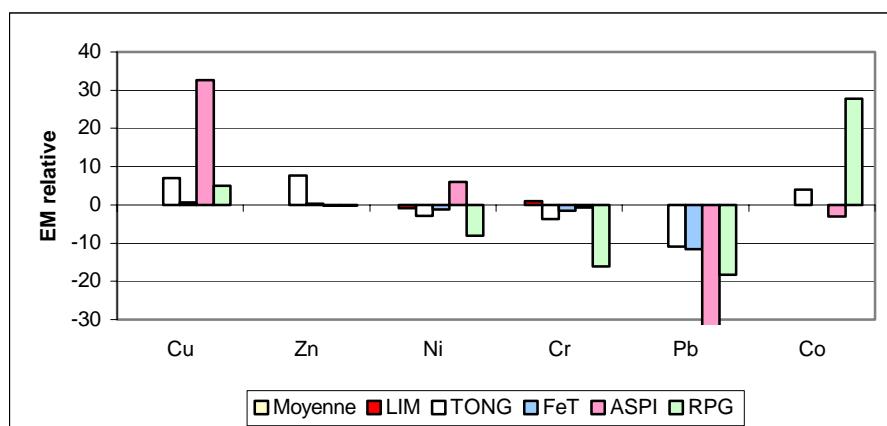


Figure IV. 6: Exactitude des prédictions des teneurs en ETMs dans le jeu de données LIM par rapport à la moyenne de ces données. EM = Erreur moyenne.

Les prédictions en règle générale sont peu biaisées (<10% de la teneur moyenne - figure IV.6). Le biais des données ASPI est clairement illustré pour les teneurs en Cu et en Pb. Pour ce dernier élément, l'ensemble des régressions testées présente un biais supérieur à 10%. d'une manière générale, la régression TONG est logiquement moins exacte que la régression LIM et la régression sur base de Fe est meilleure que la régression TONG. La régression RPG est acceptable pour Cu, Zn et Ni mais pas pour les trois autres éléments. Il convient toutefois de nuancer le constat pour Cr. La régression RPG est basée sur la seule variable argile et sa pente est du même ordre de grandeur que la régression TONG. Seule l'ordonnée à l'origine est différente entre les deux équations induisant un biais systématique. Outre les éléments Cu et Pb déjà évo-

qués, les ETMs restants sont relativement bien prédis par les régressions ASPI.

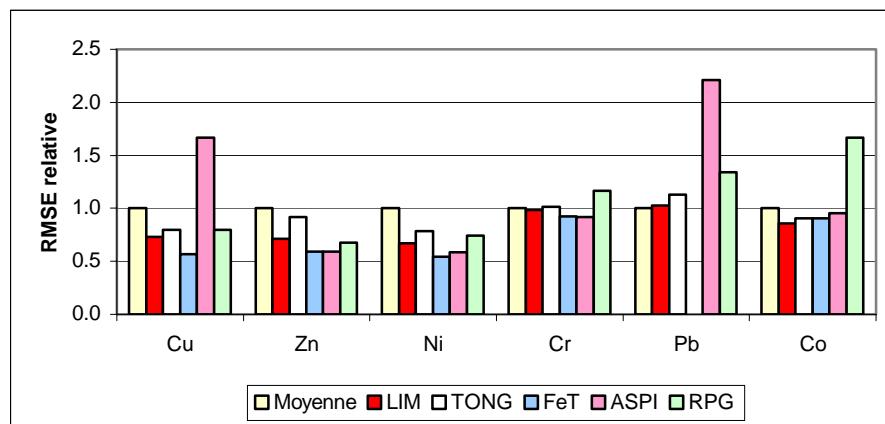


Figure IV. 7: Précision des prédictions des teneurs en ETMs dans le jeu de données LIM par rapport à la prédiction sur base de la moyenne des données.

En terme de précision, toutes les régressions sont plus intéressantes que la prédiction par la teneur moyenne sauf ASPI pour Cu et Pb, et RPG pour Cr, Pb et Co. Pour Pb, la meilleure prédiction reste la teneur moyenne. Pour Cr, seules les régressions sur base de Fe sont plus précises que la teneur moyenne. D'une manière générale d'ailleurs, les régressions avec Fe sont plus précises que les régressions sur base de l'argile².

7.2.1.3 Conclusions relatives à la modélisation du fond pédo-géochimique des sols limoneux.

Les différentes comparaisons de modèles de prédiction des teneurs en ETMs sur base de régressions ont montré que:

- les modélisations possibles sont nombreuses et peuvent être diversifiées (exemple pour les huit niveaux de modélisation BRAB) mais elles ne diffèrent pas pour autant en terme d'exactitude et de précision;
- les régressions simples sont aussi (voire plus) efficaces que les régressions multivariées, et il ne sert dès lors à rien de compliquer les modèles, si ce n'est pour la beauté du "sport";
- les différentes régressions sur base de l'argile fournissent des résul-

² en absence de biais évidemment (ex. Cu pour ASPI)!

tats comparables, toutefois les régressions TONG sont plus pertinentes que les régressions BRAB, particulièrement pour Cr et Co; pour Zn, par contre, la régression LIM semble la plus appropriée;

- les régressions sur base de Fe sont globalement meilleures que celles sur base de l'argile;
- la recherche de relations "universelles" à travers des familles de sols limoneux n'est pas aisée en raison de l'existence, pour certaines variables, de biais relevant des méthodes d'analyse ou de spécificités régionales (les Luvisols dégradés issus de limons anciens présentent un état d'altération que nous n'avons pas considéré dans notre étude), mais des relations Fe-ETMs satisfaisantes se dégagent néanmoins à cette échelle;

Les différents modèles de prédiction du fond pédo-géochimique en ETMs que nous retiendrons figurent au tableau IV.12.

Pour chaque élément, sont donnés :

- la teneur moyenne, tous horizons confondus, une équation de régression avec l'argile, une autre avec Fe (si les relations sont significatives);
- un demi-intervalle de confiance pour chaque estimation; dans le cas des régressions, l'intervalle de confiance correspond à celui d'un horizon présentant des teneurs en argile et en Fe moyennes (respectivement 22.5% et 2.5g/100g);
- une valeur limite (Lim_95) correspondant à la borne supérieure de l'intervalle de confiance sur la valeur estimée: (i) tous horizons confondus dans le cas de la prédiction par la moyenne, (ii) pour un horizon à teneurs en argile en Fe moyennes, ainsi que (iii) pour un horizon E (15% argile et 2 g/100g de Fe) et un horizon BT typiques (30% argile et 3g/100g Fe) dans le cas des régressions; une teneur supérieure à ces valeurs limites dans un sol "limoneux" peut être considérée comme ne relevant pas du seul fond pédo-géochimique lié à l'argile.

Tableau IV. 12: Estimations du fond pédo-géochimique des sols "limoneux", modèles, intervalles de confiance (IC95) et limite supérieure (Lim_95).

Elément	Modèle et IC95 ^a	Lim_95 (mg/kg) ^b
Mn	Mn = 480.2 ±190.8	671.0
Cu	Cu = 14.4 ± 5.5	19.9
	Cu = 5.5 + 0.351 * [argile] ± 4.6 ^a	18.0 (15.4 ; 20.6)
	Cu = 1.0 + 5.23 * [Fe] ± 3.5 ^a	17.6 (15.0 ; 20.2)
Zn	Zn = 52.5 ± 15.2	67.7
	Zn = 26.8 + 1.17* [argile] ± 11.3 ^a	64.3 (55.6 ; 73.1)
	Zn = 13.1 + 15.62 * [Fe] ± 11.1 ^a	63.2 (55.4 ; 71.0)
Ni	Ni = 25.6 ± 12.0	37.6
	Ni = 10.7 + 0.71 * [argile] ± 8.9 ^a	35.0 (29.7 ; 40.3)
	Ni = -1.7 + 10.76 * [Fe] ± 7.9 ^a	33.1 (27.7 ; 38.5)
Cr	Cr = 55.0 ± 27.2	82.2
	Cr = 18.8 + 14.3 * [Fe] ± 20.9 ^a	75.5 (68.3 ; 82.6)
Pb	Pb = 15.2 ± 7.7	22.9
Co	Co = 10.0 ± 3.9	13.9
	Co = 5.81 + 0.201 * [argile] ± 3.5 ^a	13.8 (12.3 ; 15.3)
	Co = 3.3 + 2.71 * [Fe] ± 3.2 ^a	13.3 (12.0 ; 14.7)

a: l'intervalle de confiance sur une valeur prédite dépend de la valeur de la variable indépendante (argile ou Fe);

b: IC correspondant à un "horizon moyen" et entre parenthèse à un horizon E (15% argile et 2.0g/100g Fe) et à un BT (30% argile et 3.0g/100g Fe).

7.2.2 Interprétation des teneurs dans l'horizon labouré

Après avoir évalué un fond pédo-géochimique lié à l'argile et au fer, nous pouvons tenter d'interpréter les teneurs dans l'horizon de surface.

Une série d'exercices ont été menés à partir d'une population de 312 horizons labourés, représentative des sols limoneux et sablo-limoneux de la zone d'étude. Ces horizons ont été sélectionnés sur base de leur teneur en Na total ($>0.55\text{g}/100\text{g}$).

Une majorité d'échantillons (211) proviennent de sols de type Aba, ce qui peut introduire un biais dans l'estimation de la moyenne générale si les moyennes entre séries de sols sont différentes. Les autres séries sont limoneuses (90), limono-caillouteuse (8) ou sablo-limoneuse (3).

L'objectif principal des exercices est d'élaborer un cadre d'interprétation des teneurs totales en terme de valeurs "habituelles" (BAIZE, 1997) et de valeurs aberrantes ou inhabituelles, *i.e.* des teneurs supérieures au niveau général rencontré dans les horizons labourés. Les exercices diffèrent principalement par l'utilisation ou non de variables "explicatives" pour guider l'interprétation, ainsi que par la nature de ces variables. Les résultats consisteront en propositions de valeurs-seuils au-dessus desquelles, à l'échelle régionale, les teneurs en ETMs pourront être qualifiées d'inhabituelles et éventuellement nécessiter une investigation plus poussée.

7.2.2.1 Approche globale non stratifiée

Lorsque l'on ne dispose d'aucun critère de stratification ni d'aucune mesure de variable "explicative", les teneurs en ETMs doivent être interprétées brutes.

L'estimation des valeurs-seuils a donc été réalisée directement sur la population. Deux estimateurs ont été retenus: la vibrisse supérieure, adoptée par BAIZE (1997) pour l'identification des valeurs abérrantes, et la valeur de la fonction de répartition normale à 0.95 [F(0.95)], *i.e.* telle que la probabilité de mesurer une teneur supérieure à cette fonction soit de 5%.

La vibrisse supérieure est calculée par: $Q_3 + 1.5 * (Q_3 - Q_1)$, où Q_1 et Q_3 représentent respectivement le premier et le troisième quartile de la population. Cette méthode présente l'avantage de ne pas supposer la normalité des données.

La fonction de répartition à 0.95 est basée sur une loi normale reconstruite à partir de la moyenne et de l'écart-type de la population. Elle

suppose la normalité de la population-parent. Pour remplir cette condition, les teneurs en Ni, Cr et Pb ont dû subir une transformation par le logarithme népérien (Ln). Les teneurs en Mn, Cu, Zn et Co n'ont pas contre été transformées³.

Les statistiques descriptives de la population d'horizons labourés ainsi que les estimations des valeurs-seuils figurent au tableau IV.13. Les teneurs moyennes et les limites à 95% relatives au fond pédo-géochimique minéral y figurent également à titre de comparaison.

Tableau IV. 13: Statistiques relatives à la population des horizons labourés limoneux: moyenne, écart-type, vibrisse supérieure et fonction de répartition à 0.95 [F(0.95)]; rappel des statistiques relatives au fond pédo-géochimique.

	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co
Moyenne	535.7	14.3	62.7	21.9	56.0	25.0	9.0
Ecart-type	69.2	2.5	9.7	7.1	18.8	4.2	1.5
Vibrisse	700.1	21.3	90.8	34.7	94.4	34.7	12.4
F(0.95)	649.5	18.4	78.6	33.1	90.0	32.6	11.5
Fond							
Moyenne	480.2	14.4	52.5	25.6	55.0	15.2	10.0
Lim_95	671.0	19.9	67.7	37.6	82.2	22.9	13.9

On constate que les teneurs moyennes en Cu, Ni, Cr et Co dans les horizons labourés sont très proches de celles des horizons plus profonds. Ceci signifie en première approche, qu'au niveau régional, il n'y a pas de contamination avérée en ces éléments dans l'horizon labouré. En réalité, nous savons ces éléments liés à l'argile et au fer et il se trouve que les niveaux moyens de teneurs en argile sont inférieurs en surface. Il est donc possible qu'il y ait eu accumulation des éléments considérés dans l'horizon labouré, mais cette accumulation est alors cachée par la diminution de la teneur en argile.

Si les teneurs moyennes en Mn sont supérieures dans l'horizon labouré, on se gardera bien de parler de contamination tant cet élément présente un comportement particulier. Il faut mettre cette différence de teneurs moyennes sur le compte de la présence fréquente d'un horizon BT dans

³ L'exigence de normalité n'est pas nécessaire pour estimer une probabilité, contrairement à d'autres tests ou estimations que nous avons dû réaliser. Ceci explique que nous ayons procédé à la normalisation des variables.

les sols limoneux, horizon BT qui ralentit le drainage des horizons sus-jacents et se trouve à l'origine de l'enrichissement moyen constaté en surface. On notera d'ailleurs que les valeurs-seuils à 95% des teneurs en surface sont inférieures à celles du fond minéral.

Les teneurs en Zn et Pb, par contre, traduisent bien une accumulation en surface. La différence entre surface et profondeur est en moyenne de l'ordre de 10mg/kg pour chacun des deux éléments.

Pour ce qui concerne la comparaison entre vibrisse et F(0.95), on constate que la seconde est systématiquement inférieure à la première, ce qui veut dire que l'approche "normale" est plus discriminante⁴. C'est le niveau de probabilité choisi pour l'approche normale qui conditionne ce résultat; les valeurs des vibrisses correspondent en effet à des niveaux de probabilité compris entre 0.970 et 0.998 en fonction de l'élément considéré.

7.2.2.2 Approche par régression

S'il est une règle d'or en matière d'analyse des données, c'est de tenir compte des informations disponibles. L'exercice précédent a donc été répété en utilisant des variables "explicatives" pour différencier les teneurs pédo-géochimiques modélisées des teneurs "résiduelles".

Une analyse factorielle réalisée sur les teneurs en ETMs et les variables argile, sable, Fe, COT et pH_{H2O} indique que le facteur principal de variation est granulométrique (30% de la variance totale). Les teneurs en argile et en sable s'opposent et les sables ont un effet diluant sur presque tous les ETMs sauf Mn et Pb (figure IV.8); Fe est très bien lié à l'argile.

Le deuxième facteur de variation (14%) oppose Pb et Zn à Cr et Ni (figure IV.8). On notera que COT pèse dans le sens de Pb et Zn tandis que les fractions granulométriques appuient dans l'autre sens. Il faut

⁴ On peut s'interroger sur le niveau de précision utile à donner à ces valeurs-seuils. BAIZE (1997) propose des FPGN dans un système où l'incrément vaut 2.5 (en pratique, avec les arrondis, cela donne une fois 3 et une fois 2; exemple 2, 5, 8, 10... sauf pour Cd évidemment). Nous sommes conscient que fixer un seuil à 32.6 plutôt qu'à 35mg/kg pour Pb ne se justifie pas d'un point de vue fonctionnel ou pratique. Toutefois, la vibrisse et la F(0.95) reposent sur des calculs effectués avec un niveau de précision donné et 35.0 n'a pas la même probabilité d'être dépassé que 32.6. Notre objectif n'étant pas la fixation de normes mais l'observation et la détermination de niveaux de contamination ou d'anthropisation de l'horizon labouré, nous avons fait le choix de conserver une décimale pour les valeurs-seuils.

donner à ce facteur une signification biogéochimique, l'augmentation des teneurs en COT dilue des éléments comme Cr et Ni et induit une concentration de Pb et Zn.

Le troisième facteur de variation (14%) oppose Co et COT, ce qui complète la logique du facteur précédent, à savoir que Co a tendance à être dilué par la matière organique.

Le quatrième axe factoriel (10%) concerne le $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, plus il est élevé plus les teneurs en ETMs sont faibles. Il convient de relativiser la signification de cet axe car les valeurs de $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ sont relativement homogènes entre 6.6 et 8.1.

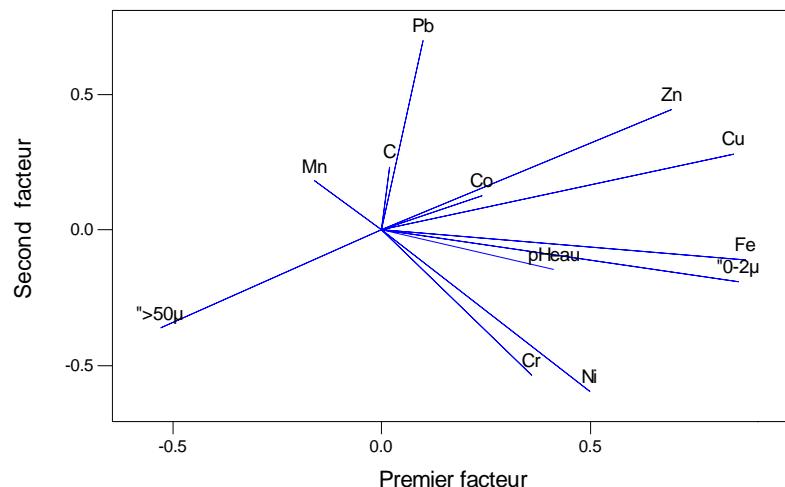


Figure IV. 8: Position des variables sur le plan factoriel principal: horizons labourés.

En vertu des résultats des comparaisons de modèles, nous avons retenu les régressions avec les teneurs en Fe pour modéliser le fond pédo-géochimique dans l'horizon labouré.

Pour Cu, Zn, Ni, Cr et Co, des teneurs pédo-géochimiques ont été estimées par régression. Pb et Mn ne présentant pas de relation significative avec les variables "explicatives", n'ont pas fait l'objet de régression. Le fond en ces deux éléments est estimé par les teneurs moyennes du tableau IV.12.

La vibrisse et la F(0.95) sont alors évaluées à partir des résidus de la régression et reformulées en teneurs totales moyennant la connaissance de la teneur en Fe.

Les résultats sont repris au tableau IV.14 et la figure IV.9 illustre les relations entre teneurs "nômiales" et les variables sable, COT et pH_{H2O}.

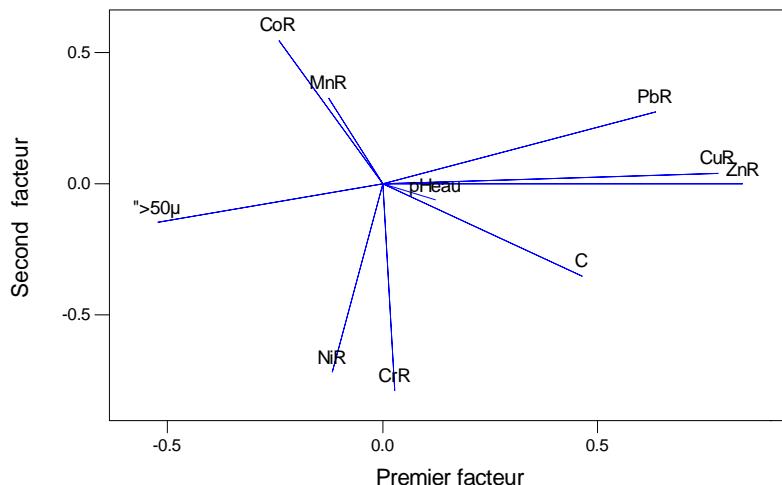


Figure IV. 9: Position des variables sur le plan factoriel principal: teneurs "nômiales" dans les horizons labourés.

Tableau IV. 14: Moyenne, écart-type, indice de concentration (Conc.), vibrisse supérieure et fonction de répartition à 0.95 [F(0.95)] des teneurs "nômiales"; évaluation de la F(0.95) des teneurs totales pour des échantillons présentant des teneurs en Fe de 2.0, 2.5 et 3.0g/100g .

Teneurs (N=312)	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co
- "nômiales"							
Moyenne	55.5	2.0	16.1	0.4	6.4	10.0	-0.1
Ecart-type	69.2	1.9	8.4	6.5	18.3	4.2	1.6
Conc.	1.12	1.17	1.36	1.04	1.15	1.66	1.0
Vibrisse	-	6.4	36.5	10.6	45.2	-	3.2
F(0.95)	-	5.2	29.8	12.2	34.0	-	2.4
- totales							
Fe = 2.0g/100g	-	16.7	77.9	22.9	81.4	-	11.1
Fe = 2.5g/100g	-	19.3	85.8	28.3	88.6	-	12.5
Fe = 3.0g/100g	-	21.9	93.6	33.7	95.7	-	13.8

On constate (figure IV.9) que (i) les résidus de la régression de Pb, Zn et Cu sont partiellement liées aux teneurs en COT, (ii) les teneurs en Ni et Cr sont bien liées, (iii) de même que les teneurs en Mn et Co. Les teneurs totales en Ni, Cr, Mn et Co émanent essentiellement du fond pédo-géochimique. Il se confirme que les teneurs en Co sont influencées par la dynamique de Mn, contrairement à celles de Ni et Cr.

La teneur "nômiale" moyenne (tableau IV.14) équivaut à l'enrichissement constaté en moyenne dans l'horizon labouré par rapport aux teneurs du fond pédo-géochimique; l'indice de concentration (teneur mesurée/teneur du fond) relativise l'accumulation par rapport au fond.

La F(0.95) en valeur totale est estimée pour des horizons à teneur en Fe égale à 2.0, 2.5 ou 3.0g/100g. Les valeurs de Fe retenues pour l'illustration correspondent, dans le contexte qui est le nôtre, à des teneurs en argile de l'ordre de 10, 20 et 30%.

En ce qui concerne les niveaux de teneurs du "nôme agricole", on constate que l'enrichissement en surface est insignifiant pour Ni et Co, compris entre 12 et 17% pour Mn, Cu et Cr, de l'ordre de 4/3 pour Zn et 5/3 pour Pb. Ceci infirme donc le constat de non-accumulation de Cu et Cr en surface réalisé au point précédent. Pour les autres éléments, le niveau d'enrichissement est confirmé, voire précisé pour Zn (accumulation moyenne de 16.5 plutôt que d'une dizaine de mg/kg).

On notera que les écarts-types des résidus des régressions ne sont que de peu inférieurs à ceux des teneurs totales. Ceci reflète les relativement faibles niveaux de corrélations entre Fe et les ETMs en surface. On imputera ces faibles niveaux de corrélation à la faible différenciation du fond pédo-géochimique lié à l'argile et au fer (l'amplitude de variation de Fe est de l'ordre de 1g/100g, ce qui équivaut à 5mg/kg pour Cu, 15mg/kg pour Zn, 11mg/kg pour Ni, 14mg/kg pour Cr et 3mg/kg de Co) et à l'anthropisation de l'horizon labouré .

Malgré la relative homogénéité du fond lié à l'argile et au fer, la prise en compte des relations entre Fe et ETMs permet d'affiner les valeurs-seuils et des teneurs jugées aberrantes au tableau IV.13 deviennent "habituelles" si l'on tient compte de leur teneur en Fe. Ainsi une teneur de 80mg/kg de Zn dans un horizon de surface limoneux est aberrante, sauf si la teneur en Fe est elle-même supérieure à 2.38g/100g, ce qui est le cas d'à peu près un quart des échantillons analysés. Seules les régressions avec Fe ont été présentées ici, mais la

démonstration aurait été la même avec les teneurs en argile.

7.2.2.3 Approche typologique

Les deux premiers exercices ne nécessitent aucune connaissance particulière en matière de pédologie. L'inventaire aurait tout aussi bien pu se baser sur un échantillonnage "aveugle", *i.e.* on ne s'intéresse pas à déterminer le type de sol. Mais il existe également sur la terre des gens à même de reconnaître une série de sols. Et l'objet de ce troisième exercice est de vérifier si la prise en compte de cette information est de nature à améliorer l'interprétation des teneurs en ETMs.

Cet exercice a été réalisé une première fois sur l'ensemble de la population des horizons labourés, indépendamment du caractère limoneux (COLINET *et al.*, 2002b, *cf* annexe 9). L'exercice permettait de conclure à la pertinence du critère "série de sols" pour la stratification d'un référentiel ETM.

Nous disposons d'un plus grand nombre de mesures des teneurs en Cr, Pb et Co qu'en 2002 et nous avons voulu refaire l'exercice dans un cadre moins différencié, celui des sols à texture limoneuse ou sablo-limoneuse. L'étude des toposéquences (chapitre 6) a indiqué que le facteur "série de sols" ne semblait pas être un critère pertinent de stratification pour Cu, Zn et Pb dans les sols limoneux. Ce point fera donc l'objet d'une vérification par l'intermédiaire de l'exercice présenté ci-après.

Des informations qualitatives liées à la nature des séries de la carte des Sols de la Belgique ont donc été testées en tant que critères de stratification de la population. La pertinence du critère de stratification s'évalue sur base de l'analyse de la variance. En cas de différences significatives entre les moyennes de groupes, on peut conclure à l'intérêt de la stratification. Ont été testés:

- la lithologie des matériaux (*i.e.* la distinction entre les sols sur substrat peu profond et les autres sols),
- la texture du profil (A: limoneuse; G limono-caillouteuse; L: sablo-limoneuse),
- l'intensité du drainage naturel (b: bien drainé; D: à drainage imparfait),
- le développement de profil (a: à horizon BT; a(b): à horizon BT tacheté; B: à horizon BT ou B de structure; b: à horizon B de structure; p: sans développement de profil -colluvions),

- la combinaison des quatre critères précédents, qui correspond à peu de choses près aux séries de sols.

