

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

**Quatrième partie – référentiels agricoles  
conclusions**

Promoteur : Pr. L. BOCK

2003



**Quatrième partie**  
**Référentiels agricoles**



## Liste des figures

Figure IV.1:	Représentation de l'exactitude et la précision des différents modèles de régression BRAB pour Cu	339
Figure IV.2:	Représentation de l'exactitude et la précision des différents modèles de régression BRAB pour Pb	339
Figure IV.3:	Relations argile-Fe selon les différents jeux de données "limons".	341
Figure IV.4:	Relations entre Ni et Fe dans les différents jeux de données "limons"	342
Figure IV.5:	Relations entre Cu et Fe dans les différents jeux de données "limons"	343
Figure IV.6:	Exactitude des prédictions des teneurs en ETMs dans le jeu de données LIM par rapport à la moyenne de ces données	350
Figure IV.7:	Précision des prédictions des teneurs en ETMs dans le jeu de données LIM par rapport à la prédiction sur base de la moyenne des données	351
Figure IV.8:	Position des variables sur le plan factoriel principal: horizons labourés	357
Figure IV.9:	Position des variables sur le plan factoriel principal: teneurs "résiduelles" dans les horizons labourés	358
Figure IV.10:	Localisation des secteurs de l'Orneau, de Corroy, de Waremme, ainsi que de la parcelle de Boëlhe par rapport à la zone d'étude	369
Figure IV.11:	Semi-variogramme expérimental relatif à la catégorisation du développement de profil pour les horizons labourés	370
Figure IV.12:	Carte des teneurs mesurées en Zn dans la zone étudiée.	371
Figure IV.13:	Cartes des teneurs mesurées en Fe dans la zone étudiée. .	372
Figure IV.14:	Cartes des teneurs "résiduelles" en Zn dans la zone étudiée	372
Figure IV.15:	Cartes des résidus de la régression de Zn (mg/kg) par Fe et COT.	373
Figure IV.16:	Semi-variogramme modélisé et données expérimentales relatifs aux teneurs en argile pour les horizons de surface	375
Figure IV.17:	Semi-variogramme modélisé et données expérimentales relatifs aux teneurs en COT pour les horizons de surface	376
Figure IV.18:	Semi-variogrammes modélisés et données expérimentales relatifs aux teneurs en Zn à courte distance et à longue distance	377
Figure IV.19:	Extraits de carte topographique et de carte des sols relatifs à la parcelle de Boëlhe	381
Figure IV.20:	Cartes des teneurs mesurées en Zn et en Pb dans la parcelle de Boëlhe	382
Figure IV.21:	Relations entre teneurs en ETMs et la latitude	383
Figure IV.22:	Semi-variogrammes des résidus des régressions Zn-Y et Pb-Y	383
Figure IV.23:	Teneurs estimées et intervalles de confiance pour les teneurs en Zn et en Pb dans la parcelle de Boëlhe	384
Figure IV.24:	Grille d'échantillonnage et séries de sols pour le secteur de Corroy-le-Grand	385
Figure IV.25:	Résultats relatifs à la prédiction spatiale des teneurs en Mn dans le secteur de Corroy-le-Grand	386
Figure IV.26:	Résultats relatifs à la prédiction spatiale des teneurs en Ni dans le secteur de Corroy-le-Grand	387
Figure IV.27:	Identification de teneurs anormales en Ni dans le secteur de Corroy-le-Grand	388
Figure IV.28:	Cartes des teneurs "résiduelles" calculées pour Cu et Zn	390

Figure IV.29:	Semi-variogramme des teneurs en Fe à l'échelle régionale	391
Figure IV.30:	Carte des unités pédo-géochimiques réalisée à partir des planchettes 130E et 143E de la carte des Sols de la Belgique	395
Figure IV.31:	Détails de la carte pédo-géochimique et explicitation de la légende.	396
Figure IV.32:	Schéma de principe de la cartographie des teneurs en ETMs à l'échelle régionale selon une approche par régression	398
Figure IV.33:	Illustration de l'approche BME	400
Figure IV.34:	Teneurs en Cu par traitement et par bloc dans l'expérimentation CRAGx	403
Figure IV.35:	Relations entre les teneurs en Cu et en Fe différenciées par type de traitement	404
Figure IV.36:	Relations entre les teneurs en Zn et en Fe différenciées par parcelle agrobiologique	406
Figure IV.37:	Relations entre les teneurs en Zn et en COT différenciées par parcelle agrobiologique	406
Figure IV.38:	Relation entre les teneurs en Cu dans les données 2002 et 1992.	408
Figure IV.39:	Relations Cu-Fe différenciées par jeu de données	408

## Liste des tableaux

Tableau IV. 1: Résultats de l'évaluation des modèles BRAB pour la prédiction des teneurs en ETMs dans des horizons limoneux "profonds"	337
Tableau IV. 2: Equations des droites de régression argile-Fe dans les jeux de données BRAB, TONG, LIM, RPG et ASPI	341
Tableau IV. 3: Critères d'exactitude et de précision du modèle général Fe-Ni pour la prédiction des teneurs en Ni dans les jeux de données "limons".	343
Tableau IV.4: Matrices des critères d'exactitude et de précision des modèles "limons" par rapport aux différents jeux de données - Cu	344
Tableau IV.5: Matrices des critères d'exactitude et de précision des modèles "limons" par rapport aux différents jeux de données - Zn	345
Tableau IV.6: Matrices des critères d'exactitude et de précision des modèles "limons" par rapport aux différents jeux de données - Ni	345
Tableau IV.7: Matrices des critères d'exactitude et de précision des modèles "limons" par rapport aux différents jeux de données - Cr	346
Tableau IV.8: Matrices des critères d'exactitude et de précision des modèles "limons" par rapport aux différents jeux de données - Pb	346
Tableau IV.9: Matrices des critères d'exactitude et de précision des modèles "limons" par rapport aux différents jeux de données - Co	347
Tableau IV.10: Equations des droites de régression argile-Fe dans les jeux de données BRAB, TONG, LIM, RPG et ASPI	348
Tableau IV.11: Critères d'exactitude et de précision des équations générales pour les différents jeux de données "limons" et les différents ETMs pour lesquels la régression avec Fe est significative	349
Tableau IV.12: Estimations du fond pédo-géochimique minéral des sols limoneux, modèles, intervalles de confiance (IC95) et limite supérieure (Lim_95)	353
Tableau IV.13: Statistiques relatives à la population des horizons labourés limoneux	355
Tableau IV.14: Moyenne, écart-type, indice de concentration (Conc.), vibrisse supérieure et fonction de répartition à 0.95 [F(0.95)] des teneurs "résiduelles"	355
Tableau IV.15: Différenciation du fond pédo-géochimique modélisé et des seuils de teneurs totales habituelles dans les sols limoneux en fonction des séries	364
Tableau IV.16: Sensibilité du référentiel ETMs à détecter une évolution des teneurs	367
Tableau IV.17: Semi-variances relatives, à différentes échelles spatiales, pour les variables Fe, argile, sable, COT et pHH2O	374
Tableau IV.18: Semi-variances relatives, à différentes échelles spatiales, pour les teneurs en ETMs	376
Tableau IV.19: Différences de teneurs en argile et en ETMs dans l'horizon labouré entre Aba et Abp à l'échelle de la parcelle agricole	380
Tableau IV.20: Analyses de bases et teneurs totales en Fe, Cu et Zn dans les parcelles d'agrobiologie	405

Table des matières

*CHAPITRE.7FOND PEDO-GEOCHIMIQUE ET ANTHROPISATION  
DE L'HORIZON LABOURE* 333

7.1	<i>Introduction</i>	333
7.2	<i>Approches régionales</i>	334
7.2.1	Modélisation du fond pédo-géochimique des sols limoneux	336
7.2.1.1	Validation des modèles BRAB pour le fond pédo-géochimique des horizons profonds des sols limoneux.	336
7.2.1.2	Comparaison de modèles de prédiction du fond pédo-géochimique en sols limoneux.	340
7.2.1.3	Conclusions relatives à la modélisation du fond pédo-géochimique des sols limoneux.	351
7.2.2	Interprétation des teneurs dans l'horizon labouré	354
7.2.2.1	Approche globale non stratifiée	354
7.2.2.2	Approche par régression	356
7.2.2.3	Approche typologique	360
7.2.3	Conclusions	365
7.3	<i>Approche spatiale du fond pédo-géochimique et du niveau d'anthropisation</i>	368
7.3.1	Analyse des structures spatiales	371
7.3.1.1	Visualisation des données	371
7.3.1.2	Echelles spatiales de variabilité	374
7.3.1.3	Variabilité à l'échelle de la station	378
7.3.1.4	Variabilité à la parcelle	379
7.3.1.5	Variabilité à l'échelle du secteur	385
7.3.1.6	Variabilité régionale	389
7.3.2	Evaluation de la faisabilité d'une cartographie du fond minéral et de l'état d'anthropisation	392
7.3.2.1	cartographie directe	393
7.3.2.2	cartographie typologique	394
7.3.2.3	cartographie par régression	397
7.3.2.4	approches mixtes	399
7.3.3	Conclusions	401
7.4	<i>Approches ponctuelles et locales</i>	402
7.4.1	Expérimentations CRAGx	402
7.4.2	Agriculture biologique	404
7.4.3	Bilan de 10 années d'irrigation avec des eaux résiduaires d'une industrie agro-alimentaire (Waremme)	407
7.4.4	Conclusions	409







## **Chapitre.7 Fond pédo-géochimique et anthropisation de l'horizon labouré**

### **7.1 Introduction**

L'horizon labouré par sa position d'interface environnemental et sa fonction de production agricole occupe une place particulièrement importante. Milieu anthropisé par excellence, les étapes de l'étude des différenciations d'origine pédogénétique en ont relevé la spécificité.

Deux types de questions se posent par rapport aux teneurs en ETMs dans l'horizon labouré: (i) "Est-ce qu'une teneur mesurée peut être considérée comme naturelle ou normale?" et (ii) "A quelle teneur puis-je m'attendre en tel endroit?". La première question relève de la problématique de détection des contaminations; la seconde de la prédiction spatiale.

Pour rappel, les travaux de D. BAIZE ont montré qu'il ne fallait pas rechercher une solution unique au problème de détection des contaminations. Au cas par cas selon l'élément considéré, la quantité et la qualité d'information ancillaire à disposition, l'une ou l'autre des démarches qu'il propose s'avérera plus pertinente.

Dans le même esprit, l'objectif de cette quatrième partie est d'exploiter les acquis des phases précédentes pour construire un référentiel spatialisé des teneurs en ETMs dans l'horizon labouré.

Dans une première partie, plusieurs voies de structuration d'un référentiel-ETM seront évaluées. Le référentiel-ETMs peut se construire (i) sur base des teneurs elles-mêmes, (ii) sur base de la carte des sols, et (iii) sur base d'un modèle de régression avec des variables quantitatives, et ce à plusieurs échelles spatiales d'observation.

Les aspects spatiaux seront spécifiquement abordés dans une deuxième partie et quelques exemples d'évaluation de modes de gestion particuliers de la matière organique recadrés par rapport au référentiel dans une troisième et dernière partie.

## 7.2 Approches régionales

Pour rappel, l'importance de la phase porteuse "0-2 $\mu$ m" nous a conduit à proposer de distinguer un fond pédo-géochimique lié aux teneurs argile, estimé par régression. La différence entre teneur prédite et teneur totale mesurée pour l'horizon labouré constitue lorsqu'elle est significative une teneur "nômiale", dont le caractère "prédictible" sera évalué postérieurement à celui du fond pédo-géochimique.

