

Intérêt d'une stratification pédologique pour la constitution de référentiels régionaux sur les teneurs en éléments traces métalliques dans les sols de Wallonie

Gilles Colinet ⁽¹⁾, Jean Laroche ^(1, 2), Marie Etienne ⁽¹⁾, Daniel Lacroix ⁽¹⁾, Laurent Bock ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Laboratoire de Géopédologie. Unité SOLECOTER. Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux. Passage des Déportés, 2. B-5030 Gembloux (Belgique). E-mail : colinet.g@fsagx.ac.be

⁽²⁾ D.N.F. Direction générale des Ressources naturelles et de l'Environnement (DGRNE). Ministère de la Région wallonne. Montagne Sainte Walburge, 2 Bât. II. B-4000 Liège (Belgique).

Dans les sols, la distinction de l'origine naturelle ou anthropique des niveaux de teneurs en éléments traces métalliques (ETM) est importante pour (i) comprendre le fonctionnement des ETM dans les sols et (ii) définir des bases d'évaluation de pratiques de gestion agricole ou forestière, de détection de contaminations ou de suivi à long terme de teneurs régionales. Une démarche méthodologique a été établie et mise en œuvre autour de la caractérisation du déterminisme spatial naturel des teneurs en ETM, i.e. le fond pédogéochimique naturel, et de l'évaluation du degré d'anthropisation actuel des sols agricoles. Distribution spatiale des teneurs en ETM et facteurs de pédogenèse sont étudiés de concert, en qualité d'éléments constitutifs de base de référentiels régionaux sur l'état des terres. L'intérêt d'une stratification de ces référentiels régionaux sur une base pédologique, i.e. la reconnaissance des volumes de sols, est démontré au travers de recherches effectuées en Région wallonne tant en milieux agricoles que forestiers. La pertinence des référentiels régionaux pour la détection des contaminations locales sera d'autant plus affirmée que ces référentiels prendront en considération un certain nombre d'informations ancillaires, ainsi que des spécificités géographiques propres à des "Petites Régions Naturelles". Dans ce cadre, la Carte des Sols de la Belgique numérisée, moyennant un travail de révision de sa légende et l'intégration de données complémentaires, s'avère un outil potentiellement intéressant pour la réalisation d'une cartographie géochimique.

Mots-clés. Référentiels régionaux, état des sols, éléments traces métalliques, fond pédogéochimique, variabilité spatiale, Belgique.

Pertinence of pedological stratification of regional-scale reference systems about metallic trace elements content in soils. Walloon case studies. The natural background levels of metallic trace elements (ETM) in soils should be known in order (i) to understand the processes in which they are involved and (ii) to settle reference systems dedicated to the appraisal of agricultural or forest management 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, also-called the pedogeochemical background, of the spatial distribution of ETM in soils. The methodology also aims at defining indicator values of the current degree of ETM contamination in agricultural soils. The spatial distributions of both ETM content and soil forming factors constitute the basement parameters of regional reference soil systems (RSS) about ETM content. The stratification of these regional reference soil systems on a pedological base, which means that soil volumes are clearly identified, appears to be valuable to refine predictions. This is shown through some case studies in the Walloon Region from Belgium. The more the regional reference systems will consider ancillary soil information as well as the geographic specificities of small natural regions, the more they will be relevant to detect local contaminations. For that reason, the digital soil map of Belgium can be considered as a potential powerful tool for geochemical mapping, after an adaptation of its legend.

Keywords. Regional reference systems, soil health, metallic trace elements, natural background values, spatial variability, Belgium.

1. INTRODUCTION

À l'heure actuelle, l'agriculture doit maîtriser les flux d'éléments tout en contribuant à la préservation du milieu. En outre, on lui demande de "valoriser" les effluents des villes, de l'agro-industrie et des zones d'élevage intensif. Là où Benoit et Papy (1998) parlent de la nécessité de concevoir une agronomie écologique, l'actualité européenne met l'accent sur la surveillance et la protection des sols (CE, 2002). Or, cette dernière nécessite au préalable une bonne connaissance de l'état des sols, de leurs caractéristiques.

Que ce soit en matière de fertilité des terres ou d'évaluation de la sensibilité environnementale, l'interprétation fonctionnelle des mesures et la prédiction spatiale demeurent des questions cruciales. Elles justifient, l'une comme l'autre, l'acquisition d'un cadre référentiel spatialisé et robuste. Le Laboratoire de Géopédologie consacre une partie de ses activités de recherche à l'établissement de référentiels régionaux sur l'état des sols. Ceux-ci sont élaborés sur base d'une approche morphopédologique (Bertrand *et al.*, 1985 ; Bock, 1994) qui, par son caractère stratifiant et ses changements d'échelle, permet la généralisation spatiale de phénomènes étudiés localement. Les référentiels régionaux sont bâtis autour de la Carte des Sols de la Belgique, qui présente, outre un niveau de détail très fin (1/20.000), une complétude géographique. Un certain nombre d'inventaires relevant de la problématique d'évaluation de la qualité agro-environnementale des terres sont cités par Warin *et al.* (2004, ce fascicule). Toutes ces initiatives présentent des finalités et des modalités de mise en place différentes et non coordonnées car elles répondent à des objectifs différents. Elles n'ont en outre pas pour vocation le suivi temporel de l'évolution des caractéristiques, au contraire des activités du groupe ARVA (Action Recherche et Valorisation en Agriculture) qui vise clairement la mise en place d'un réseau de surveillance au sens de la communication européenne sur les sols (*ibidem*).

Parmi les préoccupations environnementales figurent les teneurs en éléments traces métalliques (ETM). Dans les sols, les ETM sont d'origine naturelle (roches-mères, apports diffus éoliens, cycle bio-géochimique et redistributions par pédogenèse ou morphogenèse) ou anthropique et proviennent alors d'activités agricoles, industrielles, domestiques (Baize, 1997 ; Collectif, 1998). Le fond géochimique, *sensu stricto*, est la teneur originelle, l'héritage de la roche-mère d'un sol. Le fond pédogéochimique naturel est défini comme la concentration d'un élément chimique dans un sol, résultant des évolutions géologiques et pédologiques, en dehors de tout apport d'origine humaine (Baize, 1997). Les ETM co-existent dans les sols sous différentes formes, plus ou

moins fortement fixés dans divers compartiments (Juste, 1988). L'ambiance physico-chimique du sol conditionne les relations entre les compartiments et régit les phénomènes de mobilité et de migration des ETM (Alloway, 1990 ; Juste, 1988 ; Collectif, 1998). Les stocks totaux ne sont dès lors pas systématiquement associables à des risques de transfert vers d'autres composantes de l'environnement (Baize, 1997). À cet égard, la distinction des anomalies géochimiques est fondamentale pour la compréhension de différences comportementales des ETM entre types de sols (Collectif, 1998 ; Baize *et al.*, 2002).

Outre les travaux réalisés par le Laboratoire de Géopédologie sur le fond pédogéochimique (Bock *et al.*, 2002 ; Colinet, 2003), un certain nombre d'études ont été réalisées en Région wallonne ou en Belgique sur la problématique des teneurs totales en éléments traces dans les sols (Cottenie *et al.*, 1974 ; De Temmerman *et al.*, 1982 ; Cornelis, Geuzens, 1993 ; Petit, Defoux, 2001 ; Bock *et al.*, 2003) ou dans les sédiments de ruisseau (Sondag, Martin, 1984 ; Van Der Sluys *et al.*, 1997). Ces études

- mettent en évidence l'importance de la classe texturale du sol ,
- permettent de distinguer les matériaux quaternaires des matériaux plus anciens,
- ainsi que l'occupation du sol et
- permettent d'établir des relations entre teneurs en ETM, teneurs en argile et en fer total, en carbone organique et pH, relations spécifiques à des volumes pédologiques.