Le détail des résultats se trouve en annexe 10. Nous les synthétisons comme suit:

- Il existe une différence significative entre les sols limoneux et le groupe composé des sols limono-caillouteux et des sols limoneux sur substrat pour les éléments Cu, Zn et Mn. Ce constat semble à première vue imputable au fond pédo-géochimique. Toutefois, cette hypothèse n'est pas confirmée par les teneurs en argile, en Fe ou en Ni. L'explication la plus plausible réside dans la gestion agricole des parcelles comme en témoignent les différences significatives de COT entre les deux groupes.
- Les sols à texture sablo-limoneuse présentent des moyennes de teneurs en Mn, Cu, Zn, Pb, Fe, argile et COT inférieures aux sols à texture limoneuse, ce qui est logique. Ces sols sont malheureusement trop faiblement représentés dans la population générale pour en tirer des conclusions.
- Le drainage n'est un critère de différenciation utile, du moins en apparence, que pour Co. Cette différenciation résulte à la fois de teneurs moyennes en Fe et en argile moins élevées dans les sols à drainage imparfait, ainsi que de teneurs en COT plus élevées. Il n'y a toutefois pas de lien causal entre l'intensité du drainage et ces différenciations, ce qui aurait contredit les résultats relatifs au drainage dans l'approche solum. Il s'agit ici du résultat d'un biais dans l'échantillonnage. La proportion de sols sur colluvions est en effet sensiblement plus importante dans la sous-population imparfairement drainée que dans celle à drainage normal.
- Outre les différenciations des sols à horizon B de structure, déjà évoquées par l'entremise des sols limono-caillouteux, on observe des différences significatives entre les sols à BT et les sols à BT tacheté pour les éléments Cu, Zn, Pb, pour Fe, l'argile et le pH. Cette différenciation s'explique essentiellement par l'ancienneté de mise en culture. En raison d'un défrichement plus récent, les sols à BT tacheté ont été épargnés par les phénomènes d'érosion d'une part, comme en témoignent les teneurs en argile plus faibles dans l'horizon labouré, et par les accumulations d'origine agricole d'autre part. Il s'agit donc essentiellement d'une différenciation entre les phases à horizon A (*i.e.* l'ensemble horizons A + horizons E, anciennement dénommés respectivement A₁ et A₂) épais (suffixe 0) et horizon A

mince (suffixe 1).

- Au sein du modèle limoneux (Aba-AbB-Abp), il n'est pas de distinction possible pour Mn et Cu, contrairement à Zn, Ni et Cr qui suivent les teneurs en Fe (inférieures dans les colluvions par rapport aux deux autres séries), et Pb et Co dont les teneurs sont légèrement plus élevées dans les colluvions. Pour Cu et Pb, ceci rejoint les conclusions tirées de l'approche toposéquentielle, à savoir une atténuation significative de l'importance du fond minéral dans l'horizon labouré suite aux apports d'intrants en agriculture. Pour Co, le constat est plus surprenant.
- En toute logique avec les points précédents, le critère série de sols est peu pertinent pour les séries limoneuses, considérées à l'échelle régionale. Nous retiendrons la différenciation Aba-Aba(b), qui repose sur des différences d'argile et d'ancienneté de mise en culture, ainsi que la différenciation des Abp pour Ni et Cr sur base des teneurs en argile et pour Co. Il convient de signaler que les séries regroupées sous le sigle ADp (*i.e.* des sols sur colluvions faiblement à modérément gleyifiés) présentent la même tendance que la série Abp pour les tous éléments sauf Co dont les teneurs reflètent le plus faible fond minéral. Toutefois, faute de représentativité suffisante des ADp, la tendance devinée n'est pas statistiquement significative.

Pour ce qui concerne les teneurs "nômiales" (détails en annexe 10), l'absence de la composante liée au fond pédo-géochimique induit la perte du caractère discriminant de Zn, Cr et Ni pour les Abp, de Cu pour les Aba(b) et une réduction notable de la pertinence de stratification pour Zn et Pb dans la même série. Ce qui signifie que les résidus de la régression par Fe sont indépendants des séries de sols. On notera toutefois que la différenciation des Abp est renforcée pour Pb et Co.

Le critère "développement de profil" est pour les séries de sols "limoneux" un indicateur de niveaux de teneurs en argile différents. Il présente donc une certaine pertinence comme critère de stratification des teneurs liées au fond pédogéochimique. Les teneurs moyennes en Fe et en argile dans les sols sur colluvions sont en effet significativement différentes de celles dans les sols des séries Aba et AbB. Pour les sols de type Aba, la prise en considération de la phase accentuerait probablement le potentiel discriminant des informations de la carte des sols. Pour ce qui concerne les teneurs totales, au niveau régional, les sols sont différentiables pour les éléments Zn, Cr et Ni selon le même

canevas que celui du fond pédo-géochimiqu. On constate également une accumulation de Pb et Co plus importante dans les sols sur colluvions à drainage normal par rapport aux autres sols⁵. En ce qui concerne Cu, par contre, la distinction des séries de sols limoneux ne se justifie pas. Quel que soit l'élément considéré, les teneurs "nômiales" sont difficiles à estimer précisément, si ce n'est par leur moyenne, car elles résultent d'un historique de gestion agricole que l'on ne peut pas connaître.

Le tableau IV.15. synthétise les informations relatives au fond pédo-géochimique estimé et aux teneurs totales pour (i) l'ensemble des séries à texture limoneuse sauf les Abp et (ii) les Abp.

La différenciation entre séries de sols reflète principalement des différences entre les moyennes des teneurs en argile. La différenciation des Aba(b) n'a pas été retenue en raison de son caractère davantage lié à la phase d'épaisseur des horizons A qu'à une différence entre types de profils. Dans le futur, le tableau IV.15 devrait d'ailleurs faire l'objet d'un complément de discrimination par la prise en considération de ces phases d'épaisseur.

L'intérêt de la différenciation des séries colluviales peut sembler à priori moins grand que la prise en considération des teneurs en Fe ou en argile de façon directe. Toutefois, l'intérêt majeur de la typologie réside dans sa couverture spatiale complète pour la zone étudiée et à une échelle détaillée. Les difficultés de mise en évidence de l'intérêt typologique au sein des limons, constatées également dans le cadre du projet POLLUSOL, sont liées à la variabilité des teneurs en argile au sein d'une série à l'échelle régionale.

⁵ Rappelons qu'en moyenne il n'y a pas d'accumulation de Co.

Tableau IV. 15: Différenciation du fond pédo-géochimique modélisé et des seuils de teneurs totales habituelles dans les sols "limoneux" en fonction des séries: (teneurs moyennes, écarts-types, indices de concentration (Conc.), vibrisse supérieure et fonction de répartition à 0.95 [F(0.95)] des teneurs totales.

	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co
(mg/kg)							
Fond pédo-géochimique modélisé (Sols limoneux: N = 245; Abp: N = 48)							
- Sols limoneux							
Moyenne ^a	480.2	12.4	47.2	21.8	50.1	15.2	9.2
Ecart-type	-	1.5	4.6	3.2	4.2	-	0.8
- Abp							
Moyenne	480.2	11.2	43.6	19.3	46.7	15.2	8.6
Ecart-type	-	1.3	3.8	2.6	3.5	-	0.7
Teneurs totales							
- Sols limoneux							
Moyenne	533.5	14.2	63.1	22.4	57.6	24.8	8.9
Ecart-type	66.3	2.4	9.4	6.8	18.8	4.3	1.6
Conc. ^b	1.11	1.16	1.34	1.03	1.15	1.63	0.97
Vibrisse	698.3	20.8	89.2	34.7	94.4	33.6	12.2
F(0.95)	642.5	18.1	78.5	33.7	88.4	31.9	11.5
- Abp							
Moyenne	-	-	59.2	18.8	48.3	27.4	9.6
Ecart-type	-	-	10.4	7.2	18.2	4.9	1.7
Conc. ^b	-	-	1.36	0.97	1.03	1.80	1.12
Vibrisse	-	-	86.5	25.1	79.9	40.2	13.8
F(0.95)	-	-	76.3	30.8	78.3	35.5	12.4

^a : Pour Mn et Pb, le fond est estimé par la moyenne des horizons de profondeur.

^b : indice de concentration = (teneurs mesurées / teneurs du fond pédogéochimique modélisé)

7.2.3 Conclusions

Les teneurs du fond pédo-géochimique et les niveaux de concentration de l'horizon labouré ont été étudiés à l'échelle régionale sur base des enseignements des étapes précédentes.

Différents modèles du fond géochimique ont d'abord été comparés et les résultats analysés dans l'optique de valider les modèles pour le fond pédo-géochimique. Ces comparaisons ont permis de conclure à l'intérêt de modèles simples basés sur des régressions avec l'argile ou le fer total. L'analyse de jeux de données externes a montré que les modèles basés sur Fe avaient une portée plus "universelle" que ceux basés sur l'argile en raison de la réduction des biais analytiques. Les modèles d'estimation du fond pédo-géochimique figurent au tableau IV.12.

L'application principale d'un référentiel régional pour les horizons labourés consiste à évaluer le niveau général des teneurs les plus fréquentes et à estimer des valeurs-seuils au-dessus desquelles une teneur peut-être qualifiée de suspecte, *i.e.* relevant soit d'anomalie naturelle, soit de contamination anthropique élevée ou encore d'erreur analytique, et mérite dès lors une certaine attention.

L'exercice mené sur une collection d'horizons labourés à dominance nettement limoneuse permet de donner des niveaux régionaux de teneurs en ETMs. La comparaison de ceux-ci aux teneurs générales de fond du tableau IV.12 ne permet de constater que les différenciations les plus évidentes, à savoir l'accumulation de Zn et Pb en surface. Des valeurs-seuils régionales sont données au tableau IV.13.

L'approche par régression a illustré l'intérêt de prendre en considération les informations relatives aux variables "explicatives" comme Fe et l'argile. Elle a permis d'évaluer les niveaux d'anthropisation par l'intermédiaire de l'indice de concentration, calculé sur base des valeurs du fond pédo-géochimique obtenues par l'utilisation des régressions évoquées précédemment. Par rapport à l'approche globale, l'approche par régression a mis en évidence l'accumulation modérée de Cu dans l'horizon labouré et a montré la double influence du fond pédo-géochimique et de l'anthropisation pour Cu et Zn. Autre apport des régressions, les valeurs-seuils peuvent être nuancées en fonction des teneurs en Fe ou en argile, selon les informations dont on dispose (tableau IV.14). La pertinence de la prise en compte du fond pédo-géochimique pour l'établissement de valeurs-seuils n'est tangible que parce que les niveaux de contamination en ETMs dans la zone d'étude sont modérés.

L'approche typologique s'est avérée moins pertinente que l'approche par

régression, en raison notamment du contexte très homogène de la zone d'étude. Au sein des séries de sols "limoneux", les séries de sols colluviaux se démarquent des autres, en raison principalement de teneurs moyennes en argile inférieures. La différenciation est cependant plus nette pour les teneurs du fond que pour les teneurs totales, car les séries Abp présentent des niveaux d'accumulation légèrement à sensiblement plus importants que les séries non-colluviales, à l'exception des éléments Ni et Cr. Des teneurs moyennes et des valeurs-seuils sont fournies pour les séries limoneuses non-colluviales et les séries colluviales au tableau IV.15. La moindre pertinence de la typologie de sols s'explique par la variabilité relativement importante à l'échelle régionale des teneurs en argile dans les horizons labourés d'une même série de sols. La question d'une expression des teneurs en argile dans les horizons de surface à travers des changements d'échelle et par la prise en compte de critères distinctifs supplémentaires dans la légende de la carte mérite certainement un complément d'investigation.

En raison de l'effectif de la collection d'échantillons, nous pouvons considérer que celle-ci est représentative de la situation des sols agricoles pour les séries limoneuses. Une question se pose en corollaire à l'évaluation de l'état des terres; elle concerne son suivi temporel et la sensibilité d'un référentiel à enregistrer des changements.

Cette sensibilité peut-être évaluée par le calcul des plus petites différences significatives (ppds) entre deux moyennes (DAGNELIE, 1975; BREJDA *et al.*, 2000). La première moyenne correspond à celle de l'inventaire actuel, la seconde à celle d'un inventaire futur. L'égalité des variances est supposée et l'exercice a été réalisé pour plusieurs effectifs d'inventaire. Les ppds ont été estimées pour les sols limoneux non-colluviaux ($N = 250, 50$ ou 20) et pour les sols colluviaux ($N = 50$ ou 20).

Les résultats figurent au tableau IV.16 tant pour les teneurs totales que pour les indices de concentration. Ils expriment pleinement la puissance du référentiel, plus grande pour les sols limoneux que pour les sols colluviaux, principalement en raison de la taille de l'effectif car les variances au sein de chacun des deux groupes de séries sont du même ordre de grandeur.

On retiendra que l'inventaire régional doit permettre de détecter une augmentation du taux de concentration dans l'horizon de surface inférieure à 10% pour Mn, Cu, Zn et Co (<12% pour les sols colluviaux) et comprise entre 10 et 20% pour Ni, Cr et Pb.

A titre d'exemple, si l'on s'attache aux sols "limoneux", la sensibilité du référentiel pour un nouvel inventaire basé sur 50 échantillons correspond à 12kg/ha de Zn, 24 kg/ha de Cr et 5.2 kg/ha de Pb. Sur base des compositions moyennes des produits valorisables en agriculture (tableau I.9), cela représente 80, 2 000 et 520 To de fumier de bovin (MS) ou 23, 1 000 et 40 To de boues d'épuration (MS).

Tableau IV. 16: Sensibilité du référentiel ETMs à détecter une évolution des teneurs (en mg/kg) ou de l'indice de concentration dans l'horizon labouré à l'échelle régionale ($\alpha=0.05$).

Teneurs totales	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co
- Sols limoneux							
N = 250	11.5	0.4	1.7	1.2	3.3	0.8	0.3
N = 50	19.5	0.7	2.9	2.1	6.0	1.3	0.5
N = 20	29.7	1.1	4.4	3.1	9.1	2.0	0.7
Sols colluviaux							
N = 50	31.4	0.9	4.2	3.0	7.4	2.0	0.7
N = 20	41.0	1.2	5.3	3.9	9.9	2.6	0.9
Indice de concentration	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co
- Sols limoneux							
N = 250	0.02	0.03	0.03	0.06	0.07	0.05	0.03
N = 50	0.04	0.04	0.05	0.10	0.12	0.09	0.05
N = 20	0.06	0.07	0.08	0.14	0.18	0.13	0.07
Sols colluviaux							
N = 50	0.07	0.07	0.10	0.13	0.15	0.13	0.09
N = 20	0.09	0.09	0.12	0.17	0.20	0.17	0.12

7.3 Approche spatiale du fond pédo-géochimique et du niveau d'anthropisation

Afin d'apporter des éléments de réponse à la question de la prédition spatiale des teneurs en ETMs, leur variabilité spatiale a été abordée à plusieurs échelles de perception.

Les notions de bases relatives à l'approche spatiale ont fait l'objet du point 4.3.3.

La fonction de semi-variance exprime la dissemblance entre deux points en fonction de la distance qui les sépare. Au cours de notre approche, des jalons virtuels ont été placés à des distances de 0, 25, 50, 100, 250, 500, 1 000, 2 500, 5 000 et 10 000 mètres. Ces écartements sont représentatifs de la variabilité à l'échelle de l'échantillon (variabilité opératoire), de la station (25, 50m), de la parcelle (100, 250m), du secteur (500, 1 000, 2 500m) et de la petite région naturelle (PRN – 5 000 et 10 000m).

L'estimation des semi-variances à l'échelle de la station repose partiellement sur l'échantillonnage réalisé selon des transects régionaux (*cf* titre 5.3.2 et figure II.37). Sur un certain nombre de sites de cet inventaire, des échantillons ont en effet été prélevés à une quinzaine de mètres de distance. Il s'agit là de sols de type Aba (CSB). La deuxième source de données est constituée de prélèvements effectués selon une grille à maille carrée de 20m de côté dans une parcelle agricole située près de Waregemme (à Boëlle; figure IV.10). Les sols sont de type Aba ou Abp (CSB).

L'étude de la variabilité à l'échelle parcellaire se base sur le maillage évoqué ci-dessus, sur les séquences étudiées au titre 6.4.1 ainsi que sur un ensemble de paires Aba-Abp prélevées dans 26 parcelles sur la zone d'étude. Un échantillonnage systématique réalisé à Corroy à partir d'une grille à maille carrée de 250m (VERSTRAETE [1994] - figure IV.10) alimente également en données ce niveau d'investigation.

La quantification de la variabilité à l'échelle du secteur repose sur les données des différents secteurs du bassin versant de l'Orneau, de Waregemme et de Corroy-le-Grand (localisation figure IV.10). Les caractérisations pédologiques de ces secteurs ont été réalisées dans le cadre de TFEs d'étudiants (respectivement WARIN [2000], MASSART [1993] et VERSTRAETE [1994]). A cette échelle, la variabilité concerne essentiellement des toposéquences. Toutefois, la grille systématique à maille de 250m apporte également son lot d'informations à l'échelle du

secteur.

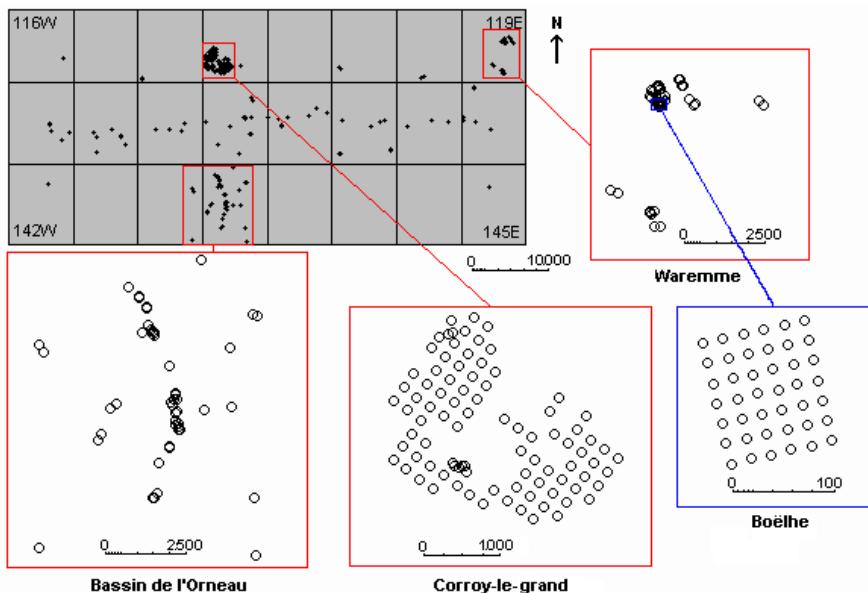


Figure IV. 10: Localisation des secteurs de l'Orneau, de Corroy, de Waremme, ainsi que de la parcelle de Boëlle par rapport à la zone d'étude (en gris).

Bien que les sols de type Aba soient sur-représentés, l'opposition Aba/Abp est présente dans les structures spatiales étudiées dès les échelles les plus détaillées. Un semi-variogramme expérimental a été obtenu (figure IV.11) après codage binaire du caractère "développement de profil" ($p = 1$; les autres sigles = 0). On peut constater sur le semi-variogramme que la semi-variance augmente à partir de 100m, signe que les deux classes de développement de profil entrent dans les comparaisons de points à partir de ces distances. On notera également qu'entre 400 et 500m de distance, les points comparés appartiennent à nouveau tous à la même classe. En l'occurrence, ce sont les sols sur colluvions qui font défaut. Il est dès lors possible que la semi-variance soit sous-estimée pour cette gamme de valeurs.

La structure spatiale des teneurs en ETMs et des variables "explicatives" sera analysée préalablement aux considérations relatives à la cartographie s.s. Ensuite, la faisabilité de la spatialisation sera évaluée, spatialisation directe (*i.e.* sur base des teneurs mesurées en ETMs) ou indirecte par l'entremise de régressions ou de stratification typologique, à l'instar des travaux réalisés dans le cadre de l'inventaire POLLUSOL.

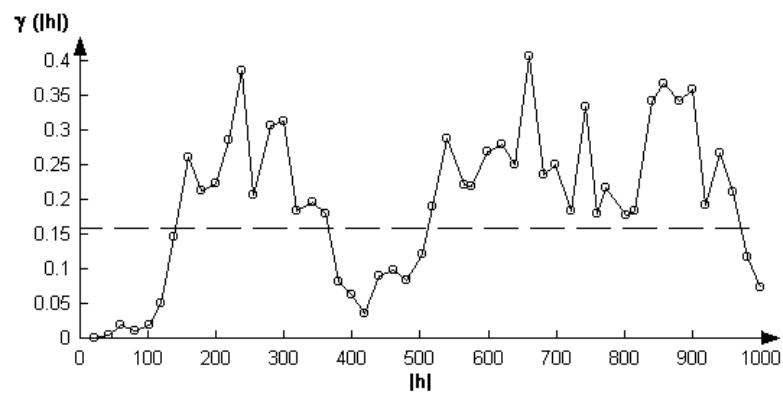


Figure IV. 11: Semi-variogramme expérimental relatif à la catégorisation du développement de profil pour les horizons labourés.

7.3.1 Analyse des structures spatiales

7.3.1.1 Visualisation des données

L'affichage cartographique des données est nécessaire pour vérifier qu'il n'existe pas de gradients spatiaux. Les cartes relatives aux ETMs ainsi qu'aux variables Fe, argile, sable, COT et $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ figurent en annexe 11.

Pour Zn, il est possible de suspecter l'existence d'une zone à teneur plus élevée, en bordure de Meuse à l'extrême Est de la zone étudiée (figure IV.12). Les résultats spatialisés des inventaires POLLUSOL et OWD montrent la même tendance. Pour les autres éléments, il n'apparaît à première vue aucune différenciation régionale.

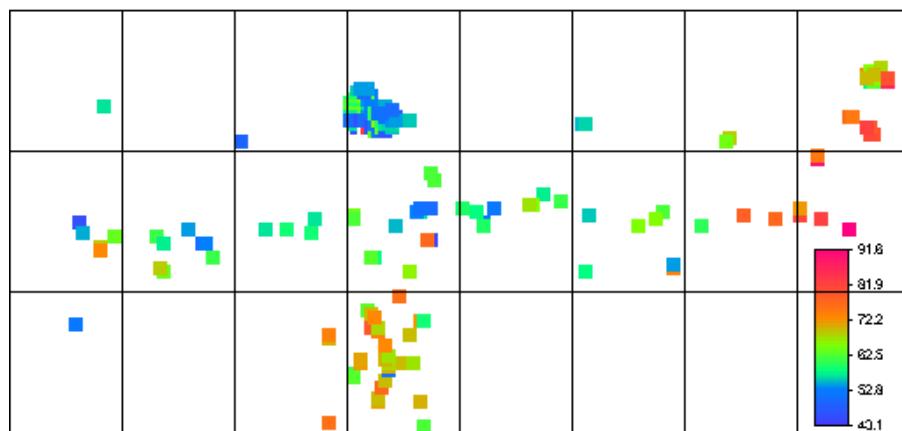


Figure IV. 12: Carte des teneurs mesurées en Zn (mg/kg) dans la zone étudiée.

Pour ce qui concerne les relations entre ETMs et variables "explicatives", elles sont évidemment les mêmes que celles décrites au titre 7.2.2.2 (approche régionale par régression): influences principales de la granulométrie ou de Fe (Cu, Zn, Ni, Cr, Co) et de COT (Cu, Zn, Pb).

Pour chaque élément, il existe une composante aléatoire (ou non expliquée par les régressions) de la variabilité qui n'est pas négligeable. A titre d'illustration, les cartes de Fe, du "nôme" Zn-Fe et des résidus de la régression de Zn par Fe et COT sont présentées ci-après.

La carte de Fe (figure IV.13), aux facteurs de la régression près, donne une image du fond pédo-géochimique en Zn.

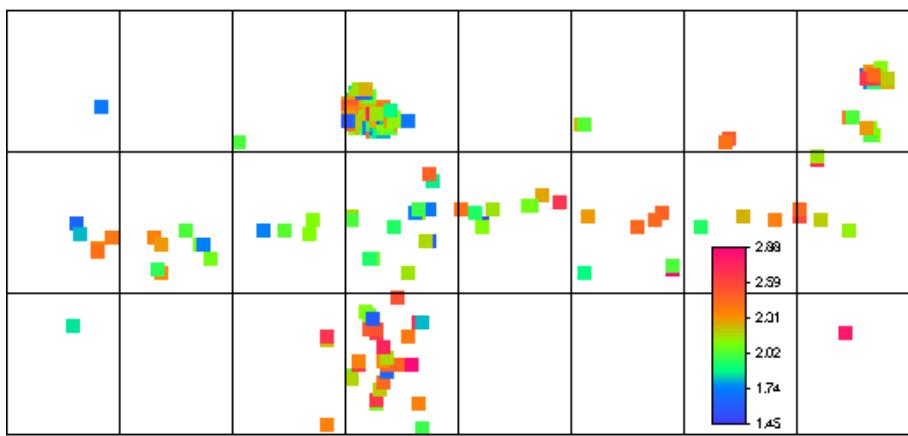


Figure IV. 13: Cartes des teneurs mesurées en Fe (g/100g) dans la zone étudiée. La variabilité des teneurs en Fe n'explique qu'une partie de celle des teneurs en Zn (figure IV.10).

La carte des teneurs "nômiales" (figure IV.14) exprime les écarts par rapport à la régression par Fe. Ceux-ci sont pour partie liés aux teneurs en COT, à des spécificités régionales et à une anthropisation différenciée.

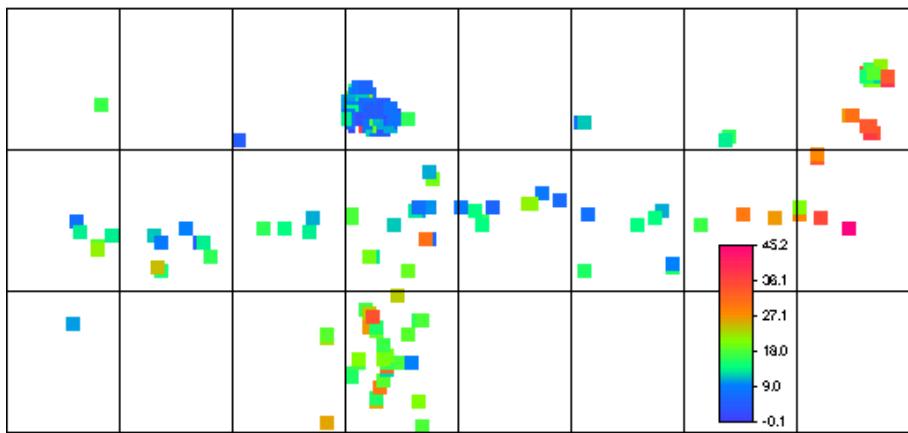


Figure IV. 14: Cartes des teneurs "nômiales" (résidus de la régression par Fe) en Zn (mg/kg) dans la zone étudiée.