Au cours du chapitre 5, des modèles de prédiction des teneurs en ETMs dans le matériau parental "brabantien" ont été obtenus par régression uni- ou multivariée (modèles BRAB). Nous nous sommes interrogés sur le champ de validité de ces modèles et en particulier sur leur généralisation à d'autres matériaux limoneux, indépendamment de la stratigraphie.

Les différentes étapes de l'étude des différenciations pédogénétiques ont permis de confirmer certaines relations, avec l'argile granulométrique, Al, Fe.... pour les horizons minéraux. Ces relations sont donc a priori exploitables dans le cas de l'horizon labouré pour estimer des concentrations en ETMs liées à la matrice minérale.

Il apparaît ainsi opportun de comparer les résultats des différents modèles BRAB, qui correspondent à différents niveaux de disponibilité en variables ancillaires, pour la prédiction des teneurs en ETMs dans les sols "limoneux". Il est en outre nécessaire de comparer les modèles BRAB à des modèles formalisés à partir d'autres jeux de données afin d'analyser leurs différences et d'en retenir le plus universel, si tant est que cela ait un sens.

Nous avons déjà souligné le problème de validité des modèles de régression au chapitre 5, dans lequel deux modèles basés sur les teneurs en argile (BRAB-IV et TONG) pouvaient donner des résultats très différents en-dehors du champ des données ayant servi à la calibration des modèles.

L'analyse des modèles de prédiction des teneurs relatives au fond pédo-géochimique sera menée en plusieurs phases. Dans un premier temps, les équations obtenues au chapitre 5 (BRAB-I à VIII) seront appliquées sur un jeu de données indépendant présentant des valeurs mesurées pour chaque variable d'entrée des modèles. Ensuite, des équations établies sur d'autres jeux de données seront évaluées et comparées aux modèles BRAB sur base des données acquises au cours de ce travail. Nous tenterons enfin de déterminer un ou plusieurs modèles, en fonc-

tion des disponibilités en variables ancillaires, dont la portée soit la plus générale possible tout en satisfaisant à des critères d'exactitude et de précision.

La pertinence des modèles de régression sur les différents jeux de données sera évaluée sur base:

- de l'erreur moyenne (EM) définie par  $\frac{1}{n} \left[ \sum_{i=1}^n (obs_i - préd_i) \right]$  qui mesure le biais de la prédiction (TRIAANTIFILIS *et al.*, 2001; D'OR et BOGAERT, 2003);
- de la racine carrée de la moyenne des carrés des erreurs (RMSE) calculée par  $\left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (obs_i - préd_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$ , paramètre fréquemment utilisé (SINOWSKI et AUERSWALD, 1999; CHAPLOT *et al.*, 2000; BISHOP et McBRATNEY, 2001; TRIANTAFILIS *et al.*, 2001; D'OR et BOGAERT, 2003) qui renseigne sur la précision de la méthode de prédiction;
- du coefficient de corrélation entre données estimées et observées ( $r$ ), qui traduit la linéarité de la relation, et
- du rapport écart-type des valeurs mesurées / écart-type des valeurs estimées ( $sy/s\hat{y}$ ), qui doit montrer si le modèle reproduit, exagère ou atténue ( $sy/s\hat{y} = 1, < 1$  ou  $> 1$ ) la différenciation moyenne des teneurs observées.

On trouve également d'autres indices d'évaluation des régressions dans la littérature: l'erreur absolue moyenne, la statistique F ou le niveau de probabilité  $p$  (CHAPLOT *et al.*, 2000; TRIANTAFILIS *et al.*, 2001), ainsi que l'écart-type du carré des écarts (VAN MEIRVENNE, 1998) ou encore la variance d'estimation moyenne (D'OR et BOGAERT, 2003). Mais ceux-ci n'apportent rien de plus que les indices déjà retenus.

## 7.2.1 Modélisation du fond pédo-géochimique des sols limoneux

### *7.2.1.1 Validation des modèles BRAB pour le fond pédo-géochimique des horizons profonds des sols limoneux.*

Pour valider les modèles obtenus à partir des horizons C "brabantiens", nous les avons testés sur un jeu de données constitué d'un ensemble d'horizons limoneux "profonds" qui n'ont pas été utilisés pour l'élaboration des droites de régression et pour lesquels nous disposons de toutes les variables d'entrée des différents modèles. Ce jeu de données sera nommé LIM dans la suite du texte.

Seuls les modèles de prédiction des éléments Cu, Zn, Ni, Pb et Co sont évalués, en raison du manque ou de la faiblesse des relations linéaires entre Cr ou Mn et les variables "explicatives". Les modèles BRAB sont comparés à la prédiction par la teneur moyenne des horizons BRAB.

Les résultats des évaluations figurent au tableau IV.1. Pour rappel, les différents modèles correspondent à des régressions sur base de toutes les variables ancillaires (I), de toutes les variables sauf les "bases" (II), des variables disponibles dans AARDEWERK (III), de la teneur en argile (IV), des teneurs en Al, Fe et Mn (V), en Al et Fe (VI), en Fe (VII) et sur base de variables factorisées (VIII).

**Tableau IV. 1: Résultats de l'évaluation des modèles BRAB pour la prédiction des teneurs en ETMs dans des horizons limoneux "profonds", par rapport à l'utilisation de la teneur moyenne (MOY).**

	BRAB								MOY.
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	
<b>Cu (mg/kg)</b>									
EM	-0.5	-0.1	-0.3	-0.1	0.2	-0.1	-0.5	-0.1	-1.0
RMSE	2.1	1.8	2.2	2.2	2.5	1.8	1.8	1.7	3.2
r	0.75	0.81	0.68	0.68	0.78	0.81	0.82	0.83	
sy/s $\hat{y}$	1.37	1.04	1.63	1.50	0.78	1.03	1.17	1.11	
<b>Zn (mg/kg)</b>									
EM	1.3	-	0.3	0.5	-	-	0.1	1.9	-1.2
RMSE	5.1	-	6.2	6.2	-	-	4.9	5.4	8.4
r	0.81	-	0.70	0.70	-	-	0.81	0.79	
sy/s $\hat{y}$	1.08	-	2.14	2.13	-	-	1.22	1.34	
<b>Ni (mg/kg)</b>									
EM	-3.0	-2.4	-2.9	-2.7	-	-	-2.8	-1.9	-3.5
RMSE	8.2	5.7	6.4	6.1	-	-	5.2	5.1	7.4
r	0.12	0.69	0.62	0.70	-	-	0.82	0.74	
sy/s $\hat{y}$	1.65	2.60	4.09	3.59	-	-	2.23	2.12	
<b>Pb (mg/kg)</b>									
EM	2.2	1.9	1.5	1.3	-	-	1.0	1.5	-1.1
RMSE	4.7	4.7	4.3	4.3	-	-	4.7	4.6	4.0
r	0.077	-0.043	0.086	-0.113	-	-	-0.267	-0.131	
sy/s $\hat{y}$	2.07	1.98	2.29	3.18	-	-	2.10	2.24	
<b>Co (mg/kg)</b>									
EM	0.9	0.4	0.8	0.9	-	-	0.5	0.7	0.2
RMSE	2.7	2.2	1.9	2.1	-	-	2.3	2.1	2.1
r	0.45	0.52	0.54	0.45	-	-	0.43	0.47	
sy/s $\hat{y}$	0.83	0.90	1.38	1.27	-	-	0.97	1.16	

EM: erreur moyenne; RMSE: *root mean square error*; r coefficient de corrélation; sy/s $\hat{y}$ : rapport des écarts-types relatifs aux valeurs observées et prédites.

Pour ce qui concerne Cu, tous les modèles BRAB, excepté BRAB-V (régression Cu-[Al,Fe,Mn]) tendent à surestimer (EM < 0) les teneurs dans les horizons "profonds", en moyenne de moins de 0.5 mg/kg, ce qui est relativement peu. La RMSE est toujours inférieure à celle obtenue à partir de la prédiction sur base de la teneur moyenne. Les coefficients de corrélation indiquent un certain degré de linéarité et les rapports sy/s $\hat{y}$  indiquent une légère tendance à la sous-représentation de la variance des données. Tous les modèles sont moins biaisés et plus précis que la teneur moyenne des horizons BRAB. Des meilleurs résultats sont obtenus en prenant en compte Al et Fe, ou la fraction "0-2 $\mu$ " que

Fe tout seul.

Les modèles BRAB sous-estiment les teneurs en Zn de 0.1 à 2 mg/kg tandis que la teneur moyenne les surestime. Les RMSE sont toutes du même ordre de grandeur (5 à 6 mg/kg) et inférieures à celle de la moyenne. La linéarité des relations est très hautement significative et les rapports  $sy/s\hat{y}$  sont compris entre 1.08 et 2.14. On notera que la régression sur base du Fe total présente les meilleurs résultats et que les modèles granulométriques (BRAB-III et -IV) sont moins précis mais restent très peu biaisés.

Pour ce qui concerne les teneurs en Ni, la tendance générale est à la surestimation des teneurs (entre 2.0 et 3.0 mg/kg, soit moins de 10% de la teneur moyenne des horizons limoneux); les RMSE sont inférieures à celle de la moyenne, sauf pour BRAB-I (Ni-[Ca, K, Al, "0-2", Y]) qui cumule les indices défavorables (EM, RMSE et r), ce qui traduit bien que les modèles les plus compliqués ne sont pas pour autant les plus généralisables. Les rapports  $sy/s\hat{y}$  sont relativement élevés. Le "meilleur" modèle pour cette évaluation est le modèle factorisé.

Pour les éléments Pb et Co, les constats se ressemblent: sous-estimation des teneurs (respectivement de 1 à 2 et de 0.4 à 0.9 mg/kg), RMSE supérieures ou égales à celle de la moyenne, coefficients de corrélation plus faibles (particulièrement pour Pb) que pour Cu et Zn. La différence majeure entre Pb et Co réside dans les rapports  $sy/s\hat{y}$  proches de l'unité pour Co et supérieurs à 2 pour Pb. Même si pour ce dernier, les régressions sur base des fractions granulométriques sont un peu meilleures que les autres régressions, la meilleure prédiction des teneurs en Pb est fournie par la teneur moyenne des horizons "brabantiens" (*i.e.* 14.1 mg/kg). Pour Co, tous les modèles se valent en terme de précision, mais la teneur moyenne (9.9 mg/kg) est l'estimateur le moins biaisé.