Le cycle biogéochimique et la différenciation pédogénétique des horizons sont souvent reconnus comme les processus déterminants de la distribution spatiale des ETM dans les sols non contaminés (Swaine, Mitchell, 1960 ; Oertel, 1961 ; Khokhlova, 1967 ; Delecour, 1968 ; Stolt *et al.*, 1993 ; Baize, 1997 ; Lee *et al.*, 1997 ; Kleber *et al.*, 1998). Toutefois l'étude des processus de morphogenèse ainsi que du régime hydrologique peuvent s'avérer également riches d'enseignement dans certaines situations (Bourg *et al.*, 1989 ; Alloway, 1997 ; Mac Grath, 1997 ; Kleber *et al.*, 1998 ; Salvador-Blanes, 2002).

Les teneurs en éléments dans un sol en un moment donné résultent donc 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. Les référentiels régionaux que le Laboratoire de Géopédologie contribue à mettre en place sont stratifiés sur base de critères typologiques d'essence pédogénétique (lithologie, type de sol, type d'horizon) et de modèles régressifs. L'objectif de ce travail est d'apporter des éléments de réflexion quant à l'intérêt de cette approche par rapport à la

thématique de l'évaluation du fond pédogéochimique et du niveau d'anthropisation des sols agricoles, d'une part, ainsi que sur la faisabilité d'une cartographie géochimique sur base de la Carte des Sols de la Belgique, d'autre part.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Les influences du facteur lithologique et du type de sol sur la distribution spatiale des teneurs totales en ETM seront successivement étudiées et analysées par référence à leur représentation cartographique. L'analyse de la pertinence d'une stratification pédologique des mesures de teneurs en ETM dans les sols agricoles dans une perspective de détection des contaminations abordera deux niveaux d'échelle spatiale, la région naturelle et la parcelle agricole. Trois cas d'étude ont été retenus parmi les différents travaux de recherche du Laboratoire de Géopédologie. Bien qu'elles présentent des finalités d'application spécifiques à chacune d'elles, ces recherches ont en commun la méthodologie de cadrage morphopédologique des différents sites d'étude ainsi qu'un échantillonnage orienté par des volumes pédologiques observés sur le terrain. La localisation géographique des différents sites de chacun de ces cas d'étude est reprise dans la **figure 1**.

2.1. Sites et échantillonnages

Le réseau "chêne". Afin d'établir un référentiel sur la qualité des sols de chênaies, dans le cadre de la problématique de dépérissement du chêne, un réseau de 14 sites de référence a été installé en Région wallonne (Étienne, 2003). Chacun des sites a fait l'objet de caractérisations de terrain et de documentation cartographique afin de comprendre les lois d'organisation des sols dans le paysage et d'évaluer la représentativité spatiale des différents sites étudiés. En chacun des sites, deux fosses pédologiques ont été décrites et échantillonnées. Les prélèvements de la terre fine et des éléments caillouteux ont été réalisés dans les horizons les plus représentatifs des profils, du contact avec le substrat à la surface.

Les formations géologiques sur les sites du réseau "chêne" sont d'âge paléozoïque, à l'exception des deux sites de Lorraine belge localisés sur des formations sableuses mésozoïques. En terme de lithologie, la nature des matériaux présents dans les fosses étudiées varie du grès grossier au schiste, en passant par différents grès plus ou moins fins, soit essentiellement des roches détritiques d'origine sédimentaire. En fonction de la finesse des grains dans les éléments caillouteux et de leur dureté relative, une

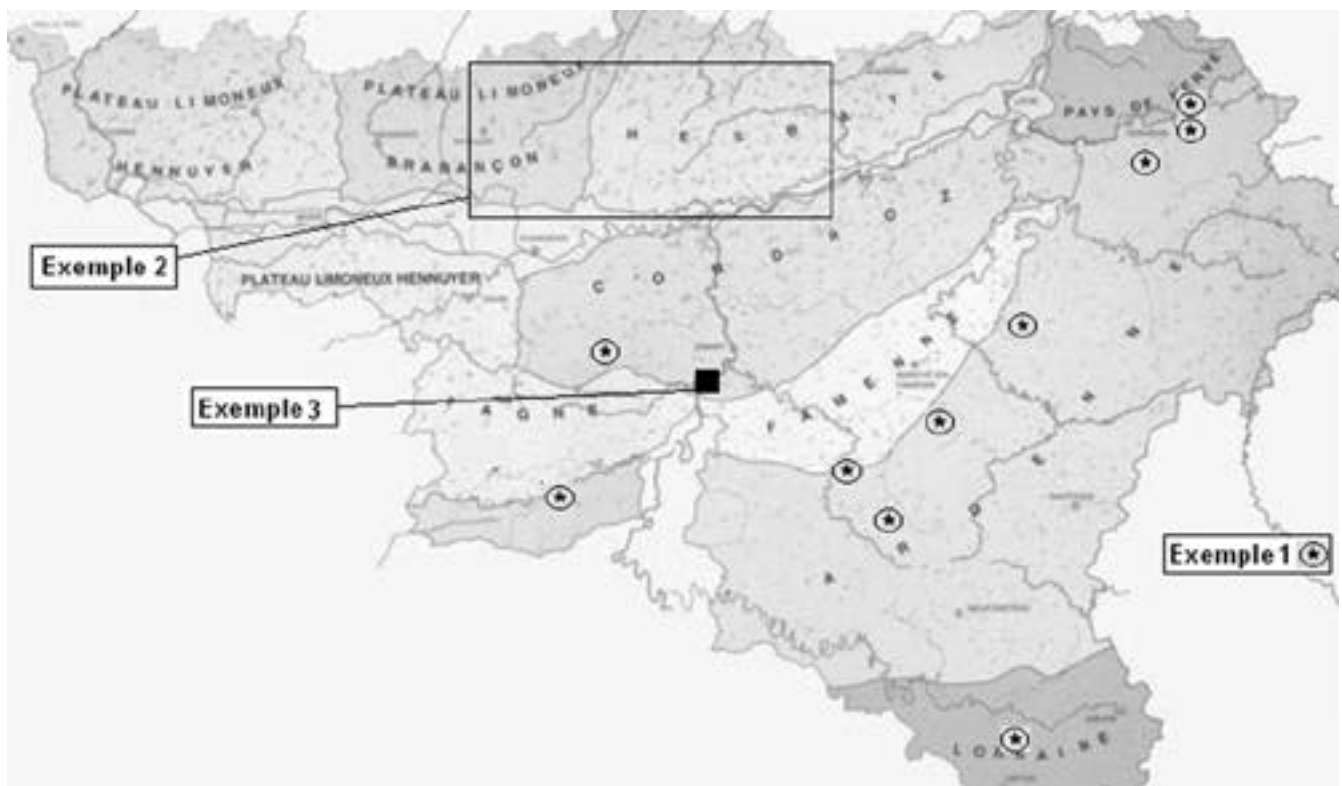


Figure 1. Localisation géographique des sites d'étude — *Geographic situation of study sites*. Exemple 1 = réseau "chêne" ; exemple 2 = référentiel régional ; exemple 3 = parcelle du Cheslon.

cote comprise entre 0 (éléments grossiers quartzeux) et 5 (grains fins argileux) a été attribuée aux lithologies rencontrées.