Les résidus de la régression par Fe et COT (figure IV.15) constituent une composante aléatoire, non modélisable par les variables "explicatives". On constate à nouveau que la partie à l'est de la zone d'étude se singularise par des teneurs élevées, qui pourraient être liées à des contaminations industrielles, atmosphériques ou sous forme d'intrants agricoles.

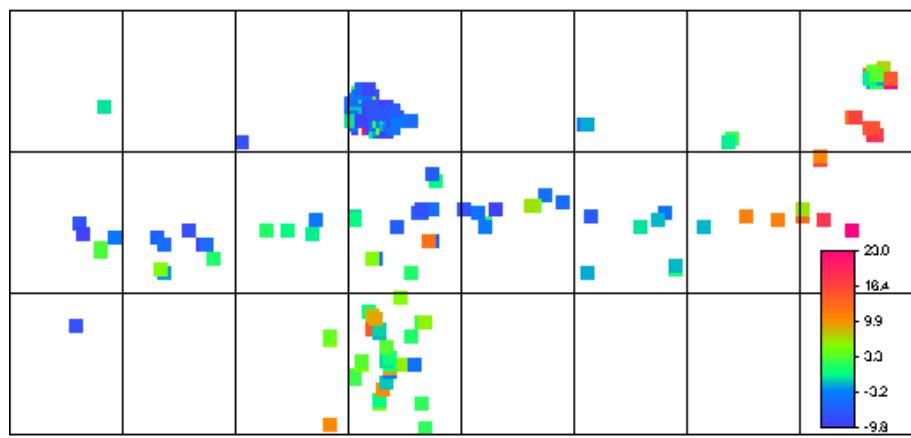


Figure IV. 15: Cartes des résidus de la régression de Zn (mg/kg) par Fe et COT.
Les points situés à l'est de la carte présentent des valeurs non-négligeables.

7.3. 1.2 Echelles spatiales de variabilité

Les semi-variances relatives aux distances évoquées en introduction ont été évaluées pour les différentes teneurs en ETMs et les variables "explicatives": Fe total, argile, sable, COT et pH_{H2O}. Les résultats figurent aux tableaux IV.17 et IV.18 ; ils correspondent à des semi-variances relatives (par rapport à la semi-variance maximum) évaluées sur base des semi-variogrammes modélisés. L'ensemble des modèles et des semi-variogrammes figurent en annexe 11.

Tableau IV.17: Semi-variances relatives, à différentes échelles spatiales, pour les variables Fe total, argile, sable, COT - [g/100g]² - et pH_{H2O}

Echelle - (m)		Fe	"0-2µm"	>50µm"	COT	pH _{H2O}
Pépite	0	0.16	0.16	0.12	0.14	0.07
Station	25	0.40	0.43	0.19	0.22	0.12
	50	0.62	0.67	0.26	0.29	0.18
Parcelle	100	0.94	0.97	0.39	0.44	0.28
	250	1.00	1.00	0.75	0.77	0.58
Secteur	500	1.00	1.00	1.00	0.95	0.93
	1 000	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	2 500	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
P.R.N. ^a	5 000	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	10 000	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

^a P.R.N.: Petite Région Naturelle

Fe et argile présentent la même structure spatiale (tableau IV.17). L'effet pépite vaut environ 16% de la variance totale, près de 2/3 de celle-ci est acquise à l'échelle de la station et la totalité à l'échelle de la parcelle. La portée est en effet de l'ordre de 120-130m. Cette structure spatiale commune correspond à la différenciation entre les sols limoneux de type Aba et les sols colluviaux. Il est logique que le seuil de semi-variance soit atteint à l'échelle des parcelles agricoles car il est fréquent d'observer les différentes formes principales (planes, convexes, concaves) du modèle limoneux au sein d'une même parcelle. Le semi-variogramme de l'argile et les données expérimentales sont représentés à la figure IV.16.

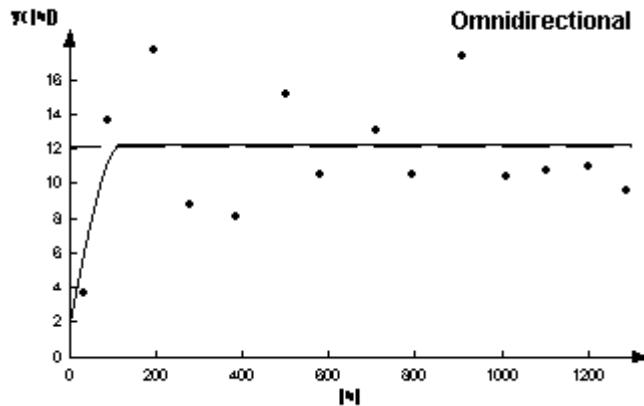


Figure IV.16: Semi-variogramme modélisé (ligne continue) et données expérimentales (points) relatifs aux teneurs en argile pour les horizons de surface (pépite: 2.0 [g/100g]^2 ; seuil: 12.2 [g/100g]^2 ; portée 117m)

Les teneurs en sable et en COT, ainsi que le $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ sont caractérisés par des portées plus longues. Selon ENGELS (1998), la variabilité spatiale serait liée à la parcelle pour COT et à l'exploitation (agricole) pour $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$. Nos résultats indiquent l'existence d'une autocorrélation entre parcelles voisines pour ces deux variables mais nous ne disposons pas de l'information suffisante pour juger s'il s'agit réellement d'un facteur "exploitation agricole".

Dans le cas de la variable COT, la semi-variance est estimée par un modèle gigogne⁶ qui différencie variabilité à l'échelle de la parcelle et à l'échelle du secteur (figure IV.17). On notera que pour des distances de 500m, la semi-variance équivaut déjà à 95% de la variabilité maximum.

Pour ce qui concerne les teneurs en sable et le $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, la différenciation se joue également principalement à des distances inférieures à 500m. C'est à la fois la transition entre Aba et Abp et celle de la région limoneuse vers la région sablo-limoneuse qui conditionnent la structure spatiale des teneurs en sable. Le pH est pour partie sous l'influence de la différenciation entre Aba et Abp et pour une autre partie conditionné par la gestion agricole.

Dans les sols limoneux, la variabilité des paramètres explicatifs à l'échelle de la parcelle est proche de la variabilité maximum.

⁶ Plusieurs structures emboîtées sont modélisées.

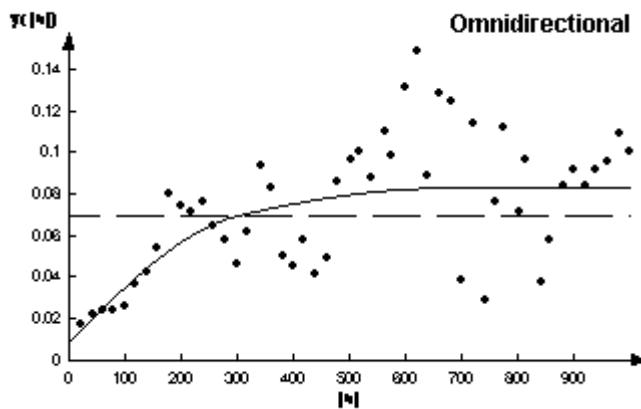


Figure IV.17: Semi-variogramme modélisé (ligne continue) et données expérimentales (points) relatifs aux teneurs en COT pour les horizons de surface (pépite: 0.01 [g/100g]^2 ; palier_1: 0.04 [g/100g]^2 ; portée_1: 300m; palier_2: 0.07 [g/100g]^2 ; portée_2: 720m)

Tableau IV.18: Semi-variances relatives, à différentes échelles spatiales, pour les teneurs en ETMs - [mg/kg]²

Echelle - (m)		Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co
Pépite	0	0.23	0.08	0.11	0.55	0.23	0.14	0.04
Station	25	0.25	0.21	0.17	0.57	0.25	0.22	0.09
	50	0.28	0.33	0.23	0.59	0.28	0.30	0.14
Parcelle	100	0.34	0.50	0.33	0.64	0.32	0.46	0.25
	250	0.51	0.53	0.38	0.76	0.45	0.85	0.49
Secteur	500	0.76	0.55	0.39	0.92	0.65	1.00	0.57
	1 000	1.00	0.59	0.42	1.00	0.89	1.00	0.61
	2 500	1.00	0.70	0.48	1.00	1.00	1.00	0.71
P.R.N. ^a	5 000	1.00	0.86	0.59	1.00	1.00	1.00	0.86
	10 000	1.00	1.00	0.79	1.00	1.00	1.00	1.00

^a P.R.N.: Petite Région Naturelle

Les teneurs en Mn (tableau IV.18) présentent un effet pépite relativement important (près d'1/4 de la variance totale). Le reste de l'auto-corrélation se distribue à peu près équitablement dans les gammes de distance 50-250m, 250-500m et 500-1 000m.

Les éléments Cu et Zn présentent tous deux, en plus de l'effet pépite, une structure spatiale à courte distance et une structure spatiale à longue distance (exemple pour Zn à la figure IV.18). La structure à courte distance (< 150m) peut être interprétée comme le résultat de la dépendance de ces deux éléments avec les teneurs en argile. La structure à longue distance (10 000m pour Cu, 20 000m pour Zn) résulte de la différenciation du niveau de concentration de l'horizon labouré entre PRN pour ces éléments.

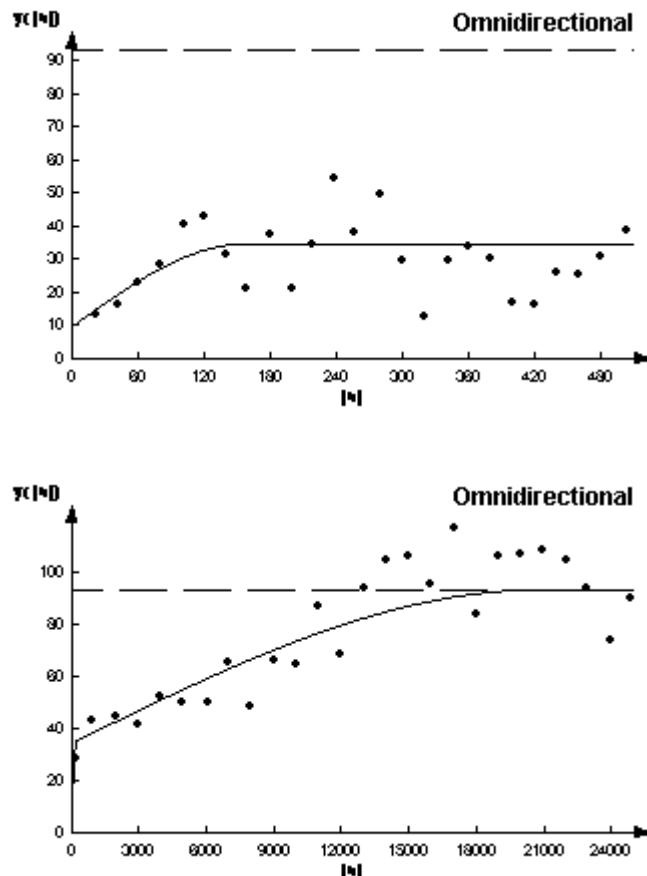


Figure IV. 18: Semi-variogrammes modélisés et données expérimentales relatifs aux teneurs en Zn ($[mg/kg]^2$) à courte distance (haut) et à longue distance (bas).

La variabilité pépitique des teneurs en Ni est relativement importante (>50% de la variabilité totale). Une seule structure spatiale est observable, avec une portée de l'ordre de 800m. Il est probable que la variabilité pépitique cache une structure spatiale liée aux teneurs en argile.

Cr présente deux structures spatiales à longues portées (1 000 et 2 600m). La première est assez proche de celle de Mn, sans qu'il faille y voir de corrélation.

Pb et Co présentent tous deux une structure d'auto-corrélation à courte distance (400m). Une seconde structure existe toutefois pour Co avec une portée de l'ordre de 10 000m comme pour Cu. La variabilité est donc liée à l'échelle de la parcelle pour Pb, tandis qu'une part non négligeable (30%) de la semi-variance de Co concerne uniquement les gammes de distance supérieures à 2 500m.

La soustraction des teneurs du fond pédo-géochimique, estimées par régression avec Fe, entraîne la disparition des structures spatiales à courte distance pour Cu, Zn, Ni et Co (voir semi-variogrammes en annexe 11). Les structures spatiales à longue distance sont par contre conservées, ce qui confirme que le facteur explicatif pour les longues distances n'est pas lié au fond pédo-géochimique, du moins tel que nous l'avons modélisé.

7.3.1.3 Variabilité à l'échelle de la station

L'existence d'une auto-corrélation à l'échelle de la station, du site de référence, de l'observatoire peut être une source de difficultés techniques dans le cadre d'essais ou de suivis expérimentaux. En premier lieu, l'utilisation des statistiques classiques comme l'analyse de la variance ou la régression reposent sur l'indépendance des échantillons, condition qui n'est pas remplie en cas d'auto-corrélation significative. Le caractère d'indépendance nécessite que les observations soient distantes d'au moins la portée du variogramme. La quantification de celui-ci peut donc s'avérer utile pour indiquer s'il existe un risque qu'une méthode statistique ne soit pas adaptée (BHATTI *et al.*, 1991). A l'opposé, une forte variabilité spatiale (et temporelle) peut gêner la détection de changements temporaux ou la mise en évidence de l'effet d'un traitement en expérimentation (un exemple est donné par MICHELIN *et al.* [2002] par rapport au bilan d'épandages de boues en agriculture) et l'intérêt est alors à la recherche d'une distance la plus courte possible (RÖVER et KAISER, 1999). Une fois encore, la connaissance du semi-variogramme peut être utile⁷ pour évaluer le niveau de sensibilité d'un dispositif expérimental à mesurer un changement ou un effet.

⁷ utile mais pas indispensable pour autant si l'on se base sur la méthodologie mise en place dans le cadre du suivi de l'accumulation en Cu et Zn sur une parcelle de l'Observatoire de la qualité des sols (LEGROS *et al.*, 2002).

Dans tous les cas, des références sont nécessaires quant aux niveaux de variabilité existant pour cette gamme d'échelles spatiales. Les résultats des tableaux IV.17 et IV.18 constituent des premières estimations de ces niveaux de variabilité pour les sols limoneux. Il existe peu d'études relatives à la variabilité des teneurs en ETMs à cette échelle, contrairement aux paramètres liés à la matière organique, au pH, aux éléments "disponibles" ou aux propriétés structurales (ARROUAYS *et al.*, 1997; BRAGATO et PRIMAVERA, 1998; TESSIER *et al.*, 1998; TSEGAYE et HILL, 1998; RÖVER et KAISER, 1999;). Les comparaisons sont dès lors difficiles. Les résultats de la séquence d'Elnes, étudiée par CORDIER (1999) pour le RPG Nord-Pas-de-Calais et qui ne compte malheureusement que 10 points espacés de 30m, sont très semblables à la semi-variance calculée à 25m pour Fe, Mn, Cu et Zn. Les semi-variances pour Ni et Cr sont nettement inférieures dans les données CORDIER; celle pour Pb est inférieure en valeur absolue mais identique en valeur relative et la semi-variance de Co est supérieure chez CORDIER. Nous noterons également que dans un contexte nettement plus différencié (Massif central - France), BOURENNANE *et al.* (2003) obtiennent des semi-variances relatives du même ordre de grandeur pour Cr, supérieures pour Co et nettement inférieures pour Fe. Il est donc possible que la semi-variance à l'échelle de la station soit surestimée pour Ni et Cr, mais pour les autres éléments, les données du tableau IV.18 semblent cohérentes.

7.3.1.4 Variabilité à la parcelle

La parcelle agricole apparaît être un niveau-clé par rapport aux échelles spatiales de variabilité. La variabilité de l'ensemble des paramètres "explicatifs" s'y trouve fortement exprimée ainsi qu'une part importante de celle des ETMs (tableaux IV.17 et IV.18).

L'importance relative de la variabilité à cette échelle trouve son origine dans l'organisation des sols selon le relief qui y est pleinement exprimée. Le problème de la comparaison entre Aba et Abp a déjà été abordé sous deux angles. Dans l'approche "toposéquence", les deux séries ont fait l'objet de comparaisons multiples. Nous pouvions conclure à une différence nette pour ce qui concerne les profils de teneurs et le niveau moyen à l'échelle du solum. Nous avions également souligné que l'horizon labouré présentait une certaine homogénéisation des teneurs pour Cu, Zn et Pb et nous avions présumé que *le critère "série de sols" n'a plus guère d'intérêt comme facteur de stratification en sols limoneux*. Cette hypothèse ne fut que partiellement confirmée par l'ap-

proche "référentiel typologique régional". En effet, car, pour peu importantes que paraissaient les différences entre séries de sols, la différenciation des Abp n'en était pas moins statistiquement significative. Nous avions également évoqué un problème d'échelle de perception des différences entre séries de sols, la variabilité des teneurs en argile à l'intérieur des séries étant relativement importante à l'échelle régionale. La comparaison des séries Aba et Abp a été approfondie à l'échelle de la parcelle agricole.

Vingt-six parcelles distribuées dans l'ensemble de la zone étudiée ont été échantillonnées. Dans chacune d'elles, l'horizon labouré a été prélevé sur un Aba et sur un Abp. Un test de nullité de la moyenne des différences de teneurs en ETMs entre Aba et Abp a été réalisé. Les résultats figurent au tableau IV.19, sous la forme d'une différence moyenne de teneur ($[Aba] - [Abp]$), de l'écart-type de ces différences et de leur niveau de signification statistique.

Tableau IV. 19: Différences de teneurs en argile (g/100g) et en ETMs (mg/kg) dans l'horizon labouré entre Aba et Abp à l'échelle de la parcelle agricole: moyennes, écarts-types et niveau de signification.

	[0-2µm]	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co
Moyenne	5.6	30.5	1.6	4.3	3.3	3.3	-2.9	1.0
Ecart-type	3.5	154.4	2.3	9.1	4.0	7.3	5.2	1.1
Niveau α	***	NS	**	*	***	*	**	***

Niveau α : *** très hautement significatif; ** hautement significatif; * significatif; NS non significatif.

Comme on peut le constater au tableau IV.19, la différenciation entre les deux séries est prononcée pour les teneurs en argile, en moyenne un Abp présente 5.6 g/100g de moins qu'un Aba situé dans la même parcelle. La différenciation entre les deux séries est significative également pour l'ensemble des éléments, à l'exception de Mn. Les teneurs en Cu, Zn, Ni, Cr et Co sont plus élevées dans l'Aba, celles en Pb dans l'Abp.

Par rapport à l'approche "référentiel typologique régional", on retrouve les mêmes constats pour Mn, Zn, Ni, Cr et Pb avec les mêmes ordres de grandeur de différences entre les deux séries. L'approche "typologie à la parcelle" montre par contre que les différenciations en Cu et en Co sont significatives aussi et qu'elles respectent la logique du fond pédo-géochimique. Nous pouvons dès lors conclure à l'intérêt de la typologie des sols "limoneux" comme facteur de stratification de l'horizon labouré à l'échelle d'une parcelle agricole. Les teneurs en Ni, Cr et Co sont gouvernées par le fond pédo-géochimique; Cu et Zn par le fond et les

apports organiques; Pb par le facteur organique.

L'influence du relief à l'échelle de la parcelle n'est pas sans conséquences non plus pour ce qui concerne le traitement géostatistique des données. En effet, le relief est un facteur de dérive ("drift") ce qui entraîne que la valeur attendue de la teneur en un élément n'est pas constante sur la totalité de la surface de la parcelle. En pratique, il faut modéliser la dérive par rapport aux coordonnées X et Y, soustraire cette dérive des données brutes et analyser le variogramme par rapport aux résidus.

Ces opérations ont été appliquées sur la parcelle de Boëlhe (*cf* localisation à la figure IV.10). A titre illustratif, les résultats vont être présentés pour Zn et Pb. Les informations d'ordre topographique et "carte des sols" sont présentées à la figure IV.19; les données brutes à la figure IV.20; les relations entre les teneurs en Zn et les variables X et Y à la figure IV.21 et le variogramme des résidus à la figure IV.22. Les résultats non-présentés ici figurent en annexe 12.

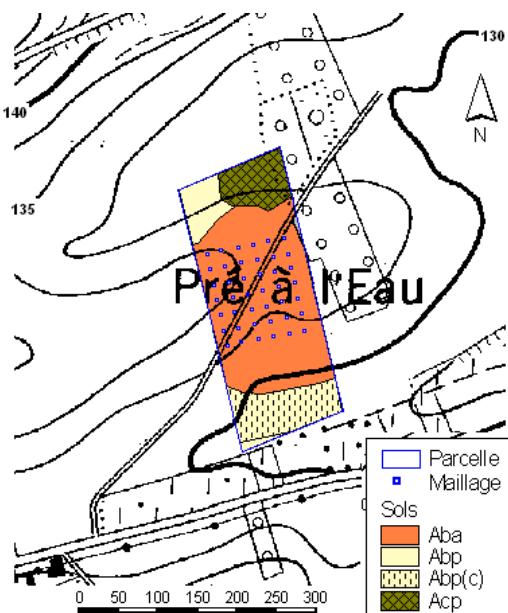


Figure IV. 19: Extraits de carte topographique (IGN- 47/2) et de carte des sols (119E) relatifs à la parcelle de Boëlhe.

Le maillage dans la parcelle est situé en position sommitale d'un interfluve légèrement bombé. Les limons éoliens reposent en couverture (5 à 10 mètres d'épaisseur) sur des sables fins peu glauconifères datant de l'éocène supérieur (étage tongrien en Belgique). Malgré l'homogénéité cartographique, un gradient décroissant d'argile, du sommet de l'interfluve vers les bas de pente, est observé sur le terrain.

Ce gradient d'argile est perceptible également (et heureusement) à travers les résultats analytiques (voir cartes en annexe). Les teneurs en Zn expriment clairement l'influence du fond pédo-géochimique minéral tandis que les teneurs en Pb sont légèrement plus élevées dans les zones basses du relief (figure IV.20).

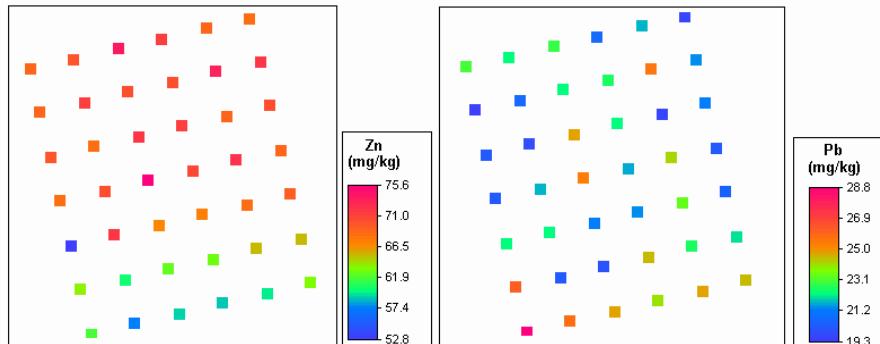


Figure IV. 20: Cartes des teneurs (mg/kg) mesurées en Zn (gauche) et en Pb (droite) dans la parcelle de Boëlhe.

Les gradients de teneurs liés à la topographie peuvent être modélisés par régression. Dans ce cas d'étude, le gradient topographique suit approximativement une direction Nord-Sud et la seule coordonnée Y (en mètres dans le système Lambert) suffit (figure IV.21).

Dans le cas de Zn et Pb, les résidus de la régression ne présentent plus de structure spatiale, comme en attestent leurs semi-variogrammes (figure IV.22). Les résidus peuvent donc être considérés comme aléatoires et indépendants, et sont de moyenne nulle.

Les valeurs prédictives suivent donc un modèle très simple et la variance résiduelle de la régression sert de base à l'estimation d'un intervalle de confiance sur chaque teneur prédictive. Teneurs estimées et intervalles de confiance (à 0.05) pour Zn et Pb sont donnés à titre illustratif à la figure IV.23. Les "structures spatiales" de Zn et Pb sont logiquement antithétiques, au facteur d'échelle près; celles des intervalles de confiance sont par contre identiques pour les deux éléments (toujours au facteur d'échelle près!).

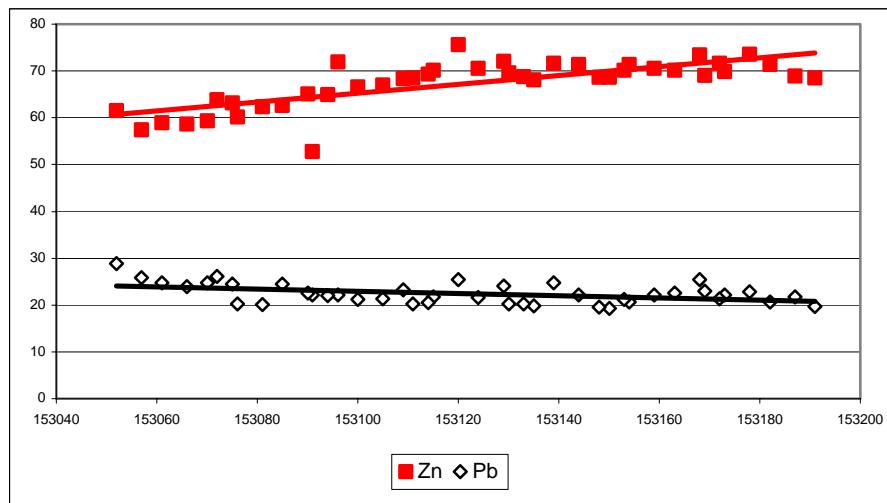


Figure IV.21: Relations entre teneurs en ETMs (Zn et Pb en mg/kg en ordonnée) et la latitude (Y en mètres en abscisse).