***D'une manière générale, les performances des modèles de régression pour la prédiction des teneurs dans les horizons "profonds" limoneux se valent (exemple pour Cu, figure IV.1). Pour la prédiction d'un élément, ils se différencient principalement par l'erreur moyenne. Tous les modèles sont biaisés, toutefois pour Cu et Zn, l'erreur moyenne est inférieure à 5% de la teneur moyenne. Pour Ni et Co le biais est de l'ordre de 10% et pour Pb de 15%. Pb et Co présentent en outre une précision inférieure ou égale à celle de la prédiction par la teneur moyenne (exemple Pb, figure IV.2). Pour ces deux éléments, les régressions BRAB ne présentent donc pas d'intérêt. Pour Cu, Zn et Ni, les résultats obtenus en tenant compte de Al, Fe et "0-2 $\mu$ "(seuls ou en associations) sont satisfaisants. Il ne semble donc pas utile de***



*compliquer davantage les modèles.*

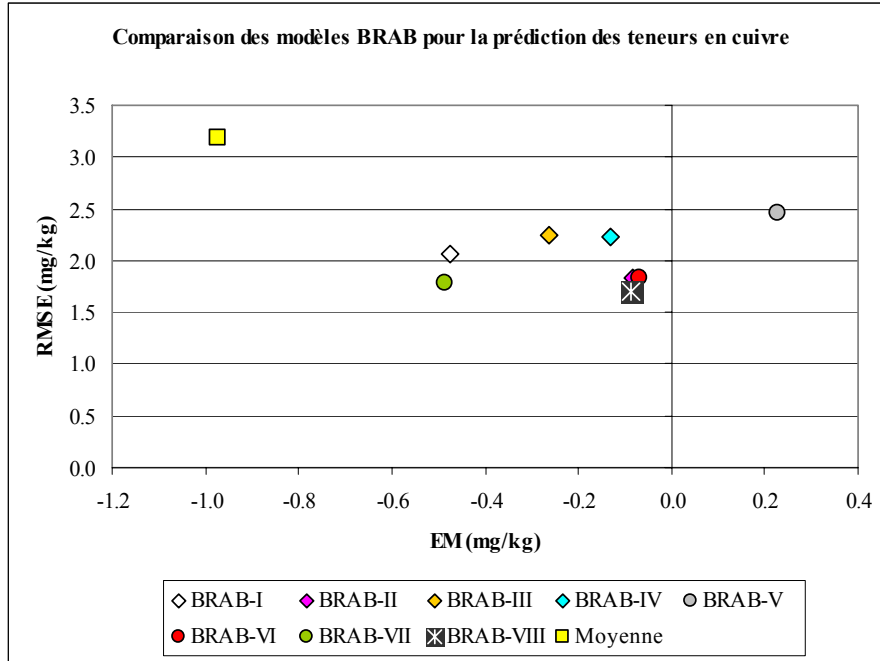


Figure IV. 1: Représentation de l'exactitude (EM) et la précision (RMSE) des différents modèles de régression BRAB pour Cu.

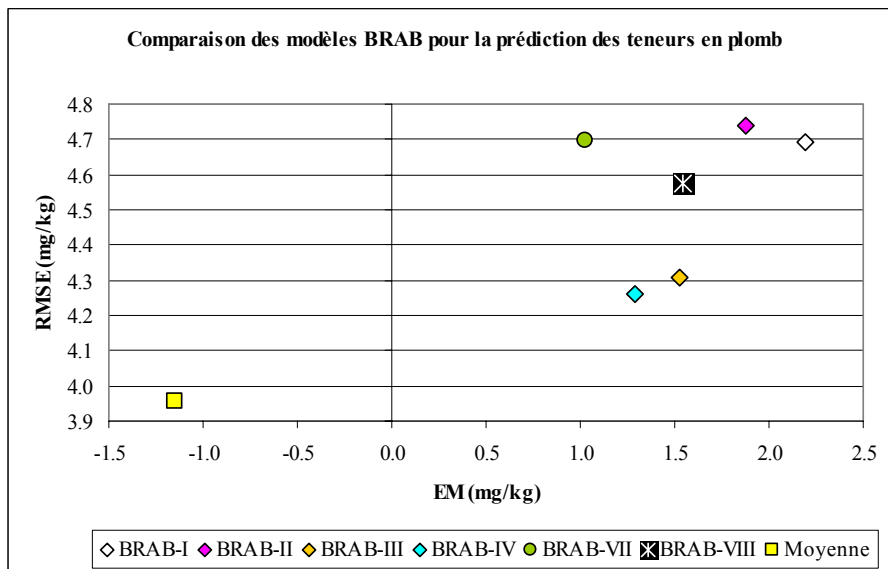


Figure IV. 2: Représentation de l'exactitude (EM) et la précision (RMSE) des différents modèles de régression BRAB pour Pb.

### 7.2.1.2 Comparaison de modèles de prédiction du fond pédogéochimique en sols limoneux.

Le gain de précision apporté par les régressions BRAB, par rapport à la prédiction sur base de la teneur moyenne, est surtout évident pour les éléments Cu, Zn et Ni. Les modèles BRAB vont faire l'objet d'une évaluation complémentaire par comparaison avec d'autres modèles acquis sur des jeux de données différents.

Nous disposons de plusieurs jeux de données dont les seules variables "explicatives" communes sont les teneurs en argile et en Fe. Ces jeux de données sont: la coupe de Tongrinne (données TONG, N=12), un ensemble d'horizons peu humifères de sols limoneux (données LIM, N=184), les données de l'inventaire régional réalisé par CORDIER (1999) dans le cadre de la mise en place du RPG Nord-Pas-de-Calais (données RPG, N= 46) et des données relatives aux limons de plateaux en France fournies par D. BAIZE (données ASPI, N= 88).

Les données RPG comprennent des horizons de coupes profondes (i.e. MCG, BUS et LLA présentées au chapitre 5), d'un inventaire régional (prélèvement à une profondeur proche de 150cm) ainsi que d'une toposéquence réalisée dans une parcelle agricole (10 prélèvements espacés de 30m à une profondeur de 100cm). Les données ont été présentées par CORDIER (1999).

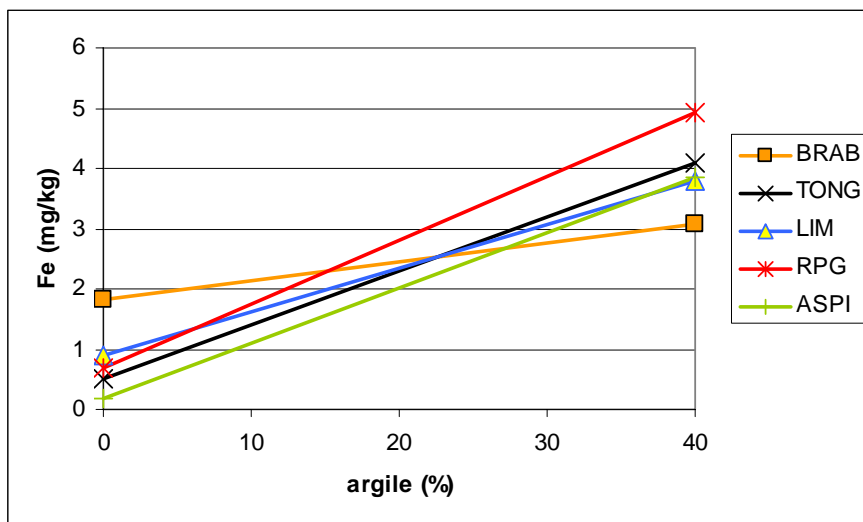
Les données ASPI ont été mesurées sur deux "Familles pédogéologiques" limoneuses: les Luvisols Dégradés issus de limons anciens et les Néoluvisols du Vexin, dont la caractérisation a été présentée par BAIZE (1997). Si la seconde famille semble très proche morphologiquement parlant des sols visés dans ce travail, les sols dégradés sont caractérisés par une exacerbation des processus d'hydromorphie et de lessivage. Les profils des teneurs en argile sont plus différenciés que pour "nos" sols limoneux, les horizons E sont fortement blanchis et les concentrations ferro-manganiques abondantes.

#### **a comparaison des jeux de données**

Les relations argile-Fe (détail des régressions en annexe 8) ont fait l'objet d'une comparaison pour vérifier l'absence de biais entre les jeux de données mentionnés *supra*. Des biais peuvent en effet résulter des méthodes et outils d'analyse utilisés pour l'acquisition des données ainsi qu'éventuellement de spécificités régionales. Les paramètres des droites de régression argile-Fe figurent au tableau IV.2 tandis que les droites sont représentées à la figure IV.3.

**Tableau IV. 2: Equations des droites de régression argile-Fe dans les jeux de données BRAB, TONG, LIM, RPG et ASPI (voir explications dans le texte).**

Données	Equations (Fe et argile en g/100g)
BRAB	$Fe = 1.82 + 0.032 * [argile]$
TONG	$Fe = 0.52 + 0.089 * [argile]$
LIM	$Fe = 0.95 + 0.071 * [argile]$
RPG	$Fe = 0.67 + 0.106 * [argile]$
ASPI	$Fe = 0.19 + 0.089 * [argile]$



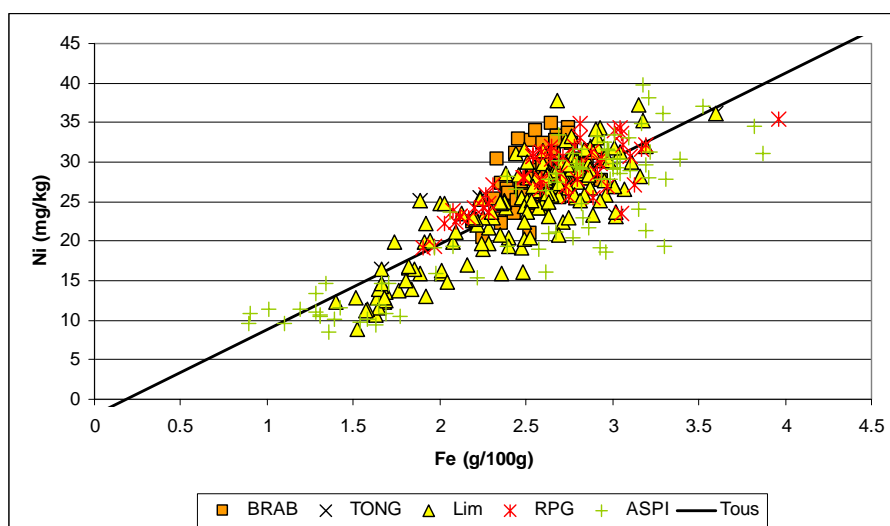
**Figure IV. 3: Relations argile-Fe selon les différents jeux de données "limons".**

Au premier regard, les régressions BRAB et RPG apparaissent différentes des autres. Toutefois, la relation entre les pentes et les ordonnées à l'origine des équations BRAB, TONG et LIM est tout-à-fait linéaire. Ces trois équations qui se coupent en un même point ne diffèrent pas à cause d'un biais analytique mais en raison de différences d'amplitudes de variation des données sources. La relation argile-Fe la plus vraisemblable doit être proche de l'équation LIM, car les données y sont les plus nombreuses et les plus différenciées. La régression ASPI présente une pente proche de celles de TONG et LIM, toutefois l'ordonnée à l'origine plus faible traduit un biais systématique par rapport aux équations TONG et LIM. Pour une teneur en argile de 20g/100g, les teneurs en Fe estimées valent 2.06 (ASPI), 2.30 (TONG), 2.40 (LIM), 2.45 (BRAB) et 2.79g/100g (RPG). L'équation RPG se distingue par une pente plus forte qui induit une "surestimation" des teneurs en Fe, par rapport à TONG et LIM, d'autant plus importante que les teneurs en argile sont élevées.

*Il y a donc clairement un biais entre les différents jeux de données pour ce qui concerne les relations argile-Fe, sans que l'on sache si le biais concerne les teneurs en argile, en Fe ou les deux. Ce biais rend illusoire le principe de régression argile-ETMs valide pour l'ensemble des jeux de données. Néanmoins, nous pouvons considérer qu'il en existe une pour les données BRAB, TONG et LIM, i.e. les données acquises dans le cadre de cette étude.*

En complément, les relations Fe-ETMs ont été analysées de la même façon. Fe et ETMs sont en effet dosés dans les mêmes "jus", ce qui enlève une source de biais par rapport aux relations argile-Fe.

Comme on peut le constater visuellement à la figure IV.4 pour la relation Fe-Ni, l'ensemble des données suit assez bien une relation générale représentée par la droite orange, avec un coefficient de détermination ( $r^2$ ) pour l'ensemble valant 0.68. Les résultats pour les éléments Zn, Cr et Co vont dans le même sens. Les critères d'exactitude et de précision de ce modèle pour la prédiction des teneurs en Ni dans les différents jeux de données figurent au tableau IV.3.