Le référentiel ETM sur les sols issus de loess. Afin de déterminer les niveaux de teneurs dans l'horizon labouré des sols agricoles en région limoneuse belge et de juger de leur état de contamination en ETM, un référentiel régional relatif aux sols issus de loess a été établi (Colinet, 2003). En fonction de la différenciation régionale des formes du relief et de la géologie des substrats anté-quadernaires, la Région limoneuse présente des ensembles géographiques — des “Petites Régions Naturelles” (PRN) — caractérisés par des paysages pédologiques spécifiques. En raison d'une couverture limoneuse quasi continue sur les plateaux, le schéma de base représenté par la **figure 2** constitue le modèle d'organisation des sols issus de loess le plus simple mais également le plus représentatif de la Région limoneuse. Les grands types de sols susceptibles d'être rencontrés dans la région sont 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, et les sols sans développement de profil sur colluvions plus ou moins humides dans les dépressions. Sur les versants, au contact des substrats, apparaissent des sols limono-caillouteux, à horizon B d'altération, ou des sols à texture sablo-limoneuse à sableuse ; les fonds de vallées accueillent des sols à horizons réductiques sur alluvions récentes.

Une collection de 312 échantillons provenant de l'horizon labouré de différents types de sols en Région limoneuse a été constituée afin d'élaborer un référentiel régional. Chaque échantillon est associé aux diverses informations portées par une série de la Carte des Sols de la Belgique. Ces variables qualitatives seront évaluées en qualité de facteur de stratification du référentiel. L'idée étant de vérifier dans quelle mesure la teneur moyenne, ou une gamme de teneurs fréquentes, en ETM de l'horizon labouré peut être différenciée en fonction du type de sol à l'échelle de la Région limoneuse.

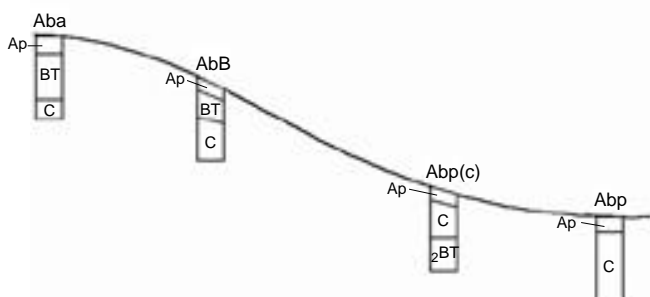


Figure 2. Modèle simplifié d'organisation des sols issus de loess sur les plateaux — *Simplified organization model of soils from loess on plateaus.*

Complémentairement à l'approche régionale, 26 parcelles distribuées dans l'ensemble de la zone étudiée ont été échantillonnées. Dans chacune d'elles, l'horizon labouré a été prélevé sur un sol de plateau (Aba) et sur un sol colluvial (Abp). Cet échantillonnage complémentaire se justifiait par le souci de s'affranchir des différences pouvant résulter soit de pratiques agricoles différentes soit de spécificités propres aux PRN.

La parcelle du Cheslon. Le cadrage géographique et géomorphopédologique de la parcelle du Cheslon a été présenté par Bock *et al.* (2002). Ce cadrage a permis de s'assurer que les sols rencontrés dans cette parcelle de 11 ha étaient représentatifs tant des typologies que de leur organisation paysagère à l'échelle régionale. La parcelle s'inscrit dans un versant en pente douce, sur la partie axiale d'un synclinal constitué de calcaires et de dolomies plus ou moins silicifiés et recouvert de dépôts éoliens quadernaires. Vingt sondages (de 1 à 2 m) ont été réalisés et quatre types de sols (trois séries principales et une série dérivée de la légende de la Carte des Sols de la Belgique) ont été reconnus

- des sols limoneux à horizon BT issus de loess (Aba),
- des sols sur colluvions limoneuses (Abp) dans les parties basses de la parcelle,
- des sols présentant une texture argileuse et une charge caillouteuse importante (G_{ba}) en haut de la parcelle et
- des sols de transition correspondant à des sols limoneux peu profonds sur substrat argileux.

2.2. Déterminations de laboratoire

Afin d'estimer le niveau de contamination régional des sols agricoles en ETM, le fond pédogéochimique doit être pris en considération. Pour ce faire, des variables indicatrices du fond doivent être mesurées. Conformément aux travaux de Baize (1997), les teneurs en fer total et en argile granulométrique nous servent de référence en la matière.

Les formes totales des éléments Ca, Mg, K, Na, Mn, P, Al, Fe, Zn, Cu, Ni et Pb ont été mesurées par mise en solution chimique (HF- triacide dont l'acide fluorhydrique) et dosage des éléments par absorption atomique. La méthode normalisée AFNOR NF X 31-147 a été suivie pour la mise en solution. 500 mg de l'échantillon tamisé à 200 µm sont mis en solution par

1. prétraitement à HNO₃ dans un godet en platine,
2. ajout, chauffage et évaporation complète de 5 ml HF (48 %) et 1,5 ml HClO₄ (70 %),
3. dissolution à chaud dans 10 ml d'HCl (10 %), transfert quantitatif dans un ballon jaugé de 50 ml et mise au trait à l'eau distillée.

Les opérations 1. et 2. peuvent être répétées selon les échantillons. Les éléments sont dosés par absorption atomique de flamme.

Dans le cas de la parcelle du Cheslon, la mise en solution des éléments a été effectuée à l'eau régale (ER = mélange des acides chlorhydrique et nitrique – Norme AFNOR NF ISO 11466). Le dosage a été réalisé par absorption atomique de flamme.

L'analyse granulométrique repose sur une méthode par sédimentation. Afin d'éliminer la matière organique, les carbonates et les ciments, 20 g de terre broyée à 2 mm sont soumis aux prétraitements suivants : attaque à froid par H₂O₂ (10 %) pendant une nuit, attaque à chaud par H₂O₂ (10 %) jusqu'à disparition de la matière organique, attaque à chaud par HCl (0,2 puis 4 N). Ensuite l'échantillon est lavé à l'eau distillée, mis en suspension par ajout de dispersant (hexamétophosphate de Na + carbonate de Na), chauffage (15 min) et agitation (2 h). La séparation de la fraction sableuse (>50 µm) est réalisée par tamisage sous eau. Le fractionnement des sables s'opère par tamisage à sec sur tamis emboîtés. La mesure des fractions limoneuses et argileuses est réalisée au moyen de l'hydromètre à chaîne. La fraction 20–50 µm est calculée par différence.

2.3. Méthodes statistiques

Des tests statistiques ont été mis en œuvre pour évaluer l'intérêt des stratifications, d'une part, et réaliser des tests de signification des différences entre des moyennes, d'autre part.

Les référentiels sur les ETM sont stratifiés en fonction de variables qualitatives (lithologie, type de sol, horizon) divisées en classes. La pertinence de ces classifications peut être évaluée 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 la variance totale (Burrough, 1986 ; Webster, Oliver, 2001). L'analyse de la variance a été utilisée pour

- la réalisation de tests d'hypothèse d'égalité des moyennes entre les classes et
- l'estimation de S_w^2 par le carré moyen résiduel.

