

COMMUNAUTE FRANCAISE DE BELGIQUE  
FACULTE UNIVERSITAIRE DES SCIENCES AGRONOMIQUES DE GEMBOUX

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

Gilles COLINET

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

**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 integrates ancillary data 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<sup>me</sup> Willocq pour tout ce qui concerne la thèse. Je remercie également le P<sup>f</sup> Lambotte qui s'est révélé une personne-ressource très précieuse.

Merci au P<sup>f</sup> 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<sup>rs</sup> 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<sup>f</sup> 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<sup>f</sup> 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<sup>f</sup> 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<sup>f</sup> Culot, infatigable travailleur et membre organique de la Société des oenologues avertis. Vos conseils et encouragements m'ont été plus que bénéficiales. Au quotidien, vous avez toujours fait preuve d'empathie à mon égard.

Merci au P<sup>f</sup> 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<sup>rs</sup> Sonnet et Delvaux ainsi que Francois, dont la galoche n'a rien à envier à la mienne.

Merci au P<sup>f</sup> 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<sup>f</sup> 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<sup>o</sup> AT et surtout au P<sup>f</sup> 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 prédiction*

#### 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 ANTHROPISATION 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 insondable 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 géologique<sup>1</sup> (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-investigués. 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

---

<sup>1</sup> 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  $t_0$  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 traces métalliques (ETMs).*



Table des matières

<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE.1 PROBLEMATIQUE</b>	<b>6</b>
1.1 <i>Les ETMs dans les sols.</i>	6
1.2 <i>Mobilité des ETMs</i>	10
1.3 <i>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
1.4 <i>Conclusions</i>	29
<b>CHAPITRE.2 PRESENTATION DU CADRE DE L'ETUDE</b>	<b>31</b>
2.1 <i>La Région limoneuse</i>	31
2.1.1 Le cadre géologique régional	31
2.1.2 Dépôts quaternaires, modelé et régions géomorpho-logiques	34
2.1.3 Délimitation d'une zone d'étude en région limoneuse	43
2.2 <i>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
<b>CHAPITRE.3 STRATEGIES D'ECHANTILLONNAGE</b>	<b>62</b>
3.1 <i>Paramètres à suivre</i>	62
3.1.1 Variables explicatives	62
3.1.2 Teneurs en ETMs	65
3.2 <i>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
3.3 <i>Méthodologie adoptée</i>	74
3.3.1 Une démarche comparative pas-à-pas	74
3.3.2 Des modes opératoires intégrés	77
<b>CHAPITRE.4 CONSIDERATIONS RELATIVES A L'INTERPRETATION DES RESULTATS ANALYTIQUES POUR LES ELEMENTS TOTAUX</b>	<b>79</b>
4.1 <i>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 limoneuse .....	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 méthodologie .....	75
Figure I.17:	Comparaison des résultats d'analyse du Co total par attaque triacide et.....	88
Figure I.18:	absorption atomique (AAS), ou ICP et par fluorescence X (XRF) .....	89
Figure I.19:	Comparaison des résultats d'analyse du K total par attaque triacide et .....	89
Figure I.20:	absorption atomique (AAS), ou ICP et par fluorescence X (XRF) .....	90
Figure I.21:	Comparaison des résultats d'analyse du Cr total par attaque triacide et .....	100
Figure I.22:	Exemple de dendrogramme représentant la structure du regroupement.....	105
Figure I.23:	des individus .....	106
Figure I.24:	modèle de variation par palier; polygonations de THIESSSEN .....	109
Figure I.25:	<i>Trend surfaces</i> en deux dimensions spatiales (a) linéaire, (b) quadratique, .....	112
Figure I.26:	(c) cubique .....	113
Figure I.27:	composantes de la variation spatiale d'une propriété .....	113
Figure I.28:	Formes typiques de semi-variogrammes .....	113
Figure I.29:	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/dépôts 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 ruissellement 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 accidentelles, 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).

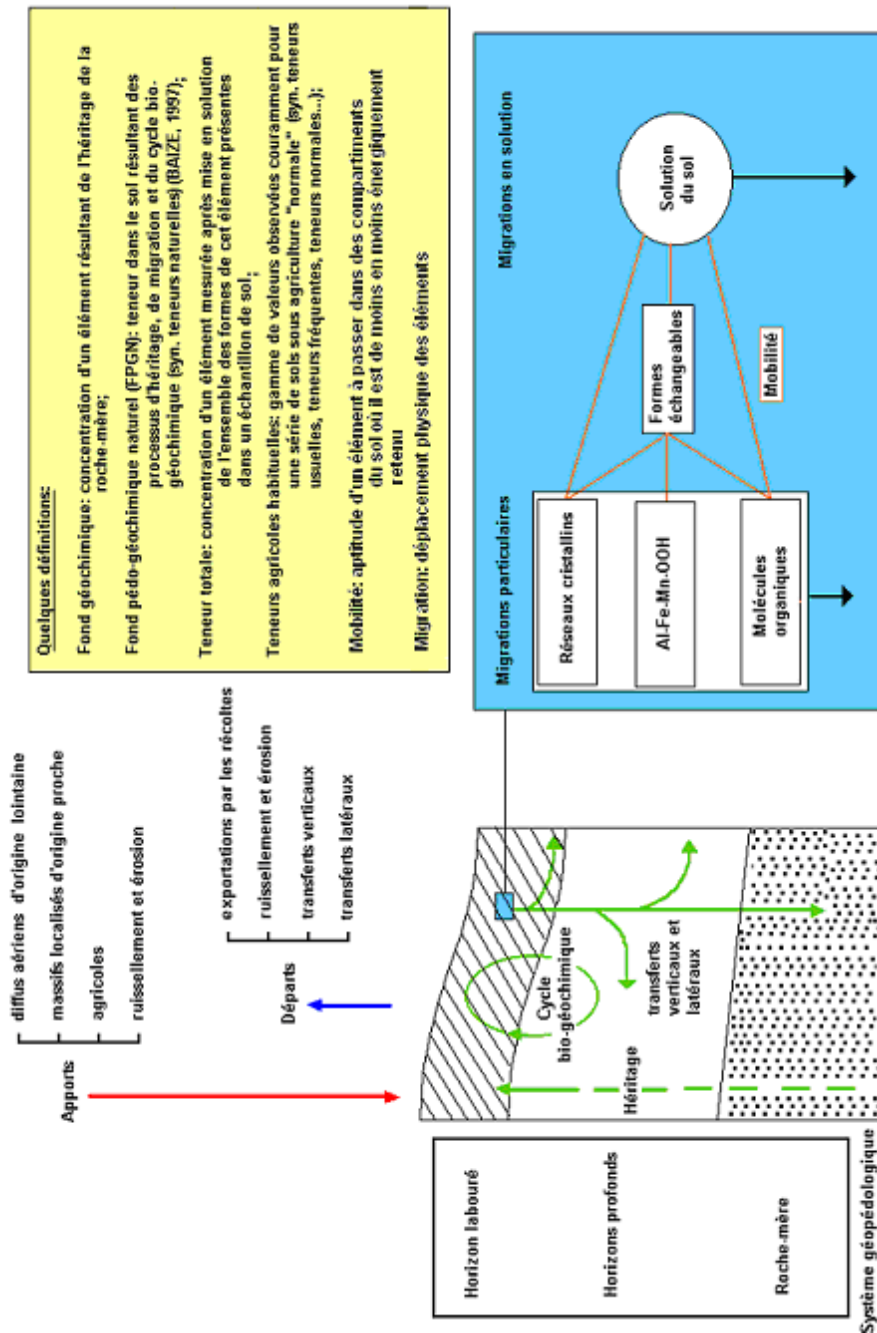


Figure I. 1: Eléments-traces dans les sols: processus, formes et flux (modifié d'après BAIZE, 1997), définitions.

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 géologique<sup>1</sup>.

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 engrais, 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

---

<sup>1</sup> 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 matériau 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 acceptions 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<sub>arg.</sub> ; FPG<sub>Fe</sub>): *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<sub>H</sub> - 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<sub>NC</sub>): *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-hydroxydes<sup>2</sup> 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 (pKa) régit la forme ionique (si  $\text{pH} < \text{pKa}$ ) ou hydroxylée (si  $\text{pH} > \text{pKa} = \text{hydrolyse}$ ); le produit de solubilité (pS) la forme *sel* (si  $\text{pH} > \text{pS}$  et  $\text{pS} < \text{pKa}$ , *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 ( $\emptyset = \text{charge } (z) / \text{rayon ionique } (r)$ ) 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  $\text{CO}_2$  favorisera la mobilisation des éléments du groupe B (pour des  $\text{pH} > \text{pKa}$ ), alors que celle de  $\text{H}_2\text{S}$  les freinera (en raison des produits de solubilité).