**Figure IV. 4: Relations entre Ni (mg/kg) et Fe (g/100g) dans les différents jeux de données "limons". Les données suivent une relation unique (en noir).**

**Tableau IV. 3: Critères d'exactitude (EM) et de précision (RMSE) du modèle**  
Quatrième partie - 342

général Fe-Ni pour la prédiction des teneurs en Ni dans les jeux de données "limons".

	EM	RMSE
TONG	0.5	3.4
BRAB	2.0	3.4
LIM	-0.4	3.3
RPG	1.5	3.2
ASPI	-1.8	4.7

On peut considérer que le modèle général pour Ni est satisfaisant car le biais est inférieur ou égal à 2mg/kg (~7% de la teneur moyenne) et la précision inférieure ou du même ordre de grandeur que l'écart-type opératoire<sup>1</sup> (tableau I.17).

Par contre pour ce qui concerne les teneurs en Cu (figure IV.5) et en Pb, on constate une divergence entre les données ASPI et les autres jeux de données. Un modèle unique n'est donc pas applicable.

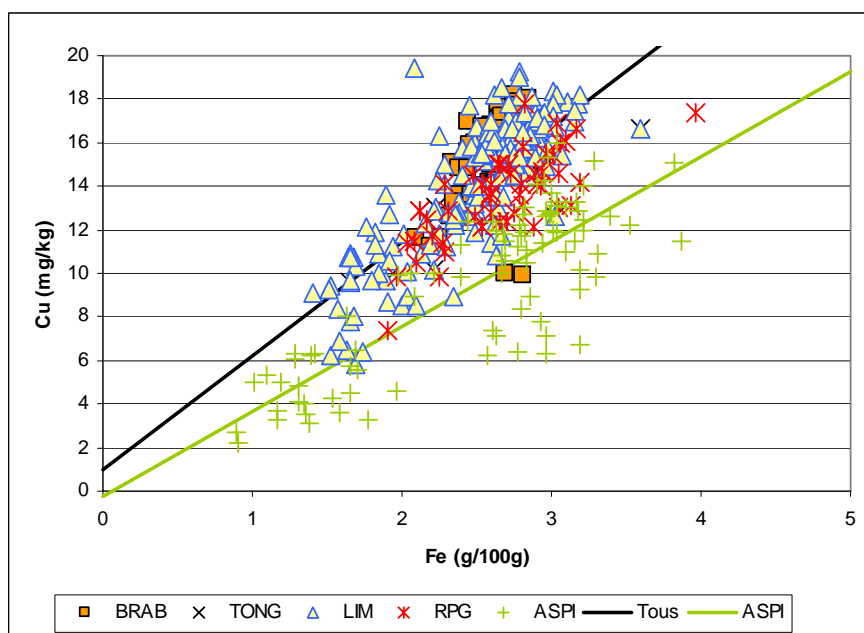


Figure IV. 5: Relations entre Cu (mg/kg) et Fe (g/100g) dans les différents jeux de données "limons". Il existe un biais entre les données ASPI et les autres.

<sup>1</sup> avec la réserve que ces deux paramètres ne sont pas calculés exactement de la même façon.

*Nous considérerons dans la suite de ce travail qu'il n'y a pas de biais analytique entre les différents jeux de données pour les teneurs en Zn, Ni, Cr et Co. Par contre, un biais a été constaté pour les teneurs en Cu (systématiquement inférieures) et en Pb (systématiquement supérieures) du jeu ASPI.*

**b Modélisation du fond pédo-géochimique sur base des teneurs en argile**

Les régressions BRAB-IV, TONG et LIM entre argile et ETMs (voir détail en annexe 8) ont été appliquées aux jeux de données éponymes.

Les résultats sont présentés par élément aux tableaux IV.4 à IV.9.

**Tableau IV.4: Matrices des critères d'exactitude (EM) et de précision (RMSE) des modèles "limoneux" (BRAB, TONG, LIM) par rapport aux différents jeux de données – prédiction des teneurs en Cu**

EM (mg/kg)	Modèles			RMSE (mg/kg)	Modèles		
	BRAB	TONG	LIM		BRAB	TONG	LIM
Données				Données			
BRAB	0.0	1.2	0.1	BRAB	1.5	1.9	1.5
TONG	-1.1	0.0	-1.0	TONG	2.3	2.0	2.3
LIM	-0.1	0.9	0.0	LIM	2.2	2.4	2.2

Les teneurs en Cu prédites par les modèles BRAB et LIM sont exactes sauf pour les données TONG, où le biais est de l'ordre de 1mg/kg. En terme de précision, les trois modèles peuvent être considérés comme équivalents. Ils sont tous trois plus précis que l'estimation sur base de la teneur moyenne.

Pour ce qui concerne les teneurs en Zn (tableau IV.5), le modèle BRAB est le moins biaisé. Le modèle TONG sous-estime les valeurs des deux autres jeux de données, mais le biais reste en moyenne inférieur à 8%. Le classement par précision décroissante est LIM > BRAB > TONG, mais les deux premiers sont fort proches l'un de l'autre.

**Tableau IV.5: Matrices d'exactitude (EM) et de précision (RMSE) des modèles "limoneux" (BRAB, TONG, LIM) par rapport aux différents jeux de données – prédiction des teneurs en Zn**

EM (mg/kg)	Modèles			RMSE (mg/kg)	Modèles		
	BRAB	TONG	LIM		BRAB	TONG	LIM
Données				Données			
BRAB	0.0	1.4	1.3	BRAB	4.6	5.3	4.9
TONG	-2.0	0.0	-3.1	TONG	7.1	4.1	6.1
LIM	0.5	4.0	0.0	LIM	6.2	7.6	5.9

**Tableau IV.6: Matrices des critères d'exactitude (EM) et de précision (RMSE) des modèles "limoneux" (BRAB, TONG, LIM) par rapport aux différents jeux de données – prédiction des teneurs en Ni**

EM (mg/kg)	Modèles			RMSE (mg/kg)	Modèles		
	BRAB	TONG	LIM		BRAB	TONG	LIM
Données				Données			
BRAB	0.0	1.0	1.4	BRAB	3.3	3.5	3.7
TONG	-1.2	0.0	-0.5	TONG	3.9	3.1	3.3
LIM	-2.7	-1.0	0.0	LIM	6.1	4.9	4.7

Le modèle BRAB surestime les teneurs en Ni (tableau IV.6) dans les deux autres jeux de données. Les deux autres modèles sont meilleurs tant en terme d'exactitude que de précision.

*Précédemment, les modèles BRAB ont été jugés pertinents pour la prédiction des teneurs en Cu, Zn et Ni dans les horizons "brabantiens". Les comparaisons BRAB-TONG-LIM montrent que les régressions BRAB restent appropriées pour la prédiction de Cu et Zn dans les horizons des sols limoneux, indépendamment de toute considération stratigraphique. La prédiction des teneurs en Ni, par contre, peut être améliorée par l'utilisation du modèle TONG ou LIM.*

**Tableau IV.7: Matrices des critères d'exactitude (EM) et de précision (RMSE) des modèles "limoneux" (BRAB, TONG, LIM) par rapport aux différents jeux de données – prédiction des teneurs en Cr**

EM (mg/kg)	Modèles			RMSE (mg/kg)	Modèles		
	BRAB	TONG	LIM		BRAB	TONG	LIM
Données				Données			
BRAB	-	0.2	4.0	BRAB	-	11.2	11.4
TONG	-	0.0	0.1	TONG	-	6.5	7.2
LIM	-	-1.3	0.0	LIM	-	14.7	14.4

Le modèle TONG pour la prédiction des teneurs en Cr (tableau IV.7) est meilleur que le modèle LIM en terme d'exactitude. Les deux sont relativement égaux en terme de précision. Les RMSE sont relativement élevées, en raison de la variabilité opératoire plus grande pour cet élément. On notera toutefois que les statistiques sont meilleures sur le jeu de données TONG là où les corrélations entre argile et Cr sont les mieux marquées. Ceci confirme qu'outre la variabilité opératoire, l'argile est le facteur principal de différenciation des teneurs en Cr.

**Tableau IV.8: Matrices des critères d'exactitude (EM) et de précision (RMSE) des modèles "limoneux" (BRAB, TONG, LIM) par rapport aux différents jeux de données – prédiction des teneurs en Pb**

EM (mg/kg)	Modèles			RMSE (mg/kg)	Modèles		
	BRAB	TONG	LIM		BRAB	TONG	LIM
Données				Données			
BRAB	0.0	-1.0	0.1	BRAB	4.2	3.9	3.8
TONG	-1.6	0.0	-3.6	TONG	1.9	3.5	3.7
LIM	-1.3	-1.6	0.0	LIM	4.3	4.3	3.9

Les modèles TONG et LIM sont plus précis que le modèle BRAB et le modèle LIM présente un minimum de biais sur le plus grand nombre de prédictions. Or le modèle LIM est celui qui se rapproche le plus d'une prédiction par la teneur moyenne, car la pente de la régression est faible. Le modèle TONG traduit une plus grande liaison entre Pb et argile mais il surestime le fond pédo-géochimique minéral en moyenne de 1 à 1.6mg/kg, ce qui reste raisonnable.



**Tableau IV.9: Matrices des critères d'exactitude (EM) et de précision (RMSE) des modèles "limoneux" (BRAB, TONG, LIM) par rapport aux différents jeux de données – prédiction des teneurs en Co**

EM (mg/kg)	Modèles			RMSE (mg/kg)	Modèles		
	BRAB	TONG	LIM		BRAB	TONG	LIM
Données				Données			
BRAB	0.0	-0.1	-0.7	BRAB	1.2	1.3	1.4
TONG	0.3	0.0	-0.5	TONG	1.1	0.7	0.9
LIM	0.9	0.4	0.0	LIM	2.1	1.9	1.8

Pour Co, c'est le modèle TONG qui présente les indices d'exactitude et de précision les plus favorables.

*L'intérêt des modèles BRAB n'avait pas été jugé significatif pour la prédiction des teneurs en Cr, Pb et Co dans les limons "brabantiens", notamment en raison d'un manque de différenciation. Pour ces éléments, le recours aux modèles TONG s'avère pertinent pour la prédiction d'un fond pédo-géochimique lié à l'argile.*

*Lorsque l'on fait le bilan des régressions argile-ETMs, on se rend compte que celles qui ont été établies sur base de la coupe de Tongrinne, soit peu de mesures mais bien différenciées, sont tout-à-fait satisfaisantes pour la prédiction des teneurs en ETMs, sauf peut-être pour Zn dont un modèle BRAB ou LIM prédirait mieux les teneurs.*

**c Modélisation du fond pédo-géochimique minéral sur base des teneurs en Fe**

Conformément à ce qui fut écrit au titre 7.2.2.1, une relation générale a été recherchée entre Fe et chaque ETM. Les équations figurent au tableau IV.10. Il n'y a pas de relation significative entre Fe et Pb à l'échelle générale. Celle qui figure au tableau IV.10 est celle établie sur base de la coupe de Tongrinne ( $R^2= 0.99$ ). La relation Fe-Cu a été établie sans tenir compte du jeu de données ASPI pour lequel un biais a été constaté.

**Tableau IV. 10: Equations des droites de régression argile-Fe dans les jeux de données BRAB, TONG, LIM, RPG et ASPI (voir explications dans le texte).**

Elément	Equations (Fe : g/100g ; ETMs : mg/kg)
Cu <sup>a</sup>	$Cu = 1.0 + 5.23 * [Fe]$
Zn	$Zn = 13.1 + 15.62 * [Fe]$
Ni	$Ni = -1.7 + 10.76 * [Fe]$
Cr	$Cr = 18.8 + 14.30 * [Fe]$
Pb <sup>b</sup>	$Pb = 11.4 + 2.02 * [Fe]$
Co	$Co = 3.3 + 2.71 * [Fe]$

<sup>a</sup> Equation obtenue sans les données ASPI

<sup>b</sup> Equation obtenue à partir des données de la coupe TONG.