En cas de rejet de l'hypothèse d'égalité des moyennes, un test de Fischer est appliqué pour identifier quelles sont les moyennes qui diffèrent des autres. L'ensemble des tests a été réalisé avec le logiciel MINITAB (Minitab Inc, 2000).

Les tests de signification des différences de deux moyennes sont utilisés pour évaluer la sensibilité du référentiel ETM à détecter une évolution temporelle et pour tester l'égalité des teneurs en ETM entre les sols de types Aba et Abp de 26 parcelles.

Dans le premier cas, les échantillons sont considérés comme indépendants, i.e. un deuxième inventaire est réalisé sans tenir compte de la position géographique des sites du premier inventaire. La plus petite différence significative est calculée sur base d'un test t de Student, pour un niveau de signification

() de 0,05. Les variances des deux populations sont considérées comme égales dans un souci de simplification des formules qui peuvent être trouvées chez Dagnelie (1975).

Pour la comparaison des sols Aba et Abp, à l'échelle des parcelles agricoles, le test d'égalité des moyennes a été remplacé par un test de nullité de la moyenne des différences (test t par paires ; Dagnelie, 1975) entre les deux types de sols, les échantillons étant associés par paires.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Importance du facteur lithologique sur les teneurs en ETM

Les résultats se basent sur l'analyse des sites du réseau "chêne", choisi en raison de la diversité lithologique qui y fut rencontrée.

Apports des observations de terrain. Alors que certains sites du réseau "chêne" sont lithologiquement homogènes, dans d'autres sites, les éléments grossiers observés d'une fosse pédologique à une autre, voire au sein d'une même fosse, peuvent être de natures différentes.

Le retour au cadrage géomorphopédologique prend alors tout son caractère explicatif. Ainsi, le site "Paliseul 1" est caractérisé, à l'échelle de la fosse, par la présence d'une charge schisto-gréseuse rougeâtre, dont les éléments caillouteux considérés individuellement peuvent relever d'un grès quartzueux, d'un grès fin, d'un schiste rouge ou d'un schiste gris-bleu. Si l'on recadre le site à une échelle hectométrique ou kilométrique, celui-ci est situé sur un haut de versant de faible pente (5 %) et la variété des sols rencontrés dans l'environnement proche du site traduit un contexte lithologique et morphodynamique propice au mélange de matériaux différents. L'utilisation des documents existants et les observations de terrain permettent ainsi de supposer que les sols actuels se sont développés dans des matériaux issus de l'altération

- des roches en place,
- de limons éoliens, sans indication précise de l'origine géographique de ceux-ci, et
- d'éléments déplacés et mélangés aux premiers par solifluxion et processus typiques des matériaux sur pentes.

Potentiel minéral. Le substrat et les éléments caillouteux représentent le potentiel minéral des sols et constituent une source de réserves mobilisables à long terme. Soixante-huit échantillons représentatifs des éléments grossiers trouvés dans les fosses pédologiques ont été analysés. Les teneurs moyennes par classe lithologique figurent au **tableau 1**. Une

Tableau 1. Teneurs en éléments (mg/100g ou mg/kg) dans les roches des sites du réseau “chêne”. Les roches sont classées selon la taille des clastes (cote ; NC = non classé) — *Rock content in elements (mg/100g or mg/kg) in the « oak » network. Rocks have been classified depending on the size of their grains (NC = non classified).*

Lithologie	Cote ¹	Effectif ²	mg/100g						mg/kg					
			Ca	Mg	K	Na	Mn	P	Al	Fe	Zn	Cu	Ni	Pb
Sable	0	8	12	73	233	7	108	53	12106	41141	45	6	42	18
Induration	NC	4	20	137	365	12	286	136	19463	219206	182	10	65	45
Grès														
très grossier	1	15	5	93	561	55	22	14	27363	16268	30	14	25	18
grossier	1,5	4	5	58	444	53	2	7	21092	9561	10	9	7	12
moyen	2	4	8	530	364	52	55	31	30195	32661	56	20	29	21
fin	3	12	9	563	1916	334	39	20	69280	33776	68	15	51	35
très fin	4	11	11	652	2257	245	66	28	80094	49127	85	22	61	44
schisteux	4,5	2	12	908	2447	263	27	25	92796	38591	92	10	85	32
Schiste	5	8	20	659	2616	203	30	24	95036	44564	83	32	58	40

¹ valeur sur une échelle lithologique = taille des clastes ; ² nombre d'échantillons analysés

tendance générale à l'augmentation des niveaux moyens de teneurs en fonction de l'indice de finesse du matériau est observable et généralisable à l'ensemble des éléments, à l'exception de Ca.

Une analyse de la variance a été réalisée à titre exploratoire. Les niveaux de probabilité associés au risque d'erreur (**Tableau 2**) sont indicatifs car les conditions d'application de l'analyse de la variance ne sont pas obligatoirement respectées. La classification se révèle – intéressante, *i.e.* plus de deux tiers de la variance totale est répartie entre les groupes, pour les éléments K, P, Al et Fe ;
– moyennement à faiblement efficace, 30 à 45 %, pour Mg, Mn, Zn, Ni et Pb et
– très faiblement pertinente pour Ca, Na et Cu.

Parmi ces éléments, l'essentiel de la variabilité entre les groupes des éléments P et Mn est dû aux différences entre un ensemble de matériaux sableux indurés et riches en concrétions et les autres groupes. Ces horizons constituent indubitablement une famille lithologique à distinguer des autres matériaux sableux. Dans le cadre de cette étude, où tous les éléments caillouteux relèvent de lithologies d'origine détritique, il n'est pas surprenant que les classifications soient si moyennement efficaces. Les matériaux s'inscrivent en effet ici dans un continuum dirigé par les proportions relatives et opposées de quartz d'une part (“stérile” pour la plupart des éléments étudiés) et de minéraux argileux d'autre part. Le gradient chimique qui en dérive concerne tous les éléments, mais est le plus marqué pour K, Al, Fe, Mg, Ni et Zn qui sont des éléments à corrélations très hautement significatives ($< 0,001$). Des différences significatives existent entre les extrêmes du continuum mais scinder la population en ensembles chimiquement distincts s'avère malaisé pour certains éléments, dont les traces.

Tableau 2. Risque d'erreur () associé à l'analyse de la variance des teneurs en éléments par classe lithologique (voir **tableau 1**) et part de la variance expliquée par la classification ($1-s_w^2/s_T^2$) — *Error risk () associated with the analysis of variance of element content stratified by lithology (see classes in **table 1**) and percentage of variance explained by classification ($1-s_w^2/s_T^2$).*

	$1-s_w^2/s_T^2$		$1-s_w^2/s_T^2$	
Ca	0,136	0,07	Al	0,000 0,81
Mg	0,000	0,42	Fe	0,000 0,83
K	0,000	0,71	Zn	0,000 0,30
Na	0,002	0,24	Cu	0,031 0,14
Mn	0,000	0,37	Ni	0,000 0,31
P	0,000	0,67	Pb	0,000 0,46

Stocks en éléments dans les sols. Le chimisme des roches est intéressant dans la mesure où il influence celui des sols. Trente horizons des fosses du réseau “chêne” ont été analysés tant pour leur terre fine (< 2 mm) que pour les éléments grossiers. Les résultats figurent au **tableau 3** sous forme de coefficients de corrélation, qui mesurent la linéarité des relations sols-roches. À l'exception des éléments Al et Pb, les niveaux de corrélation sont significatifs et révélateurs d'un effet lithologique notable sur la composition chimique des sols. Plus les matériaux parentaux sont riches en un élément, plus la terre fine présente des teneurs élevées également (exemple à la **figure 3**). Ce simple constat ne préjuge en rien du degré d'altération des roches ni des formes chimiques ou minéralogiques des éléments.