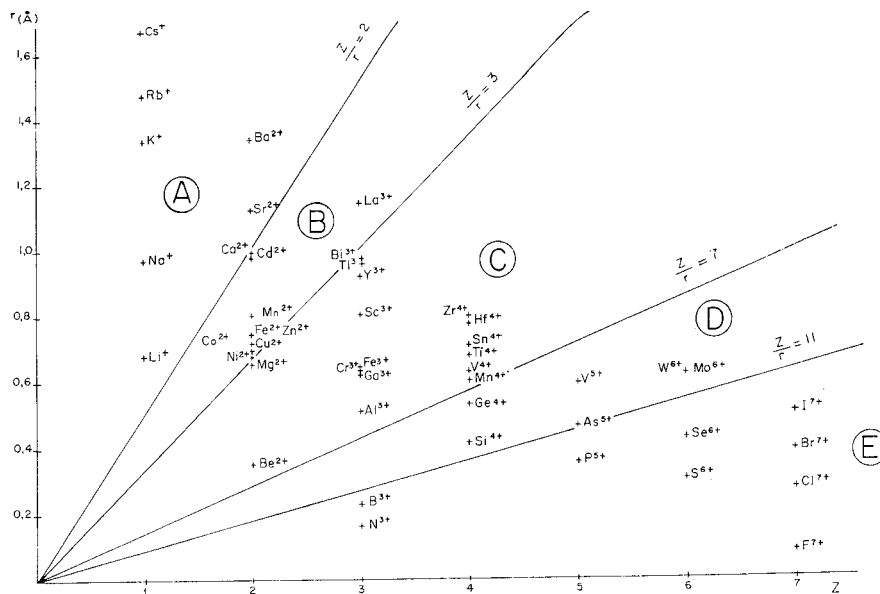
En première approche, par rapport aux propriétés des sols, ce seront donc le pH, la présence de matière organique complexante<sup>3</sup>, et les transferts d'eau qui vont régir les transferts d'éléments dans et hors du profil. On comprend bien pourquoi les sols podzolisés sont le siège des migrations les plus importantes.

---

<sup>2</sup> Dans la suite du travail,  $\text{AlOOH}$ ,  $\text{FeOOH}$  et  $\text{MnOOH}$  désigneront respectivement les oxy-hydroxydes d'aluminium, de fer et de Mn.

<sup>3</sup> 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 ETMs<sup>4</sup> 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

<sup>4</sup> 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 propres.

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>
- échange cationique - adsorption spécifique + Fe - MnOOH [1] + -COOH [2] - co-précipitation [1] + FeOOH + MnOOH + CaCO <sub>3</sub> + argiles	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>
- 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]	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 al.*, 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): NO<sub>3</sub>, MnOOH, FeOOH, SO<sub>4</sub> et CO<sub>2</sub>. 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 soils<sup>5</sup>, 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).***

---

<sup>5</sup> 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 haut<sup>6</sup> 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 particulaire 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.

---

<sup>6</sup> 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 relative<sup>7</sup> 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...)

---

<sup>7</sup> 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 toxicité<sup>8</sup> 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'exsudats...), 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).

---

<sup>8</sup> 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, COTTENIE (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 observée<sup>9</sup>.

**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)	
	déficiência	toxicité	déficiência <sup>(a)</sup>	toxicité <sup>(b)</sup>
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 = NH<sub>4</sub>-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, pH<sup>10</sup>, potentiel rédox, matière organique, teneur en argiles. Elle est *difficile à apprécier et les valeurs des seuils toxicologiques issues de publications sont souvent disparates*

<sup>9</sup> 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.

<sup>10</sup> 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, betterave	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<sup>-1</sup>an<sup>-1</sup> ; Cu = 40 g ha<sup>-1</sup>an<sup>-1</sup>; Hg 0.5 g ha<sup>-1</sup>an<sup>-1</sup>; Pb= 2 g ha<sup>-1</sup>an<sup>-1</sup>; Zn= 200 g ha<sup>-1</sup>an<sup>-1</sup>. MOOLENAAR *et al.* (1997) donnent quant à eux des flux de 1,5 et 300g ha<sup>-1</sup>an<sup>-1</sup> 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 jauges 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 <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup>							
Fond diffus <sup>a</sup>	37	37	657	15	20	73	2	0.73
Fond/sol (%) <sup>b</sup>	0.05	0.01	0.03	0.01	0.02	0.06	0.14	0.23
Industrie <sup>a</sup>								
min	37	146	1460	73	7	7	2	1.10
max	256	1862	16060	621	219	164	7	-
ISSeP <sup>c</sup>	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/webtabet.htm>), d'une densité de 1.3 T/m<sup>3</sup> 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 engrais 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"<sup>11</sup>. 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

<sup>11</sup> 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**

<b>Types d'effluents</b>	<b>Quantités</b>
<b>Région Wallonne</b>	
<i>Résidus agricoles</i>	10 <sup>7</sup> T. MB
lisiers	7,5 * 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
fumiers	8 * 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
<i>Résidus des Industries agro-alimentaires</i>	170 kT MB
<i>Epuration des eaux/déchets urbains</i>	
boues stations d'épuration <sup>d</sup>	10 kT. MS
<b>France<sup>a</sup></b>	
<i>Résidus agricoles</i>	
lisiers de porcs	15 * 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
déjections bovines	250 * 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
<i>Résidus Industries agro-alimentaires</i>	5 * 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
<i>Epuration des eaux/déchets urbains</i>	
composts d'ordures ménagères <sup>b</sup>	450 kT. MB
boues stations d'épuration <sup>c</sup>	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 urbaines<sup>12</sup>, il ne faut cepen-

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

Il ne faut 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 engrais (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 <sup>a</sup>	28	150	11	21	10	-
Lisier de bovin <sup>b</sup>	57	580	15	10	17	-
Lisier de porc <sup>a</sup>	300	700	18	14	12	-
Engrais (moyenne) <sup>c</sup>	83	268	-	21	37	13
Scorie potassique <sup>b</sup>	17	23		17	3,0	9,0
Compost d'ordures ménagères <sup>b</sup>	234	987	30	43	548	11
Boue d'épuration <sup>b</sup>	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 g ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>) 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<sup>-1</sup>), (B) d'une boue contenant les teneurs limites autorisées par la législation suédoise (1 tonne MS ha<sup>-1</sup>), (C) d'effluents d'élevage (2 tonnes MS ha<sup>-1</sup>), et (D) d'engrais commerciaux (20 kg P ha<sup>-1</sup>); (E) dépôts atmosphériques estimés (d'après WITTER, 1996).**

	A	B	C	D	E
ETM	g ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup>				
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 engrais 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<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> (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 <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup> ) 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)<sup>1</sup> et dont les limites sont esquissées à la figure I.3.

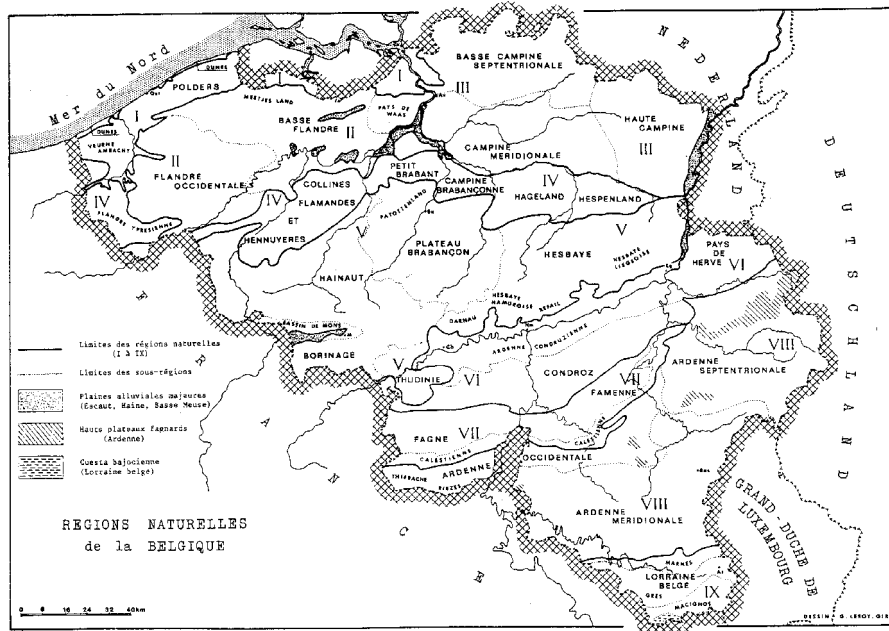


Figure I. 3: Délimitation de la Région Limoneuse (en grisé) en Belgique, d'après NOIRFALISE (1988).

#### 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):

---

<sup>1</sup> 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 schistes<sup>2</sup>, 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 brabançonnaises (Massif du Brabant), ainsi que dans quelques massifs ardennais et dans la bande silurienne du Condroz.*

*Au Silurien,... l'orogénèse calédonienne engendre l'émergence 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 nord<sup>3</sup>. 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**.*

---

<sup>2</sup> schiste est à prendre ici au sens de shale.

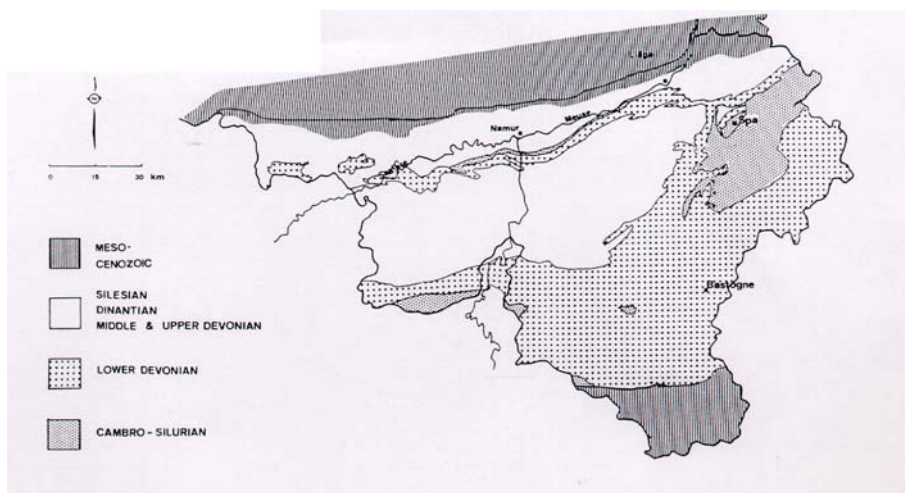
<sup>3</sup> Les dépôts du Dévonien inférieur sont peu représentés dans la région limoneuse.