Ces équations générales ont été appliquées aux différents jeux de données (BRAB, TONG, LIM, RPG, ASPI). Les résultats sont affichés en termes de critères d'exactitude (EM) et de précision (RMSE), de pourcentage de variance modélisée ( $R^2$ ) et d'indice  $sy/s\hat{y}$ , au tableau IV.11.

La prédiction des teneurs en ETMs par l'intermédiaire de Fe n'est que légèrement biaisée et la précision est satisfaisante pour la majorité des éléments dans les différents jeux de données. On notera:

- l'absence de biais pour Zn, sauf pour les données TONG;
- les statistiques intéressantes pour Cr qui confirment les résultats obtenus sur les régressions avec l'argile;
- le manque d'intérêt de la régression Fe-Pb de la coupe TONG; Pb est prédit de façon plus précise dans un jeu de données par la teneur moyenne de ce jeu;
- dans les données BRAB, les moins différenciées, la régression générale est moins précise que la teneur moyenne pour Ni, Cr et Pb;
- les variabilités de Cu, Zn, Ni et Cr sont globalement bien reproduites pour les jeux de données TONG, LIM, RPG et ASPI.

**Tableau IV.11: Critères d'exactitude (EM), de précision (RMSE) des équations générales pour les différents jeux de données "limoneux" (BRAB, TONG, LIM, RPG, ASPI) et les différents ETMs pour lesquels la régression avec Fe est significative ; pourcentage de la variance "expliquée" par la régression (R<sup>2</sup>) et rapport des écarts-types mesurés et prédits.**

EM	BRAB	TONG	LIM	RPG	ASPI
Cu	0.7	-0.8	0.1	-1.3	-
Zn	0.0	-2.9	0.1	0.0	0.1
Ni	2.0	0.3	-0.2	1.4	-1.9
Cr	3.3	0.9	-1.3	-0.1	-0.4
Pb	-0.7	0.0	-1.7	0.8	6.4
Co	-0.4	-0.3	0.0	0.1	0.2
RMSE	BRAB	TONG	LIM	RPG	ASPI
Cu	1.6	1.9	1.7	1.9	-
Zn	4.3	4.9	4.9	3.9	8.0
Ni	<b>3.8</b>	3.3	4.4	3.2	4.7
Cr	<b>11.0</b>	2.4	13.4	5.1	4.3
Pb	<b>3.9</b>	0.1	<b>4.4</b>	<b>1.4</b>	<b>7.3</b>
Co	1.3	<b>1.3</b>	1.9	0.9	5.3
R <sup>2</sup>	BRAB	TONG	LIM	RPG	ASPI
Cu	0.29	0.67	0.68	0.57	-
Zn	0.25	0.88	0.65	0.63	0.76
Ni	0.10	0.67	0.62	0.57	0.74
Cr	0.00	0.89	0.17	0.49	0.69
Pb	0.01	0.98	0.07	0.68	0.00
Co	0.36	0.22	0.18	0.53	0.52
sy/sŷ	BRAB	TONG	LIM	RPG	ASPI
Cu	2.15	1.01	1.34	0.97	-
Zn	2.00	1.28	1.23	1.01	1.22
Ni	1.98	0.89	1.52	0.94	1.07
Cr	4.56	0.78	2.38	1.28	1.08
Pb	11.90	0.90	4.35	2.10	2.09
Co	3.40	0.82	1.76	1.29	2.90

En rouge, RMSE supérieures ou égales à celles obtenues à partir de la prédiction par la teneur moyenne du jeu de données.

*Par rapport aux régressions avec l'argile, les résultats des modèles Fe-ETMs sont caractérisés par des indices d'exactitude et de précision semblables (Ni, Cr, Co) ou plus favorables (Cu, Zn). La seule exception est Pb, pour lequel la régression sur base de l'argile présente une pertinence que n'a pas la régression avec Fe.*

#### d synthèse relative aux comparaison de modèles.

Une dernière comparaison de modèles, appliqués sur le jeu de données LIM (les données les plus différenciées relatives aux sols limoneux de la région étudiée) fera office de synthèse générale. Ont été retenues la teneur moyenne du jeu de données, la régression avec l'argile pour le jeu de données, celle relative à la coupe de Tongrinne (la première référence au cours de ce travail), la régression générale avec Fe, une régression avec Fe élaborée sur les données ASPI (pour illustrer le biais existant entre certains jeux de données), ainsi qu'une régression multivariée élaborée pour les "sols loessiques" de la Région Nord-Pas-Calais (STERCKEMAN *et al.*, 2002b).

Les résultats des modèles peuvent être comparés en terme d'exactitude et de précision aux figures IV.6 et IV.7. Les résultats bruts se trouvent en annexe 8.

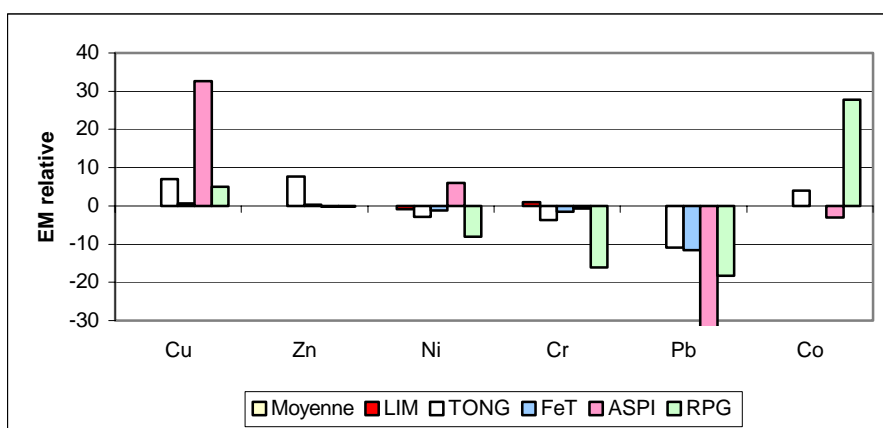


Figure IV. 6: Exactitude des prédictions des teneurs en ETMs dans le jeu de données LIM par rapport à la moyenne de ces données. EM = Erreur moyenne.

Les prédictions en règle générale sont peu biaisées (<10% de la teneur moyenne - figure IV.6). Le biais des données ASPI est clairement illustré pour les teneurs en Cu et en Pb. Pour ce dernier élément, l'ensemble des régressions testées présente un biais supérieur à 10%. d'une manière générale, la régression TONG est logiquement moins exacte que la régression LIM et la régression sur base de Fe est meilleure que la régression TONG. La régression RPG est acceptable pour Cu, Zn et Ni mais pas pour les trois autres éléments. Il convient toutefois de nuancer le constat pour Cr. La régression RPG est basée sur la seule variable argile et sa pente est du même ordre de grandeur que la régression TONG. Seule l'ordonnée à l'origine est différente entre les deux équations induisant un biais systématique. Outre les éléments Cu et Pb déjà évo-

qués, les ETMs restants sont relativement bien prédits par les régressions ASPI.

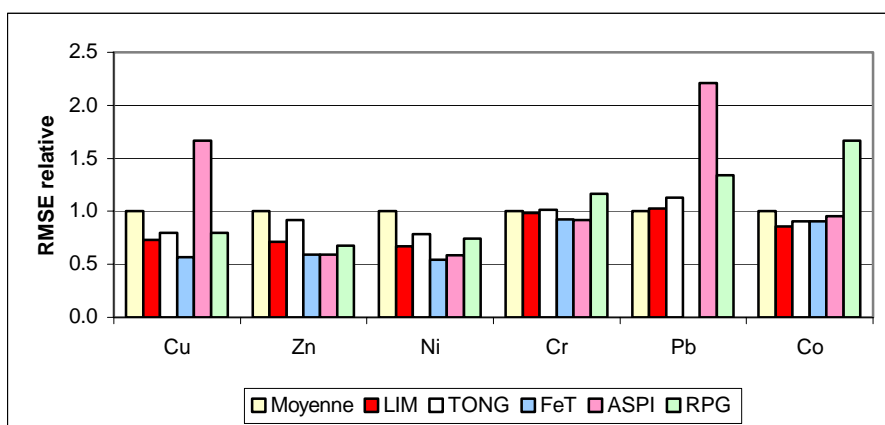


Figure IV. 7: Précision des prédictions des teneurs en ETMs dans le jeu de données LIM par rapport à la prédiction sur base de la moyenne des données.

En terme de précision, toutes les régressions sont plus intéressantes que la prédiction par la teneur moyenne sauf ASPI pour Cu et Pb, et RPG pour Cr, Pb et Co. Pour Pb, la meilleure prédiction reste la teneur moyenne. Pour Cr, seules les régressions sur base de Fe sont plus précises que la teneur moyenne. D'une manière générale d'ailleurs, les régressions avec Fe sont plus précises que les régressions sur base de l'argile<sup>2</sup>.

### 7.2.1.3 Conclusions relatives à la modélisation du fond pédogéochimique des sols limoneux.

Les différentes comparaisons de modèles de prédiction des teneurs en ETMs sur base de régressions ont montré que:

- les modélisations possibles sont nombreuses et peuvent être diversifiées (exemple pour les huit niveaux de modélisation BRAB) mais elles ne diffèrent pas pour autant en terme d'exactitude et de précision;
- les régressions simples sont aussi (voire plus) efficaces que les régressions multivariées, et il ne sert dès lors à rien de compliquer les modèles, si ce n'est pour la beauté du "sport";
- les différentes régressions sur base de l'argile fournissent des résultats

<sup>2</sup> en absence de biais évidemment (ex. Cu pour ASPI)!

tats comparables, toutefois les régressions TONG sont plus pertinentes que les régressions BRAB, particulièrement pour Cr et Co; pour Zn, par contre, la régression LIM semble la plus appropriée;

- les régressions sur base de Fe sont globalement meilleures que celles sur base de l'argile;
- la recherche de relations "universelles" à travers des familles de sols limoneux n'est pas aisée en raison de l'existence, pour certaines variables, de biais relevant des méthodes d'analyse ou de spécificités régionales (les Luvisols dégradés issus de limons anciens présentent un état d'altération que nous n'avons pas considéré dans notre étude), mais des relations Fe-ETMs satisfaisantes se dégagent néanmoins à cette échelle;

Les différents modèles de prédiction du fond pédo-géochimique en ETMs que nous retiendrons figurent au tableau IV.12.

Pour chaque élément, sont donnés :

- la teneur moyenne, tous horizons confondus, une équation de régression avec l'argile, une autre avec Fe (si les relations sont significatives);
- un demi-intervalle de confiance pour chaque estimation; dans le cas des régressions, l'intervalle de confiance correspond à celui d'un horizon présentant des teneurs en argile et en Fe moyennes (respectivement 22.5% et 2.5g/100g);
- une valeur limite (Lim<sub>95</sub>) correspondant à la borne supérieure de l'intervalle de confiance sur la valeur estimée: (i) tous horizons confondus dans le cas de la prédiction par la moyenne, (ii) pour un horizon à teneurs en argile en Fe moyennes, ainsi que (iii) pour un horizon E (15% argile et 2 g/100g de Fe) et un horizon BT typiques (30% argile et 3g/100g Fe) dans le cas des régressions; une teneur supérieure à ces valeurs limites dans un sol "limoneux" peut être considérée comme ne relevant pas du seul fond pédo-géochimique lié à l'argile.