La concentration en éléments totaux dans la terre fine n'est toutefois pas suffisante pour une évaluation des stocks car elle ne prend pas en considération les

Tableau 3. Coefficients de corrélation entre les teneurs dans les roches et dans la terre fine – sites du réseau “chêne” (n=39) — *Correlation coefficients between rock and fine earth contents - the “oak” network (n=39).*

	r		r		r		r
Ca	0,706	Na	0,513	Al	0,026	Cu	0,839
Mg	0,603	Mn	0,822	Fe	0,554	Ni	0,636
K	0,472	P	0,769	Zn	0,574	Pb	0,300

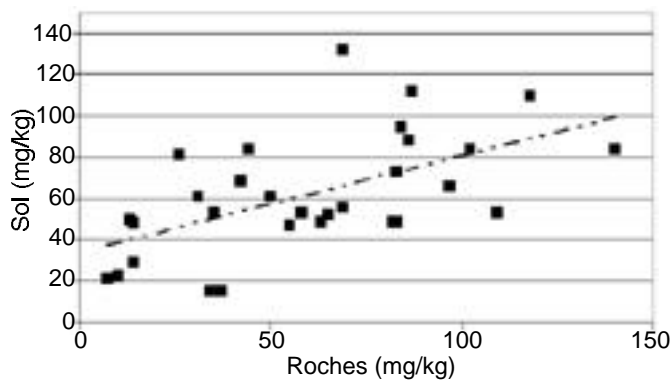


Figure 3. Relation entre les teneurs en zinc total (mg/kg) dans les roches et dans les sols du réseau “chêne” — *Relationship between rock and soil content in total zinc (mg/kg) for the “oak” network.*

volumes de sol. Le calcul des quantités par unité de surface en tenant compte de l'épaisseur des horizons, de leur densité apparente et de la quantité d'éléments grossiers permet en principe cette évaluation. L'exercice réalisé pour les différents sites du réseau “chêne” montre une relation inverse entre les stocks et la quantité d'éléments grossiers.

Aspects cartographiques. Les résultats relatifs au facteur lithochimique plaident en faveur de la pertinence, comme facteur de stratification, de la typologie propre à la Carte des Sols de la Belgique, qui prend en considération l'abondance de la charge caillouteuse. Ces conclusions doivent toutefois être nuancées car le caractère “stérile” d'une charge caillouteuse dans un horizon de sol dépend de l'échelle de temps considérée. Si l'on considère les formes rapidement mobilisables par la plante, seule compte la terre fine ; par contre, les stocks totaux devraient prendre en considération l'ensemble des matériaux d'un horizon. Un deuxième point à noter est la grande variabilité de la morphologie et de l'épaisseur des horizons, principalement en surface. Williot (1995) a montré que les mésestimations de stocks pouvaient être très importantes pour l'horizon holorganique. L'exercice mériterait d'être réalisé pour les horizons peu organiques. En outre, la variabilité spatiale de la densité apparente des

horizons, qu'ils soient forestiers ou agricoles, reste encore pour une bonne partie *terra incognita*. Enfin, il ne s'agit pas de se leurrer sur le degré de précision des estimations de la charge caillouteuse à attendre de la Carte des Sols de la Belgique. Les classes sont relativement larges, principalement celle des teneurs élevées (> 50 %) en raison de la difficulté de réaliser des observations à la tarière de cartographe dans les sols à ce point caillouteux.

3.2. Importance du facteur “sol” sur la variabilité spatiale des teneurs en ETM

Différenciations régionales des sols issus de loess.

L'étude du référentiel régional sur les sols issus de loess consiste à évaluer la pertinence de sa stratification sur base de critères propres aux séries de sols, à savoir la lithologie des matériaux (L), la texture du profil (T), l'intensité du drainage naturel (D), le développement de profil (P), ainsi que des combinaisons de ces critères (LTDP correspond à peu près à la série de sols). La pertinence de ces critères est évaluée sur base d'une analyse de la variance. Les résultats (Tableau 4) indiquent une absence de signification statistique presque généralisée pour les différences entre les groupes établis selon les trois premiers critères. Les groupes basés sur le développement de profil ou la combinaison des quatre critères, à l'inverse, affichent des différences significatives mais les indices de pertinence des classifications sont assez faibles. Ceci traduit le fait que certains types de sols se démarquent des autres au point de vue des teneurs en ETM mais qu'il n'est pas pertinent de les distinguer tous. L'exemple du cuivre (Figure 4) est illustratif. Le critère “série de sol” est

Tableau 4. Pertinence de la stratification des sols issus de loess en fonction des critères typologiques estimée par la part de la variance expliquée par la classification ($1-s_w^2/s_T^2$) — *Relevance of loess soils stratification with typological criteria expressed by the percentage of variance taken into account by classification ($1-s_w^2/s_T^2$). (L = lithologie — lithology ; T = texture ; D = drainage naturel — natural drainage ; P = développement de profil — soil profile development ; NS = pas de différences significatives entre les moyennes — no significative differences between means).*

	L	T	D	P	LTDP
Cu	0,02	0,05	NS	0,05	0,07
Zn	0,02	0,02	NS	0,04	0,03
Cr	NS	NS	NS	0,05	0,05
Ni	NS	NS	NS	0,04	0,03
Pb	NS	0,02	NS	0,06	0,07
Co	NS	NS	0,01	0,02	0,04

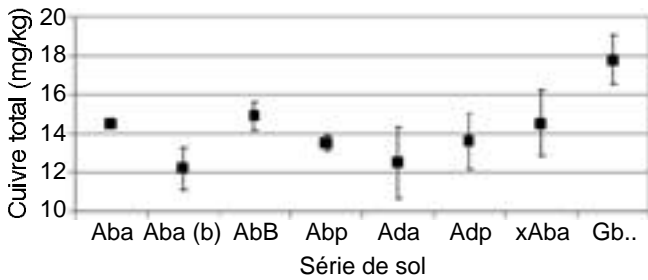


Figure 4. Teneurs régionales en cuivre (mg/kg) dans l'horizon labouré en fonction des séries de sols de la Carte des Sols de la Belgique (cf Avril, 1982 pour la légende) — *Regional copper content (mg/kg) of plough layer for various soil series from the Belgian soil map (see Avril, 1982 for legend).*

peu pertinent pour les séries limoneuses à l'échelle régionale ; les différences se marquent essentiellement entre les sols issus de loess et les sols sur pente influencés par un substrat argileux, schisteux ou calcaire. On notera néanmoins une différenciation entre les séries Aba et Aba(b) (sol limoneux à horizon BT tacheté) que l'on peut mettre en parallèle avec des historiques de mise en culture et des teneurs en argile en surface différents.