*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 dévoniennes 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).

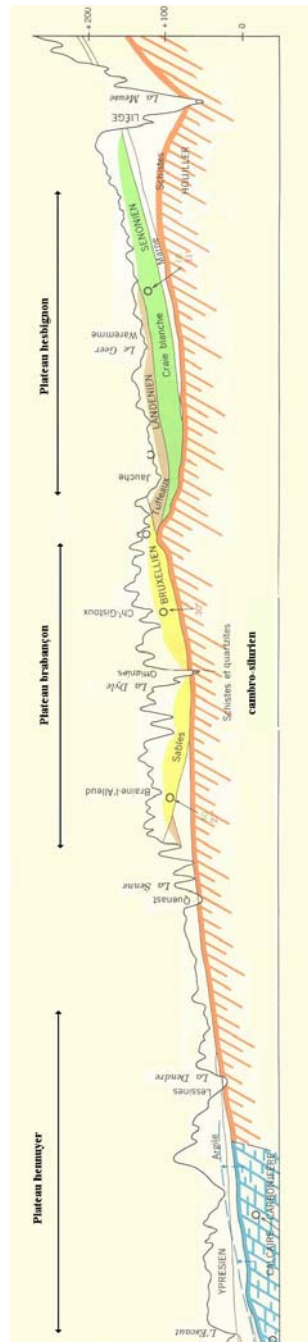


Figure I. 5: Coupe ouest - est dans la région limoneuse (d'après l'Atlas de Belgique, 1970)



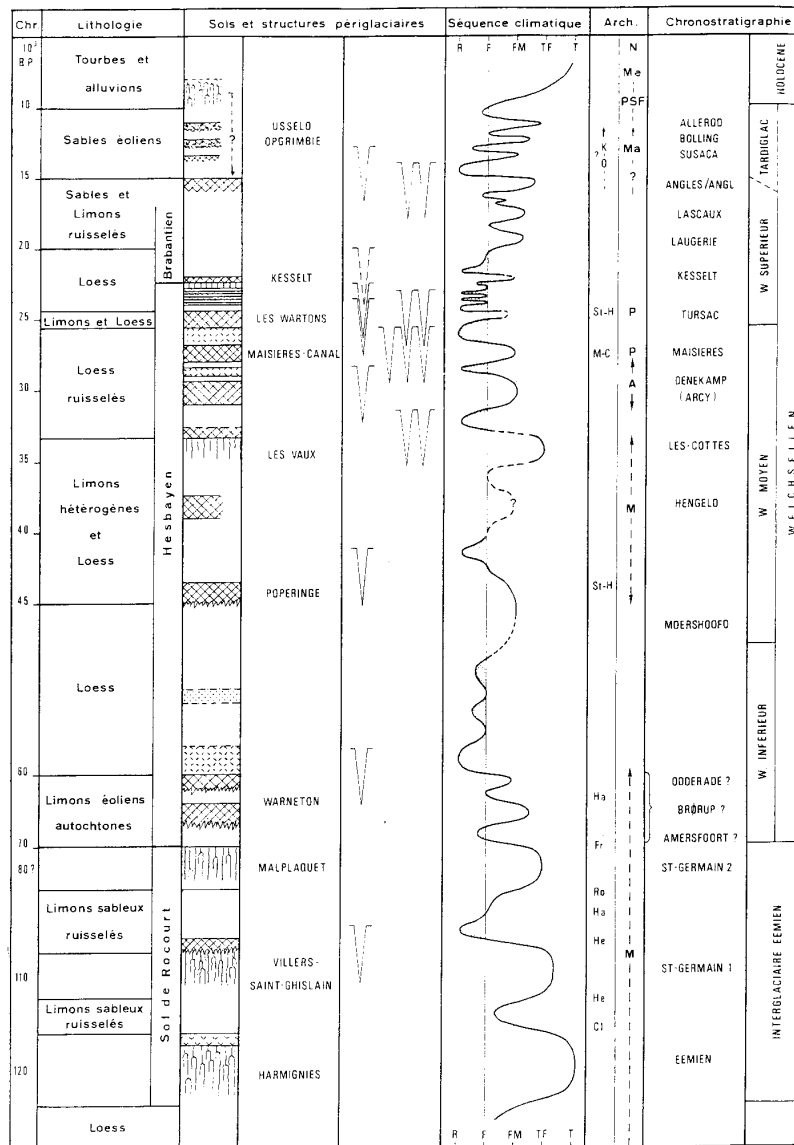
L'interglaciaire Eemien est représenté par un sol lessivé polygénétique, le sol de Rocourt, qui se développe sur les loess Saaliens (CHALINE, 1985; HAESAERTS *et al.*, 1999). La séquence Eemienne présente plusieurs stades de pédogenèse qui peuvent localement se surimposer. Elle résulterait de la succession 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: subarctique; 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 (Els-tériens 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 "Kesselt suite" délimite souvent sa base (GULLENTOPS *et al.*, 2001).

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

Dans la suite du travail, nous utiliserons les termes "brabantien", "hes-bayen" 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 modelé 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 recrudescence 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 à 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.*

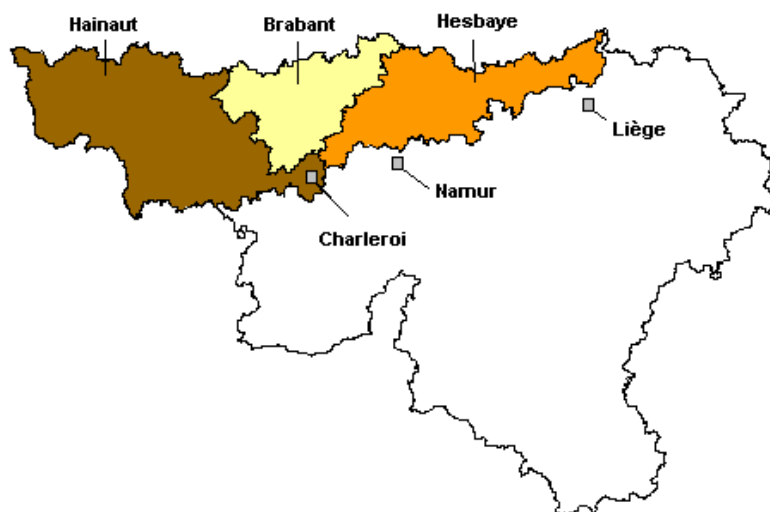
On peut deviner sur la figure I.5 (*cf supra*) trois zones de plateaux, d'ouest en est:

- 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.

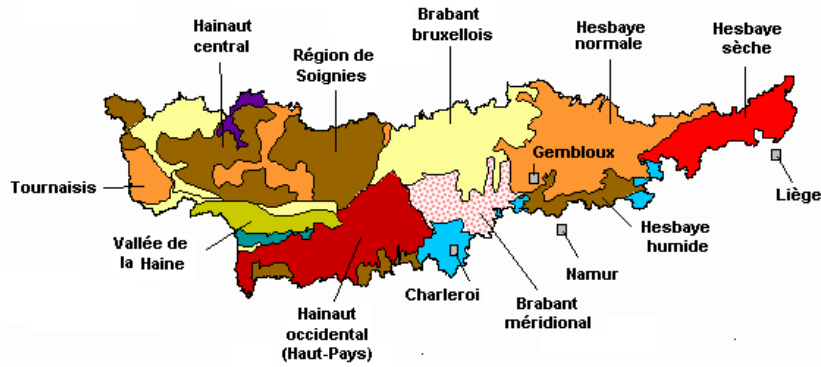


Figure I. 7: Délimitation des principaux ensembles géographiques en Région Limoneuse. Les ensembles présentant les mêmes couleurs sont caractérisés par les mêmes associations de sols, d'après les cartes d'associations de sols de TAVERNIER et MARECHAL (1958) et MARECHAL et TAVERNIER (1974).

BRULARD (1962) subdivise la Hesbaya en un Pays brabançon, un pays de Gembloux, le bassin de la Meuse, 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 Hesbaya 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.

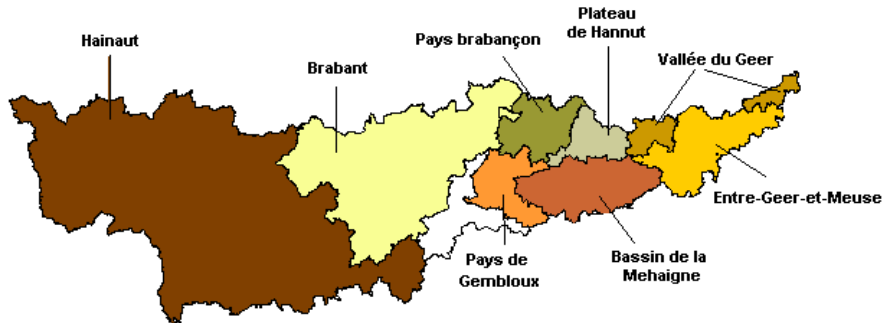


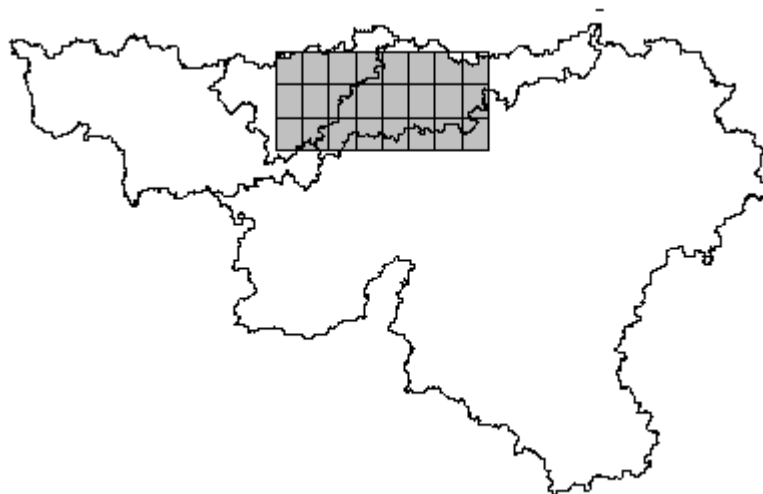
Figure I.8: Subdivision de la Hesbaya en unités sous-régionales, d'après BRULARD (1962).