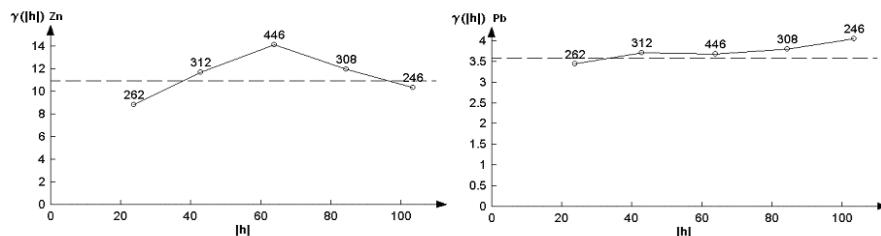


Figure IV.22: Semi-variogrammes des résidus des régressions Zn-Y (gauche) et Pb-Y ($[mg/kg]^2$).

Ces modèles présentent quelques simplifications, peut-être abusives. Ainsi, des régressions curvilinéaires avec les coordonnées Y pourraient être plus judicieuses. Pour d'autres éléments, il y a lieu de tenir compte également des coordonnées X; pour d'autres encore, la différenciation n'est pas plus importante à l'échelle de la parcelle qu'à celle de la maille. Il n'en est pas moins vrai qu'à l'échelle de la parcelle, la variabilité spatiale des teneurs en ETMs apparaît déterminée par le relief. La stratification sur base de la carte des sols, qui exprime la topographie par le critère "développement de profil" ou la régression avec des paramètres traduisant le relief sont dès lors autant d'approches pertinentes de la spatialisation des teneurs en ETMs à cette échelle.

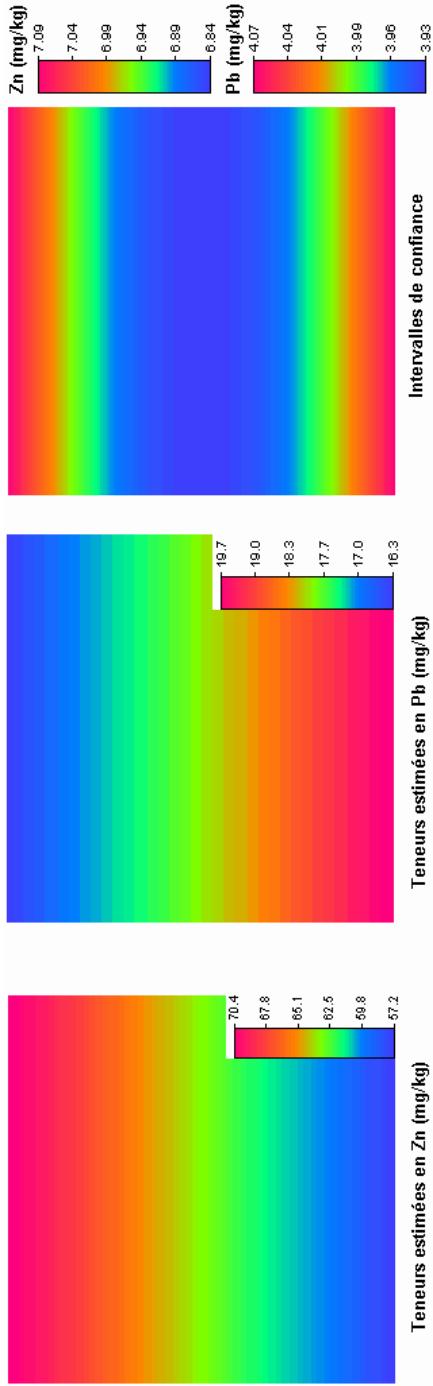


Figure IV.23: Teneurs estimées et intervalles de confiance (mg/kg) pour les teneurs en Zn et en Pb dans la parcelle de Boëlle.

7.3.1.5 Variabilité à l'échelle du secteur

Parmi les différents secteurs présentés au cours de ce travail, figure celui de Corroy-le-Grand, dont la localisation peut être trouvée à la figure IV.10. Une grille de points selon un maillage de 250m, échantillonnée par VERSTRAETE (1994), permet d'estimer la semi-variance de toutes les variables étudiées pour des échelles allant de 250 à 1500m environ. Les séries de sols sont principalement limoneuses, comme en témoigne la figure IV.24. Il faut noter que le secteur est bordé au sud par l'autoroute E411.

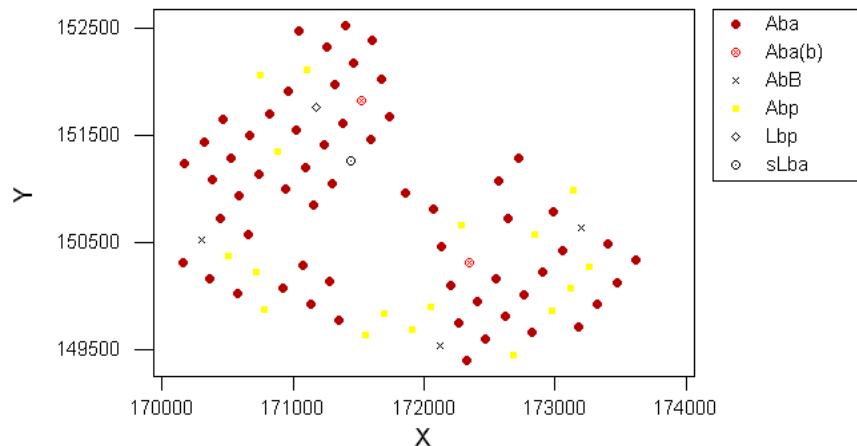


Figure IV. 24: Grille d'échantillonnage et séries de sols pour le secteur de Corroy-le-Grand.

Les cartes des données brutes et les variogrammes pourront être trouvés en annexe 13.

A l'exception des éléments Mn et Ni, aucune des variables étudiées ne présente de structure spatiale à cette échelle.

Pour Mn et Ni, les teneurs peuvent être prédites à l'échelle du secteur par krigage. Teneurs estimées et erreurs standards de prédiction sont présentées aux figures IV.25 et IV.26. On y voit clairement apparaître une tache correspondant à des teneurs plus faibles en Mn, ainsi que pour Ni une certaine dichotomie entre les points situés au sud-est et ceux au nord-ouest. Les valeurs en rouge pour Ni correspondent à des teneurs anomalies, sans que l'on en ait identifié la cause, car elles sont beaucoup plus élevées que les prédictions réalisées sur base des teneurs en Fe (figure IV.27). On notera également que les teneurs les plus faibles sont probablement sous-estimées (en raison d'un léger biais

analytique).

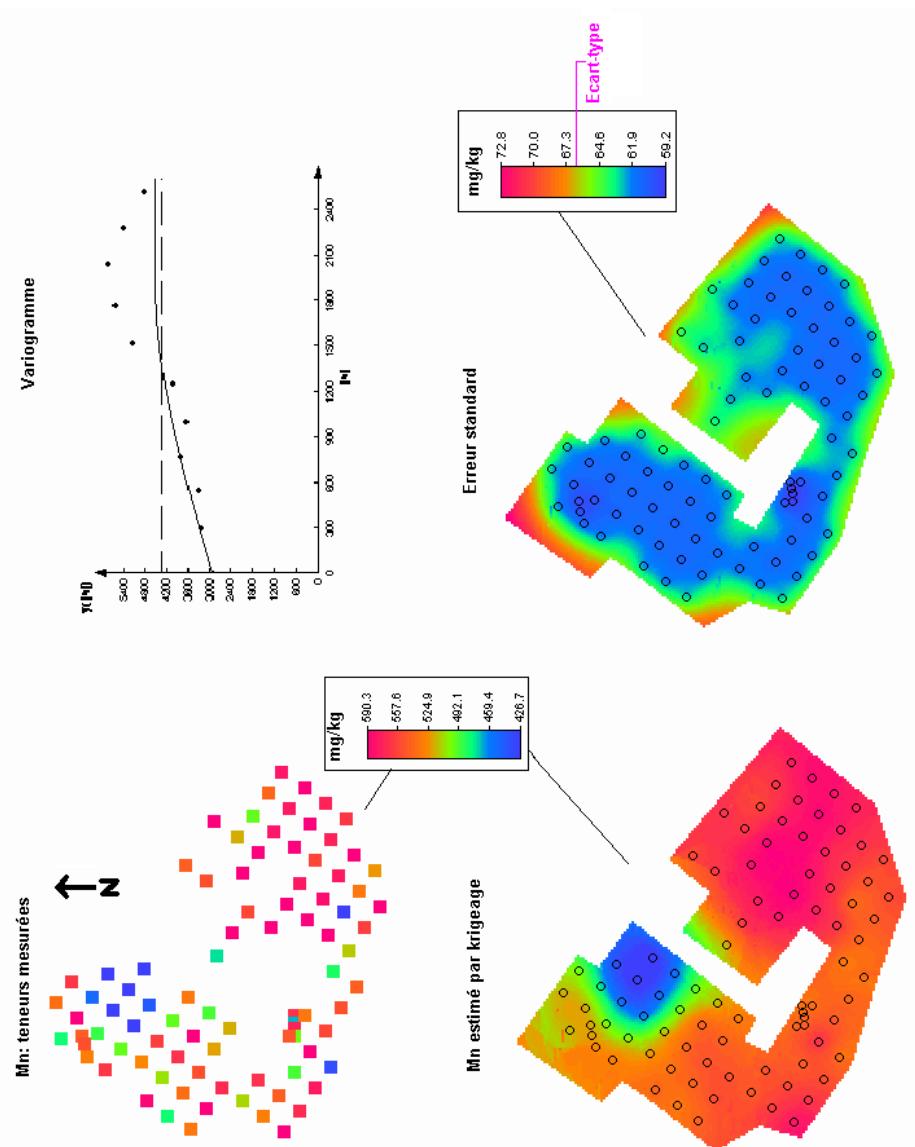


Figure IV. 25: Résultats relatifs à la prédiction spatiale des teneurs en Mn (mg/kg) par krigage ordinaire dans le secteur de Corroy-le-Grand.

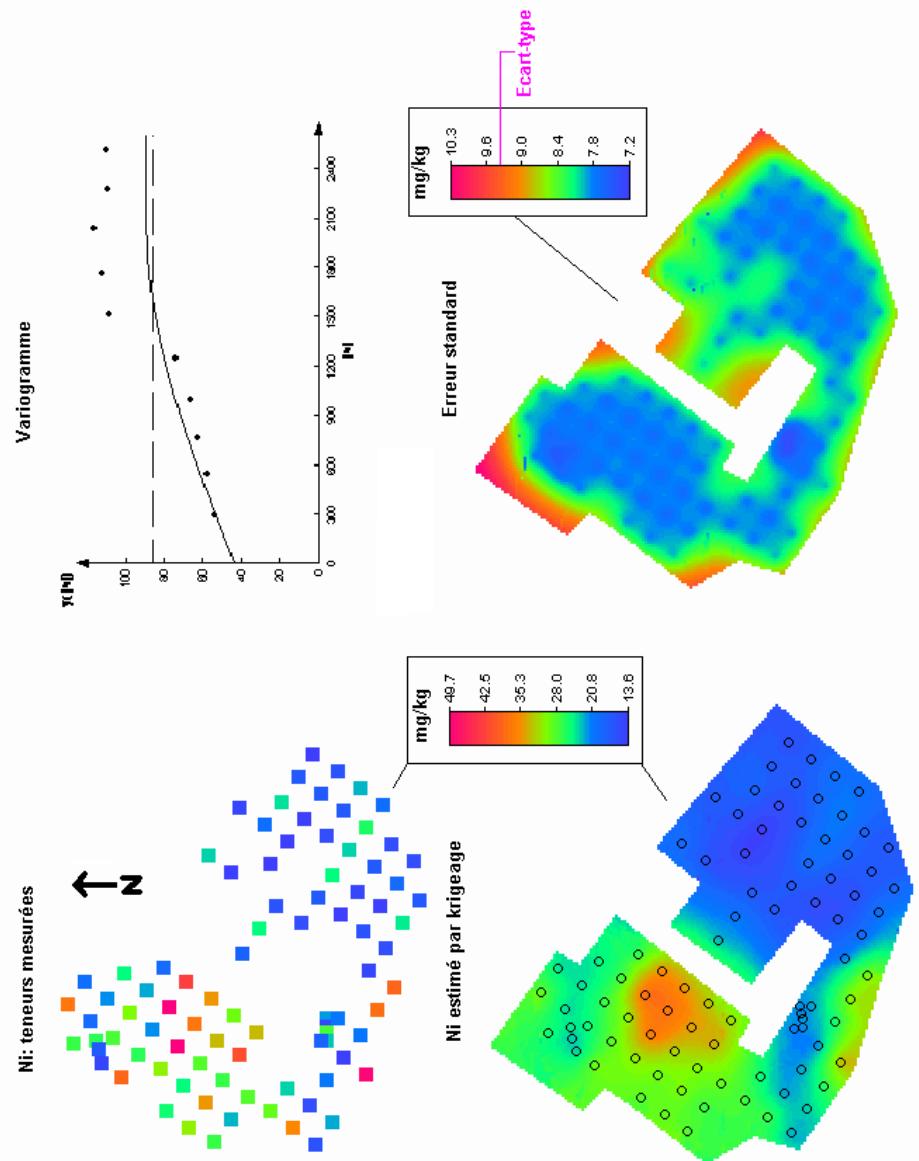


Figure IV. 26: Résultats relatifs à la prédiction spatiale des teneurs en Ni (mg/kg) par krigeage ordinaire dans le secteur de Corroy-le-Grand.

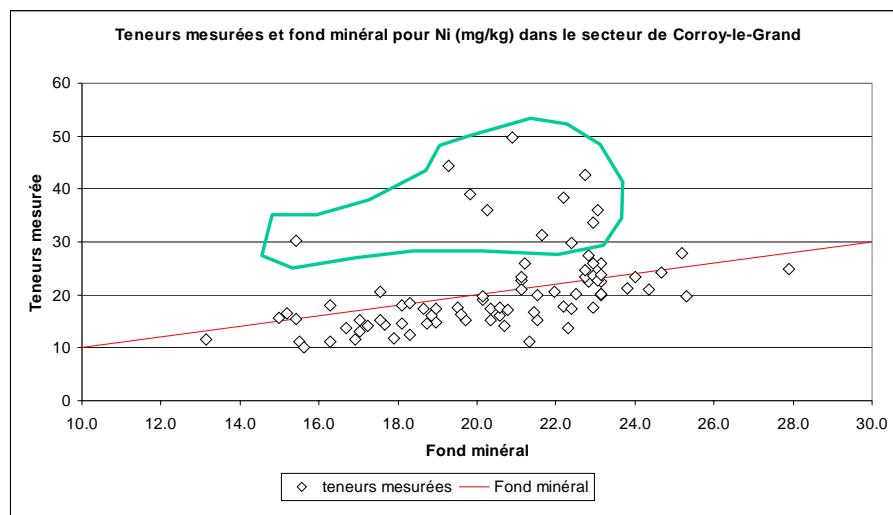


Figure IV. 27: Identification de teneurs anormales en Ni (mg/kg) dans le secteur de Corroy-le-Grand. Les points à l'intérieur de la courbe verte présentent des teneurs beaucoup plus élevées que ce que le fond minéral laissait prévoir.

Pour les autres éléments/variables, aucune technique d'interpolation entre les teneurs mesurées ne se justifie et la meilleure prédiction est alors donnée par la teneur moyenne.

Une analyse de la variance a été effectuée afin de vérifier la pertinence d'une stratification sur base de la distinction du caractère colluvial. Le détail des résultats figure en annexe 13. Dans le cas présent, aucune différence significative n'a été trouvée; ce qui signifie que, pour le secteur de Corroy, il n'y a pas de lieu de distinguer les teneurs moyennes par séries de sols.

Le point essentiel à retenir pour l'analyse des structures spatiales à l'échelle du secteur, c'est l'absence de continuité spatiale que ce soit pour les variables explicatives, comme pour les teneurs en ETMs. Les gammes de distances abordées sont en effet supérieures ou équivalentes à la portée des structures pour l'argile, Fe, COT et a fortiori les teneurs en ETMs. Les structures plus longues évoquées au titre 7.3.1.2 ne sont pas perceptibles à l'échelle du secteur.

7.3.1.6 Variabilité régionale

La variabilité spécifique à l'échelle régionale a été perçue principalement par l'entremise des transects ouest-est et nord-sud, relatifs aux sols de type Aba, d'une part et des comparaisons entre les différents secteurs d'autre part.

Afin de nuancer les constats réalisés sur l'ensemble des échantillons, les deux groupes (transects et secteurs) ont été analysés séparément.

L'analyse des transects doit montrer s'il existe une structure spatiale et/ou des différenciations régionales liées aux limons de plateaux. L'ensemble des cartes des données brutes et des variogrammes figurent en annexe 14.

Nous retiendrons que :

- les teneurs en Fe et argile sont globalement plus élevées dans la vallée de l'Orneau et dans la partie orientale de la zone d'étude; en référence à ce qui a été écrit précédemment, cela pourrait signifier un niveau d'érosion supérieur, à mettre en relation avec l'historique du défrichement;
- il n'y a pas de différenciation régionale pour les teneurs en sable et en COT et le pH_{H2O};
- les variables "explicatives" argile, Fe et COT présentent une auto-corrélation spatiale avec une portée de l'ordre de 6 000m; les sols Aba sont donc plus semblables sur des plateaux géographiquement proches; ceci peut traduire une certaine homogénéité de gestion à l'échelle du secteur;
- Les éléments Mn, Ni et Cr ne présentent pas de différenciation régionale; au contraire de Cu (teneurs plus élevées dans la branche orientale du transect), de Zn (teneurs plus élevées à l'est et intermédiaires dans la vallée de l'Orneau), de Pb (teneurs plus élevées à l'est) et de Co (teneurs légèrement plus élevées dans la vallée de l'Orneau);
- les structures spatiales, en terme de continuité, de Cu, Cr et Co sont semblables à celles de Fe et argile;
- les teneurs en Zn et en Pb présentent une structure d'auto-corrélation à grande portée (entre 20 000 et 24 000m); signe de la présence d'entités spatiales de dimensions supérieures à celles des secteurs;
- Ni ne présente pas d'auto-corrélation spatiale à cette échelle.

Si l'on s'attache aux teneurs "nômiales" en Cu, Zn (figure IV.28) et Pb⁸, on peut constater que les teneurs élevées sont aléatoires pour Cu et organisées pour Zn et Pb. La partie orientale de la zone d'étude est ainsi caractérisée par une concentration "modérée" (Cu) à "forte" (Zn et Pb).

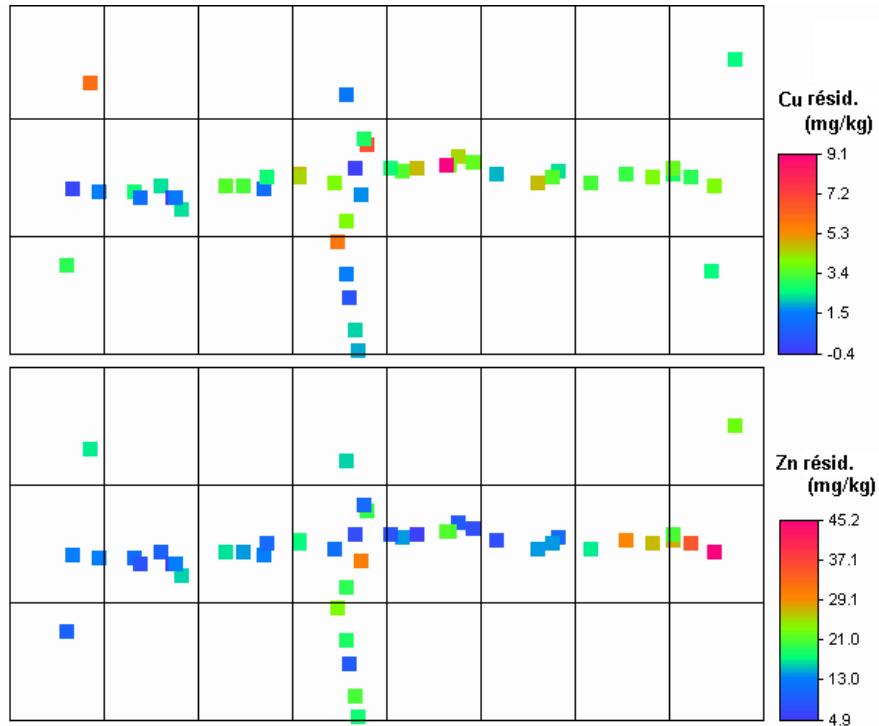


Figure IV. 28: Cartes des teneurs "nômiales" (mg/kg) pour Cu (haut) et Zn (bas).

L'analyse des différences entre secteurs a été réalisée sur base des variogrammes d'une part et d'analyse de la variance d'autre part.

Pour les variogrammes, les distances entre les points ont été regroupées en classes de 5 000m d'intervalle. La semi-variance pour la classe des distances inférieures à 5000m traduit la variabilité à l'intérieur des secteurs. Pour des gammes de distances de l'ordre de 15 000 à 20 000m, il s'agit de la différenciation entre les secteurs de l'Orneau et de Corroy-le-Grand; pour les distances supérieures à 35 000m, ce sont les différences entre le secteur de Waremme et les deux autres qui sont représentées (voir schéma en figure IV.29).

⁸ pour rappel, pour Pb les teneurs nômiales présentent la même configuration spatiale que les teneurs totales.

L'analyse des semi-variogrammes (annexe 14) confirme les points suivants:

- d'une manière générale, la semi-variance égale déjà la variance totale à l'intérieur du secteur, à l'exception de Cu et Zn (tant les formes totales qu'anthropiques),
- il existe des différenciations régionales pour les teneurs en Fe, argile, Cu, Zn et Pb.

Pour ce qui concerne ce dernier point, les trois secteurs étudiés, en particulier le secteur de l'Orneau, ne constituent pas obligatoirement des unités sous-régionales bien définies. A l'examen des variogrammes (exemple pour Fe à la figure IV.29), il apparaît ainsi une différence de semi-variance entre les classes 15 000 et 20 000m. Ceci signifie que les niveaux de variabilité entre le secteur de Corroy et le secteur de l'Orneau ne sont pas identiques selon que l'on considère la partie nord ou la partie sud du secteur de l'Orneau.

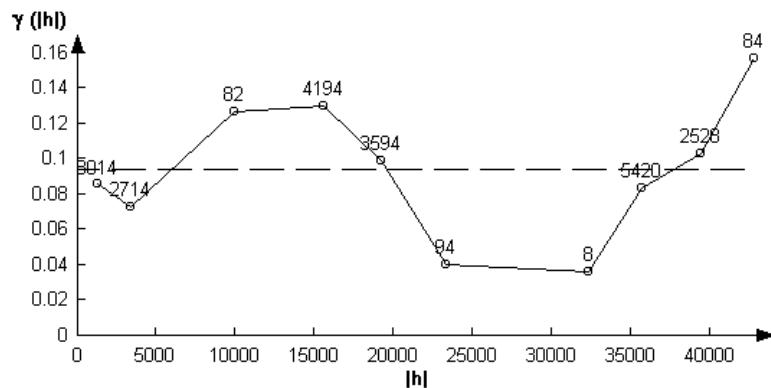


Figure IV. 29: Semi-variogramme des teneurs en Fe ($\gamma(h)$ en $[mg/kg]^2$) à l'échelle régionale.

En plus de l'analyse variographique, chaque élément a fait l'objet d'une analyse de la variance sur base du critère "secteur". Les résultats détaillés figurent en annexe 14.

Des différences significatives existent entre les trois secteurs. Les teneurs moyennes

- en Fe, argile et COT sont plus élevées dans le secteur de l'Orneau,
- en sable sont plus élevées dans le secteur de Corroy-le-Grand,
- du pH_{H2O} sont équivalentes pour tous les secteurs,

- en Mn sont moins élevées dans le secteur de Waremme;
- en Cu, Zn et Pb sont moins élevées dans le secteur de Corroy-le-Grand;
- en Ni et Co ne sont pas discriminées par le critère "secteur";

Pour ce qui concerne le niveau d'anthropisation des trois secteurs, les teneurs "résiduelles" en Cu, Zn et Pb concourent à un classement de ceux-ci selon l'ordre suivant: Corroy-le-Grand < Orneau < Waremme.

Il existe donc bien des différenciations géographiques tant au niveau des teneurs naturelles (traduites par les teneurs en Fe et argile), que des teneurs anthropiques. Une partie de cette différenciation anthropique revêt un caractère socio-historique. Les époques de mise en culture diffèrent en effet selon les "sous-régions" et il en va de même pour les modes de gestion agricole. Il est ainsi autorisé de penser à des épandages plus importants de scories et autres résidus de l'activité sidérurgique dans la partie orientale de la zone étudiée, proche géographiquement des (anciens) bassins industriels liégeois.

La délimitation plus précise des différentes sous-régions (ou PRNs) semble être une perspective intéressante pour les travaux futurs.

7.3.2 Evaluation de la faisabilité d'une cartographie du fond minéral et de l'état d'anthropisation

Dans le droit prolongement de ce qui vient d'être écrit, il y a lieu d'évaluer la faisabilité d'une cartographie régionale des teneurs en ETMs liées au fond pédo-géochimique naturel et du niveau d'anthropisation, par l'intermédiaire du "nôtre agricole".

Plusieurs options sont possibles en théorie: (i) une cartographie directe par interpolation entre les points de mesure, (ii) une cartographie indirecte sur base de la carte des sols, (iii) une cartographie indirecte sur base de régressions et (iv) une approche mixte.

Il est également loisible de prédire la teneur attendue en moyenne, une gamme de valeurs fréquentes (BAIZE et RODDIER, 2002) ou une teneur-seuil présentant telle probabilité d'être dépassée (POLLUSOL).

7.3.2.1 cartographie directe

Pour rappel, la cartographie n'est pas un objectif premier de ce travail et, dans l'état actuel des choses, les différents jeux de données que nous possédons ne couvrent pas la zone d'étude de façon satisfaisante pour réaliser une cartographie à l'échelle régionale.

Par contre, l'approche basée sur une perception de la variabilité des teneurs en ETMs à différentes échelles d'observation nous a permis de quantifier ces différents niveaux de variabilité spatiale qui peuvent nous servir de base pour l'élaboration d'un plan d'échantillonnage à vocation cartographique.

Les résultats obtenus ont mis en avant le caractère relativement court de la portée pour les ETMs, à l'exception de Cu et Zn. Au-delà de 1 000m de distance, deux points, sans considération de la typologie des sols, peuvent à coup sûr être considérés comme indépendants pour la majorité des variables mesurées.