Estimation des contaminations et monitoring à l'échelle régionale. Le référentiel régional a également pour objet l'évaluation des niveaux de contamination en ETM des terres agricoles. Dans cette optique, le fond pédogéochimique a fait l'objet d'une modélisation par régression avec les teneurs en fer total ou en argile. Un indice de concentration, calculé par le rapport "teneur mesurée dans l'horizon de surface/teneur du fond pédogéochimique", a été retenu comme indicateur du niveau d'anthropisation agricole. La comparaison des résultats entre sols agricoles et sols forestiers (**Tableau 5**) montre une accumulation moyenne des éléments Cu et Zn, souvent associés aux effluents d'élevage, dans les sols agricoles alors que les teneurs en Pb dans l'horizon labouré sont très nettement inférieures à celles que l'on retrouvera sous forêt. Ce dernier point est à mettre en relation avec l'accélération de l'érosion suite à la mise en culture des terres et les pertes importantes en matière organique qui en résultent.

En raison de l'effectif de la collection d'échantillons, nous pouvons considérer que celle-ci est représentative de la situation des sols agricoles pour les séries limoneuses. Une question se pose en corollaire à l'évaluation de l'état des terres ; elle concerne son suivi temporel et la sensibilité d'un référentiel à enregistrer des changements.

Cette sensibilité peut être évaluée par le calcul des plus petites différences significatives (ppds) entre

Tableau 5. Indice de concentration moyen (teneur observée/teneur du fond pédogéochimique) de sols sous culture et sous forêt pour quelques ETM — *Mean concentration index (observed content/background calculated content) of some ETM in soils under agriculture or forest.*

	Cu	Zn	Co	Pb
Culture	1,17	1,36	1,00	1,66
Forêt	1,09	1,21	1,07	3,46

deux moyennes. La première moyenne correspond à celle de l'inventaire actuel, la seconde à celle d'un inventaire futur. L'égalité des variances est supposée et l'exercice a été réalisé pour plusieurs effectifs d'inventaire. Les ppds ont été estimées pour les sols limoneux non colluviaux (N = 250, 50 ou 20) et pour les sols colluviaux (N = 50 ou 20).

Les résultats (**Tableau 6**) pour les indices de concentration expriment pleinement la puissance du référentiel, plus grande pour les sols limoneux que pour les sols colluviaux, principalement en raison de la taille de l'effectif car les variances au sein de chacun des deux groupes de séries sont du même ordre de grandeur. On retiendra que l'inventaire régional doit permettre de détecter une augmentation du taux de concentration dans l'horizon de surface inférieure à 10 % pour Mn, Cu, Zn et Co (< 12 % pour les sols colluviaux) et comprise entre 10 et 20 % pour Ni, Cr et Pb. On notera que ces résultats supposent que les deux inventaires soient indépendants. Les résultats de Colinet (2003) montrent que la sensibilité du référentiel pourrait encore être améliorée en effectuant le suivi temporel sur les mêmes parcelles agricoles, en raison tant de niveaux de variance inférieurs que d'un mode de calcul statistique différent.

Tableau 6. Sensibilité du référentiel à détecter une évolution de l'indice de concentration dans l'horizon labouré à l'échelle régionale ($\alpha=0,05$) — *Reference System sensibility for the detection of a change in the concentration index of the plough layer at regional scale ($\alpha=0.05$).*

Indice de concentration	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co
Sols limoneux						
N = 250	0,03	0,03	0,06	0,07	0,05	0,03
N = 50	0,04	0,05	0,10	0,12	0,09	0,05
N = 20	0,07	0,08	0,14	0,18	0,13	0,07
Sols colluviaux						
N = 50	0,07	0,10	0,13	0,15	0,13	0,09
N = 20	0,09	0,12	0,17	0,20	0,17	0,12

Fond pédogéochimique à l'échelle des parcelles agricoles. Afin d'affiner l'approche régionale qui ne différencie ni les facteurs de variation liés à la gestion agricole ni d'éventuelles spécificités naturelles sous-régionales, un test de nullité de la moyenne des différences de teneurs en ETM entre Aba et Abp de parcelles identiques a été effectué. Les résultats figurent au **tableau 7**, sous la forme d'une différence moyenne de teneur ([Aba]-[Abp]), de l'écart-type de ces différences et de leur niveau de signification statistique. La différenciation entre les deux séries est prononcée pour les teneurs en argile, en moyenne un Abp présente 5,6 g/100 g de moins qu'un Aba situé dans la même parcelle. La différenciation entre les deux séries est significative également pour l'ensemble des éléments, à l'exception de Mn. Les teneurs en Cu, Zn, Ni, Cr et Co sont plus élevées dans l'Aba, celles en Pb dans l'Abp.

Par rapport au référentiel typologique régional, on retrouve les mêmes constats pour Mn, Zn, Ni, Cr et Pb avec les mêmes ordres de grandeur de différences entre les deux séries. L'approche typologie à la parcelle montre par contre que les différenciations en Cu et en Co sont également significatives et qu'elles respectent la logique du fond pédogéochimique.

La parcelle du Cheslon est située dans un contexte pédologique moins homogène. Les résultats relatifs aux teneurs à l'eau régale (ER) en ETM figurent au

Tableau 7. Différences de teneurs en argile (g/100g) et en ETM (mg/kg) dans l'horizon labouré entre Aba et Abp à l'échelle de la parcelle agricole — *Plot-scale differences between Aba and Abp clay (g/100g) and MTE (mg/kg) contents in the plough layer.* *** = très hautement significatif — *very-highly significant*; ** = hautement significatif — *highly significant*; * = significatif — *significant*; NS = non significatif — *non significant*.

	[0-2µm]	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co
Moyenne	5,6	30,5	1,6	4,3	3,3	3,3	-2,9	1,0
Écart-type	3,5	154,4	2,3	9,1	4,0	7,3	5,2	1,1
Niveau	***	NS	**	*	***	*	**	***

Tableau 8. Teneurs en ETM (mg/kg) moyennes et écarts-types par unités de sol dans la parcelle du Cheslon — *Mean contents in MTE (mg/kg) and standard deviations for each soil unit from the Cheslon plot.*

Sol (n)	Zn	Cu	Ni	Cr	Pb
Aba (11)	65 ± 7	18 ± 2	20 ± 2	36 ± 3	23 ± 2
uAba (2)	71 ± 3	21 ± 1	23 ± 2	36 ± 1	25 ± 2
Abp (3)	54 ± 5	15 ± 2	16 ± 1	28 ± 1	19 ± 1
Gbax (4)	101 ± 19	30 ± 7	40 ± 10	51 ± 4	34 ± 4
Moyenne	71 ± 18	20 ± 6	24 ± 10	38 ± 8	28 ± 5

tableau 8, regroupés par type de sol. La singularité des sols argilo-caillouteux apparaît clairement. Les concentrations de tous les ETM, sauf Cd, y sont systématiquement supérieures à celles mesurées dans les autres types de sol. Si, statistiquement, les sols sur colluvions limoneuses ne diffèrent pas des autres sols limoneux, les teneurs moyennes y sont néanmoins dans l'ensemble les plus basses.

Les résultats obtenus sur la parcelle du Cheslon appellent plusieurs commentaires, complémentaires à ceux réalisés par Bock *et al.* (2003). En premier lieu, ils mettent clairement en évidence la pertinence d'une stratification sur base de la typologie des sols, même si toutes les séries de la Carte des Sols de la Belgique ne sont pas utiles à distinguer. La prédiction d'une teneur "normale" pour l'horizon labouré d'un sol argilo-caillouteux de type Gbax sera différente de celle pour le même horizon d'un sol limoneux.