Citons encore PECROT (1956) qui propose une subdivision de la Hesbaya 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 planchettes); 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).

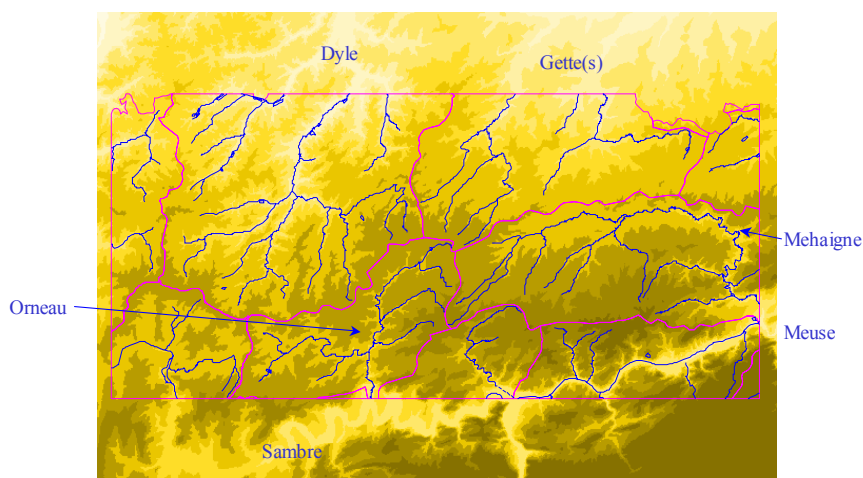


Figure I. 10: Image des altitudes, classées par tranches de 25 mètres. Les couleurs les plus foncées correspondent aux altitudes les plus élevées. En fuchsia, les limites de bassin versant.

### 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 dévoniens 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 sénoniennes affleurent sur les versants des vallées de la Meuse 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 limoneux<sup>4</sup> 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 pédologiques reste la morphogenèse mais les solums sont marqués par la présence des substrats anciens.

---

<sup>4</sup> 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
Waremmé	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 lessivés<sup>5</sup> (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-

---

<sup>5</sup> En théorie, selon l'intensité du lessivage, exprimée par l'IDT, les sols à horizon BT pourraient élarger 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'accroît, que les pentes deviennent plus fortes, en relief convexe, le décapage 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"<sup>6</sup>. 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 décapage 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-

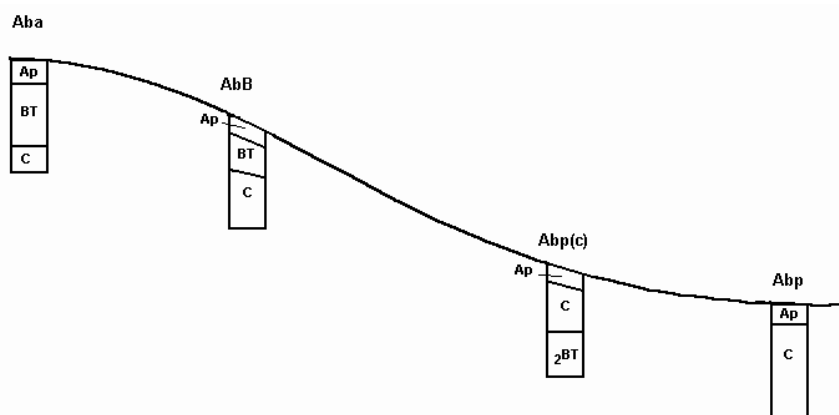
---

<sup>6</sup> 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 entisol<sup>7</sup>(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 labouré<sup>8</sup> 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

<sup>7</sup> 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.

<sup>8</sup> 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 rédoximorphes<sup>9</sup>.

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 éluvions<sup>10</sup> caillouteuses... le solum est caractérisé par un horizon (B) appelé structural<sup>11</sup>, 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 inceptisols (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-

<sup>9</sup> Une série de définitions relatives à l'hydromorphie figurent dans le glossaire.

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

<sup>11</sup> 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*<sup>12</sup> (IRSIA, 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.

---

<sup>12</sup> 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 limonéuse (TAVERNIER et MARECHAL, 1958).**

Groupe	Région limonéuse normale (Ass. 16)	Hesbave sèche (Ass. 17)	Région limonéuse humide (Ass. 18)	Brabant méridional (Ass. 19)	Région des terrasses (Ass. 22)
Aba, Aba(b)	50-75 %	65-75 %	< 2,5 %	35-50 %	30-70 %
Aca, Ada	< 5 %	< 2 %	50,75 %	< 5 %	< 20 %
Aha, Aia	-	-	< 10 %	-	-
Abp, Abp(c)	5-20 %	23-35 %	< 2 %	5-15 %	< 10 %
Acp, Adp	5-15 %	< 2 %	5-15 %	< 5 %	< 5 %
App, App, Agpp, Ahp, Aip	5-10 %	-	5-10 %	2-10 %	5 %
S, Z, P, L, E, G	< 5 %	< 1 %	< 5 %	10-40 % <sup>1</sup>	20-40 % <sup>2</sup>

<sup>1</sup> En majorité sableux, limono-sableux et sablo-limonéux

<sup>2</sup> En majorité sols 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-quatérnaires, 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 "paysage"<sup>13</sup> 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.

---

<sup>13</sup> 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<sup>ème</sup> siècle dans les régions "hennuyères" et "méridionales".

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.

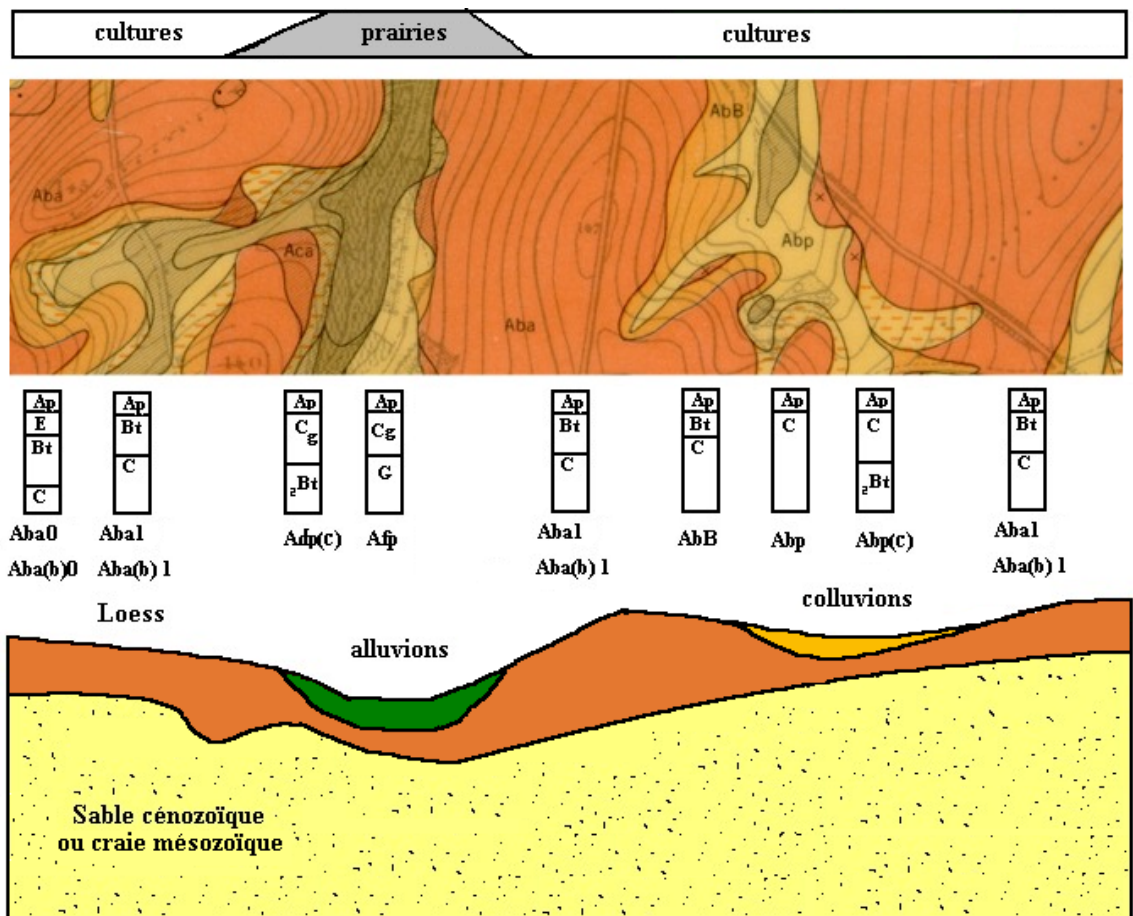


Figure I.12: Relations géologie-relief-sols en "Région limoneuse gembloutoise" (modifié d'après PECROT, 1956).