En conséquence, un inventaire cartographique régional portant sur les mêmes éléments que ceux étudiés au cours de ce travail devrait en principe reposer sur une grille⁹ à maille inférieure à 400m (portée spéculative¹⁰ de Pb). Si cela se conçoit à l'échelle d'un secteur, la mission est impossible à l'échelle de la zone d'étude (12 000 points de prélèvement). En outre, l'analyse propre au secteur de Corroy-le-Grand a montré que même une distance de 250m ne constitue pas toujours une garantie de pouvoir interpoler.

La prédiction d'une teneur en un point à l'échelle régionale sur base d'un krigeage des teneurs mesurées apparaît peu réaliste.

Par contre, la détection de petites régions naturelles au sein de la zone d'étude pourrait se satisfaire d'un échantillonnage moins dense. Ainsi, la couverture complète de la zone d'étude par une grille à maille de 2 kilomètres nécessiterait de l'ordre de 500 points et une maille de 5 kilomètres moins de 100 points. Un échantillonnage de type "*nested sampling*" touchant plusieurs échelles de variabilité (500m, 1km, 2 km) et reposant sur une grille à maille de 5 kilomètres constituerait certainement une approche pertinente pour en même temps couvrir la zone de

⁹ Nous réduisons volontairement les plans d'échantillonnage à une grille systématique par souci de simplification!

¹⁰ car, en théorie, les différences entre deux points situés à une distance h sont stationnaires.

manière complète et affiner les variogrammes relatifs à ces gammes de distances.

7.3.2.2 cartographie typologique

Dans l'Avalonnais (France), sur un secteur d'une surface équivalente à 9 planchettes de la carte des sols de la Belgique, BAIZE et RODDIER (2002) ont montré l'intérêt d'une approche typologique pour la cartographie des gammes de valeurs fréquentes en ETMs. Cet intérêt est fortement conditionné à l'existence (i) de contrastes entre les familles de sols et (2) d'une couverture cartographique complète.

Les différents exercices de comparaison réalisés au cours de ce travail ont montré que la série de sols au sens de la carte des Sols de la Belgique conservait une certaine pertinence en tant que critère de stratification malgré une tendance constatée à l'homogénéisation des teneurs dans l'horizon labouré. Le caractère de pertinence est toutefois d'autant moins évident que la surface considérée est importante.

En raison des spécificités géographiques déjà mentionnées, il serait certainement approprié de réaliser des inventaires complémentaires stratifiés, par rapport au découpage cartographique (par facilité) ou à un découpage plus naturel (associations de sols, bassins versants...).

Toutes les séries de sols ne sont pas utiles à distinguer et des regroupements peuvent être opérés sur des critères géomorphologiques. Le résultat consiste alors en cartes, d'allure pédopaysagère, dont les plages peuvent être caractérisées tant par des teneurs moyennes que par des paramètres liés aux distributions fréquentielles des valeurs.

L'exercice de thématisation pédo-géochimique de la Carte des sols de la Belgique, moyennant le regroupement de certaines séries et la définition d'une nouvelle légende, a été réalisé sur les cartes 130E (Gembloix) et 143E (Spy). Par rapport à la légende initiale, sont (partiellement) conservés comme critères de stratification, la texture (A, G, L ou S), le développement de profil (p ou autre), la phase d'épaisseur de l'horizon A pour les sols limoneux et enfin la nature de la charge caillouteuse et la phase de profondeur pour les textures limono-caillouteuses. Le critère drainage n'est utile que pour la distinction entre sols sur colluvions et sols sur alluvions (présence d'un horizon réduit). Le format de présentation de la thèse n'autorise évidemment pas la publication à l'échelle du résultat de la thématisation. Toutefois, la figure IV.30 donne un aperçu de celle-ci à l'échelle, approximative de 1:150 000. La légende ainsi que deux fenêtres plus détaillées (échelle: 1:50 000) sont

montrés à la figure IV.31.

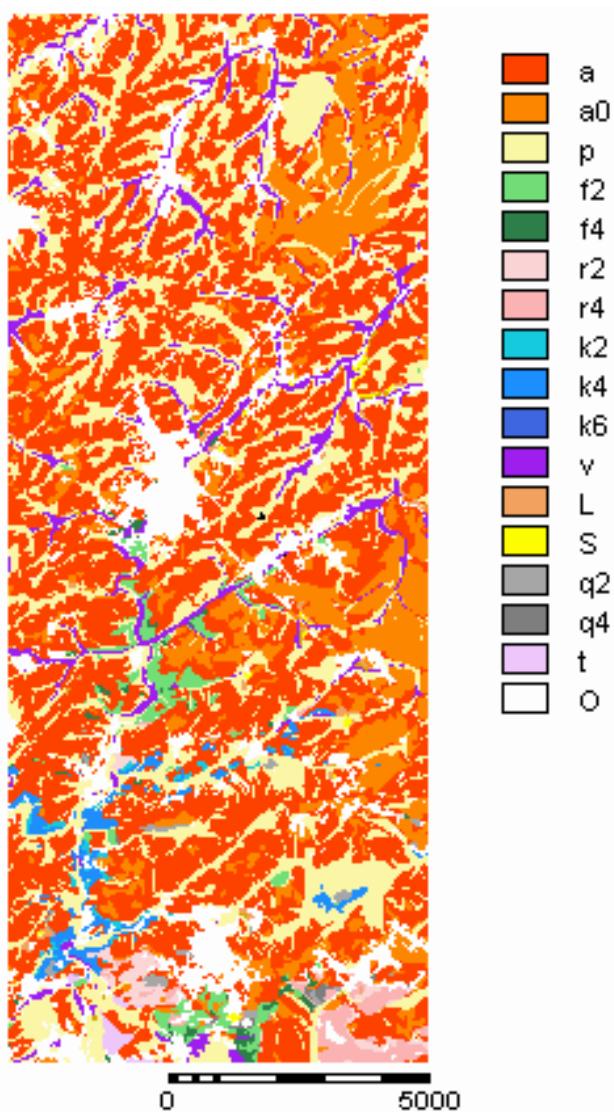
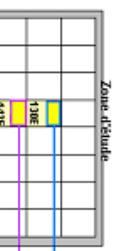


Figure IV. 30: Carte des unités pédo-géochimiques réalisée à partir des planchettes 130E et 143E de la carte des Sols de la Belgique. Voir légende à la figure IV.31.

Plan de situation

Zone d'étude



Extrait d'une carte des teneurs fréquentes en ETMs réalisée à partir de la carte des sols de la Belgique.

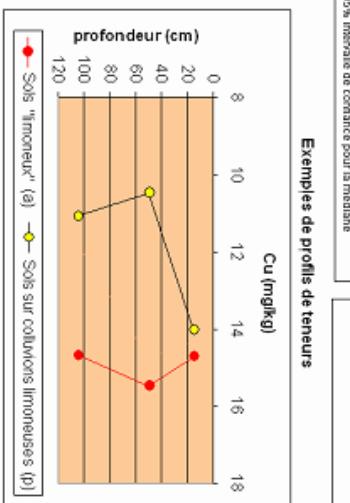
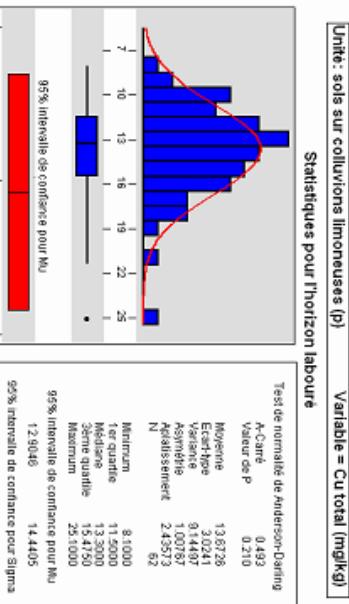
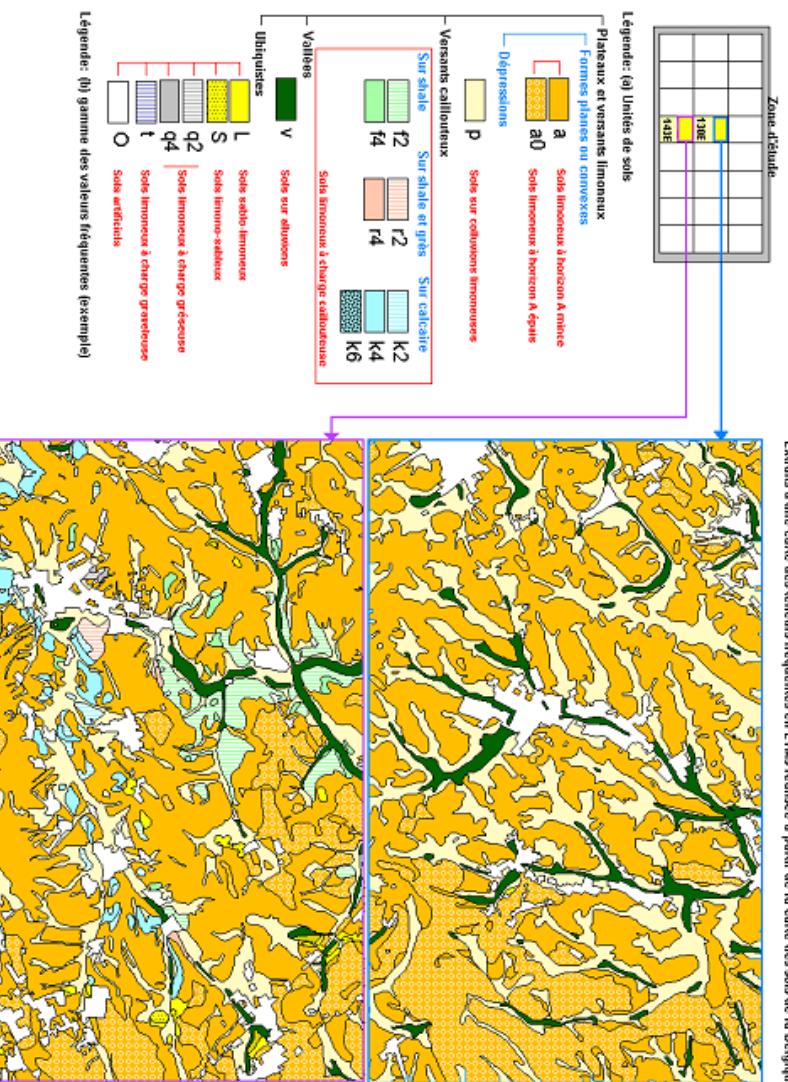


Figure IV.31: Détails de la carte pédogéochimique (1/50 000) et explication de la légende.

L'avantage de cette méthode réside dans la complétude de la couverture cartographique des unités de sols, à une échelle détaillée. L'inconvénient majeur est que ce critère perd de sa pertinence lorsque la surface augmente, en raison de disparités géographiques, ainsi que lorsque les niveaux d'anthropisation sont très marqués (ce qui n'est heureusement pas encore le cas dans la zone d'étude).

Un autre avantage, et il est relativement conséquent, de l'approche typologique est son adéquation à représenter des profils de teneurs. Des profils moyens ou caractéristiques peuvent en effet aisément être rattachés aux différentes unités cartographiques, ce que ne permet pas une approche par interpolation.

7.1.1.1 cartographie par régression

Autre méthode indirecte, une cartographie des teneurs en ETMs est réalisable à partir d'informations ancillaires, *i.e.* les différentes variables identifiées comme explicatives.

Pour être pleinement opérationnel, ce type de cartographie suppose bien évidemment (i) qu'il existe des relations causales fortes entre données primaires et ancillaires et (ii) que ces dernières soient suffisamment spatialisées.

Eu égard à la première condition, l'applicabilité de la cartographie par régression sera plus évidente (i) pour les teneurs du fond pédo-géochimique minéral que pour les teneurs totales ou anthropiques et (ii) pour les éléments Cu, Zn, Ni, Cr et Co que pour Mn et Pb.

Pour ce qui concerne la seconde condition, AARDEWERK constitue la base de données la mieux pourvue à l'échelle de la zone d'étude. Elle a d'ailleurs été exploitée à des fins de cartographie des teneurs en ETMs (à l'eau régale) dans le cadre du projet POLLUSOL. Les variables à priori intéressantes pour la spatialisation y sont les teneurs en argile, en sable, en COT et le pH_{H2O}.

Des variogrammes ont été établis à partir des données AARDEWERK relatives à l'horizon labouré pour la zone d'étude (*cf* annexe 15). Ces données présentent une certaine continuité spatiale jusqu'à des distances de l'ordre de 4 000 (pH_{H2O}) à 10 000m (argile, Sable, COT). Rien ne s'oppose donc en théorie à l'interpolation par krigage de ces quatre variables et à l'introduction des cartes obtenues dans des équations de régression ETMs-variables "explicatives".

Ces opérations sont schématisées à la figure IV.32; elles fournissent des cartes d'estimation des teneurs en ETMs (fond minéral ou teneurs totales selon le modèle utilisé) mais également des cartes de l'erreur d'estimation (qui doivent tenir compte de l'incertitude sur le krigage des données et de la variance résiduelle de la modélisation).

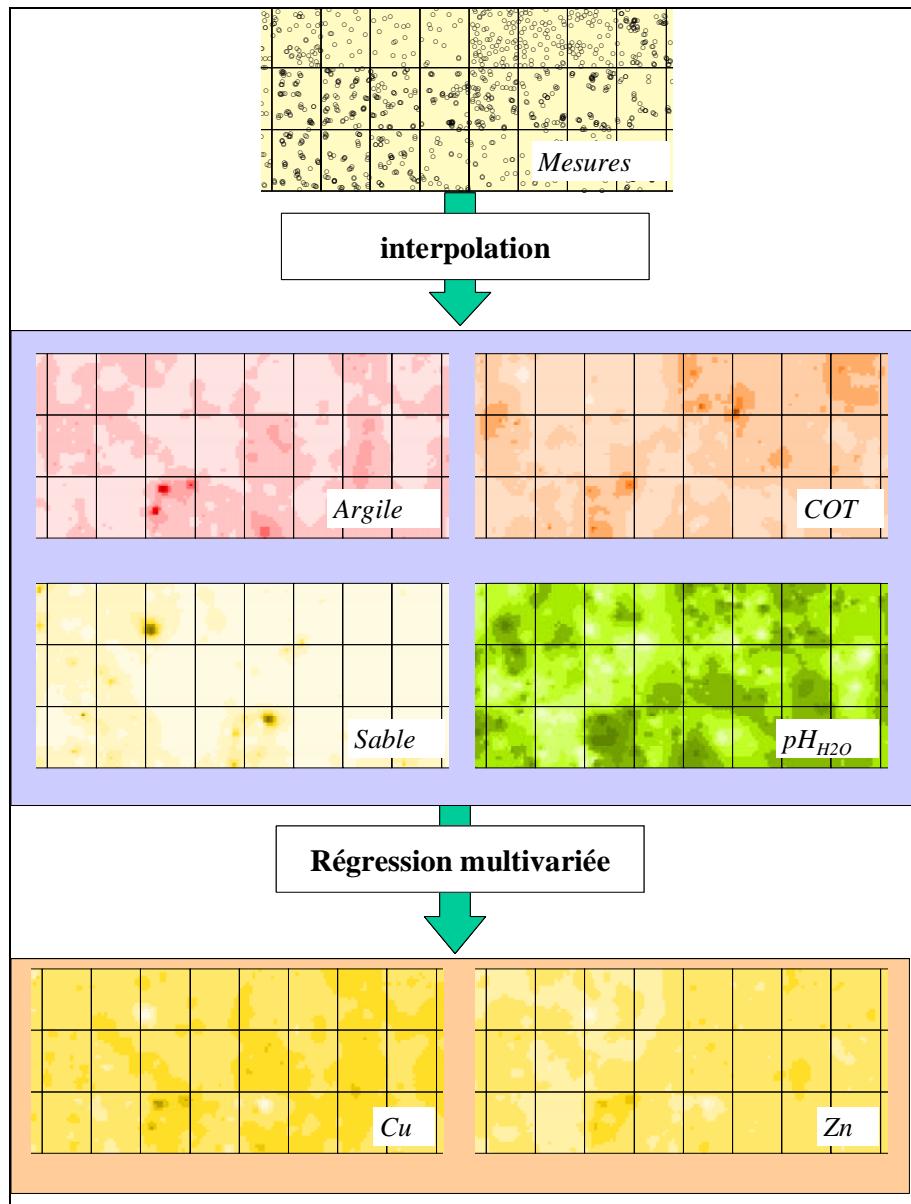


Figure IV. 1: Schéma de principe de la cartographie des teneurs en ETMs à l'échelle régionale selon une approche par régression.

Sur le principe, ce type d'approche est séduisant car il fournit des estimations ponctuelles et des cartes régionales. Toutefois, la prise en compte de structures spatiales à longues portées pour les variables "explicatives", dont l'existence soit-dit en passant contredirait les observations effectuées dans le cadre de cette étude, n'implique pas que les effets à courte distance soient modélisés de façon satisfaisante. Il a en effet été montré ci-dessus que l'essentiel de la variabilité en sols limoneux se produisait à l'échelle de la parcelle, échelle largement sous-représentée dans la base AARDEWERK.

En outre, il convient de se remémorer le fameux précepte cher aux géo-informaticiens: "*Garbage In, Garbage Out*". Nous avons déjà fait état des réserves à entretenir sur la qualité des données en raison de la pléthora de modes opératoires et de laboratoires impliqués dans la caractérisation des profils de la base AARDEWERK.

Il y a donc tout lieu d'être prudent quant à l'usage potentiel des résultats d'une telle approche par régression. Nous ne saurions trop plaider pour la nécessité d'établir un inventaire cartographique des données granulométriques, du pH et des teneurs en matière organique pour lesquels l'incertitude liée aux contingences opératoires serait la plus faible possible et, dans tous les cas, maîtrisée.

Maintenant, il doit également être clair, qu'un inventaire présentant la densité d'échantillonage de la base AARDEWERK ne peut pas servir à la prédiction à l'échelle ponctuelle, mais plutôt à l'identification d'unités régionales spécifiques.

7.1.1.2 approches mixtes

C'est probablement dans le domaine des approches mixtes que se situent les voies de recherche en spatialisation les plus prometteuses.

Les approches mixtes consistent à combiner des techniques et des types d'informations spatiales différents (cartes choroplètes, mesures directes, estimations...).

Les travaux de l'équipe du P^r BOGAERT, fondés sur l'exploitation du Maximum d'Entropie Bayesien (BME, une approche développée par CHRISTAKOS, *In D'OR* et BOGAERT, 2003) semblent avoir montré une autre voie intéressante à suivre.

Ainsi, dans le cadre du projet POLLUSOL, des résultats obtenus d'une part par krigeage des teneurs mesurées et d'autre part à l'aide d'un modèle prédictif (régression en fonction des variables pH, argile et COT)

aboutissaient à deux cartes *assez peu semblables* (exemple à la figure IV.33). Une approche BME a permis de fusionner ces résultats et d'obtenir une carte unique basée conjointement sur les valeurs d'ETMs voisines dans l'espace et les valeurs du pourcentage d'argile, de matière organique, du pH et pour laquelle *l'incertitude sur les valeurs prédites en ETMs est plus faible que l'incertitude associée à chacune des deux cartes obtenues séparément.*

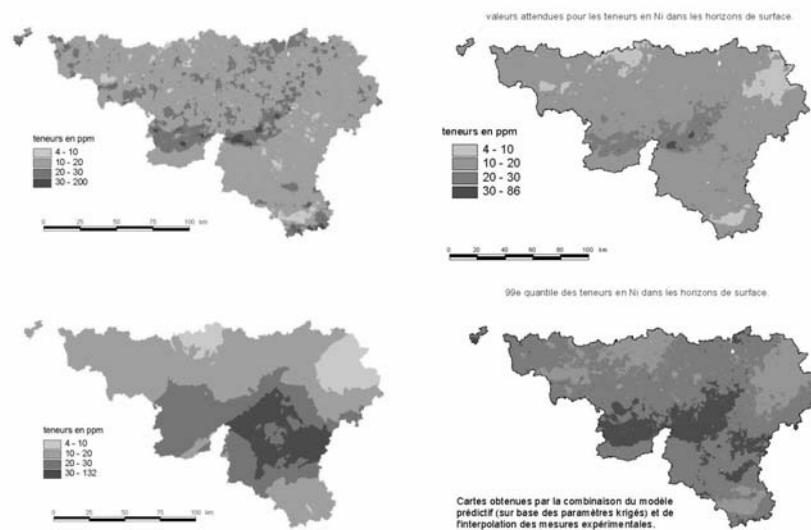


Figure IV. 2: illustration de l'approche BME. Cartes des teneurs estimées en Ni (mg/kg en Région wallonne): teneurs attendues par krigeage direct (haut à gauche), par régression (bas à gauche), par l'approche BME (haut à droite) et estimation du 99° quantile par BME (bas à droite) – (POLLUSOL 2003).

Nous ne pourrions citer tous les développements possibles. Mais, si intégrer des mesures directes, des données ancillaires, des paramètres topographiques, des informations qualitatives d'ordre géomorphologique et lithologique, les limites de la carte des sols... semble *a priori* relever de la gageure, quelle ne serait pas la puissance d'un tel outil?

7.1.2 Conclusions

L'analyse des structures spatiales à différentes échelles a montré que l'essentiel de la variabilité en sols limoneux échoit à des distances relativement courtes. Parmi les variables "explicatives", les teneurs en Fe et en argile sont gouvernées par la topographie et la différenciation est maximum entre les formes convexes et concaves d'un même versant. Pour COT et pH_{H2O}, par contre, l'origine de la variabilité est principalement anthropique, même si ces deux variables ne sont pas complètement indépendantes de la teneur en argile. Les limites du parcellaire agricole, ou de l'exploitation, constituent dès lors des "lignes de rupture" plus ou moins franches dont il conviendrait de tenir compte pour la spatialisation de ces variables. La caractérisation d'une parcelle dans une autre région naturelle a montré qu'il fallait également se préoccuper de l'évolution historique du parcellaire (BOCK *et al.*, 2002).

L'ensemble des ETMs étudiés, sauf Mn, affichent également une structure spatiale à courte distance. Cependant pour Cu, Zn et Pb, une structure spatiale à portée plus longue a également été constatée. Celle-ci est à mettre en relation avec une différenciation régionale de ces teneurs qui correspond à des niveaux d'anthropisation différents. L'analyse des résultats à l'échelle régionale a montré la nécessité d'une définition spatiale des différentes unités géographiques qui composent la zone d'étude.

Dans l'état actuel des choses, le seul outil de prédiction spatialisée, à l'échelle de la zone d'étude, qui représente une avancée par rapport aux simples teneurs moyennes est la carte dérivée de l'approche typologique. Elle est cependant perfectible par une densification de l'échantillonnage des séries non-limoneuses et par une meilleure définition des spécificités régionales.

La cartographie directe souffre d'un manque de données tant en terme de distribution générale que de densité. La cartographie indirecte par régression présente deux types de lacunes: le manque de liaison avec les variables ancillaires pour les teneurs anthropiques et le défaut de confiance dans la validité des données ancillaires existantes.

Les approches mixtes constituent certainement une voie de recherche intéressante afin de valoriser au mieux les nombreuses informations, tant quantitatives que qualitatives, existantes. Toutefois, des efforts de caractérisation des propriétés de base des sols doivent certainement encore être consentis car la connaissance de l'état des sols au niveau

régional reste plus que parcellaire.

7.2 Approches ponctuelles et locales

Après les considérations relatives à la définition d'un référentiel régional et à la prédiction spatiale des teneurs en ETMs, les problèmes de références sont abordées à une échelle plus ponctuelle. Nous allons en effet illustrer en quoi les étapes précédentes peuvent être utiles pour l'analyse et l'interprétation des résultats provenant d'expérimentations de plein champ.

7.2.1 Expérimentations CRAGx

En 1990, des échantillons étaient prélevés dans des parcelles d'essais du Centre de Recherches agronomiques de Gembloux (CRAGx). Les expérimentations du CRAGx concernent le suivi à long terme des restitutions de matières organiques diverses en agriculture; l'échantillonnage avait été opéré dans le cadre du fractionnement de la matière organique. Divers échantillons ont été sélectionnés en vue de la détermination des teneurs totales.

Trois traitements ont été retenus: (i) pas d'apport de matières organiques (témoin), (ii) enfouissement des sous-produits de récolte, apport de 40 Tonnes de lisier de porc tous les 3 ans, engrais vert tous les 3 ans, écume de sucrerie toutes les trois rotations (lisier+) et (iii) apport de 40 tonnes de fumier tous les trois ans (fumier). Trois échantillons provenant de trois blocs de placettes ont été analysés pour chacun des traitements.

Les placettes ont une taille de l'ordre de 150m²; la distance, de centre à centre, entre toutes ces unités d'échantillonnage est comprise entre 20 et 200m.

D'après un levé cartographique réalisé au 1:1 000, les placettes sont implantées sur des sols de type Aca et Ada, soit des "sols limoneux à horizon BT à drainage naturel modéré à imparfait". Le champ d'essais est annoncé comme homogène en terme de composition texturale (environ 20% d'argile dans l'horizon labouré). Le pH_{H2O} est compris entre 7.0 et 7.6 selon les traitements, les teneurs en COT entre 0.74 et 0.98g/100g.

Le premier point à discuter par rapport à ce qui précède concerne l'homogénéité texturale des parcelles. Les résultats discutés au cours de

l'approche spatiale montrent en effet qu'à des distances de 200m la variabilité des teneurs en Fe et en argile est importante (dans le sens de la pente, il est vrai!). Et, à des distances de l'ordre de 25m, la variabilité correspond déjà à plus de 40% de la variance totale pour ces deux variables. On peut dès lors légitimement émettre des réserves quant à l'homogénéité texturale annoncée.

Nous nous sommes intéressés essentiellement aux éléments Cu et Zn en raison de leur occurrence notoire dans les résidus d'élevage.

Les teneurs en Cu sont présentées à la figure IV.33. On peut y voir que les traitements présentent une réponse homogène dans le premier bloc et que dans les deux autres, les teneurs suivent l'ordre:

témoin < fumier < lisier+. L'analyse de la variance (cf annexe 16) ne permet toutefois pas de conclure à une différence entre les traitements.