En deuxième lieu, les vingt sondages répartis sur une grille systématique peuvent être considérés comme représentatifs de l'importance spatiale de chacun des types de sol au sein de la parcelle. Les sols limoneux, courts ou profonds, étant majoritaires, la teneur moyenne à l'échelle de la parcelle est proche de celles de ces types de sol. Ce qui peut paraître anecdotique pour l'évaluation d'une moyenne surfacique l'est toutefois moins dans le cadre d'un suivi temporel. En effet, les niveaux de variabilité, traduits par les écarts-types qui entrent dans les calculs de différences significatives, sont nettement plus élevés à l'échelle de la parcelle qu'à celle des Aba et il est dès lors moins aisé de mesurer de faibles évolutions dans une parcelle hétérogène que dans une parcelle homogène. Dans le même ordre d'idée, l'autocorrélation spatiale des teneurs en ETM n'est pas correctement perceptible dans ce type d'environnement mêlant des matériaux aux propriétés sensiblement différentes sur des petites distances.

Troisièmement, il est possible de s'affranchir de la typologie des sols dans le cadre d'un diagnostic relatif à une contamination par le recours aux régressions avec des variables ancillaires, en l'occurrence la teneur en fer-ER, qui témoignent en faveur d'une origine pédogénétique lorsque les logiques des relations entre éléments sont respectées, de contaminations dans le cas contraire. La **figure 5** illustre ce principe pour les teneurs en cuivre. Les teneurs observées supérieures à 30 mg/kg dans les sols argilo-caillouteux participent de la même logique avec les teneurs en fer que les sols à texture limoneuse. Il s'agit bien là d'un effet lié à des concentrations différentes en minéraux porteurs d'ETM selon les types de sols et non pas d'un effet lié à la gestion agricole de la parcelle ou à toute autre contamination d'origine anthropique.

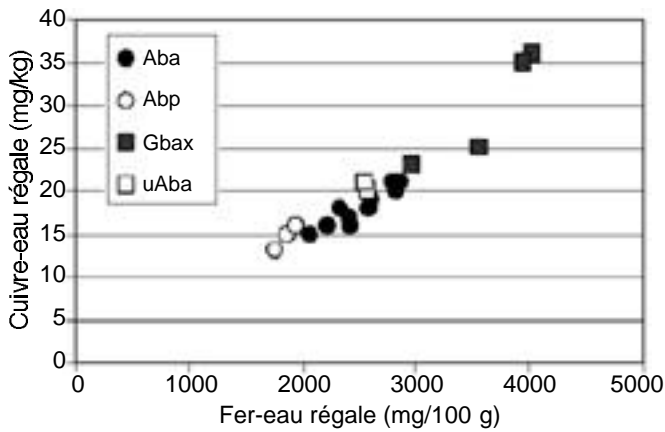


Figure 5. Relation entre les teneurs en cuivre et en fer (à l'eau régale ; Cu en mg/kg, Fe en mg/100 g) par série de sol pour la parcelle du Cheslon — *Copper-iron relationship (aqua regia and mg/kg) for the soil series in the Cheslon plot.*

Aspects cartographiques. Les résultats relatifs à la stratification du référentiel ETM sur base des types de sol indiquent une faible pertinence de celle-ci pour les sols issus de loess à l'échelle régionale. À l'inverse, les résultats à l'échelle de la parcelle agricole plaident en faveur d'une distinction entre sols à horizon BT et sols sur colluvions. Cette apparente contradiction s'explique par l'existence d'une variabilité géographique des teneurs en ETM dans les sols de plateaux. Dans les analyses de variance, cette variabilité géographique correspond au carré moyen résiduel et tend à dissimuler la différenciation entre types de sol due à des processus géomorphologiques qui est bien réelle. Pour réaliser une cartographie géochimique dans les sols issus de loess, la Carte des Sols de la Belgique est pertinente mais nécessite des adaptations, à savoir le regroupement des séries de sols géochimiquement indissociables et l'identification des spécificités géographiques propres à des PRN.

Dans des milieux lithologiquement moins homogènes, la variabilité due au facteur type de sol augmente. Toutefois, on peut croire que la variabilité d'un même type de sol augmente également à l'échelle régionale et ce, de manière spécifique à ce type de sol en fonction de la variabilité des matériaux lithologiques. La définition de PRN s'avère nécessaire pour toutes les unités géochimiques de sols et il est probable qu'une meilleure prise en compte des aspects géomorphologiques par l'intermédiaire des modèles numériques de terrain et des cartes géologiques soit utile à cet égard.

4. CONCLUSIONS

Les exemples présentés ici ont montré, à des échelles d'appréciation différentes de la problématique de

l'évaluation des teneurs naturelles en ETM dans les sols, l'importance de prendre en considération non seulement le contenu mais également le contenant des sols, *i.e.* les différents volumes et leurs organisations.

L'exemple du réseau "chêne" est à la fois illustratif

- de l'influence du matériau parental sur la concentration en éléments d'un sol,
- de la complexité de l'évaluation de stocks fonctionnels dans des sols caillouteux et
- de la nécessité de continuer recherche et réflexion en la matière.

L'étude d'un référentiel régional et l'approche à l'échelle des parcelles agricoles en contexte lithologique homogène permettent de conclure à l'importance de la géomorphologie, facteur à l'origine de la différenciation des sols sur colluvions au sein des sols issus de loess. L'étude de la parcelle en Condroz confirme l'importance de raisonner en types de sol pour la prédiction spatiale des teneurs naturelles en ETM.

En abordant des questions liées au facteur lithologique et à la position dans le relief, à l'échelle de régions naturelles ou au niveau d'une parcelle agricole, suffisamment d'arguments ont donc été apportés en faveur d'une pertinence de l'identification des facteurs de la pédogenèse et de la reconnaissance des volumes de sols pour une prédiction et une interprétation des niveaux de teneurs en ETM. La numérisation de la Carte des Sols de la Belgique fait de celle-ci un outil de spatialisation du fond pédogéochimique potentiellement intéressant, moyennant toutefois

- un travail de révision de sa légende car certaines séries de sols peuvent être groupées et
- l'intégration de données complémentaires, comme les modèles numériques de terrain et les cartes géologiques.

Bibliographie

- Alloway BJ. (1990). *Heavy metals in soils*. Glasgow: Blackie Academic & Professional, 339 p.
- Alloway BJ. (1997). The mobilisation of trace elements in soils. In Prost R. (ed) *Contaminated Soils. Proceedings of the third international conference on the biogeochemistry of trace elements. Paris, 15-19 May 1995*. Paris: INRA, p. 133–146.
- Avril P. (1982). *Légende de la Carte des Sols de Belgique*. Gembloux, Belgique: Faculté universitaire des Sciences agronomiques, Service de la Science du sol, 21 p.
- Baize D. (1997). *Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France)*. Paris: INRA, 408 p.
- Baize D., Salpeteur I., Bideau L., Cornu S., Itard Y., King D., Mouvet C., Salvador-Blanes S. (2002). Fonds