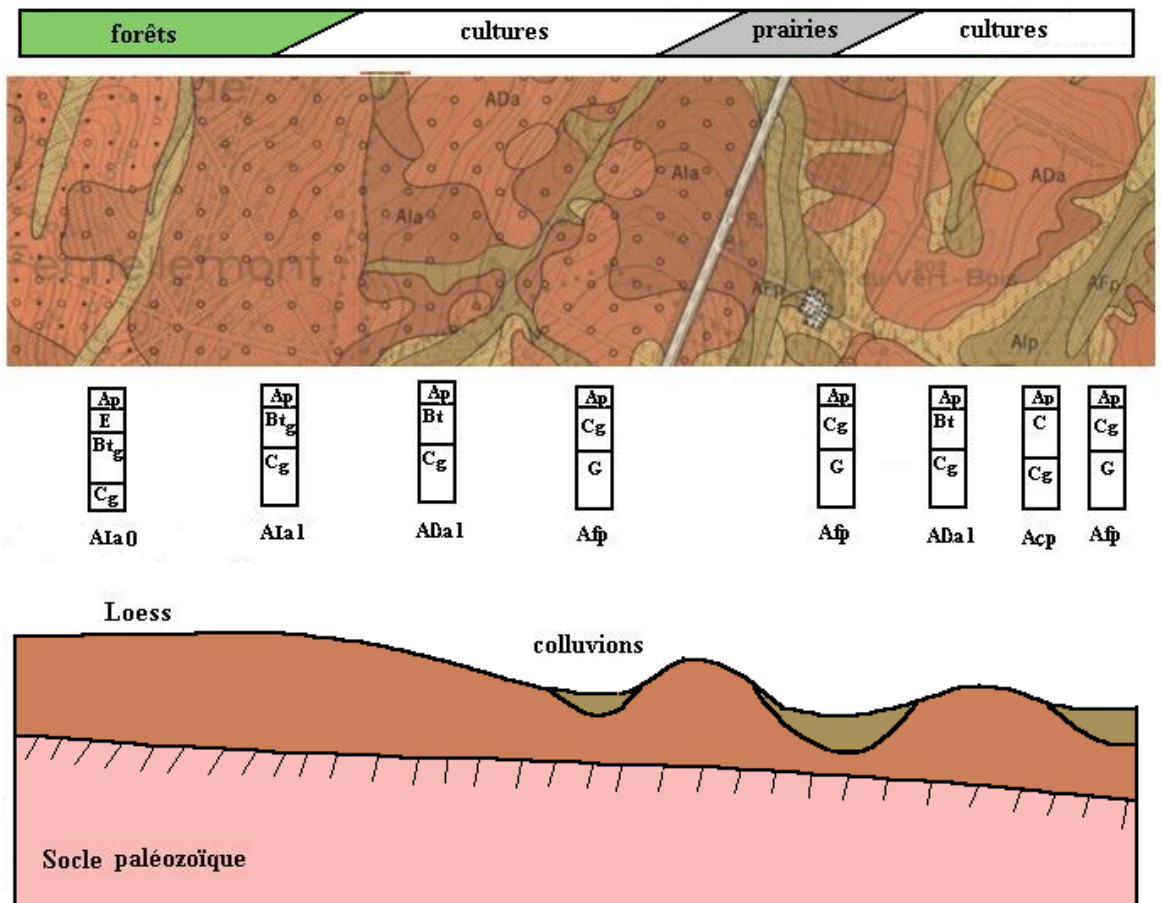


Figure I.13: Relations géologie-relief-sols en "Région limoneuse méridionale" (modifié d'après PECROT, 1956).



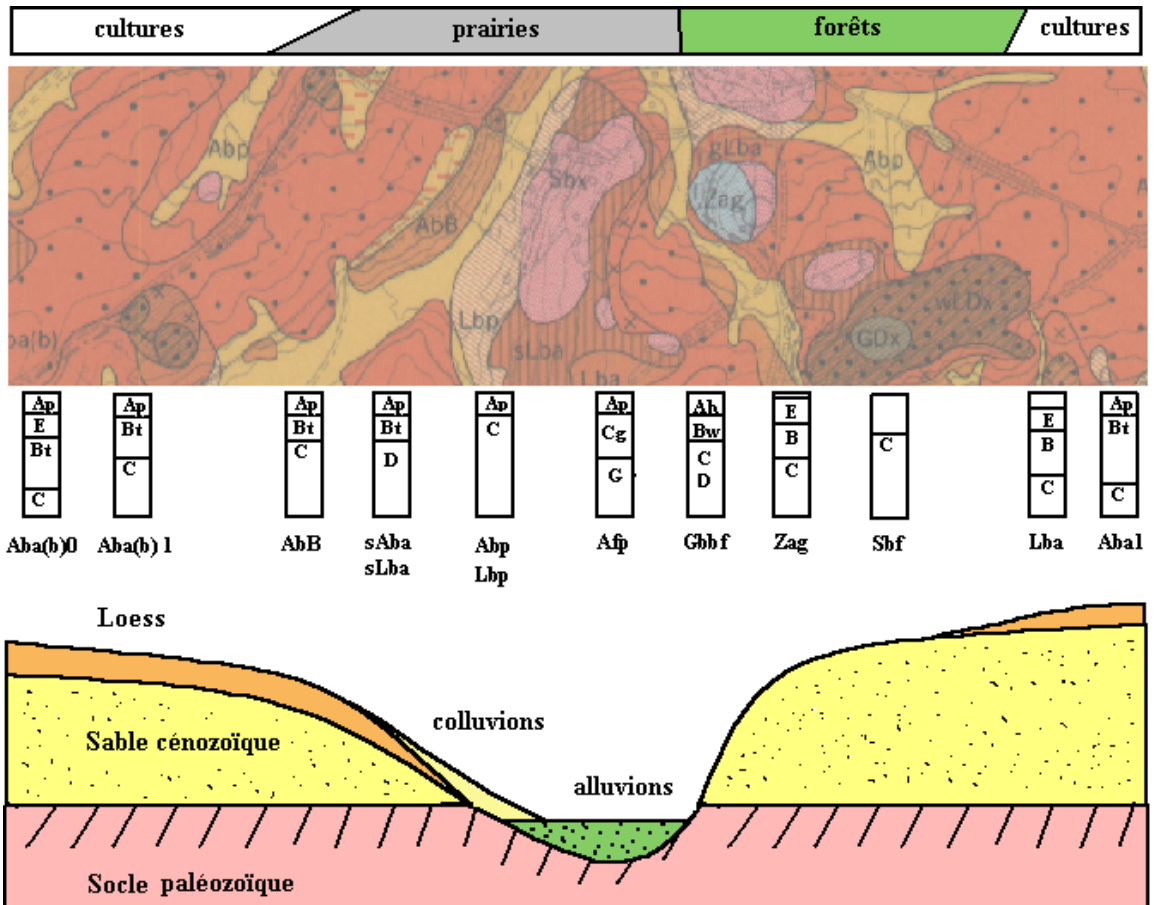


Figure I.14: Relations géologie-relief-sols en "Région limoneuse mixte à substrat sableux" (modifié d'après PECROT, 1956).

#### 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

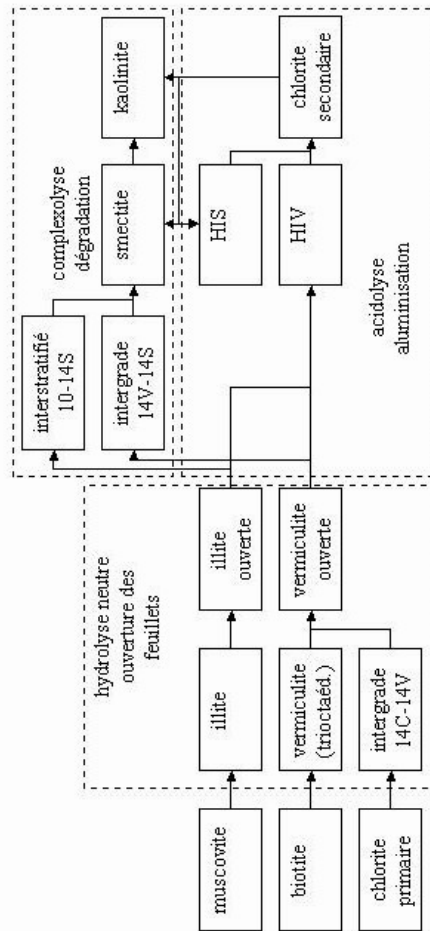
Les teneurs "naturelles" en ETMs dans les sols dépendent de caractères liés aux éléments mais également aux sols. Des paramètres doivent donc être trouvés qui traduisent le mieux les processus de redistribution et de rétention des ETMs et le milieu physico-chimique dans lesquels se placent ces processus.

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 morphogénèse 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 (2-50 $\mu$ m), des argiles de types illite, vermiculite, smectite, chlorite, kaolinite et interstratifiés pour la fraction 0-2 $\mu$ m. *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<sub>c</sub>/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, pédogenèse, apport éolien, ruissellement, 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, pâlisement de matrice, concrétions...). L'ensemble de ces paramètres constituent a 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  $\text{HNO}_3/\text{HCl}$ ), 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 ETMs<sup>14</sup> 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: Mn<sup>15</sup>, 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

---

<sup>14</sup> 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*).

<sup>15</sup> Le Mn est parfois considéré comme un élément majeur car il fleurte 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 situés 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 Minière (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 hercyniens<sup>16</sup>. 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 13km<sup>2</sup>. 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-*

---

<sup>16</sup> 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 km<sup>2</sup>). 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 1ppm 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 international<sup>17</sup>, 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 km<sup>2</sup>. 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.

---

<sup>17</sup> "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 baltes<sup>18</sup>.

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 échantillons<sup>19</sup> 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).

---

<sup>18</sup> 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.