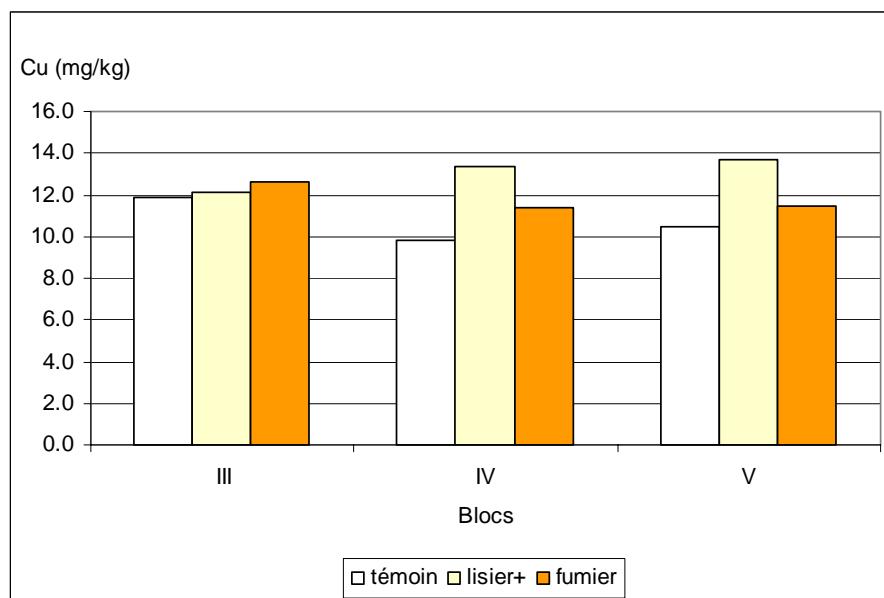


Figure IV. 3: Teneurs en Cu (mg/kg) par traitement et par bloc dans l'expérimentation CRAGx.

Prendre en considération le risque de variabilité naturelle des teneurs entre les différentes placettes revient à relativiser les résultats par rapport à un élément de référence, Fe ou argile en l'occurrence. Nous avons donc examiné les relations entre Cu et Fe pour les différents traitements (figure IV.34). Il devient clair alors que (i) les apports de matière organique se sont soldés par une augmentation des teneurs en Cu et (ii) que la différence entre le traitement lisier+ et le traitement fumier est pour une partie importante imputable aux différences de teneur en

Fe (ou en argile) entre les placettes. Les analyses de la variance effectuées sur les résidus de la régression par les teneurs en Fe (annexe 16) confirment ces constats visuels, qui sont d'ailleurs identiques pour Zn.

La variabilité à l'échelle parcellaire devrait donc être mieux caractérisée au moment de l'implantation d'un champ d'essais.

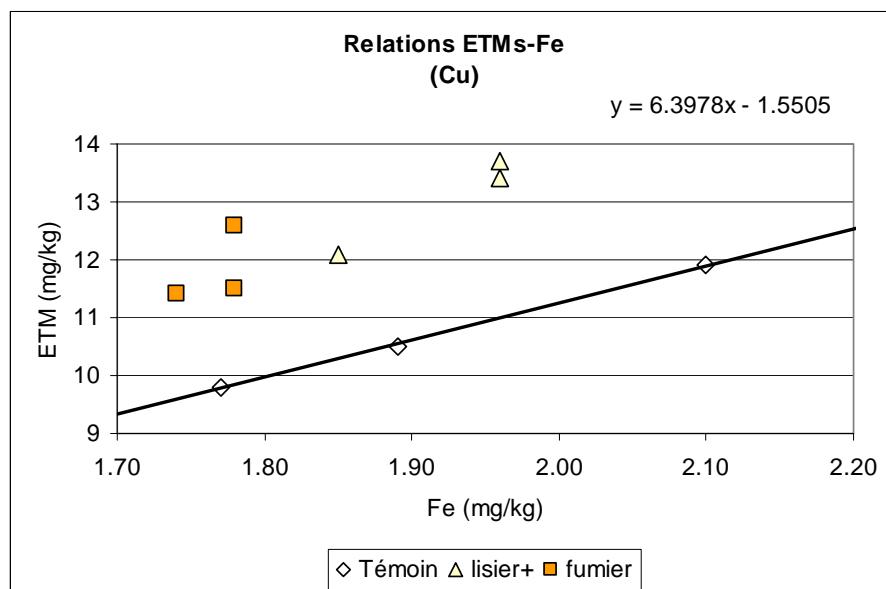


Figure IV. 4: Relations entre les teneurs en Cu et en Fe différenciées par type de traitement. La ligne blanche correspond à la droite de régression relative aux placettes sans apports.

7.2.2 Agriculture biologique

Dans le cadre de l'établissement d'un référentiel sur l'état organique des terres en Région limoneuse (BOCK *et al.*, 1993), des échantillons ont été prélevés en 1991 dans une exploitation agricole pratiquant l'agrobiologie près de Waregem.

Les modalités agricoles ont été présentées par MATHIEU *et al.* (1993). Elles sont d'importance secondaire dans le cadre de cet exercice. Huit échantillons ont été prélevés dans quatre parcelles différenciées principalement par l'âge de la conversion à l'agrobiologie : 15 ans (= parcelle "luzerne"), 7 ans ("Pomme de terre"), 5 ans ("froment") et une prairie permanente. Dans chaque parcelle un échantillon a été prélevé en position de plateau (Aba) et un dans une dépression (Abp).

Les résultats des caractérisations de base et des déterminations des teneurs totales en Fe, Cu et Zn figurent au tableau IV.20. On notera que

les facteurs de différenciation principaux pour les variables "explicatives" sont les teneurs en argile entre Aba et Abp, donc au sein d'une même parcelle, et les teneurs en COT entre parcelles.

Tableau IV. 1: Analyses de bases (MATHIEU *et al*, 1993) et teneurs totales en Fe, Cu et Zn dans les parcelles d'agrobiologie.

Parcelle	Sol	Argile	pH _{H2O}	pH _{KCl}	COT	Fe	Cu	Zn
		(%)			(%)	(g/100g)	(mg/kg)	
Prairie	Aba	17.9	7.4	7.0	2.0	2.28	18.8	109.4
	Abp	16.1	7.2	6.8	2.0	1.96	13.9	72.4
Luzerne	Aba	18.5	7.1	6.5	1.7	2.27	17.6	89.3
	Abp	11.4	7.3	6.9	1.4	1.56	14.7	73.6
P. de terre	Aba	20.3	7.4	7.0	1.4	2.21	15.5	70.2
	Abp	15.0	6.7	5.7	1.4	1.77	14.2	68.7
Froment	Aba	21.9	7.4	6.7	1.2	2.47	13.6	71.0
	Abp	14.7	7.2	6.2	1.0	1.72	14.8	64.8

En première approche, les niveaux de teneurs en Cu et surtout en Zn sont nettement plus élevés que les teneurs moyennes régionales (tableau IV.15) et l'on pourrait conclure que la pratique de l'agrobiologie engendre une accumulation supérieure à la moyenne en Cu et en Zn dans l'horizon labouré.

Par contre, si l'on se souvient que c'est toute la partie orientale de la zone d'étude, dont fait partie le secteur de Waremme, qui présente des niveaux de teneurs plus élevés en ces éléments, on peut constater (figure IV.35) que les teneurs en Zn dans les parcelles agrobiologiques ne sont pas supérieures à la moyenne calculée pour le secteur de Waremme.

Cet exemple illustre bien la nécessité de considérer à titre de référence des moyennes locales plutôt que moyennes régionales et accentue de ce fait le besoin de définition géographique de sous-régions spécifiques, quelles que soient les causes de ces spécificités.

Pour l'anecdote, les figures IV.35 et IV.36 illustrent l'importance respective des facteurs "argile" et "matière organique" dans le déterminisme des teneurs en Zn. La granulométrie semble jouer un rôle beaucoup moins important que la teneur en matière organique. Toutefois, la combinaison de ces deux facteurs n'exprime pas complètement la variabilité des teneurs en ETMs observée entre les différents échantillons.

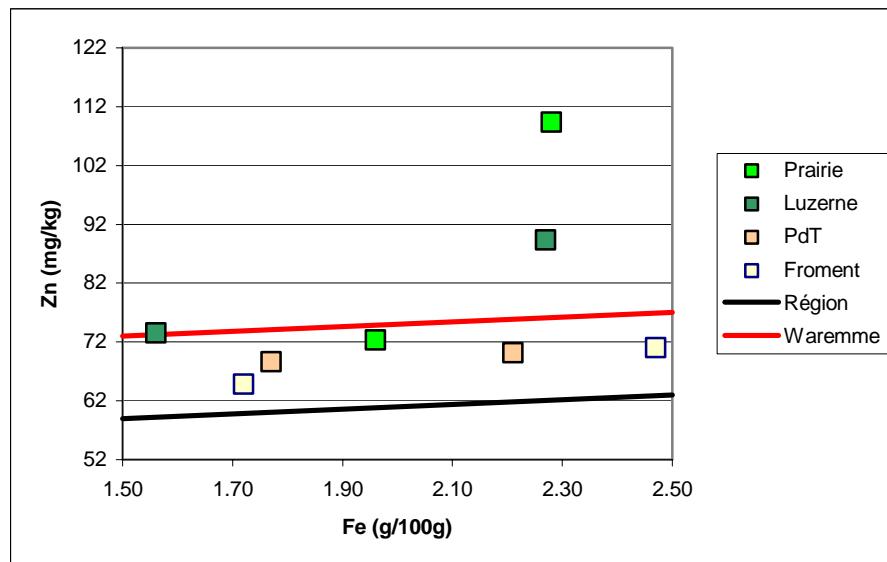


Figure IV. 5: Relations entre les teneurs en Zn et en Fe différencierées par parcelle agrobiologique. La ligne blanche correspond aux teneurs attendues à l'échelle régionale, la ligne rouge à l'échelle du secteur de Waremme.

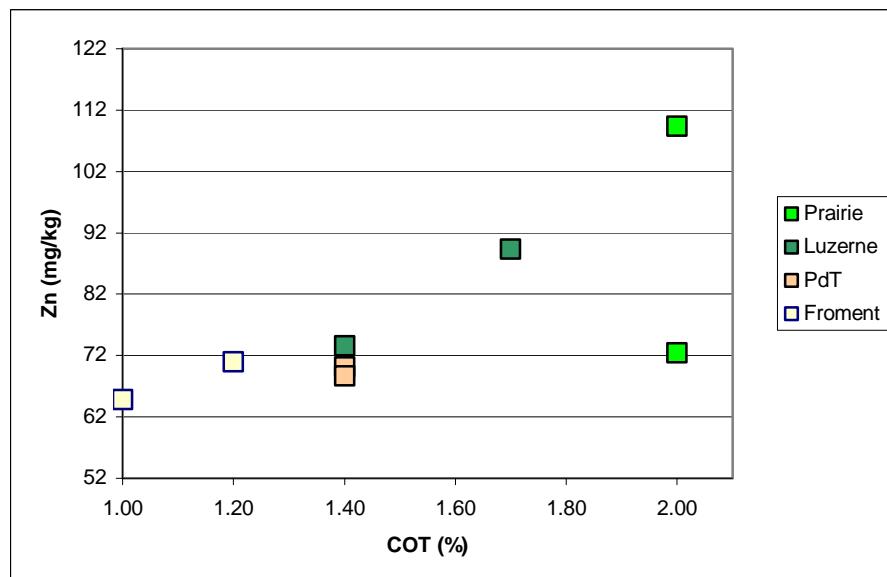


Figure IV. 6: Relations entre les teneurs en Zn et en COT différencierées par parcelle agrobiologique.

7.2.3 Bilan de 10 années d'irrigation avec des eaux résiduaires d'une industrie agro-alimentaire (Waremme)

Toujours dans le secteur de Waremme, une industrie agro-alimentaire a mis en place un système de valorisation de ses eaux résiduaires à travers l'irrigation sur des parcelles cultivées. Le secteur de Waremme a fait l'objet d'une caractérisation en 1992 au tout début des irrigations (MASSART, 1993).

En 2002, soit 10 ans après l'installation du projet, quelques parcelles ont fait l'objet de nouveaux prélèvements afin de vérifier si la valorisation agricole se double d'effets sur les teneurs en ETMs.

Sept sites dans quatre parcelles ont été revisités (4 Aba et 3 Abp). Les teneurs totales des échantillons de 1992 et 2002 ont toutes été mesurées en 2002; les biais analytiques sont dès lors minimisés. Par contre, la précision du positionnement géographique des sites en 2002 par rapport à ceux de 1992 est inférieure à 50m mais ne peut être garantie sous les 25m. Pour ces gammes d'échelle, cela signifie que les paires de points qui vont faire l'objet des comparaisons présentent une variabilité potentielle naturelle estimée par la semi-variance, soit respectivement 2.28 et 21.82 [mg/kg]² pour Cu et Zn, *i.e.* des variabilités environ 3 fois plus élevées que la variabilité opératoire.

Classiquement en statistiques (DAGNELIE, 1975), ce type d'évaluation peut être réalisé à partir d'un test d'égalité des moyennes, avec des échantillons associés par paires. La variabilité à l'échelle décimétrique est potentiellement un facteur de réduction de la puissance des tests statistiques.

Les différences entre les teneurs en Cu mesurées sur les deux lots d'échantillons sont représentées à la figure IV.37. On peut remarquer que par rapport à la ligne rouge, qui symbolise la stricte égalité entre les deux jeux de données, toutes les mesures effectuées sur les données "2002" sont supérieures aux "1992", sauf une. La première impression à la vue de cette figure est que l'irrigation provoque au bout de 10 ans une accumulation de Cu indéniable.

Plutôt que de soustraire directement les teneurs, il est plus juste de tenir compte des différences de teneurs en Fe entre les échantillons d'une même paire. Nous avons dès lors représenté les teneurs en Cu des échantillons des deux jeux de données par rapport aux teneurs en Fe à la figure IV.38. Le constat d'accumulation par l'irrigation doit être nuancé car force est de constater que, par rapport aux teneurs en Fe, il n'y a plus que quatre échantillons du groupe 2002 qui présentent des

signes d'accumulation, et parmi eux, l'un présentait déjà des teneurs élevées en 1992.

A la lumière des relations entre Cu et Fe, il est donc préférable de rester réservé quant à la conclusion d'un éventuel impact de l'irrigation par des eaux usées sur les teneurs en Cu et de préconiser un complément d'investigation pour régler la question.

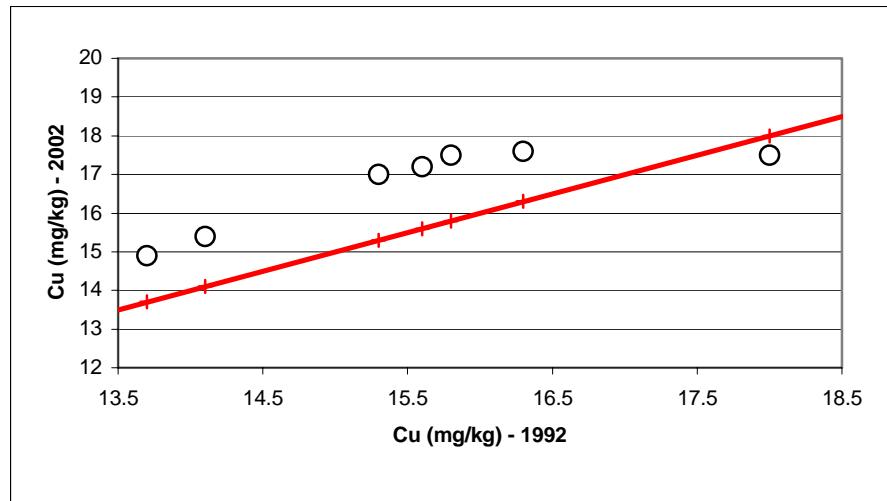


Figure IV. 7: Relation entre les teneurs en Cu (mg/kg) dans les données 2002 et 1992. La ligne rouge symbolise l'égalité entre les données.

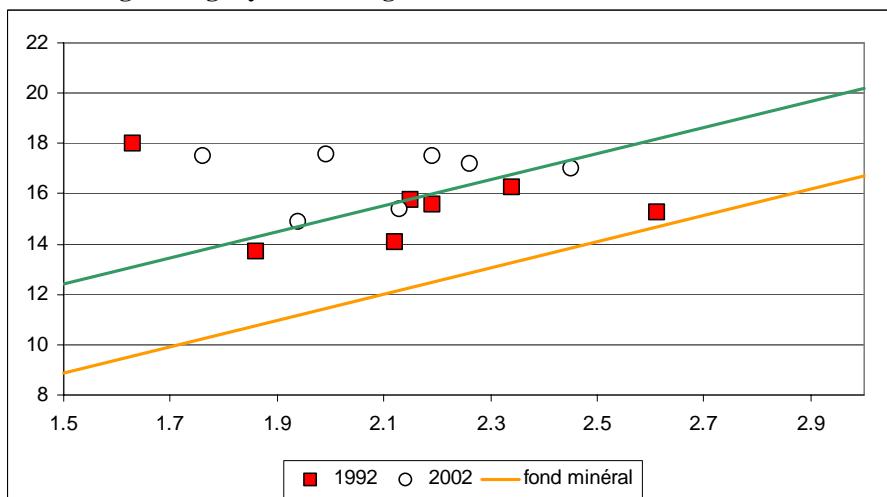


Figure IV. 8: Relations Cu-Fe différencierées par jeu de données. La ligne orange symbolise le fond modélisé moyen à l'échelle régionale; la ligne verte correspond à la limite supérieure (à 95%) du même fond modélisé.

7.2.4 Conclusions

Les quelques exemples qui précèdent illustrent le danger d'une simplification des références en matière de teneur en ETMs. Leur variabilité naturelle dans les sols doit en effet inciter à la prudence tant pour la définition de seuils de "normalité" que pour des comparaisons de différents modes de gestion des intrants agricoles.

Il doit être clair que plus on dispose d'information, descriptive, corrélative ou hiérarchisante, à-côté de la mesure, plus finement celle-ci pourra être interprétée. Un référentiel bâti uniquement sur une population de teneurs mesurées de la variable considérée sera donc d'autant moins puissant que la population-source des échantillons sur lesquels les teneurs sont mesurées est hétérogène. En simplifiant légèrement, cela signifie que la portée d'un tel référentiel dépend de l'échelle spatiale considérée. Au niveau local, une teneur moyenne, un quantile peuvent parfois s'avérer suffisant. A une échelle régionale, les intervalles de confiance s'allongent et le pouvoir discriminant du référentiel diminue d'autant.

Conclusions et perspectives

Objectifs et démarche

Les sols cultivés sont par la force des choses anthropisés. L'horizon labouré, réceptacle d'intrants divers désirés ou non, est au cœur même du cycle de nombreux éléments; il est le siège de processus capitaux en termes agricoles et environnementaux.

Les éléments traces métalliques suscitent des inquiétudes antagonistes, parfois sous le couvert de pseudonymes. Certains sont indispensables pour le règne végétal et/ou animal à faible dose. La plupart peuvent toutefois être à l'origine de toxicités. Il semble que l'ambiance physico-chimique des sols agricoles soit généralement peu propice aux migrations des ETMs vers des compartiments environnementalement sensibles et les différents flux actuels généreraient une accumulation plus ou moins lente des ETMs dans l'horizon labouré.

Dans ce contexte, la distinction des apports naturels et anthropiques est importante pour (i) comprendre le fonctionnement des ETMs dans les sols, (ii) définir des bases d'évaluation de pratiques agricoles, de détection de contaminations ou de suivi à long terme de teneurs régionales.

Les objectifs de ce travail étaient donc de contribuer (i) à une réflexion méthodologique pour la définition d'un référentiel-ETMs pour les sols agricoles et (ii) à une meilleure connaissance de l'état des sols et de leur degré d'anthropisation. Une démarche méthodologique a dès lors été établie et mise en oeuvre autour de la caractérisation du déterminisme spatial naturel des teneurs en ETMs et de l'évaluation du degré d'anthropisation actuel des sols agricoles. Une zone d'étude en Région limoneuse belge a été définie.

Résultats

La première phase, réalisée en trois étapes, concernait l'étude des matériaux parentaux.

La majorité des sols de la zone d'étude sont issus de loess. Toutefois, localement, le matériau parental peut être constitué par une formation pré-quaternaire, dont les lithologies les plus représentatives sont les shales, les grès, les calcaires pour les roches cohérentes et les argiles et les sables pour les roches meubles.

Des références ont donc d'abord été acquises ou ordonnées pour situer les niveaux de teneurs dans les limons par rapport aux autres

lithologies. Cette étape a en outre permis d'établir des signatures élémentaires pour les différentes familles lithologiques.

Les limons quaternaires ont ensuite été étudiés à partir de coupes profondes. L'étude de la coupe de Tongrinne a mis en évidence une variabilité significative des teneurs en éléments, résultant à la fois de processus pédogénétiques, anciens principalement, et de nuances de composition minéralogique selon l'âge des matériaux. L'importance des teneurs en argile, ainsi que Fe et Al qui y sont fortement corrélés, en tant que facteur "explicatif" des teneurs en ETMs dans les loess a été montrée. La représentativité de la coupe de Tongrinne par rapport aux teneurs dans les loess a été confirmée par l'étude corrélatrice de trois autres coupes profondes.

L'analyse géographique d'horizons C de loess a permis de conclure à une relative homogénéité, à une absence de continuité spatiale et à l'actualité du caractère explicatif majeur des teneurs en argile et en oxydes d'Al, Fe et Mn.

La deuxième phase du travail avait pour objet les différenciations d'ordre pédogénétique en volumes de sols. Elle comprend deux approches complémentaires.

Au cours de l'approche "*solum*", les relations entre ETMs et facteurs "explicatifs" ont été confirmées. Différents constats ont été réalisés. Certains éléments (Pb en forêt, Zn et Cu sous culture) s'accumulent dans les horizons de surface. La mise en culture entraîne une homogénéisation des teneurs en surface et une resaturation du complexe d'échange. La présence de caractères rédoxymorphes ne se double pas d'une différenciation chimique pour les "*solums* limoneux". Et enfin, il apparaît une variabilité spatiale entre sols de même typologie conditionnée par des facteurs aléatoires locaux.

L'étude de l'organisation des sols selon le relief a montré une accentuation de la différenciation des teneurs en ETMs entre les différents volumes de sols. La différenciation principale pour les sols de "plateaux" concerne les sols à horizon BT d'une part et les sols sur colluvions d'autre part. Pour les sols "de versants", la morphogenèse est responsable de l'occurrence de nombreux sols portant la marque d'un substrat dans un ou plusieurs de leurs horizons. Pour la zone étudiée, nous avons toutefois constaté que les sols de versants à caractère de "limon sur substrat" pouvaient être considérés comme des sols "limoneux" car les teneurs en ETMs y suivent les mêmes lois pédologiques.

géochimiques.

Des gammes de teneurs représentatives des horizons principaux de sols "limoneux" cultivés ont été établies. Elles sont très proches de celles du Référentiel-ETM du RPG Nord-Pas-de-Calais, et traduisent un niveau de contamination relativement faible.

La dernière phase dans la démarche visait la définition d'un référentiel spatialisé pour l'horizon labouré, avec pour double perspective la détection de teneurs aberrantes et la prédiction spatiale de teneurs "normales".

Une comparaison de modèles d'estimation des teneurs du fond pédo-géochimique minéral par régressions multiple a d'abord été effectuée. Celle-ci a montré l'intérêt de modèles simples basés sur des régressions avec l'argile ou le fer total.

L'approche d'un référentiel au niveau régional montre que la pertinence de celui-ci en tant que base de détection des contaminations locales sera d'autant plus affirmée qu'il prendra en considération un certain nombre d'informations ancillaires. Celles-ci permettant de réduire les intervalles de confiance autour des estimations. Il a en outre été montré l'importance de la reconnaissance de spécificités propres à des "Petites Régions Naturelles" au sein de la zone d'étude.

Les différentes approches cartographiques ont permis d'estimer la variabilité des teneurs en ETMs à plusieurs niveaux d'échelle spatiale. Elles ont également montré l'inadéquation des techniques classiques de géostatistique pour réaliser une cartographie de détail sur une large zone à un coût raisonnable, en raison de l'importance de la variabilité à courte distance. Par contre, la carte des sols de la Belgique peut servir de base à une cartographie géochimique, moyennant un travail de révision de la légende.

Perspectives

Beaucoup d'efforts et de temps ont été consacrés pour la caractérisation d'une Région agricole pourtant réputée homogène. Néanmoins, beaucoup de choses restent à faire encore, car si ce travail apporte un certain nombre de réponses, il a également permis de soulever quelques questions complémentaires.

En premier lieu, l'exploitation des données acquises dans le cadre de ce travail devrait faire l'objet de davantage d'investigations, principalement dans le domaine de l'intégration cartographique des différentes sources de données. Il y a des voies de recherche en matière de formalisme topographique ou de géostatistiques avancées. Des initiatives d'intégration multiple de jeux de données diversifiés existent. Il y a probablement des synergies à rechercher avec d'autres acteurs de la Recherche pour toujours mieux définir les potentialités et les limites des approches intégratrices mais également pour mieux se définir par rapport aux autres.

Ensuite, il reste tout un travail d'identification de spécificités sous-régionales, de caractérisation de Petites Région Naturelles au sein de la Région limoneuse et à fortiori en Région wallonne. La méthodologie devrait alors être allégée pour aller directement au but poursuivi. Ce travail est porteur d'enseignements à cet égard. L'estimation de la variabilité spatiale par exemple doit pouvoir servir de guide pour la planification d'un échantillonnage destiné à une cartographie. Il y a toutefois lieu de ne pas être trop exigeant par rapport au niveau de détail à attendre d'une cartographie des teneurs naturelles en ETMs.

Parallèlement à une meilleure définition des niveaux de teneurs naturelles, les activités de recherche devraient progressivement s'orienter vers la caractérisation d'anthropisations en milieu contrôlé (expérimentations de plein champ ou en laboratoire) et de contaminations avérées.

Nous citerons également les aspects de spéciation, de mobilité et de réponse-plante qui sont loin d'avoir livré tous leurs "secrets".