**Tableau IV. 12: Estimations du fond pédo-géochimique des sols "limoneux", modèles, intervalles de confiance (IC95) et limite supérieure (Lim\_95).**

Élément	Modèle et IC95 <sup>a</sup>	Lim_95 (mg/kg) <sup>b</sup>
Mn	Mn = 480.2 ±190.8	671.0
Cu	Cu = 14.4 ± 5.5	19.9
	Cu = 5.5 + 0.351 * [argile] ± 4.6 <sup>a</sup>	18.0 (15.4 ; 20.6)
	Cu = 1.0 + 5.23 * [Fe] ± 3.5 <sup>a</sup>	17.6 (15.0 ; 20.2)
Zn	Zn = 52.5 ± 15.2	67.7
	Zn = 26.8 + 1.17* [argile] ± 11.3 <sup>a</sup>	64.3 (55.6 ; 73.1)
	Zn = 13.1 + 15.62 * [Fe] ± 11.1 <sup>a</sup>	63.2 (55.4 ; 71.0)
Ni	Ni = 25.6 ± 12.0	37.6
	Ni = 10.7 + 0.71 * [argile] ± 8.9 <sup>a</sup>	35.0 (29.7 ; 40.3)
	Ni = -1.7 + 10.76 * [Fe] ± 7.9 <sup>a</sup>	33.1 (27.7 ; 38.5)
Cr	Cr = 55.0 ± 27.2	82.2
	Cr = 18.8 + 14.3 * [Fe] ± 20.9 <sup>a</sup>	75.5 (68.3 ; 82.6)
Pb	Pb = 15.2 ± 7.7	22.9
Co	Co = 10.0 ± 3.9	13.9
	Co = 5.81 + 0.201 * [argile] ± 3.5 <sup>a</sup>	13.8 (12.3 ; 15.3)
	Co = 3.3 + 2.71 * [Fe] ± 3.2 <sup>a</sup>	13.3 (12.0 ; 14.7)

a: l'intervalle de confiance sur une valeur prédite dépend de la valeur de la variable indépendante (argile ou Fe);

b: IC correspondant à un "horizon moyen" et entre parenthèse à un horizon E (15% argile et 2.0g/100g Fe) et à un BT (30% argile et 3.0g/100g Fe).

## 7.2.2 Interprétation des teneurs dans l'horizon labouré

Après avoir évalué un fond pédo-géochimique lié à l'argile et au fer, nous pouvons tenter d'interpréter les teneurs dans l'horizon de surface.

Une série d'exercices ont été menés à partir d'une population de 312 horizons labourés, représentative des sols limoneux et sablo-limoneux de la zone d'étude. Ces horizons ont été sélectionnés sur base de leur teneur en Na total ( $>0.55\text{g}/100\text{g}$ ).

Une majorité d'échantillons (211) proviennent de sols de type Aba, ce qui peut introduire un biais dans l'estimation de la moyenne générale si les moyennes entre séries de sols sont différentes. Les autres séries sont limoneuses (90), limono-caillouteuse (8) ou sablo-limoneuse (3).

L'objectif principal des exercices est d'élaborer un cadre d'interprétation des teneurs totales en terme de valeurs "habituelles" (BAIZE, 1997) et de valeurs aberrantes ou inhabituelles, *i.e.* des teneurs supérieures au niveau général rencontré dans les horizons labourés. Les exercices diffèrent principalement par l'utilisation ou non de variables "explicatives" pour guider l'interprétation, ainsi que par la nature de ces variables. Les résultats consisteront en propositions de valeurs-seuils au-dessus desquelles, à l'échelle régionale, les teneurs en ETMs pourront être qualifiées d'inhabituelles et éventuellement nécessiter une investigation plus poussée.

### 7.2.2.1 Approche globale non stratifiée

Lorsque l'on ne dispose d'aucun critère de stratification ni d'aucune mesure de variable "explicative", les teneurs en ETMs doivent être interprétées brutes.

L'estimation des valeurs-seuils a donc été réalisée directement sur la population. Deux estimateurs ont été retenus: la vibrisse supérieure, adoptée par BAIZE (1997) pour l'identification des valeurs aberrantes, et la valeur de la fonction de répartition normale à 0.95 [F(0.95)], *i.e.* telle que la probabilité de mesurer une teneur supérieure à cette fonction soit de 5%.

La vibrisse supérieure est calculée par:  $Q_3 + 1.5 * (Q_3 - Q_1)$ , où  $Q_1$  et  $Q_3$  représentent respectivement le premier et le troisième quartile de la population. Cette méthode présente l'avantage de ne pas supposer la normalité des données.

La fonction de répartition à 0.95 est basée sur une loi normale reconstruite à partir de la moyenne et de l'écart-type de la population. Elle



suppose la normalité de la population-parent. Pour remplir cette condition, les teneurs en Ni, Cr et Pb ont dû subir une transformation par le logarithme népérien (Ln). Les teneurs en Mn, Cu, Zn et Co n'ont par contre pas été transformées<sup>3</sup>.

Les statistiques descriptives de la population d'horizons labourés ainsi que les estimations des valeurs-seuils figurent au tableau IV.13. Les teneurs moyennes et les limites à 95% relatives au fond pédogéochimique minéral y figurent également à titre de comparaison.

**Tableau IV. 13: Statistiques relatives à la population des horizons labourés limoneux: moyenne, écart-type, vibrisse supérieure et fonction de répartition à 0.95 [F(0.95)]; rappel des statistiques relatives au fond pédogéochimique.**

	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co
Moyenne	535.7	14.3	62.7	21.9	56.0	25.0	9.0
Ecart-type	69.2	2.5	9.7	7.1	18.8	4.2	1.5
Vibrisse	700.1	21.3	90.8	34.7	94.4	34.7	12.4
F(0.95)	649.5	18.4	78.6	33.1	90.0	32.6	11.5
Fond							
Moyenne	480.2	14.4	52.5	25.6	55.0	15.2	10.0
Lim_95	671.0	19.9	67.7	37.6	82.2	22.9	13.9

On constate que les teneurs moyennes en Cu, Ni, Cr et Co dans les horizons labourés sont très proches de celles des horizons plus profonds. Ceci signifie en première approche, qu'au niveau régional, il n'y a pas de contamination avérée en ces éléments dans l'horizon labouré. En réalité, nous savons ces éléments liés à l'argile et au fer et il se trouve que les niveaux moyens de teneurs en argile sont inférieurs en surface. Il est donc possible qu'il y ait eu accumulation des éléments considérés dans l'horizon labouré, mais cette accumulation est alors cachée par la diminution de la teneur en argile.

Si les teneurs moyennes en Mn sont supérieures dans l'horizon labouré, on se gardera bien de parler de contamination tant cet élément présente un comportement particulier. Il faut mettre cette différence de teneurs moyennes sur le compte de la présence fréquente d'un horizon BT dans

---

<sup>3</sup> L'exigence de normalité n'est pas nécessaire pour estimer une probabilité, contrairement à d'autres tests ou estimations que nous avons dû réaliser. Ceci explique que nous ayons procédé à la normalisation des variables.

les sols limoneux, horizon BT qui ralentit le drainage des horizons sus-jacents et se trouve à l'origine de l'enrichissement moyen constaté en surface. On notera d'ailleurs que les valeurs-seuils à 95% des teneurs en surface sont inférieures à celles du fond minéral.

Les teneurs en Zn et Pb, par contre, traduisent bien une accumulation en surface. La différence entre surface et profondeur est en moyenne de l'ordre de 10mg/kg pour chacun des deux éléments.

Pour ce qui concerne la comparaison entre vibrisse et F(0.95), on constate que la seconde est systématiquement inférieure à la première, ce qui veut dire que l'approche "normale" est plus discriminante<sup>4</sup>. C'est le niveau de probabilité choisi pour l'approche normale qui conditionne ce résultat; les valeurs des vibrisses correspondent en effet à des niveaux de probabilité compris entre 0.970 et 0.998 en fonction de l'élément considéré.

#### 7.2.2.2 Approche par régression

S'il est une règle d'or en matière d'analyse des données, c'est de tenir compte des informations disponibles. L'exercice précédent a donc été répété en utilisant des variables "explicatives" pour différencier les teneurs pédo-géochimiques modélisées des teneurs "résiduelles".

Une analyse factorielle réalisée sur les teneurs en ETMs et les variables argile, sable, Fe, COT et pH<sub>H20</sub> indique que le facteur principal de variation est granulométrique (30% de la variance totale). Les teneurs en argile et en sable s'opposent et les sables ont un effet diluant sur presque tous les ETMs sauf Mn et Pb (figure IV.8); Fe est très bien lié à l'argile.

Le deuxième facteur de variation (14%) oppose Pb et Zn à Cr et Ni (figure IV.8). On notera que COT pèse dans le sens de Pb et Zn tandis que les fractions granulométriques appuient dans l'autre sens. Il faut

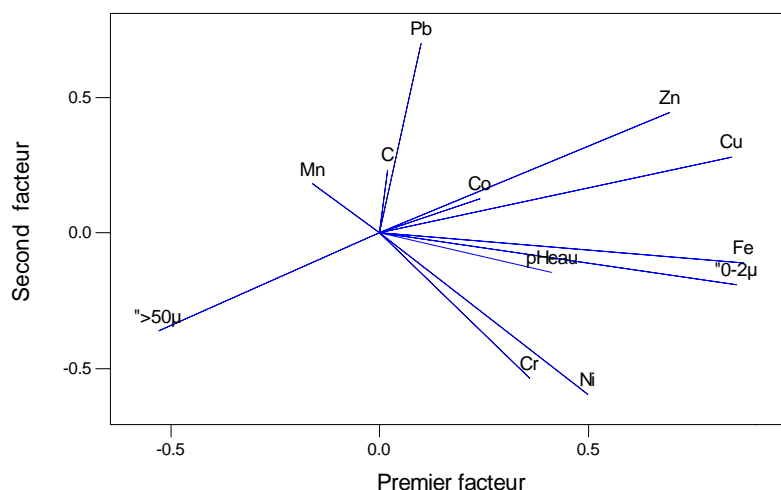
---

<sup>4</sup> On peut s'interroger sur le niveau de précision utile à donner à ces valeurs-seuils. BAIZE (1997) propose des FPGN dans un système où l'incrément vaut 2.5 (en pratique, avec les arrondis, cela donne une fois 3 et une fois 2; exemple 2, 5, 8, 10... sauf pour Cd évidemment). Nous sommes conscient que fixer un seuil à 32.6 plutôt qu'à 35mg/kg pour Pb ne se justifie pas d'un point de vue fonctionnel ou pratique. Toutefois, la vibrisse et la F(0.95) reposent sur des calculs effectués avec un niveau de précision donné et 35.0 n'a pas la même probabilité d'être dépassé que 32.6. Notre objectif n'étant pas la fixation de normes mais l'observation et la détermination de niveaux de contamination ou d'anthropisation de l'horizon labouré, nous avons fait le choix de conserver une décimale pour les valeurs-seuils.

donner à ce facteur une signification biogéochimique, l'augmentation des teneurs en COT dilue des éléments comme Cr et Ni et induit une concentration de Pb et Zn.

Le troisième facteur de variation (14%) oppose Co et COT, ce qui complète la logique du facteur précédent, à savoir que Co a tendance à être dilué par la matière organique.

Le quatrième axe factoriel (10%) concerne le  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ , plus il est élevé plus les teneurs en ETMs sont faibles. Il convient de relativiser la signification de cet axe car les valeurs de  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$  sont relativement homogènes entre 6.6 et 8.1.