<sup>19</sup> 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/webetmso.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 HNO<sub>3</sub> 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 FUSAGx 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, privilégie 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)

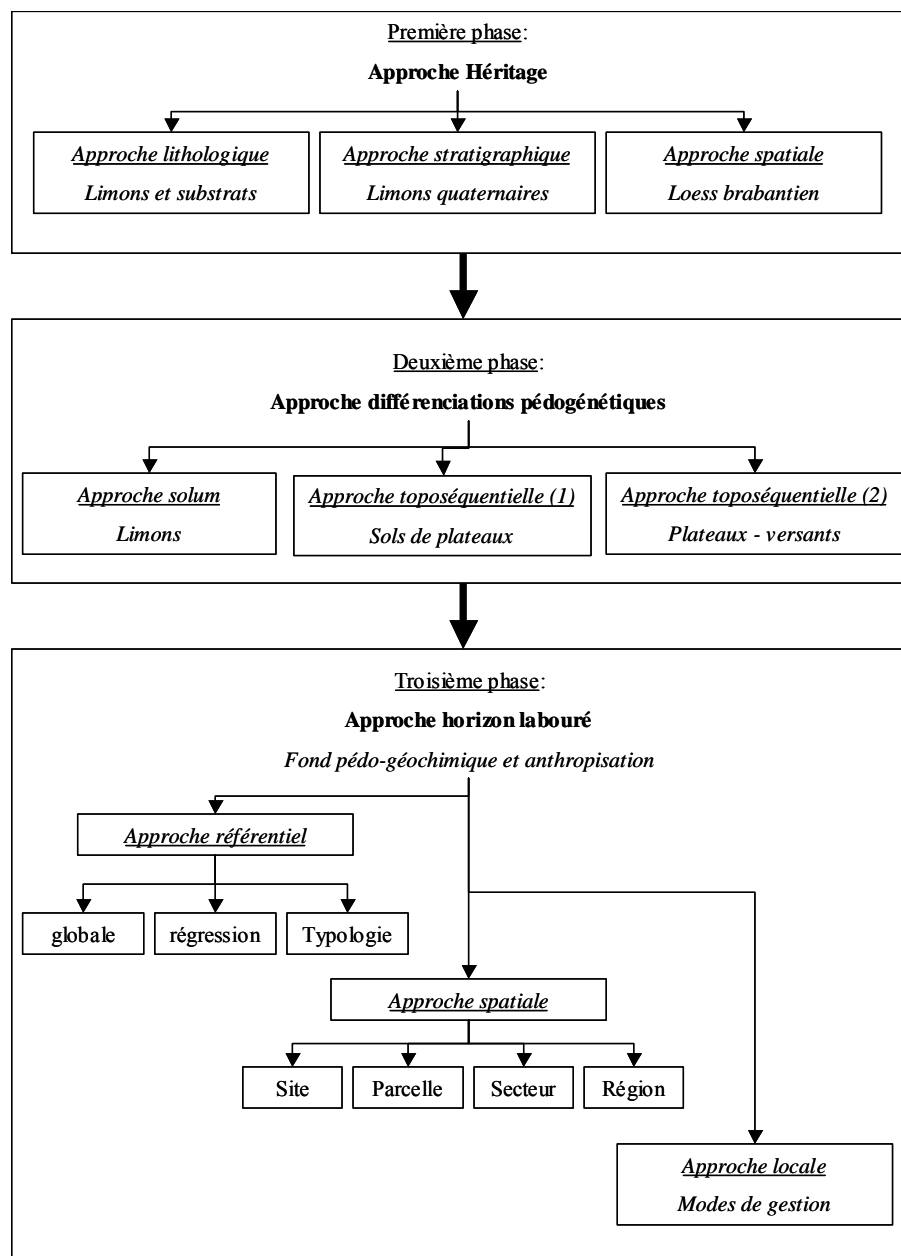


Figure I. 16: Représentation des différentes approches au sein de la méthodologie générale d'échantillonnage



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 solons 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 présuppose 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'écarts-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 <sup>2</sup> 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 favorables<sup>20</sup> 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 <sup>2</sup>	0.02	0.02	0.07	0.04	0.24	0.11	
CV <sup>2</sup> (%)	5.5	4.8	4.3	5.5	4.9	4.0	
IC95 <sup>2</sup>	0.05	0.05	0.15	0.08	0.49	0.22	
ppds <sup>2</sup>	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	Co
Unité de teneur	mg/kg						
Moyenne	504.6	15.3	53.2	28.8	59.3	13.8	10.3
Ecart-type	28.3	1.2	3.5	3.2	11.8	2.6	1.0
CV(%)	5.6	8.1	6.5	11.2	19.9	18.5	10.0
IC95	56.7	2.5	7.0	9.2	24.1	6.7	2.0
ppds	80.2	3.5	9.8	12.8	33.3	9.3	2.9
Ecart-type <sup>2</sup>	20.6	0.9	2.6	2.5	10.0	2.5	1.0
CV <sup>2</sup> (%)	4.1	6.1	5.0	14.3	16.9	17.9	9.9
IC95 <sup>2</sup>	42.1	1.9	5.4	5.2	20.4	5.1	2.1
ppds <sup>2</sup>	58.4	2.6	7.5	11.8	11.8	7.1	2.9
LD	2.7	1.7	3.0	1.6	6.8	3.2	1.6
LQ	8.9	5.7	10.1	5.2	22.6	10.8	5.3

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);

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

<sup>20</sup> ... 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)  $|x_1 - x_2| \geq u_{1-\alpha/2} * \sigma * \sqrt{2/n}$  lorsque  $\sigma$  est connu, ou

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

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  $\alpha = 0.05$ ,  $t_{1-\alpha/2} \approx 2.00$ ;

---

<sup>21</sup> 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 opératoire<sup>22</sup>.

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  $\mu$ , la moyenne générale de  $Z$ , est une constante,  $\varepsilon_i$  est un facteur aléatoire de moyenne nulle et de variance  $\sigma_i^2$ , correspondant à la variabilité entre les sites où sont effectuées les mesures,  $\varepsilon'$  est un facteur résiduel aléatoire de moyenne nulle et de variance  $\sigma_{rés}^2$ , qui correspond en théorie à la variabilité opératoire.

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

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

---

<sup>22</sup> 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	p-1	SCE <sub>f</sub>	CM <sub>f</sub>	F <sub>obs</sub>
endroit	n-p	SCE <sub>r</sub>	CM <sub>r</sub>	
Total	n-1	SCE <sub>t</sub>		

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

	ddl	SCE	CM	F
Type de sol	p-1	SCE <sub>a</sub>	CM <sub>a</sub>	F <sub>a</sub>
endroit	p(q-1)	SCE <sub>b a</sub>	CM <sub>b a</sub>	F <sub>b a</sub>
répétition	pq(n-1)	SCE <sub>r</sub>	CM <sub>r</sub>	
Total	pqn-1	SCE <sub>t</sub>		

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<sub>r</sub>) est un estimateur de la variance de la population (DAGNELIE, 1975). Dans le schéma d'analyse de la variance du tableau I. 20, CM<sub>r</sub> estime la variance opératoire ( $\hat{\sigma}_{opér.}^2$ ) et F<sub>b|a</sub> 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<sub>r</sub> 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  $\chi^2$  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 brutes 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'autre<sup>23</sup>, 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"<sup>24</sup> 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 HNO<sub>3</sub> 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.

---

<sup>23</sup> 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.

<sup>24</sup> "labile" est utilisé, dans une acception 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 <sup>2</sup>	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'extractions 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 répétabilité<sup>25</sup> 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 signification 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.*

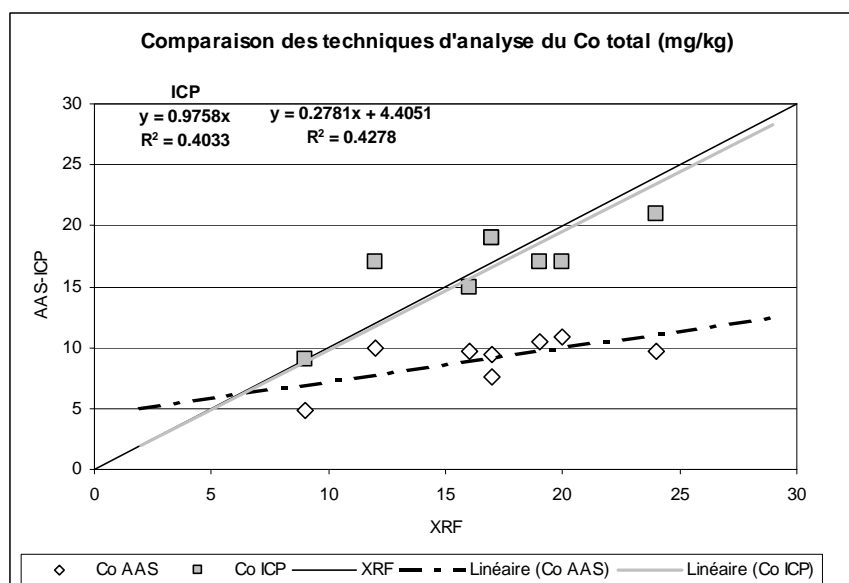
Pour Mg, K, Al, Cu, Ni et Cr, soit autant d'éléments que l'on associe généralement aux teneurs en argile, la XRF donne des valeurs supérieures (tableau I.24). Il se confirmerait ainsi que, quoi que très agressive et ne laissant pas de résidu solide discernable à l'oeil nu, l'attaque triacide ne mettrait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

Quels sont les enseignements pratiques à tirer de ces comparaisons?

---

<sup>25</sup> 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  $\text{CoAAS} = 4.4406 + 0.2781 \text{ CoXRF}$  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.