Références bibliographiques

- ADRIAENSEN W., BOUCKAERT J., VAN HERREWEGHE S., BOUCHET A., SWENNEN R. [2000]. Soil geochemistry in and around the town of Marche-en-famenne (Wallonia, S-Belgium). *Geologica Belgica* 3/3-4: 309-330.
- AFNOR [1999]. *Qualité des sols*. Vol. 1, 566p.
- ALEXANDRE J., THOREZ J. [1995]. Au Secondaire et au Tertiaire, L'Ardenne tropicale. L'altération des roches et les climats anciens. In *L'Ardenne. Essai de Géographie physique*. A. DEMOULIN Ed. Sci. Dpt. Géographie physique et Quaternaire, ULg, 238p.
- ALLOWAY B.J. [1990]. *Heavy metals in soils*. Blackie Academic & Professional. Glasgow. 339p.
- ALLOWAY [1997]. The mobilisation of trace elements in soils. In PROST (Ed.) *Contaminated Soils*. Proceedings of the third International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements. Paris, 15-19may 1995.
- ANDERSEN M.K., RAULUND-RASMUSSEN K., HANSEN H.C.B., STROBEL B.W. [2002]. Distribution and fractionation of heavy metals in pairs of arable and afforested soils in Denmark. *Eur. J. of Soil Sci.* 53 : 491-502.
- ANDERSSON A. [1992] *Trace elements in agricultural soils – fluxes, balances and background values* – Swedish Environmental Protection Agency, report 4077.
- ANDERSSON A. [1979] On the distribution of heavy metals as compared to some other elements between grain size fractions in soils. *Swedish J. agric. Res.* 9, 7-13.
- ANDERSSON A. [1977]. The distribution of heavy metals in soils and soil material as influenced by the ionic radius. *Swedish J. of Agric. Res.*, 7: 79-83.
- ARROUAYS D., VION I., JOLIVET Cl., GUYON D., COUTURIER A., WILBERT J. [1997]. Variabilité intraparcellaire de quelques propriétés des sols sableux des Landes de Gascogne (France). Conséquences sur la stratégie d'échantillonnage agronomique. *Etude et Gestion des Sols*, 4, 1: 5-16.

Références bibliographiques

- ATLAS DE BELGIQUE [1970]. *Géologie et Lithologie*.
- BAIZE D. [1997]. *Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France)*. INRA, Paris, 408 p.
- BAIZE D. [1994]. Teneurs totales en "métaux lourds" dans les sols français. Premiers résultats du programme ASPITET. *Le courrier de l'Environnement de l'INRA*, n° 22: 37-46.
- BAIZE D. [s.d.]. Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols français. URL: <http://etm.orleans.inra.fr/webetmbi.htm> Dernière visite 17/05/2003.
- BAIZE D., CHRETIEN J. [1994]. Les couvertures pédologiques de la plate-forme sinémurienne en Bourgogne. Particularités morphologiques et pédo-géochimiques. *Etude et Gestion des Sols* 2: 7-27.
- BAIZE D., DESLAIS W., GAIFFE M. [1999]. Anomalies naturelles en Cadmium dans les sols de France. *Etude et Gestion des Sols* 6 (2): 85-104.
- BAIZE D., PAQUEREAU H. [1997]. Teneurs totales en éléments traces dans les sols agricoles de Seine-et-Marne. *Etude et Gestion des Sols* 4 (2): 77-94.
- BAIZE D., RODDIER S. [2002]. Approche typologique d'une cartographie pédogéochimique. Exemple de l'Avallonnais. In BAIZE et TERCE coord. Sci. *Les éléments traces métalliques dans les sols. Approches fonctionnelles et spatiales*. INRA, 565p.
- BAIZE D., SALPETEUR I., BIDEAU L., CORNU S., ITARD Y., KING D., MOUVET C., SALVADOR-BLANES S. [2002]. Fonds pédogéochimiques naturels - concepts et spatialisation. *Comm. orale. Forum Qualité des Sols*, Paris, 15-16mai 2002.
- BAQUET V., LEJEUNE J.-L. [1982]. *Etude de sols à pseudogley dans le temps et l'espace*. TFE FUSAGx: 323p.
- BRAGATO G. et PRIMAVERA F. [1998]. Manuring and soil type influence on spatial variation of soil organic matter properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 1313-1319.
- BENAMGHAR A. [2002]. Etude statistique et géostatistique multivariée de l'inventaire géochimique des ressources métallifères de la Wallonie. Application à l'estimation et à l'interprétation des cartes de risques de pollution en métaux lourds. Thèse de doctorat. UCL,

Références bibliographiques

Louvain-la-Neuve, 333p.

BISHOP T.F.A., McBRATNEY A.B. [2001]. A comparison of prediction methods for the creation of field-extent soil property maps. *Geoderma* 103: 149-160.

BIANCHINI G., LAVIANO R., LOVO S., VACCARO C. [2002]. Chemical-mineralogical characterisation of clay sediments around Ferrara (Italy): a tool for an environmental analysis. *App. Clay Sci.*, 21, 165-176.

BIERKENS M.F.P., BURROUGH P.A. [1993]. The indicator approach to categorical soil data. I. Theory. *Journal of Soil Science*, 44: 361-368.

BOCK L. [1996]. Le sol dans tous ses états. Arguments de pédologie opérationnelle. Communication au séminaire "Echantillonnage et Environnement". 26-27/02/1996. Fondation Universitaire Luxembourgeoise. Arlon. Belgique.

BOCK L. [1994]. Analyses de sols et gestion de l'espace. Plaidoyer pour leur cadrage géomorphopédologique dans les projets, expertises et services de conseil. *Etude et Gestion des Sols*, 1: 23-33.

BOCK L. [1984]. *L'intégration chronospatiale des accumulations calcaires. Approche morphopédologique et géochimique dans un paysage semi-aride de l'Atlas tellien (Algérie)*. Thèse de doctorat FUSAGx, Gembloux.

BOCK L., LAROCHE J., GENOT V., COLINET G., LACROIX D. [2002]. Intérêt des cartes pédologiques pour la caractérisation géochimique des sols. Cas d'une parcelle en Condroz. In BAIZE et TERCE coord. Sci. *Les éléments traces métalliques dans les sols. Approches fonctionnelles et spatiales*.INRA, 565p.

BOGAERT P. [2000]. *Fondements de géostatistiques*. Notes de cours. Université Catholique de Louvain-la-Neuve.

BOGAERT P., D'OR D. [2002]. Estimating soil properties from thematic soil maps: the Bayesian Maximum Entropy approach. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66 (5): 1492-1500.

BOURG A.C.M., DARMENDRAL D., RICOUR J. [1989]. Geochemical Filtration of Riverbank and Migration of Heavy Metals between the Deûle River and the Ansereuilles Alluvion-chalk Aquifer (Nord, France). *Geoderma* 44: 229-244.

Références bibliographiques

BRADY N.C., WEIL R.R. [1996]. *The nature and properties of soils*. Prentice Hal Int. Eds. 740p.

BRAHY V., DECKERS J., DELVAUX B. [2000a]. Estimation of soil weathering stage and acid neutralizing capacity in a toposequence Luvisol-Cambisol on loess under deciduous forest in Belgium. *Eur. J. Soil Sci.* 51, 1-13.

BRAHY V., TITEUX H., ISERENTANT A., DELVAUX B. [2000b]. Surface podzolization in Cambisol under deciduous forest in the Belgian loess belt. *Eur. J. Soil Sci.* 51, 15-26.

BRAHY V. [2000]. *Fonctionnement de sols forestiers acides dérivés de limon loessique au sein d'une toposéquence Luvisol-Cambisol*. Thèse de doctorat, UCL Louvain-la-Neuve, 183p.

BREJDA J.J., MOORMAN T.B., SMITH J.L., KARLEN D.L., ALLAN D. L., DAO T.H. [2000]. Distribution and variability of surface soil properties at a regional scale. *Soil Sci. Soc. Am. J.*: 64: 974-982.

BROHEE J.C., MARCOEN J.M., NAUD J., AGNEESSENS R., LAROCHE J., CHARLIER G., ROMNEE J.M., DARDENNE P., CRELOT I., DELCARTE E. [2002a]. Validation de méthodes performantes d'analyse globale des éléments chimiques (dont la XRF: Spectrométrie de Fluorescence X), appliquées aux terres cultivées et aux intrants valorisables en agriculture. Convention Ministère de la Région Wallonne (DGA) -FUSAGx. Rapport final. 104p. (+ 1 volume annexé).

BROHEE J.C., MARCOEN J.M., NAUD J., AGNEESSENS R., DELCARTE E. [2002b]. Validation de méthodes performantes d'analyse globale des éléments chimiques (dont la XRF: Spectrométrie de Fluorescence X), appliquées aux terres cultivées et aux intrants valorisables en agriculture. Etat d'avancement des travaux pour la période 26.07.01 au 26.12.01 (Val XRF - rapport 4) -Réunion du Comité d'accompagnement du 07.02.02. Convention Ministère de la Région Wallonne. 28p.

BRULARD T. [1962]. *La Hesbaye. Etude géographique d'Economie Rurale*. Bibliothèque de L'Institut de Géographie Paul Michotte. Université catholique de Louvain, Série B, fasc. 10. Librairie Universitaire Uystpruyst. Louvain: 305p.

BURROUGH P.A. [1986]. *Principles of Geographical Information*

Références bibliographiques

Systems for land resources assesment. Clarendon Press Oxford. 193p.

CAMOBRECO V.J., RICHARDS B.K., STEENHUIS T.S., PEVERLY J.H., McBRIDE M.B.[1996]. Movement of heavy metals through undisturbed and homogenized soil columns. *Soil Science*, 161(11): 740-750.

CAMPY M., MACAIRE J.J. [1989]. *Géologie des formations superficielles. Géodynamique, faciès, utilisation.* Masson. Paris, 433p.

CARLETTI I. [2000]. *Analyse des ressources patrimoniales d'un territoire pour l'identification de circuits thématiques. Application à la Vallée de l'Orneau.* TFE FUSAGx, 753p. + annexes.

CELARDIN [2002]. Approche semi-quantitative de la mobilité. In BAIZE et TERCE coord. Sci. *Les éléments traces métalliques dans les sols. Approches fonctionnelles et spatiales.* INRA, 565p.

CHALINE [1985]. *Histoire de l'homme et des climats au Quaternaire.* Doin ed. Paris, 365p.

CHAIGNON [2001]. *Biodisponibilité du cuivre dans la rhizosphère de différentes plantes cultivées. Cas de sols viticoles contaminés par des fongicides.* Thèse de doctorat INRA - Université Aix-MarseilleIII, 183p.

CHAMPION F., GUILITTE P. [1978]. *Contribution à l'étude de sols hydromorphes développés sur loess en Hesbaye Gembloutoise.* TFE FUSAGx: 191p.

CHAPLOT V., WALTER C., CURMI P., HOLLIER-LAROUSSE A. [2000]. The use of auxiliary geophysical data to improve a soil-landscape model. *Soil Science* 165 (12): 961-970.

CHARLATCHKA R., CAMBIER P., BOURGEOIS S. [1997]. Mobilization of trace metals in contaminated soils under anaerobic conditions. In PROST (Ed.) *Contaminated Soils.* Proceedings of the third International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements. Paris, 15-19may 1995.

COLINET G. [1999]. *Contribution à l'étude du sol de Gembloux.* TFE DEA, FUSAGx, Gembloux. 69p.

COLLECTIF [2003]. *Mobilité et transfert racinaire des éléments en traces: influence des micro-organismes du sol.* TEC&DOC. Paris, 282p.

COLLECTIF [1998a]. *Contamination des sols par les éléments en*

Références bibliographiques

traces: les risques et leur gestion. Rapport de l'Académie des Sciences, 42. TEC&DOC. Paris, 440p.

COLLECTIF [1998b]. *Risques sanitaires liés aux boues d'épuration des eaux urbaines.* Direction Générale de la Santé. TEC&DOC. Paris, 106p.

CORDIER L. [1999]. *Les éléments en traces dans les limons du Nord Pas-de-Calais (France).* Contribution à l'établissement d'un référentiel pédo-géochimique. TFE, FUSAGx, Gembloux, Belgium.

CORNELIS C., GEUZENS P. [1993]. *Actergrondgehalten van een aantal anorganische en organische verontreinigingen in vlamse bodems – voorstel voor referentiewaarden.* Rapport MIE/DI/9327, VITO, Afdeling Leefmilieu, 42p.

COTTENIE A., VERLOO M., KIEKENS L. [1974]. La situation des sols belges en éléments traces. In Compte rendu de la Semaine d'étude Sol et fertilisation, 3-7 sept. 1973, *Bulletin des Recherches Agronomiques de Gembloux*: 180-190.

DAGNELIE P. [1986]. *Analyse statistique à plusieurs variables.* Presses agronomiques de Gembloux, 362p.

DAGNELIE P. [1975]. *Théorie et méthodes statistiques. Applications agronomiques.* Tome II. Presses agronomiques de Gembloux, 463p.

DAGNELIE P. [1973]. *Théorie et méthodes statistiques. Applications agronomiques.* Tome I. Presses agronomiques de Gembloux, 378p.

DELECOUR F. [1968]. Distribution des oligo-éléments Cuivre, Zinc et Molybdène dans les Sols Forestiers de l'Ardenne Belge. I. Formes Totales. *Pédologie* 18 (1): 43-62.

DELECOUR F., KINDERMANS M. [1980]. *Manuel de description des sols.* Service de la Science du Sol, FUSAGx, Gembloux.

DELCARTE E. [1988]. *Contribution à la caractérisation analytique de contaminants métalliques des écosystèmes terrestres.* PhD thesis, FUSAGx, 277p.

DE MATOS A.T., FONTES M.P.F., DA COSTA L.M., MARTINEZ M.A. [2001]. Mobility of heavy metals as related to soil chemical and mineralogical characteristics of Brazilian soils. *Environmental Pollution*, 111, 429-435.

DEMOUGEOT-RENARD H., de FOUQUET C. [2001]. La

Références bibliographiques

géostatistique au service de l'environnement. 1. Un atout pour le diagnostic des friches industrielles. *Environnement & Technique* 208, 40-44.

DEMOULIN A. [1993]. L'origine de l'axe Sambre-Meuse. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, 116 (1), 29-41.

DE TEMMERMAN L.O., ISTAS J.R., HOENIG M., DUPIRE S., LEDENT G., VAN ELSEN Y., BAETEN H., DE MEYER A. [1982]. Définition des teneurs "normales" des éléments en trace de certains sols belges en tant que critère de base pour la détection et l'interprétation de la pollution des sols en général. *Revue de l'Agriculture* (2) 35: 1915-1944.

DGRNE [1994]. Le sol. In *Etat de l'Environnement Wallon* (EEW 94), Dachelet A. éd., et Hallet C. pour la partie, Min. de la Rég. Wall. 467 p.

DGRNE [2000]. *Etat de l'Environnement Wallon*.

DGRNE [2001a]. *Etat de l'Environnement Wallon*.

DGRNE [2001b]. *Inventaire de la qualité des sols en Région wallonne*. Première édition. Juin 2001. XXpp. + annexes.

D'OR D., BOGAERT P. [2003]. Continuous-valued map reconstruction with the Bayesian Maximum Entropy. *Geoderma*, 112: 169-178.

DUDAL R. [1953]. Etude morphologique et génétique d'une séquence de sols sur limon loessique . *Agricultura* 1: 119-163.

DUDKA [1992]. Factor analysis of total element concentrations in surface soils of Poland. *The Science of the Total Environment* 121: 39-52

DUDKA, MARKERT [1992]. Baseline corrections of As, Ba, Be, Li, Nb, Sr, and V in surface soils of Poland. *The Science of the Total Environment* 122: 279-290

DUDKOWSKI A. [2000]. L'épandage agricole des boues de stations d'épuration d'eaux usées urbaines. *Le Courrier de l'Environnement de l'INRA* 41, 134-135 (mis en ligne sur <http://www.inra.fr/dpenv/lesboues.htm>.)

EMMANUEL , EREL [2002]. Implications from concentrations and isotopic data for Pb partitioning processes in soils. *Geochem. and Cosmochim. Acta* 66 (14): 2517-2527.

Références bibliographiques

ERIKSSON J [1990]: A field study on factors influencing Cd levels in soils and in grains of oats and winter wheat. - *Water, Air and Soil Pollution* 53, 69-81.

ERIKSSON J, ÖBORN I, JANSSON G & ANDERSSON A [1996] Factors influencing Cd content in crops - Results from Swedish field investigations. *Swedish J. agric. Res.* 26, 125-133.

FAGERIA N.K., BALIGAR V.C., CLARK R.B. [2002]. Micronutrients in crop production. *Adv. in Agronomy* 77, 185-268.

FAO [1998]. World Reference Base for Soil Resources. *World Soil Resources Reports* 84, Rome: 88p.

FAVROT J.C., ARROUAYS D., BORNAND M., GIRARD M.C., HARDY R. [1994]. Informatisation et spatialisation de la ressource sol: le programme «Inventaire, Gestion et conservation des sols». *Cahiers Agricultures*; 3: 237-46.

FORD R.G., SCHEINOST A.C., SPARKS D.L. [2001]. Frontiers in metal sorption/precipitation mechanisms on soil mineral surfaces. *Adv. in Agronomy*, 74, 41-62.

FOURNEAU R. [1985]. Les régions géomorphologiques de Wallonie. *G.E.O.*, 18 (2), 3-35.

GASCUEL-ODOUX Ch., WALTER C., VOLTZ M. [1993]. Intérêt du couplage des méthodes géostatistiques et de cartographie des sols pour l'estimation spatiale. *Sciences du Sol*, 31 (4): 193-213.

GASCUEL-ODOUX Ch., GRIMALDI M., VEILLON L. [1991]. Apport de la géostatistique à l'analyse morphologique du sol: cas d'un transect représentatif de la plaine côtière guyanaise. *Sciences du Sol*, 29 (3): 189-209.

GENOT V. [1999]. *Arguments géomorphopédologiques pour le cadrage de sites, la gestion agronomique et l'évaluation environnementale*. Cas d'études en Condroz. TFE FUSAGx, Gembloux. Belgique

GIRARD M-C, KING D. [1988]. Un algorithme interactif pour la classification des horizons de la couverture pédologique: DIMITRI. *Sciences du Sol*, 26 (2): 81-102.

GONG C., DONAHOE R.J. [1997]. An experimental study of heavy metal attenuation and mobility in sandy loam soils. *Applied geochemistry*, 12, 243-254.

Références bibliographiques

GOODY D.C., SHAND P., KINNIBURGH D.G., RIEMSDIJK W.H. [1995]. Field-based partition coefficients for trace elements in soil solutions. *Eur. J. of Soil Science*, 46, 265-285.

GOOSSENS D. [2000]. The Belgian loess deposits: an overview. In Historical and present-day soil erosion processes in Central Belgium. *Pedologie-Themata* 9, 7-12.

GOOVAERTS P. [1999]. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. *Geoderma* 89: 1-45.

GOOVAERTS P., JOURNEL A.G. [1995]. Integrating soil map information in modelling the spatial variation of continuous soil properties. *Eur. Journal of Soil Science*, 46: 397-414.

GOOVAERTS P., WEBSTER R. [1994]. Scale-dependent correlation between topsoil copper and cobalt concentrations in Scotland. *Eur. J. of Soil Sci.* 45, 79-95.

GUADALIX M.E., PARDO M.T. [1995]. Zinc sorption by acid tropical soils as affected by cultivation. *Eur. J. of Soil Science* 46, 317-322.

GULLENTOPS F., BOGEMANS, De MOOR G., PAULISSEN E., PISSART A. [2001]. Quaternary lithostratigraphic units (Belgium). *Geologica Belgica* 4 1/2: 153-164.

HAESAERTS P., MESTDAGH H., BOSQUET D. [1999]. The sequence of Remicourt (Hebeye, Belgium): new insights on the pedo- and chronostratigraphy of the Rocourt Soil. *Geologica Belgica* 2/3-4: 5-27.

HAESAERTS P. [1984]. Aspects de l'évolution du paysage et de l'environnement en Belgique au Quaternaire. In CAHEN D. et HAESAERTS P. eds. *Peuples chasseurs de la Belgique préhistorique dans leur cadre naturel*. Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique: 27-40.

HAN F.X., KINGERY W.L., SELIM H.M., GERARD P.D. [2000]. Accumulation of heavy metals in a long-term poultry waste-amended soil. *Soil Science*, 165, 3, 260-268.

HARDY M. [2002]. Identification des minéraux porteurs d'ETM dans des sols issus de matériaux limoneux. In BAIZE et TERCE coord. *Sci. Les éléments traces métalliques dans les sols. Approches fonctionnelles et spatiales*.INRA, 565p.

Références bibliographiques

HARDY M., JAMAGNE M., ELSASS F., ROBERT M., CHESNEAU D. [1999]. Mineralogical development of the silt fractions of a podzoluvisol on loess in the Paris Basin (France). *Eur. J. Soil Sci.* 50, 443-456.

HODGSON J.F., GEERING H.R., NORVELL W.A. [1965]. Micronutrient cation complexes in soil solution: partition between complexed and uncomplexed forms by solvent extraction. *Proc. Soil Sci. Soc. Americ.*, 29, 665-669.

HOUOT et SCHWARTZ [2002]. Risques de contamination des sols engendrés par le recyclage des déchets. *Comm. orale. Forum Qualité des Sols*, Paris 15-16mai 2002.

AFES [1995]. *Référentiel pédologique. Principaux sols d'Europe.* INRA, Paris, 222p.

JAMAGNE M. [1993]. Evolution dans les conceptions de la cartographie des sols. *Pedologie* XLIII-1: 59-115.

JAMAGNE M. [1973]. *Contribution à l'étude pédogénétique des formations loessiques du Nord de la France.* PhD thesis, FUSAGx. Gembloux.

JOLIVET C. [2000]. Le carbone organique des sols des Landes de Gascogne. Variabilité spatiale et effets des pratiques sylvicoles et agricoles. Thèse, Université de Bourgogne: 313p.

JUSTE C. [1988]. Appréciation de la mobilité et de la biodisponibilité des éléments en traces du sol. *Sciences du Sol*, 26, 2, 103-112.

JUVIGNE E. [1977]. Zone de dispersion et âge des poussières volcaniques du tuf de Rocourt. *Ann. Soc. Géol. de Belg.* 100, 13-22.

JUVIGNE E. [1976]. La stratigraphie du Quaternaire. In *Géomorphologie de la Belgique. Hommage au Professeur P. MACAR*, Liège, 169-179.

KHOKHLOVA T.I. [1967]. Content and Distribution of Micro-Elements in the Soils of the Kuznetsk Forest Steppe. *Sov. Soil Sci.* 1: 47-53.

KING D. [1986]. *Modélisation cartographique du comportement des sols basée sur l'étude de la mise en valeur du "Marais de Rochefort".* PhD thesis, INRA Paris, 243p.

KLEBER A., MAILÄNDER R., ZECH W. [1998]. Stratigraphic

Références bibliographiques

approach to alteration in mineral soils: the heavy metal example. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 1647-1650.

KUNTZE H., FLEIGE H., HINDEL R., WIPPERMANN T., FILIPINSKI M., GRUPE M., PLUQUET E. [1991]. Empfindlichkeit der Böden gegenüber geogenen und anthropogenen Gehalten an Schwermetallen - Empfehlungen für die Praxis. In ROSENKRANZ D., BACHMAN G., KÖNIG W., EINSELE G. (eds). *Bödenschutz - Ergänzbares Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser*. Kapitel 1530, 86 S. Erich Schmidt Verlag, Berlin.

LAMBERTY E. [1990]. *Traficabilité en milieux forestier et agricole comparés*. TFE FUSAGx: 103p. + annexes.

LANGOHR R. [2001]. L'anthropisation du paysage pédologique agricole de la Belgique depuis le Néolithique ancien. Apports de l'archéopédologie. *Etude et Gestion des Sols* 8 (2): 103-118.

LANGOHR R., SANDERS J. [1985]. The belgian loess belt in the last 20,000 years: evolution of soils and relief in the Zoniën forest. In BOARDMAN J. (ed.) *Soils and Quaternary landscape evolution*. John Wiley & sons: 354-366.

LANGOHR R., SANDERS J. [1984]. Apport de la pédologie à la reconstitution du paléoenvironnement en Belgique au quaternaire. In CAHEN D. et HAESAERTS P. eds. *Peuples chasseurs de la Belgique préhistorique dans leur cadre naturel*. Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique, 41-52.

LATTRILLE C. [1998]. *Localisation des éléments traces métalliques dans les sols. Application au fonds géochimique naturel*. PhD. INRA - Nancy University.

LECOUTRE [1998]. *Méthodes de statistiques multifactorielles. Analyse en Composantes Principales*. Site: <http://epeire.univ-rouen.fr/stats/ACP>, visité en avril 1999.

LEE B.D., CARTER B.J., BASTA N.T., WEAVER B. [1997]. Factors Influencing Heavy Metal Distribution in Six Oklahoma Benchmark Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 218-223.

LEENHARDT D., VOLTZ M., BORNAND M., WEBSTER R. [1994]. Evaluating soil maps for prediction of soil water properties. *Eur. Journal of Soil Science*, 45: 293-301.

Références bibliographiques

LEGROS J.P., MARTIN S., BAIZE D., RIVIERE J.-M., LEPRETRE A. [2002]. Accumulation de cuivre et de zinc dans une parcelle de l'observatoire de la qualité des sols (OQS). In BAIZE et TERCE coord. Sci. *Les éléments traces métalliques dans les sols. Approches fonctionnelles et spatiales*.INRA, 565p.

LEGROS J.P. [1996]. Cartographies des sols. De l'analyse spatiale à la gestion des territoires. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Collection Gérer l'environnement, (10), Lausanne, 321 p.

LI Z., SCHUMAN L.M.[1996]. Heavy metal movement in metal-contaminated soil profiles. *Soil Science* 161 (10), 656-666.

LOZET J., MATHIEU C. [2002]. *Dictionnaire de science du sol*. 4° édition. TEC&DOC, Paris, 575p.

MAC BRIDE M.B., RICHARDS B.K., STEENHUIS T., SPIERS G. [1999]. Long-term leaching of trace elements in a heavily sludge-amended silty clay loam soil. *Soil Science* 164 (9): 613-623

MAC BRIDE M.B., RICHARDS B.K., STEENHUIS T., RUSSO J.J., SAUVE S. [1997]. Mobility and solubility of toxic metals and nutrients in soil fifteen years after sludge application. *Soil Science* 162 (7): 487-500.

MAC GRATH [1997]. Behaviour of trace elements in terrestrial ecosystems. In PROST (Ed.) *Contaminated Soils*. Proceedings of the third International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements. Paris, 15-19may 1995.