**Figure IV. 8: Position des variables sur le plan factoriel principal: horizons labourés.**

En vertu des résultats des comparaisons de modèles, nous avons retenu les régressions avec les teneurs en Fe pour modéliser le fond pédogéochimique dans l'horizon labouré.

Pour Cu, Zn, Ni, Cr et Co, des teneurs pédogéochimiques ont été estimées par régression. Pb et Mn ne présentant pas de relation significative avec les variables "explicatives", n'ont pas fait l'objet de régression. Le fond en ces deux éléments est estimé par les teneurs moyennes du tableau IV.12.

La vibrisse et la  $F(0.95)$  sont alors évaluées à partir des résidus de la régression et reformulées en teneurs totales moyennant la connaissance de la teneur en Fe.

Les résultats sont repris au tableau IV.14 et la figure IV.9 illustre les relations entre teneurs "nômiales" et les variables sable, COT et pH<sub>H2O</sub>.

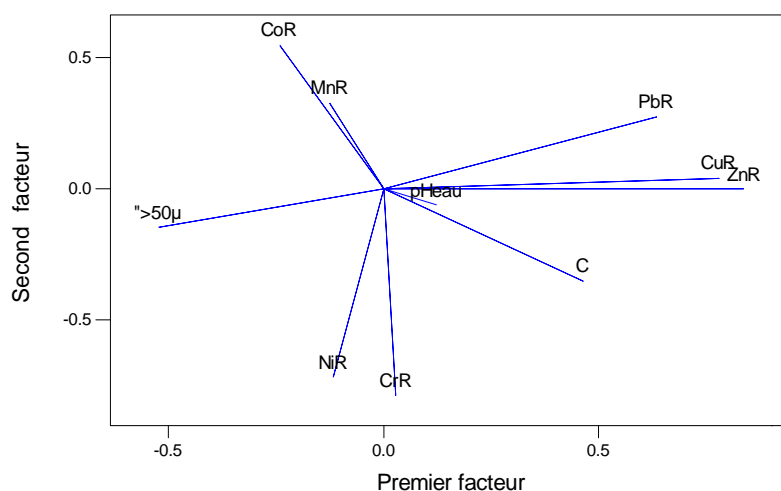


Figure IV. 9: Position des variables sur le plan factoriel principal: teneurs "nômiales" dans les horizons labourés.

Tableau IV. 14: Moyenne, écart-type, indice de concentration (Conc.), vibrisse supérieure et fonction de répartition à 0.95 [F(0.95)] des teneurs "nômiales"; évaluation de la F(0.95) des teneurs totales pour des échantillons présentant des teneurs en Fe de 2.0, 2.5 et 3.0g/100g .

Teneurs (N=312)	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co
- "nômiales"							
Moyenne	55.5	2.0	16.1	0.4	6.4	10.0	-0.1
Ecart-type	69.2	1.9	8.4	6.5	18.3	4.2	1.6
Conc.	1.12	1.17	1.36	1.04	1.15	1.66	1.0
Vibrisse	-	6.4	36.5	10.6	45.2	-	3.2
F(0.95)	-	5.2	29.8	12.2	34.0	-	2.4
- totales							
Fe = 2.0g/100g	-	16.7	77.9	22.9	81.4	-	11.1
Fe = 2.5g/100g	-	19.3	85.8	28.3	88.6	-	12.5
Fe = 3.0g/100g	-	21.9	93.6	33.7	95.7	-	13.8

On constate (figure IV.9) que (i) les résidus de la régression de Pb, Zn et Cu sont partiellement liées aux teneurs en COT, (ii) les teneurs en Ni et Cr sont bien liées, (iii) de même que les teneurs en Mn et Co. Les teneurs totales en Ni, Cr, Mn et Co émanent essentiellement du fond pédo-géochimique. Il se confirme que les teneurs en Co sont influencées par la dynamique de Mn, contrairement à celles de Ni et Cr.

La teneur "nômiale" moyenne (tableau IV.14) équivaut à l'enrichissement constaté en moyenne dans l'horizon labouré par rapport aux teneurs du fond pédo-géochimique; l'indice de concentration (teneur mesurée/teneur du fond) relativise l'accumulation par rapport au fond.

La F(0.95) en valeur totale est estimée pour des horizons à teneur en Fe égale à 2.0, 2.5 ou 3.0g/100g. Les valeurs de Fe retenues pour l'illustration correspondent, dans le contexte qui est le nôtre, à des teneurs en argile de l'ordre de 10, 20 et 30%.

En ce qui concerne les niveaux de teneurs du "nôme agricole", on constate que l'enrichissement en surface est insignifiant pour Ni et Co, compris entre 12 et 17% pour Mn, Cu et Cr, de l'ordre de 4/3 pour Zn et 5/3 pour Pb. Ceci infirme donc le constat de non-accumulation de Cu et Cr en surface réalisé au point précédent. Pour les autres éléments, le niveau d'enrichissement est confirmé, voire précisé pour Zn (accumulation moyenne de 16.5 plutôt que d'une dizaine de mg/kg).

On notera que les écarts-types des résidus des régressions ne sont que de peu inférieurs à ceux des teneurs totales. Ceci reflète les relativement faibles niveaux de corrélations entre Fe et les ETMs en surface. On imputera ces faibles niveaux de corrélation à la faible différenciation du fond pédo-géochimique lié à l'argile et au fer (l'amplitude de variation de Fe est de l'ordre de 1g/100g, ce qui équivaut à 5mg/kg pour Cu, 15mg/kg pour Zn, 11mg/kg pour Ni, 14mg/kg pour Cr et 3mg/kg de Co) et à l'anthropisation de l'horizon labouré .

***Malgré la relative homogénéité du fond lié à l'argile et au fer, la prise en compte des relations entre Fe et ETMs permet d'affiner les valeurs-seuils et des teneurs jugées aberrantes au tableau IV.13 deviennent "habituelles" si l'on tient compte de leur teneur en Fe. Ainsi une teneur de 80mg/kg de Zn dans un horizon de surface limoneux est aberrante, sauf si la teneur en Fe est elle-même supérieure à 2.38g/100g, ce qui est le cas d'à peu près un quart des échantillons analysés. Seules les régressions avec Fe ont été présentées ici, mais la***

*démonstration aurait été la même avec les teneurs en argile.*

### 7.2.2.3 Approche typologique

Les deux premiers exercices ne nécessitent aucune connaissance particulière en matière de pédologie. L'inventaire aurait tout aussi bien pu se baser sur un échantillonnage "aveugle", *i.e.* on ne s'intéresse pas à déterminer le type de sol. Mais il existe également sur la terre des gens à même de reconnaître une série de sols. Et l'objet de ce troisième exercice est de vérifier si la prise en compte de cette information est de nature à améliorer l'interprétation des teneurs en ETMs.

Cet exercice a été réalisé une première fois sur l'ensemble de la population des horizons labourés, indépendamment du caractère limoneux (COLINET *et al.*, 2002b, *cf* annexe 9). L'exercice permettait de conclure à la pertinence du critère "série de sols" pour la stratification d'un référentiel ETM.

Nous disposons d'un plus grand nombre de mesures des teneurs en Cr, Pb et Co qu'en 2002 et nous avons voulu refaire l'exercice dans un cadre moins différencié, celui des sols à texture limoneuse ou sablo-limoneuse. L'étude des toposéquences (chapitre 6) a indiqué que le facteur "série de sols" ne semblait pas être un critère pertinent de stratification pour Cu, Zn et Pb dans les sols limoneux. Ce point fera donc l'objet d'une vérification par l'intermédiaire de l'exercice présenté ci-après.

Des informations qualitatives liées à la nature des séries de la carte des Sols de la Belgique ont donc été testées en tant que critères de stratification de la population. La pertinence du critère de stratification s'évalue sur base de l'analyse de la variance. En cas de différences significatives entre les moyennes de groupes, on peut conclure à l'intérêt de la stratification. Ont été testés:

- la lithologie des matériaux (*i.e.* la distinction entre les sols sur substrat peu profond et les autres sols),
- la texture du profil (A: limoneuse; G limono-caillouteuse; L: sablo-limoneuse),
- l'intensité du drainage naturel (b: bien drainé; D: à drainage imparfait),
- le développement de profil (a: à horizon BT; a(b): à horizon BT tacheté; B: à horizon BT ou B de structure; b: à horizon B de structure; p: sans développement de profil -colluvions),

- ❑ la combinaison des quatre critères précédents, qui correspond à peu de choses près aux séries de sols.

Le détail des résultats se trouve en annexe 10. Nous les synthétisons comme suit:

- ❑ Il existe une différence significative entre les sols limoneux et le groupe composé des sols limono-caillouteux et des sols limoneux sur substrat pour les éléments Cu, Zn et Mn. Ce constat semble à première vue imputable au fond pédo-géochimique. Toutefois, cette hypothèse n'est pas confirmée par les teneurs en argile, en Fe ou en Ni. L'explication la plus plausible réside dans la gestion agricole des parcelles comme en témoignent les différences significatives de COT entre les deux groupes.
- ❑ Les sols à texture sablo-limoneuse présentent des moyennes de teneurs en Mn, Cu, Zn, Pb, Fe, argile et COT inférieures aux sols à texture limoneuse, ce qui est logique. Ces sols sont malheureusement trop faiblement représentés dans la population générale pour en tirer des conclusions.
- ❑ Le drainage n'est un critère de différenciation utile, du moins en apparence, que pour Co. Cette différenciation résulte à la fois de teneurs moyennes en Fe et en argile moins élevées dans les sols à drainage imparfait, ainsi que de teneurs en COT plus élevées. Il n'y a toutefois pas de lien causal entre l'intensité du drainage et ces différenciations, ce qui aurait contredit les résultats relatifs au drainage dans l'approche solum. Il s'agit ici du résultat d'un biais dans l'échantillonnage. La proportion de sols sur colluvions est en effet sensiblement plus importante dans la sous-population imparfaitement drainée que dans celle à drainage normal.
- ❑ Outre les différenciations des sols à horizon B de structure, déjà évoquées par l'entremise des sols limono-caillouteux, on observe des différences significatives entre les sols à BT et les sols à BT tacheté pour les éléments Cu, Zn, Pb, pour Fe, l'argile et le pH. Cette différenciation s'explique essentiellement par l'ancienneté de mise en culture. En raison d'un défrichement plus récent, les sols à BT tacheté ont été épargnés par les phénomènes d'érosion d'une part, comme en témoignent les teneurs en argile plus faibles dans l'horizon labouré, et par les accumulations d'origine agricole d'autre part. Il s'agit donc essentiellement d'une différenciation entre les phases à horizon A (*i.e.* l'ensemble horizons A + horizons E, anciennement dénommés respectivement A<sub>1</sub> et A<sub>2</sub>) épais (suffixe 0) et horizon A

mince (suffixe 1).

- Au sein du modèle limoneux (Aba-AbB-Abp), il n'est pas de distinction possible pour Mn et Cu, contrairement à Zn, Ni et Cr qui suivent les teneurs en Fe (inférieures dans les colluvions par rapport aux deux autres séries), et Pb et Co dont les teneurs sont légèrement plus élevées dans les colluvions. Pour Cu et Pb, ceci rejoint les conclusions tirées de l'approche toposéquentielle, à savoir une atténuation significative de l'importance du fond minéral dans l'horizon labouré suite aux apports d'intrants en agriculture. Pour Co, le constat est plus surprenant.
- En toute logique avec les points précédents, le critère série de sols est peu pertinent pour les séries limoneuses, considérées à l'échelle régionale. Nous retiendrons la différenciation Aba-Aba(b), qui repose sur des différences d'argile et d'ancienneté de mise en culture, ainsi que la différenciation des Abp pour Ni et Cr sur base des teneurs en argile et pour Co. Il convient de signaler que les séries regroupées sous le sigle ADp (*i.e.* des sols sur colluvions faiblement à modérément gleyifiés) présentent la même tendance que la série Abp pour les tous éléments sauf Co dont les teneurs reflètent le plus faible fond minéral. Toutefois, faute de représentativité suffisante des ADp, la tendance devinée n'est pas statistiquement significative.