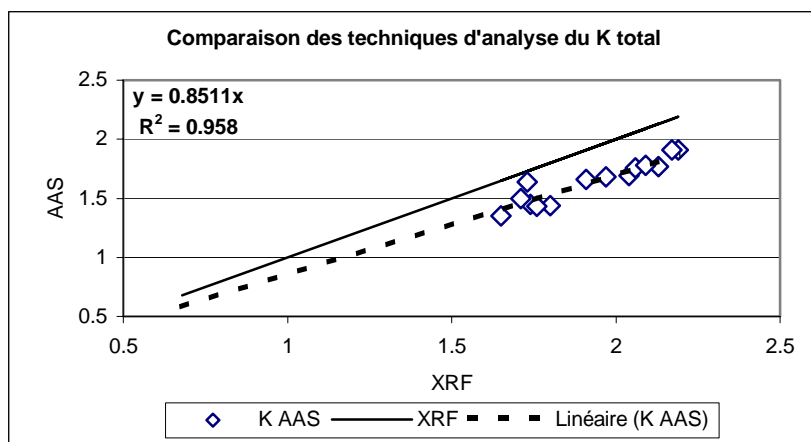


Figure I. 38: Comparaison des résultats d'analyse du K total par attaque triacide et absorption atomique (AAS) et par fluorescence X (XRF)

- 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.

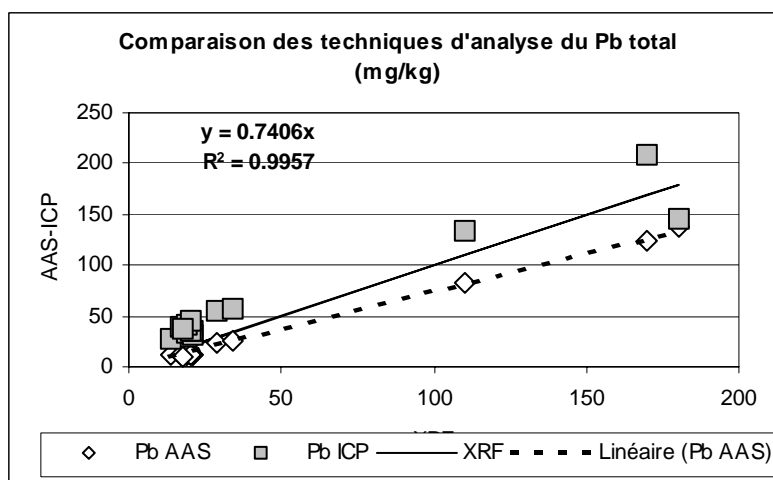
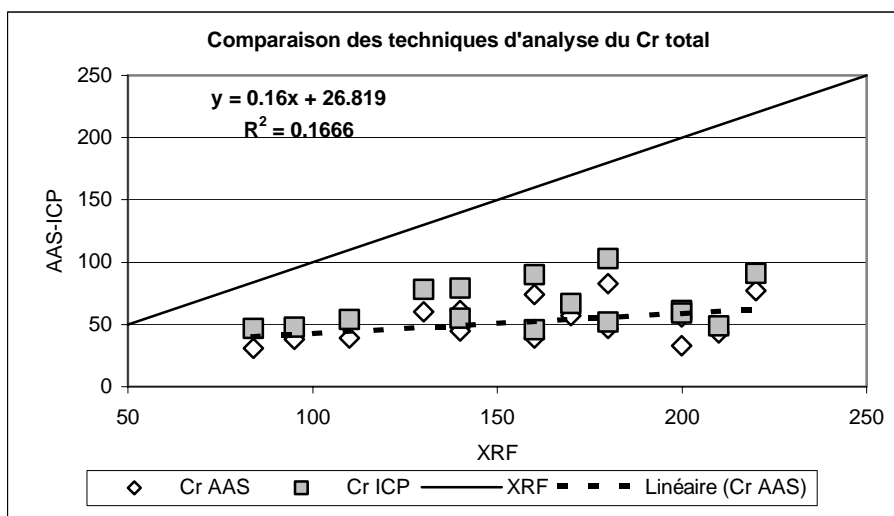


Figure I. 49: Comparaison des résultats d'analyse du Pb total par attaque triacide et absorption atomique (AAS), ou ICP et par fluorescence X (XRF).

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 réfractaire<sup>26</sup>- 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) suit 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

<sup>26</sup> 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-cents 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 <sup>[a]</sup>	1	1.2	2-3
Ni	1	1	2
Pb	1	1.7	1.4
Co <sup>[b]</sup>	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 pourrions aborder l'interprétation des données au cours des prochains chapitres.*

## 4.3 A propos de la représentativité des références<sup>27</sup>

### 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

---

<sup>27</sup> 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 euclidienne<sup>28</sup>:  $d_{ij} = \sqrt{\{\sum_{k=1}^m (X_{ik} - X_{jk})^2\}}$   
où X est la valeur de la propriété k aux points i et j.

---

<sup>28</sup> La distance euclidienne entre deux individus décrits par un seul caractère se simplifie:  $d(i,j) = (X_i - X_j)/\sigma_X$  où  $\sigma_X$ , 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 caractère<sup>29</sup>.

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).

---

<sup>29</sup> 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  $\Sigma$  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  $\mu$ , la différence  $\alpha_k$  entre la moyenne générale  $\mu$  et la moyenne de la classe  $\mu_k$  et un terme d'erreur  $\varepsilon_{ik}$  normalement distribué de moyenne nulle et de variance  $\sigma_k^2$ , 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  $\varepsilon_{ik}$ . L'*efficacité* d'une classification peut être estimée simplement<sup>30</sup> 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).

---

<sup>30</sup> WEBSTER et OLIVER (1990) proposent le coefficient de corrélation intra-classe

$\rho_i$ , 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).  $\rho_i$ , 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	$SCE_b = \sum n_i(x_i - \bar{x})^2$	$SCE_b/(k-1)$
Dans les classes (résiduelle)	n-k	$SCE_w = \sum \sum (x_{ik} - \bar{x}_i)^2$	$SCE_w/(n-k) = s_w^2$
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-corrélées... 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.

$$\begin{aligned}PC_1 &= \alpha_1 V_1 + \beta_1 V_2 + \gamma_1 V_3 \dots \omega_1 V_m \\PC_2 &= \alpha_2 V_1 + \beta_2 V_2 + \gamma_2 V_3 \dots \omega_2 V_m \\PC_m &= \alpha_m V_1 + \beta_m V_2 + \gamma_m V_3 \dots \omega_m V_m\end{aligned}\quad (\text{BURROUGH, 1986})$$

où  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma \dots \omega$  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-hiérarchique.

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 agglomérative, 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 importants<sup>31</sup>. Les méthodes agglomératives 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.

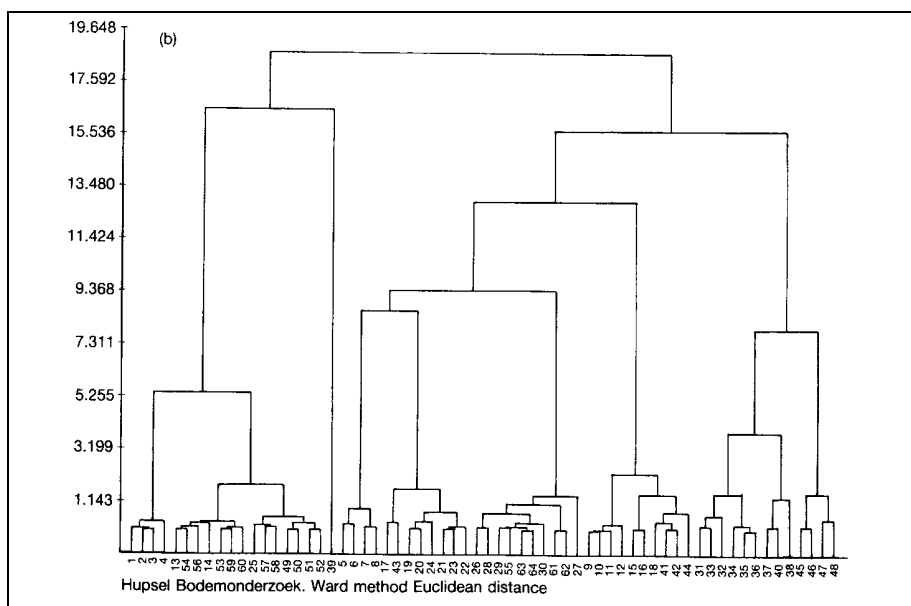
La liaison simple (*single linkage* ou *nearest neighbour*) considère la distance entre deux grappes comme la distance minimum entre une observation de l'une et une observation de l'autre. Ce mode de liaison fonctionne bien quand les grappes sont distinctes mais a tendance à identifier de longues grappes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

---

<sup>31</sup> 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 centroid*). 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 appelée 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 choisit<sup>32</sup> 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.

---

<sup>32</sup> 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...<sup>33</sup>-. 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 both<sup>34</sup> sets of techniques as voyages of discovery rather than as scheduled sailings with assured destinations. ».*

---

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

<sup>34</sup> 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-investigués 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 choroplèthe<sup>35</sup>, 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'observations<sup>36</sup>. 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:

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \text{ où } x_0 \text{ est le point ciblé, les valeurs } z(x_i), i = 1 \text{ à } n$$

sont les valeurs mesurées et  $\lambda_i$  les poids qui leur sont affectés.

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

---

<sup>35</sup> Le terme « choroplèthe » 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.