- pédogéochimiques naturels - concepts et spatialisation. Comm. orale. *Forum Qualité des Sols, Paris, 15-16 mai 2002*.
- Benoit M., Papy F. (1998). La place de l'agronomie dans la problématique environnementale. In Vilotte O., Barres D. *Sciences de la société et environnement à l'INRA - matériaux pour un débat*. Dossier de l'environnement de l'INRA **17**, p. 53-72.
- Bertrand R., Kilian J., Raunet M., Guillobez S., Bourgeon G. (1985). La connaissance des systèmes de paysages naturels, un préalable à la protection du milieu. L'approche morphopédologique. *Bull. Rech. Agron. Gembloux* **20** (3/4), p. 545-559.
- Bock L. (1994). Analyses de sols et gestion de l'espace. Plaidoyer pour leur cadrage géomorphopédologique dans les projets, expertises et services de conseil. *Étud. Gestion Sols* **1**, p. 23-33.
- Bock L., Laroche J., Genot V., Colinet G., Lacroix D. (2002). Intérêt des cartes pédologiques pour la caractérisation géochimique des sols. Cas d'une parcelle en Condroz. In Baize D. Tercé M. *Les éléments traces métalliques dans les sols. Approches fonctionnelles et spatiales*. Versailles, France : INRA, 565 p.
- Bock L., Bogaert P., Colinet G., Delcarte E., Delvaux B., Ducarme F., Laroche J., Maesen P., Marcoen JM., Sonnet P., Wibrin MA. (2003). *Convention d'étude Pollusol : établissement et cartographie des teneurs bruits de fond en éléments traces métalliques et micropolluants organiques dans les sols de la Région wallonne*. Rapport final du groupe d'étude APPP, "Application de la pédologie aux problèmes de pollution" (SPAQuE-UCL-FUSAGx-BEAGx-CAFX), 125 p.
- Bourg ACM., Darmendrail D., Ricour J. (1989). Geochemical filtration of riverbank and migration of heavy metals between the Deûle river and the Ansereuilles alluvion-chalk aquifer (Nord, France). *Geoderma* **44**, p. 229-244.
- Burrough PA. (1986). *Principles of Geographical Information Systems for land resources assessment*. Oxford: Clarendon Press, 193 p.
- CE (2002). *Vers une stratégie thématique pour la protection des sols*. Communication finale de la Commission européenne au Parlement, au Comité économique et social et au Comité des régions 179, 39 p.
- Colinet G. (2003). *Éléments traces métalliques dans les sols. Contribution à la caractérisation des déterminants de leur distribution spatiale en Région limoneuse belge*. Thèse doct., Fac. univ. Sci. agron. Gembloux, Belgique, 416 p.
- Collectif (1998). *Contamination des sols par les éléments en traces : les risques et leur gestion*. Rapport de l'Académie des Sciences **42**. Paris : TEC & DOC, 440 p.
- Cornelis C., Geuzens P. (1993). *Achtergrondgehalten van een aantal anorganische en organische Veron - treinigen in vlaamse bodems – voorstel voor referentiewaarden*. Rapport MIE/DI/9327, VITO, Afdeling Leefmilieu, 42 p.
- Cottenie A., Verloo M., Kiekens L. (1974). La situation des sols belges en éléments traces. In Compte rendu de la Semaine d'étude sol et fertilisation, 3-7 sept. 1973. *Bull. Rech. Agron. Gembloux*, p. 180-190.
- Dagnelie P. (1975). *Théorie et méthodes statistiques. Applications agronomiques. Tome II*. Gembloux, Belgique : Presses agronomiques de Gembloux, 463 p.
- Delecour F. (1968). Distribution des oligo-éléments cuivre, zinc et molybdène dans les sols forestiers de l'Ardenne Belge. I. Formes Totales. *Pédologie* **18** (1), p. 43-62.
- De Temmerman LO., Istas JR., Hoenig M., Dupire S., Ledent G., Van Elsen Y., Baeten H., De Meyer A. (1982). Définition des teneurs "normales" des éléments en trace de certains sols belges en tant que critère de base pour la détection et l'interprétation de la pollution des sols en général. *Rev. Agric.* **35** (2), p. 1915-1944.
- Etienne M. (2003). *Identification des risques édaphiques pour l'état sanitaire des chênes indigènes et recherche de moyens de stabilisation des écosystèmes forestiers à base de chêne en milieu oligotrophe*. Rapport de fin de recherches. Convention MRW-DNF-FUSAGx, t.I, 95 p., t.II, 159 p.
- Juste C. (1988). Appréciation de la mobilité et de la biodisponibilité des éléments en traces du sol. *Sci. Sol* **26** (2), p. 103-112.
- Khokhlova TI. (1967). Content and distribution of microelements in the soils of the Kuznetsk Forest Steppe. *Sov. Soil Sci.* **1**, p. 47-53.
- Kleber A., Mailänder R., Zech W. (1998). Stratigraphic approach to alteration in mineral soils: the heavy metal example. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **62**, p. 1647-1650.
- Lee BD., Carter BJ., Basta NT., Weaver B. (1997). Factors influencing heavy metal distribution in six Oklahoma Benchmark Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **61**, p. 218-223.
- Mac Grath (1997). Behaviour of trace elements in terrestrial ecosystems. In Prost R. (ed) *Contaminated Soils. Proceedings of the third international conference on the biogeochemistry of trace elements. Paris, 15-19 May 1995*. Paris: INRA, p. 35-56.
- Minitab (2000). *MINITAB Logiciel d'analyse statistique. Version 13.20*.
- Oertel AC. (1961). Relation between trace element concentrations in soil and parent material. *J. Soil Sci.* **12** (1), p. 119-128.
- Petit JP., Defoux J. (2001). *Inventaire de la qualité des sols en Région wallonne*. Rapport de l'Office Wallon des déchets- Direction de la protection des sols – DGRNE - MRW, 16 p.
- Salvador-Blanes S. (2002). *Déterminisme de la distribution spatiale des éléments majeurs et traces dans les sols en contexte métamorphique (Plateau d'Aigurande, nord du Massif central, France)*. Thèse, Université de Tours, 287 p.

- Sondag F., Martin H. (1984). *Inventaire géochimique des ressources métallifères de la Wallonie. Synthèse générale et rapport de fin de recherches*. Projet ministère de l'Économie wallonne. Louvain-la-Neuve, Belgique : UCL, Unité de Géologie, 1984, 15 p.
- Stolt MH., Baker JC., Simpson TW. (1993). Soil-landscape relationships in Virginia: I. Soil Variability and Parent Material Uniformity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **57**, p. 414–421.
- Swaine DJ., Mitchell RL. (1960). Trace-element distribution in soil profiles. *J. Soil Sci.* **11** (2), p. 347–368.
- Van Der Sluys J., Brusselmans A., De Vos W., Swennen R. (1997). Regional geochemical mapping of overbank and stream sediments in Belgium and Luxembourg. Vol. III. Geochemical maps of Belgium and Luxembourg based on overbank and active stream sediments. *Prof. Pap. Serv. Géol. Belg.* **283**.
- Warin A., Bernaerdt R., Delcarte E., Maesen P., Naud J., Marcoen JM. (2004). Projet de système harmonisé de surveillance de la qualité des terres agricoles en Région wallonne anticipant la future Directive européenne sur les sols. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* **8** (2), p. 69–82.
- Webster R., Oliver MA. (2001). *Geostatistics for environmental scientists*. Chichester, England: J. Wiley, 271 p.
- Williot B. (1995). Variabilité spatiale et risques d'erreur dans l'analyse des horizons holorganiques forestiers. *Étud. Gestion Sols* **2** (1), p. 73–84.

(37 réf.)