MAC GRATH, LOVELAND [1992]. *The soil geochemical Atlas of England and Wales*. Glasgow: Blackie Academic & Professionnal. 101p.

MAES E., ISERENTANT A., HERBAUTS J., DELVAUX B. [1999]. Influence of the nature of clay minerals on the fixation of radiocaesium traces in an acid brown earth-podzol weathering sequence. *Eur. J. of Soil Sci.*, 50, 117-125.

MANIL G., DELECOEUR F. [1958]. Identification en Belgique de loess typiques anté-rissiens, probablement d'âge Mindel. *Bull. de la Soc. belge de Géol., de Paléontol. et d'Hydrol.* 66: 203-211.

MANIL G. [1960]. Quelques observations sur les loess anciens de Belgique. *Biuletyn Peryglacjalny*, 9, 83-90.

Références bibliographiques

- MANIL G. [1952]. Quelques considérations générales sur la stratigraphie quaternaire et la pédogénèse à propos de la description de trois coupes de Loess (Hesbaye Gembloutoise). *Ann. Soc. Géol. de Belg.* 75: 153-165.
- MANIL G. [1949]. Le Quaternaire des environs de Gembloux. La tranchée de Mazy. *Bull. Soc. Belge Géol.* 58: 139-152.
- MARTIN [1998]. Les sources de pollution des sols. In STENGEL P. et GELIN S. coord. *Sol: interface fragile*. INRA. 214p.
- MASSON V. [1986]. *Caractérisation et comparaison de l'évolution du solum dans deux séquences de profils de sols bruns, sous forêt et sous culture, en Région limoneuse de Nivelles (Houtain-le-Mont)*. TFE FUSAGx: 103p.
- MICHELIN J., BOURGEOIS S., WIART J., BERMOND A. [2002]. Bilan dans un sol agricole suite à des apports réguliers depuis 1985. In BAIZE et TERCE coord. Sci. *Les éléments traces métalliques dans les sols. Approches fonctionnelles et spatiales*. INRA, 565p.
- MORERA M.T., ECHEVERRIA J.C., MAZKiaran C., GARRIDO J.J. [2001]. Isotherms and sequential extraction procedures for evaluating sorption and distribution of heavy metals in soils. *Env. Pollution*, 113, 429-435.
- NAVAS A., MACHIN J. [2002]. Spatial distribution of heavy metals and arsenic in soils of Aragón (northeast Spain): controlling factors and environmental implications. *Applied geochemistry* 17: 961-973.
- NEF J.-L. [1977]. *Contribution à l'étude des sols hydromorphes en Hesbaye Gembloutoise*. TFE FUSAGx: 173p.
- NEUBAUER U., FURRER G., SCHULIN R. [2002]. Heavy metal sorption on soil minerals affected by the siderophore desferrioxamine B: the role of Fe(III) (hydr)oxides and dissolved Fe(III). *Eur. J. of Soil Science*, 53, 45-55.
- NOIRFALISE A. [1988]. Les régions naturelles de la Belgique. *G.E.O.* 23:3-25.
- OERTEL A.C. [1961]. Relation between trace element concentrations in soil and parent material. *J. of Soil Sci.* 12 (1): 119-128.
- PAEPE R., VANHOORNE R. [1976]. The Quaternary of Belgium in its relationship to the stratigraphical legend of the geological Map.

Références bibliographiques

Service Géologique de Belgique, Mémoire N° 18, 38p.

PAEPE R. [1968]. Les sols fossiles pléistocènes de la Belgique. *Pédologie* 18 (2): 176-188.

PAEPE R. [1966]. Comparative stratigraphy of Würm loess deposits in Belgium and Austria. *Bull. de la Soc. belge de Géol., de Paléontol. et d'Hydrol.* 75 (2): 203-216.

PALM R. [2000]. L'analyse de la variance multivariée et l'analyse canonique discriminante: principes et applications. *Notes stat. Inform.* (Gembloux) 2000/1, 40p.

PECROT A. [1956]. *Etude détaillée des sols de la Hesbaye occidentale. Application à quelque problèmes d'actualités.* Centre de Cartographie des Sols, 295 p.

PEDRO G. [1987]. Géochimie, minéralogie et organisation des sols. Aspects coordonnés des problèmes pédogénétiques. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XXIII, 3: 169-186.

PEDRO G., DELMAS A.B.[1970]. Les principes géochimiques de la distribution des éléments-traces dans les sols. *Ann. agron.* 21 (5): 483-518.

POLLUSOL (BOCK L., BOGAERT P., COLINET G., DELCARTE E., DELVAUX B., DUCARME F., LAROCHE J., MAESEN P., MARCOEN J.M., SONNET P., WIBRIN M-A par ordre alphabétique) [2003]. Convention d'étude Pollusol : Etablissement et cartographie des teneurs bruts de fond en éléments traces métalliques et micropolluants organiques dans les sols de la Région wallonne. Rapport final du groupe d'étude APPP, « Application de la pédologie aux problèmes de pollution ». SONNET P. coord. (SPAQuE-UCL-FUSAGx-BEAGx-CAFX), 125p.

POUQUET J. [1966] *Les sols et la géographie. Initiation géopédologique.* Soc. d'Edition d'Enseignement Supérieur, Paris, 267p.

PRUDENTE D., BAIZE D., DUBOIS J.-P. [2002]. Le cadmium naturel dans une forêt du haut Jura français. In BAIZE et TERCE coord. Sci. *Les éléments traces métalliques dans les sols. Approches fonctionnelles et spatiales.* INRA, 565p.

QUEVAUVILLER P. [2001]. *Métrie en chimie de l'environnement.* Paris: TEC&DOC. 257p.

Références bibliographiques

RANDLE K., HARTMANN E.H. [1995]. Applications of the continuous-flow stirred-cell (CFSC) technique: II. the adsorption behaviour of Na, Cs, Sr, Cu, Ni, and Pb on humic acids. *Eur. J. of Soil Science*, 46, 303-315.

REIMANN C., SIEWERS U., TARVAINEN T., BITYUKOVA L., ERIKSSON J., GILUCIS A., GREGORAUSKIENE V., LUKASHEV V., MATINIAN N.N., PASIECZNA A. [2000]. Baltic soil survey: total concentrations of major and selected trace elements in arable soils from 10 countries around Baltic Sea. *The Science of the Total Environment* 257: 155-170.

ROBBEZ-MASSON J.M. [1994]. *Reconnaissance et délimitation de motifs d'organisation spatiale. Application à la cartographie des pédopaysages*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier, 161 p.

ROBERT [1996]. *Le sol: interface dans l'environnement, ressource pour le développement*. Masson. Paris, 244 p.

RÖVER M., KAISER E-A. [1999]. Spatial heterogeneity within the plough layer: low and moderate variability of soil properties. *Soil Biol. Biochem.* 31: 175-187.

SALVADOR-BLANES S. [2002]. *Déterminisme de la distribution spatiale des éléments majeurs et traces dans les sols en contexte métamorphique (Plateau d'Aigurande, nord du Massif central, France)*. thèse, Université de Tours, 287p.

SANDERS J., BAES R., LANGOHR R. [1986]. Micromorphology of a dry flat-bottomed valley soil in the Zonien Forest, loess belt of Middle Belgium. *Pédologie* 36, 227-302.

SCHLESINGER W.H. [1991]. *Biogeochemistry. An Analysis of Global Change*. Academic Press Inc. San Diego. California: 443p.

SHIBLI S.A.R. [1999]. *Geostatistics - Frequently Asked Questions*. Site: <http://curie.ei.jrc.it/faq/index.html> - visité en juin 1999.

SINOWSKI W., AUERSWALD K. [1999]. Using relief parameters in a discriminant analysis to stratify geological areas with different spatial variability of soil properties. *Geoderma* 89: 113-128.

SMITH S.R. [1996]. *Agricultural recycling of sewage sludge and the environment*. CAB International. 382p.

Références bibliographiques

SONDAG F. [1985]. Geochemical inventory in the stream sediments over the paleozoic formations of Belgium. *Bulletin de la Société Belge de Géologie*. 94(2), 159-163.

SONDAG F., MARTIN H. [1985]. *Inventaire géochimique des ressources métallifères de la Wallonie*. Synthèse générale et rapport de fin de recherches. Projet ministère de l'économie wallonne, UCL, Unité de géologie, 1984, 15p.

SONNET P., BENAMGHAR [2000]. Evaluation de la qualité géochimique des berges pour le dépôt des produits de curage des cours d'eau. Rapport final de convention Université Catholique de Louvain-la-Neuve-Région Wallonne (DGRNE).

STEIN A., HOOGERWERF M., BOUMA J. [1988]. Use of soil map delineation to improve (co)-kriging of point data on moisture deficits. *Geoderma*, 43:163-177.

STENGEL P. [1998]. *Sol : interface fragile*. INRA ed. Paris, 214p.

STENGER R., PRIESACK E., BEESE F. [2002]. Spatial variation of nitrate-N and related soil properties at the plot- scale. *Geoderma* 105: 259-275.

STERCKEMAN T., DOUAY F., BAIZE D., FOURRIER H., PROIX N., CORDIER L., SCHVARTZ. [2002]. Constitution d'un référentiel pédogéochimique régional: méthodologie et premiers résultats. In BAIZE et TERCE coord. Sci. *Les éléments traces métalliques dans les sols. Approches fonctionnelles et spatiales*.INRA, 565p.

STERCKEMAN T., DOUAY F., FOURRIER H., PROIX N. (2003) "Référentiel Pédo-Géochimique du Nord - Pas de Calais ". Rapport INRA-ISA 127 p. (+ annexes).

STOLT M.H., BAKER J.C., SIMPSON T.W. [1993]. Soil-landscape Relationships in Virginia: I. Soil Variability and Parent Material Uniformity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 414-421.

SWAINE D.J., MITCHELL R.L. [1960]. Trace-element distribution in soil profiles. *J. of Soil Sci.* 11 (2): 347-368.

TARVAINEN T., KALLIO E. [2002]. Baselines of certain bioavailable and total heavy metal concentrations in Finland. *Applied Geochemistry* 17: 975-980.

TAVERNIER R., MARECHAL R. [1958]. Carte des associations de

Références bibliographiques

sols. *Pédologie* VIII: 134-182.

TESSIER L., GREGORICH E.G., TOPP E. [1998]. Spatial variability of soil microbial biomass measured by the fumigation extraction method, and Kec as affected by depth and manure application. *Soil Biol. Biochem.* 30:1369-1377.

THOREZ J., BOURGUIGNON P., PAEPE R. [1970]. Etude préliminaire des associations de minéraux argileux des loess pléistocènes en Belgique. *Ann. Soc. Géol. Belgique* 93: 265-285.

TILLER K.G., GERTH J., BRÜMMER G. [1984a]. The sorption of Cd, Zn, and Ni by soil clay fractions: procedures for partition of bound forms and their interpretation. *Geoderma*, 34, 1-16.

TILLER K.G., GERTH J., BRÜMMER G. [1984b]. The relative affinities of Cd, Ni and Zn for different soil clay fractions and goethite. *Geoderma*, 34, 17-34.

TRIANTAFILIS J., HUCKEL A.I., ODEH I.O.A. [2001]. Comparison of statistical prediction methods for estimating field-scale clay content using different combination of ancillary variables. *Soil Science*, 166 (6):415-427.

TROLARD F., BOURRIE G., JAFFREZIC A. [2002]. Distribution spatiale et mobilité des ETM en région d'élevage intensif. In BAIZE et TERCE coord. Sci. *Les éléments traces métalliques dans les sols. Approches fonctionnelles et spatiales*.INRA, 565p.

TSEGAYE T., HILL R.L. [1998]. Intensive tillage effects on spatial variability of soil physical properties. *Soil Science*: 143-154.

VAN DER SLUYS J., BRUSSELMANS A., DE VOS W., SWENNEN R. [1997]. Regional Geochemical mapping of overbank and stream sediments in Belgium and Luxembourg. Vol. III. Geochemical maps of Belgium and Luxembourg based on overbank and active stream sediments. *Prof. paper Service Géol. de Belgique*, N° 283.

VAN MEIRVENNE M. [1998]. Predictive Quality of the Belgian Soil Survey Information. *Pedologie-Themata*, n°5: 21-29.

VAN RANST E., DE CONNINCK F., TAVERNIER R., LANGHOR R. [1982]. Mineralogy in silty to loamy soils of central and high Belgium in respect to autochthonous and allochthonous materials. *Bulletin de la Société Belge de Géologie* 1, 27-44.

Références bibliographiques

VAN RIEMSDIJK W.H., BENEDETTI M.F., HIEMSTRA T. [1997]. Possibilities for predicting mobility of trace elements in soils via modeling. In PROST (Ed.) *Contaminated Soils*. Proceedings of the third International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements. Paris, 15-19may 1995.

VAN VLIET-LANOË B. [1990]. The genesis and age of the argillic horizon in Weischelian loess of northwestern Europe. *Quaternary International* 5: 49-56.

VAN VLIET B., LANGOHR R. [1981]. Correlation between fragipans and permafrost with special reference to silty Weichselian deposits in Belgium and Northern France. *Catena* 8 : 137-154.

VOLTZ M., LAGACHERIE P., LOUCHART X. [1997]. Predicting soil properties over a region using sample information from a mapped reference area. *Eur. Journal of Soil Science*, 48: 19-30.

VOLTZ M., WEBSTER R. [1990]. A comparison of kriging, cubic splines and classification for predicting soil properties from sample information. *Journal of Soil Science*, 41: 473-490.

WALTER C. [1993]. L'estimation de propriétés du sol par krigeage d'indicatrices confrontée à celle dérivée d'une carte pédologique. *Science du Sol*, 31 (4):215-231.

WALTER C., CURMI P. [1998]. Les sols du bassin versant du Coët-Dan: organisation, variabilité spatiale et cartographie. In CHEVERRY C. *Agriculture intensive et qualité des eaux*. INRA, Paris: 85-105.

WARIN A. [2000]. Contribution à la détermination du fond géopédochimique naturel dans les limons de Hesbaye gembloutoise. TFE FUSAGx, 75p.

WEBSTER R. [2001]. Statistics to support soil research and their presentation. *European Journal of Soil Science* 52: 331-340.

WEBSTER R., [1991]. Local disjunctive kriging of soil properties with change of support. *Journal of Soil Science*, 42: 301-318.

WEBSTER R., ATTEIA O., DUBOIS J.-P. [1994]. Coregionalization of trace metals in the soil in the Swiss Jura. *Eur. Journal of Soil Science*, 45: 205-218.

WEBSTER R., OLIVER M.A. [2001]. *Geostatistics for environmental scientists*. J. Wiley & Sons, Ltd.

Références bibliographiques

WEBSTER R., OLIVER M.A. [1990]. *Statistical Methods in Soil and Land Resource Survey*. Oxford University Press. New-York, 316 p.

WEBSTER R., OLIVER M.A. [1989]. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. VI. Disjunctive kriging and mapping the conditionnal probability. *Journal of Soil Science*, 40: 497-512..

WEBSTER R., PAYNE R.W. [2002]. Analysing repeated measurements in soil monitoring and experimentation *Eur. J. of Soil Sci.*, 53: 1-13.

WITTER [1996]. Towards zero accumulation of heavy metals in soils. An imperative or a fad? *Fertilizer Research* 43: 225-233.

Références bibliographiques

Glossaire

Ci-après se trouvent les acceptations qu'il faut donner à certains termes utilisés dans le texte de la thèse.

Association de sols (MARECHAL et TAVERNIER, 1974) :

unité cartographique groupant des unités taxonomiques parfois très diverses, mais qui se rencontrent associées de façon souvent fort imbriquée sur des aires relativement étendues.

Biodisponibilité (COLLECTIF, 2003):

capacité d'un élément à être absorbé ou prélevé par un organisme vivant.

Coefficient de distribution K_d (COLLECTIF, 2003):

paramètre utilisé pour quantifier la distribution d'un élément trace entre phases solide et dissoute;
rapport, à l'équilibre, entre la concentration de l'espèce étudiée dans la phase solide et sa concentration dans la phase liquide.

Couverture pédologique (AFES, 1995) :

terme utilisé pour désigner "le sol" en tant qu'objet naturel, continu et tridimensionnel, ...en perpétuelle évolution.

Eléments traces (BAIZE et TERCE, 2002) :

Eléments chimiques, constituants de la croûte terrestre, dont la concentration est pour chacun d'eux inférieure à 0,1% ; certains sont toxiques ; l'expression "*métaux lourds*" est souvent employée abusivement car certains éléments traces toxiques ne sont pas des métaux (As, Se) et d'autres présentent une masse volumique relativement faible ($< 6\text{g/cm}^3$) ; les *macro-* et *micro-éléments* se distinguent par leurs teneurs mesurées dans le domaine du vivant. 0,01% de la matière sèche constitue le seuil de partage entre ces deux groupes. Parmi les micro-éléments, les *oligo-éléments* sont indispensables au déroulement des processus biologiques.

Exactitude (QUEVAUVILLER, 2001) :

étroitesse de l'accord entre le résultat d'un mesurage et une valeur vraie du mesurande ;

la *répétabilité* est l'étroitesse de l'accord entre les résultats des mesurages successifs du même mesurande dans les mêmes conditions de mesure ;

la *reproductibilité* est l'étroitesse de l'accord entre les résultats des mesurages du même mesurande en faisant varier les conditions de mesure.

Facteur de transfert (COLLECTIF, 2003) :

rapport de la concentration d'un élément dans un compartiment donné à celle du "niveau trophique inférieur".

Fidélité (QUEVAUILLER, 2001) :

aptitude d'un instrument de mesure à donner des indications très voisines lors de l'application répétée du même mesurande dans les mêmes conditions de mesure.

Fond géochimique:

concentration d'un élément résultant de l'héritage de la roche-mère.

Fond pédo-géochimique naturel (FPGN - BAIZE, 1997):

teneur en un élément dans le sol résultant des processus d'héritage, de transferts pédologiques et du cycle biogéochimique (synonyme: teneur naturelle).

Gley (voir Réductique ou Hydromorphie).

Gleyification :

Phénomène par lequel se créent dans le sol un horizon à *gley* ou à *pseudogley*.

Horizon (AFES, 1995) :

unité élémentaire correspondant à un volume de couverture pédologique suffisamment homogène par rapport à l'échelle d'investigation.

Hydromorphie :

manifestation morphologique de l'engorgement dans un horizon ou un solum sous la forme de taches, de ségrégations, de colorations ou de décolorations (BAIZE, en cours de publication) ;

lorsque l'hydromorphie est temporaire, interviennent pendant la période hivernale d'engorgement une réduction et une mobilisation partielle du fer et du manganèse, suivie de leur précipitation localisée sous forme de taches rouille ou de concrétions, par réoxydation, alors que la nappe disparaît en été ; il y a formation du *pseudogley* (LOZET et MATHIEU, 2002) ;

lorsque l'hydromorphie est permanente, la nappe est très réductrice , le fer est principalement à l'état ferreux (horizon *gley*, symbolisé G).

Justesse (QUEVAUVILLER, 2001) :

aptitude d'un instrument de mesure à donner des indications exemptes d'erreur systématique.

Lessivage (LOZET et MATHIEU, 2002):

entraînement mécanique d'argile en suspension le long des fentes ou autres vides... différent de

lixiviation qui concerne la migration d'éléments solubles (nitrates, alcalins, silice...).

Lixiviation (voir lessivage).

Loi chorologique (JAMAGNE *et al.*, 1993) :

loi (ou supposée telle) de répartition des sols dans le paysage;

une *séquence de sols* est un ensemble de sols connexes dont la répartition géographique se retrouve constamment dans un ordre déterminé; (synonyme: *combinaison de sols* - école russe de pédologie);

une *chaîne de sols* (ou *caténa*) est un ensemble de sols liés génétiquement, chacun d'eux ayant reçu des autres ou cédé aux autres certains de ses constituants;

lorsque les sols sont associés sans règle de répartition identifiée, on parle de *juxtaposition de sols*.

Macro-éléments (voir Eléments traces).

Marmorisation (LOZET et MATHIEU, 2002) :

formation de marbrures, *i.e.* de taches ou veines de couleurs différentes dispersées dans le matériau-sol dont la couleur est plus ou moins uniforme (synonyme bariolage).

Métaux lourds (voir Eléments traces).

Micro-éléments (voir Eléments traces).

Minéralomasse (BAIZE et TERCE, 2002) :

masse totale des éléments minéraux présents dans les organismes d'une biocénose, d'une communauté ou d'un peuplement (Synonyme de cendres totales).

Mobilité (BAIZE, 1997) :

aptitude d'un élément à passer dans des compartiments du sol où il est de moins en moins énergiquement retenu ; notion distincte de migration qui implique un déplacement physique.

Modèle d'organisation de sols (JAMAGNE *et al.*, 1993) :

synonyme d'*Unité de Fonctionnement de sols*, fragment d'unité de paysage ou de modèle dont on connaît l'organisation et dont on perçoit la dynamique de fonctionnement.

Oligo-éléments (voir Eléments traces).

Pédopaysage :

ensemble des horizons pédologiques et des éléments paysagers (végétation, effet des activités humaines, géomorphologie, hydrologie, roches-mères ou substrats) dont l'organisation spatiale permet de définir, dans son ensemble, tout ou partie d'une couverture pédologique; (AFES, 1995)

dans l'approche de cartographie pédopaysagère, les unités éponymes constituent le niveau supérieur dans la série de structures emboîtées: horizons - unités typologiques - unités cartographiques - unités de fonctionnement - pédopaysage (JAMAGNE *et al.*, 1993).

Profil (AFES, 1995) :

séquence d'informations concernant un solum, ordonnée de haut en bas. Informations relatives à des caractères visuels (profil structural) ou bien à une seule variable (profil calcaire,

profil hydrique, profil granulométrique) ou bien à des considérations plus synthétiques (profil d'altération, profil cultural); notion différente de solum.

Pseudogley (voir rédoxique ou hydromorphie).

Rédoximorphe (LOZET et MATHIEU, 2002) :

caractère associé à l'humidité et formé suite à la réduction, au mouvement et à l'oxydation des composés fer-manganèse dans un sol subissant une alternance périodique de saturation et de désaturation par l'eau.

Rédoxique (AFES, 1995) :

symbole -g, qualifie un horizon caractérisé par une juxtaposition de plages, de traînées grises et de taches, de nodules, voire de concrétions de couleur rouille (synonyme d'horizon à *pseudogley*); la répartition du fer est très hétérogène

Réductique (AFES, 1995) :

qualifie un horizon caractérisé par une couleur dominante grise (gris bleuâtre, gris verdâtre) et une répartition du fer plutôt homogène (synonyme d'horizon de gley);

Répétabilité (voir Exactitude).

Reproductibilité (voir Exactitude).

Résistance (COLLECTIF, 2003):

aptitude d'un organisme à survivre en présence d'éléments toxiques grâce à des mécanismes agissant directement contre la toxicité des éléments.

Série de sols :

ou type de sol détaillé: type de sol existant localement, développé dans un matériau parental précis, parfaitement caractérisé pédologiquement (BAIZE, 1997);

notion différente de la série de sols CSB qui est l'unité fondamentale de la typologie CSB mais qui ne présente pas de définition géographique précise;

Solum (AFES, 1995) :

tranche verticale d'une couverture pédologique observable dans une fosse ou une tranchée. On intègre dans le solum une épaisseur suffisante de la roche sous-jacente pour en permettre la caractérisation; notion différente de profil.

Spéciation (BAIZE et TERCE, 2002) :

définition de la forme chimique dans laquelle se trouve un élément, ou de la phase porteuse à laquelle il est associé dans un milieu donné.

Teneurs agricoles habituelles (BAIZE, 2002):

gamme de valeurs fréquemment observées pour une série de sols sous agriculture "normale" (synonyme: teneurs agricoles usuelles, fréquentes, normales...).

Teneurs pseudo-totales (voir teneurs totales).

Teneurs totales :

concentration d'un élément mesurée après mise en solution de tous les constituants d'un échantillon de sol;

différent de *teneur pseudo-totale* pour laquelle les réactifs mis en oeuvre ne permettent pas la dissolution complète de toutes les formes des éléments concernés: ex. HNO₃, "Eau régale"...

Tolérance (COLLECTIF, 2003):

capacité d'un organisme à se développer en présence d'éléments toxiques.

Les termes spécifiques à la Carte des Sols de la Belgique (CSB) sont expliqués dans l'annexe 1.

Liste des acronymes

- AAS: *Atomic Absorption Spectrometry.* Spectrométrie d'absorption atomique.
- ADEME: Agence de l'Environnement et de la maîtrise de l'énergie.
- ARVA : Association de recherche et de valorisation en agriculture.
- ASPIRET: Apports d'une Stratification Pédologique pour l'Interprétation des Teneurs en Eléments Traces. Programme de Recherche de l'INRA.
- BEAGx: Bureau d'Etudes et d'Analyses de Gembloux.
- BRGM: Bureau de Recherche Géologique et Minière (France).
- CRAGx: Centre de Recherches Agronomiques de Gembloux.
- CSB: Carte des Sols de la Belgique.
- DGRNE : Direction générale des ressources naturelles et de l'environnement.
- ER : Mise en solution par attaque à « l'eau régale »
- FPGN: Fond Pédo-Géochimique Naturel.
- FUSAGx: Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux.
- HF : Mise en solution par attaque triacide dont l'acide fluorhydrique
- ICP: *Inductively Coupled Plasma...* Plasma induit par haute fréquence.
- INRA: Institut National de la Recherche Agronomique (France).
- INIEX : Institut National des Industries Extractives
- IRC: Institut de Recherches Chimiques.
- ISSeP : Institut Scientifique de Service Public
- MO : Matière organique
- MOD : Matière organique dissoute
- MOS : Matière organique du sol
- NGR: *National Geochemical Reconnaissance.*
- OWD: Office Wallon des Déchets.
- REQUASUD : Réseau Qualité Sud
- RPG: Référentiel Pédo-Géochimique.
- SPAQuE: Société Publique d'Aide à la Qualité de l'Environnement.

- UCL: Université Catholique de Louvain-la-Neuve
- TRB: *Total Reserve in Base*, réserve totale en bases (Ca, Mg, K, Na) exprimée en cmol./kg.
- VITO: *Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek* - Institut flamand pour la recherche technologique
- XRF: *X-Ray Fluorescence* – fluorescence X