<sup>36</sup> 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:

$$Z_{ik} = \mu + \alpha_k + \varepsilon_{ik} \quad \text{où } \mu \text{ est la moyenne générale, } \alpha_k \text{ la différence entre } \mu \text{ et la moyenne de la classe } k (\mu_k) \text{ et } \varepsilon_{ik} \text{ un facteur aléatoire de moyenne nulle et de variance } \sigma_k^2 \text{ (= variance intra-classe).}$$

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

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

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)

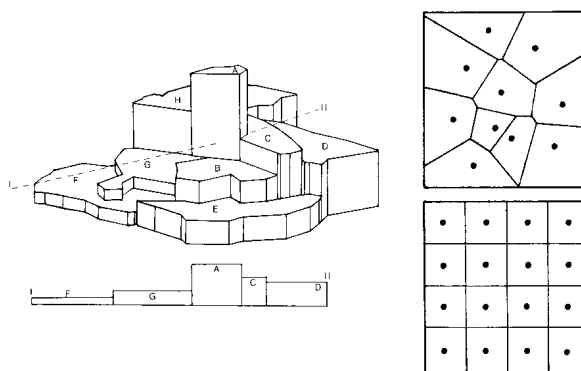
##### 4.4.2.1 Interpolations par limites nettes.

La polygonaion 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); polygones 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:

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

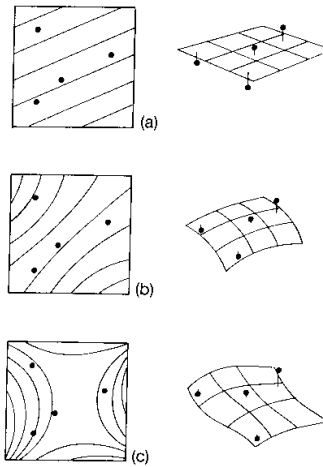
Le terme d'erreur  $\varepsilon$  est de moyenne nulle et de variance  $\sigma^2_{\varepsilon}$ .

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 prédite 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  $\mathbf{b}$  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:

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

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:

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

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"<sup>37</sup>, 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  $\varepsilon''$  le terme résiduel.

---

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

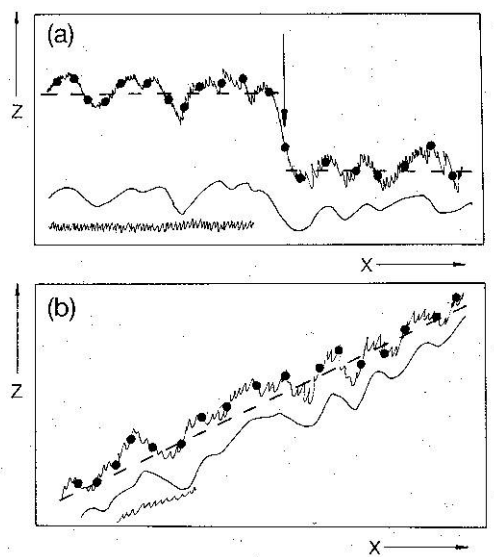


Figure I. 74: Composantes de la variation spatiale d'une propriété (BURROUGH, 1986). Les cercles noirs représentent les valeurs mesurées sur les sites échantillonnés, les lignes tiretées les composantes structurales; les lignes ondulées représentent les composantes aléatoires spatiale (basse fréquence)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

<sup>38</sup> 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:

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

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

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'auto-corrélation 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 est 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.<sup>39</sup>

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.

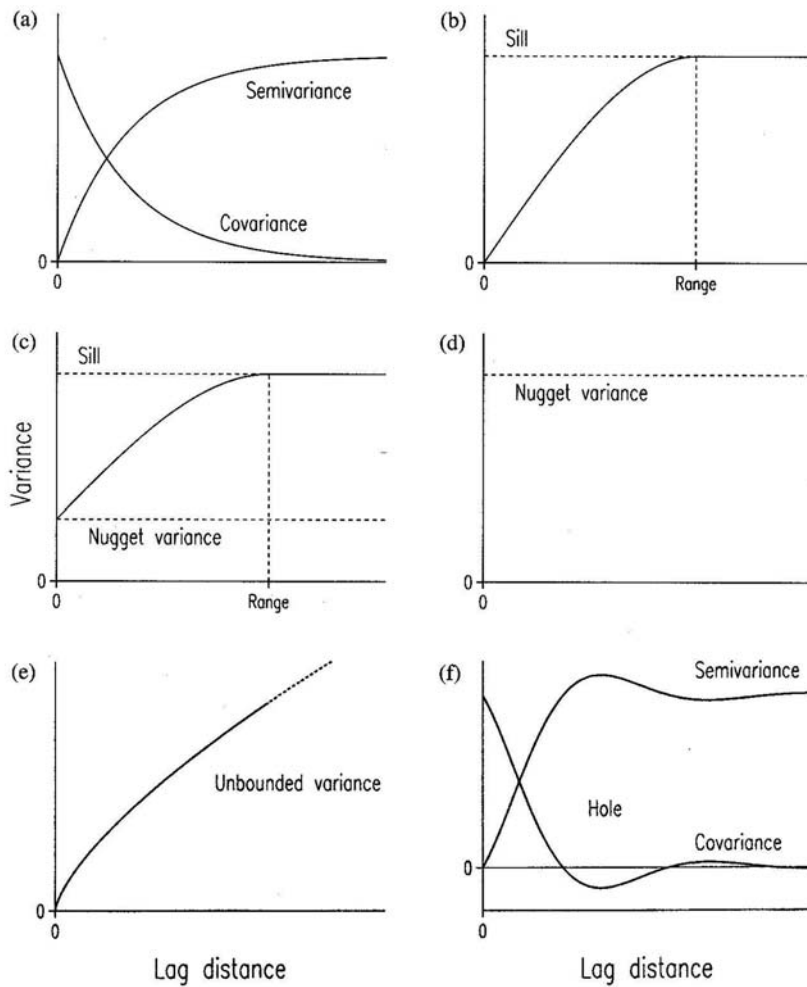
Dans certains cas, le variogramme peut présenter un *maximum*<sup>40</sup> *local* suivi d'un *minimum local* (figure I.25f). Ceci peut se produire en cas de données structurées avec des fluctuations régulières.

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.

---

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

<sup>40</sup> 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  $\gamma(h) - h$ .

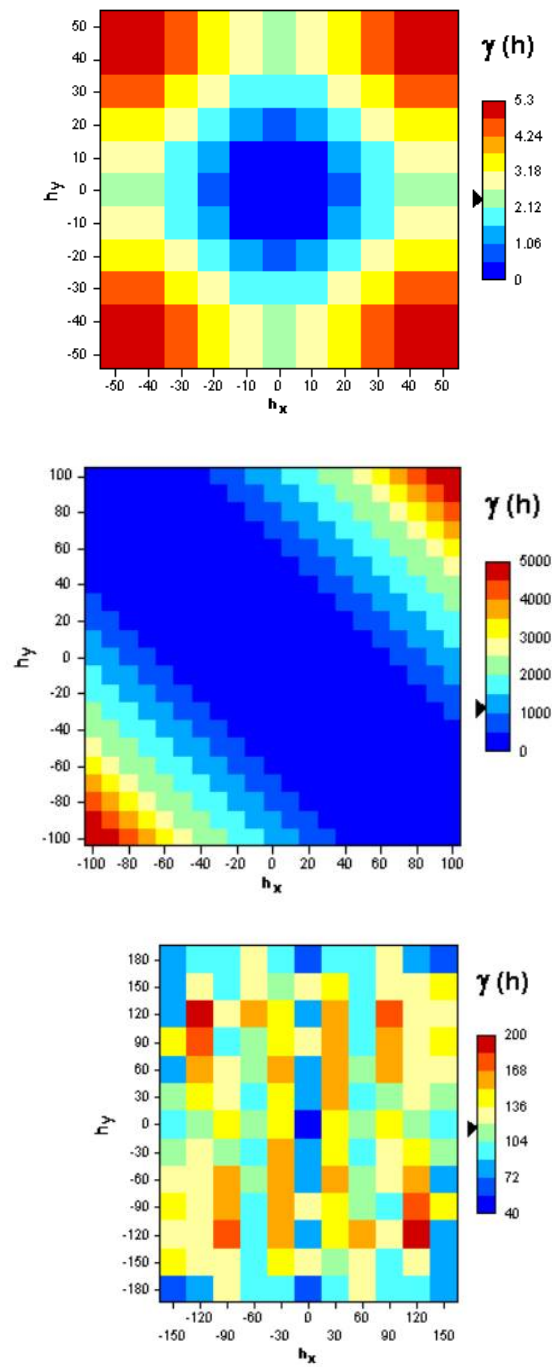


Figure I. 96: Exemples de surfaces variographiques: structure spatiale isotropique (haut), anisotropique (milieu) et absence de structure spatiale (bas).

*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 pépité 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 pépité 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  $\lambda_i$  sont choisies pour que la valeur estimée  $z^*(x_0)$  ne soit pas biaisée et que la variance sur l'estimation soit minimum.

Le krigeage 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 cellules<sup>41</sup>) à résolution plus fine que la grille<sup>42</sup> 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 krigeage*

Le krigeage universel est une technique adaptée aux données qui présentent des tendances locales<sup>43</sup> (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 krigeage 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 cokrigeage 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

---

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

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

<sup>43</sup> 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 que celle des autres éléments augmentait rapidement jusqu'à deux cent mètres et lentement ensuite. Les variogrammes croisés présentaient la même configuration de structure spatiale biscale. La corégionalisation des variables a été modélisée par combinaison linéaire de deux modèles sphériques (pour traduire les courtes et longues portées) et de l'effet pépité. 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 indicatrice<sup>44</sup>.

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 oeuvre 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).

---

<sup>44</sup> 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 krigeage), 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'exacte 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 bayésien (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 pédologiques.*