Pour ce qui concerne les teneurs "nômiales" (détails en annexe 10), l'absence de la composante liée au fond pédo-géochimique induit la perte du caractère discriminant de Zn, Cr et Ni pour les Abp, de Cu pour les Aba(b) et une réduction notable de la pertinence de stratification pour Zn et Pb dans la même série. Ce qui signifie que les résidus de la régression par Fe sont indépendants des séries de sols. On notera toutefois que la différenciation des Abp est renforcée pour Pb et Co.

***Le critère "développement de profil" est pour les séries de sols "limoneux" un indicateur de niveaux de teneurs en argile différents. Il présente donc une certaine pertinence comme critère de stratification des teneurs liées au fond pédogéochimique. Les teneurs moyennes en Fe et en argile dans les sols sur colluvions sont en effet significativement différentes de celles dans les sols des séries Aba et AbB. Pour les sols de type Aba, la prise en considération de la phase accentuerait probablement le potentiel discriminant des informations de la carte des sols. Pour ce qui concerne les teneurs totales, au niveau régional, les sols sont différenciables pour les éléments Zn, Cr et Ni selon le même***



*canavas que celui du fond pédo-géochimiquel. On constate également une accumulation de Pb et Co plus importante dans les sols sur colluvions à drainage normal par rapport aux autres sols<sup>5</sup>. En ce qui concerne Cu, par contre, la distinction des séries de sols limoneux ne se justifie pas. Quel que soit l'élément considéré, les teneurs "nômiales" sont difficiles à estimer précisément, si ce n'est par leur moyenne, car elles résultent d'un historique de gestion agricole que l'on ne peut pas connaître.*

Le tableau IV.15. synthétise les informations relatives au fond pédo-géochimique estimé et aux teneurs totales pour (i) l'ensemble des séries à texture limoneuse sauf les Abp et (ii) les Abp.

La différenciation entre séries de sols reflète principalement des différences entre les moyennes des teneurs en argile. La différenciation des Aba(b) n'a pas été retenue en raison de son caractère davantage lié à la phase d'épaisseur des horizons A qu'à une différence entre types de profils. Dans le futur, le tableau IV.15 devrait d'ailleurs faire l'objet d'un complément de discrimination par la prise en considération de ces phases d'épaisseur.

L'intérêt de la différenciation des séries colluviales peut sembler à priori moins grand que la prise en considération des teneurs en Fe ou en argile de façon directe. Toutefois, l'intérêt majeur de la typologie réside dans sa couverture spatiale complète pour la zone étudiée et à une échelle détaillée. Les difficultés de mise en évidence de l'intérêt typologique au sein des limons, constatées également dans le cadre du projet POLLUSOL, sont liées à la variabilité des teneurs en argile au sein d'une série à l'échelle régionale.

---

<sup>5</sup> Rappelons qu'en moyenne il n'y a pas d'accumulation de Co.

**Tableau IV. 15: Différenciation du fond pédogéochimique modélisé et des seuils de teneurs totales habituelles dans les sols "limoneux" en fonction des séries: (teneurs moyennes, écarts-types, indices de concentration (Conc.), vibrisse supérieure et fonction de répartition à 0.95 [F(0.95)] des teneurs totales.**

	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co
	(mg/kg)						
Fond pédogéochimique modélisé (Sols limoneux: N = 245; Abp: N = 48)							
- Sols limoneux							
Moyenne <sup>a</sup>	480.2	12.4	47.2	21.8	50.1	15.2	9.2
Ecart-type	-	1.5	4.6	3.2	4.2	-	0.8
- Abp							
Moyenne	480.2	11.2	43.6	19.3	46.7	15.2	8.6
Ecart-type	-	1.3	3.8	2.6	3.5	-	0.7
Teneurs totales							
- Sols limoneux							
Moyenne	533.5	14.2	63.1	22.4	57.6	24.8	8.9
Ecart-type	66.3	2.4	9.4	6.8	18.8	4.3	1.6
Conc. <sup>b</sup>	1.11	1.16	1.34	1.03	1.15	1.63	0.97
Vibrisse	698.3	20.8	89.2	34.7	94.4	33.6	12.2
F(0.95)	642.5	18.1	78.5	33.7	88.4	31.9	11.5
- Abp							
Moyenne	-	-	59.2	18.8	48.3	27.4	9.6
Ecart-type	-	-	10.4	7.2	18.2	4.9	1.7
Conc. <sup>b</sup>	-	-	1.36	0.97	1.03	1.80	1.12
Vibrisse	-	-	86.5	25.1	79.9	40.2	13.8
F(0.95)	-	-	76.3	30.8	78.3	35.5	12.4

<sup>a</sup> : Pour Mn et Pb, le fond est estimé par la moyenne des horizons de profondeur.

<sup>b</sup> : indice de concentration = (teneurs mesurées / teneurs du fond pédogéochimique modélisé)

### 7.2.3 Conclusions

Les teneurs du fond pédo-géochimique et les niveaux de concentration de l'horizon labouré ont été étudiés à l'échelle régionale sur base des enseignements des étapes précédentes.

Différents modèles du fond géochimique ont d'abord été comparés et les résultats analysés dans l'optique de valider les modèles pour le fond pédo-géochimique. Ces comparaisons ont permis de conclure à l'intérêt de modèles simples basés sur des régressions avec l'argile ou le fer total. L'analyse de jeux de données externes a montré que les modèles basés sur Fe avaient une portée plus "universelle" que ceux basés sur l'argile en raison de la réduction des biais analytiques. Les modèles d'estimation du fond pédo-géochimique figurent au tableau IV.12.

L'application principale d'un référentiel régional pour les horizons labourés consiste à évaluer le niveau général des teneurs les plus fréquentes et à estimer des valeurs-seuils au-dessus desquelles une teneur peut être qualifiée de suspecte, *i.e.* relevant soit d'anomalie naturelle, soit de contamination anthropique élevée ou encore d'erreur analytique, et mérite dès lors une certaine attention.

L'exercice mené sur une collection d'horizons labourés à dominance nettement limoneuse permet de donner des niveaux régionaux de teneurs en ETMs. La comparaison de ceux-ci aux teneurs générales de fond du tableau IV.12 ne permet de constater que les différenciations les plus évidentes, à savoir l'accumulation de Zn et Pb en surface. Des valeurs-seuils régionales sont données au tableau IV.13.

L'approche par régression a illustré l'intérêt de prendre en considération les informations relatives aux variables "explicatives" comme Fe et l'argile. Elle a permis d'évaluer les niveaux d'anthropisation par l'intermédiaire de l'indice de concentration, calculé sur base des valeurs du fond pédo-géochimique obtenues par l'utilisation des régressions évoquées précédemment. Par rapport à l'approche globale, l'approche par régression a mis en évidence l'accumulation modérée de Cu dans l'horizon labouré et a montré la double influence du fond pédo-géochimique et de l'anthropisation pour Cu et Zn. Autre apport des régressions, les valeurs-seuils peuvent être nuancées en fonction des teneurs en Fe ou en argile, selon les informations dont on dispose (tableau IV.14). La pertinence de la prise en compte du fond pédo-géochimique pour l'établissement de valeurs-seuils n'est tangible que parce que les niveaux de contamination en ETMs dans la zone d'étude sont modérés.

L'approche typologique s'est avérée moins pertinente que l'approche par

régression, en raison notamment du contexte très homogène de la zone d'étude. Au sein des séries de sols "limoneux", les séries de sols colluviaux se démarquent des autres, en raison principalement de teneurs moyennes en argile inférieures. La différenciation est cependant plus nette pour les teneurs du fond que pour les teneurs totales, car les séries Abp présentent des niveaux d'accumulation légèrement à sensiblement plus importants que les séries non-colluviales, à l'exception des éléments Ni et Cr. Des teneurs moyennes et des valeurs-seuils sont fournies pour les séries limoneuses non-colluviales et les séries colluviales au tableau IV.15. La moindre pertinence de la typologie de sols s'explique par la variabilité relativement importante à l'échelle régionale des teneurs en argile dans les horizons labourés d'une même série de sols. La question d'une expression des teneurs en argile dans les horizons de surface à travers des changements d'échelle et par la prise en compte de critères distinctifs supplémentaires dans la légende de la carte mérite certainement un complément d'investigation.

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

Cette sensibilité peut-être évaluée par le calcul des plus petites différences significatives (ppds) entre deux moyennes (DAGNELIE, 1975; BREJDA *et al.*, 2000). La première moyenne correspond à celle de l'inventaire actuel, la seconde à celle d'un inventaire futur. L'égalité des variances est supposée et l'exercice a été réalisé pour plusieurs effectifs d'inventaire. Les ppds ont été estimées pour les sols limoneux non-colluviaux (N = 250, 50 ou 20) et pour les sols colluviaux (N = 50 ou 20).

Les résultats figurent au tableau IV.16 tant pour les teneurs totales que pour les indices de concentration. Ils expriment pleinement la puissance du référentiel, plus grande pour les sols limoneux que pour les sols colluviaux, principalement en raison de la taille de l'effectif car les variances au sein de chacun des deux groupes de séries sont du même ordre de grandeur.

On retiendra que l'inventaire régional doit permettre de détecter une augmentation du taux de concentration dans l'horizon de surface inférieure à 10% pour Mn, Cu, Zn et Co (<12% pour les sols colluviaux) et comprise entre 10 et 20% pour Ni, Cr et Pb.

A titre d'exemple, si l'on s'attache aux sols "limoneux", la sensibilité du référentiel pour un nouvel inventaire basé sur 50 échantillons correspond à 12kg/ha de Zn, 24 kg/ha de Cr et 5.2 kg/ha de Pb. Sur base des compositions moyennes des produits valorisables en agriculture (tableau I.9), cela représente 80, 2 000 et 520 To de fumier de bovin (MS) ou 23, 1 000 et 40 To de boues d'épuration (MS).

**Tableau IV. 16: Sensibilité du référentiel ETMs à détecter une évolution des teneurs (en mg/kg) ou de l'indice de concentration dans l'horizon labouré à l'échelle régionale ( $\alpha=0.05$ ).**

Teneurs totales	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co
- Sols limoneux							
N = 250	11.5	0.4	1.7	1.2	3.3	0.8	0.3
N = 50	19.5	0.7	2.9	2.1	6.0	1.3	0.5
N = 20	29.7	1.1	4.4	3.1	9.1	2.0	0.7
Sols colluviaux							
N = 50	31.4	0.9	4.2	3.0	7.4	2.0	0.7
N = 20	41.0	1.2	5.3	3.9	9.9	2.6	0.9
Indice de concentration	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co
- Sols limoneux							
N = 250	0.02	0.03	0.03	0.06	0.07	0.05	0.03
N = 50	0.04	0.04	0.05	0.10	0.12	0.09	0.05
N = 20	0.06	0.07	0.08	0.14	0.18	0.13	0.07
Sols colluviaux							
N = 50	0.07	0.07	0.10	0.13	0.15	0.13	0.09
N = 20	0.09	0.09	0.12	0.17	0.20	0.17	0.12

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

Afin d'apporter des éléments de réponse à la question de la prédiction spatiale des teneurs en ETMs, leur variabilité spatiale a été abordée à plusieurs échelles de perception.

Les notions de bases relatives à l'approche spatiale ont fait l'objet du point 4.3.3.

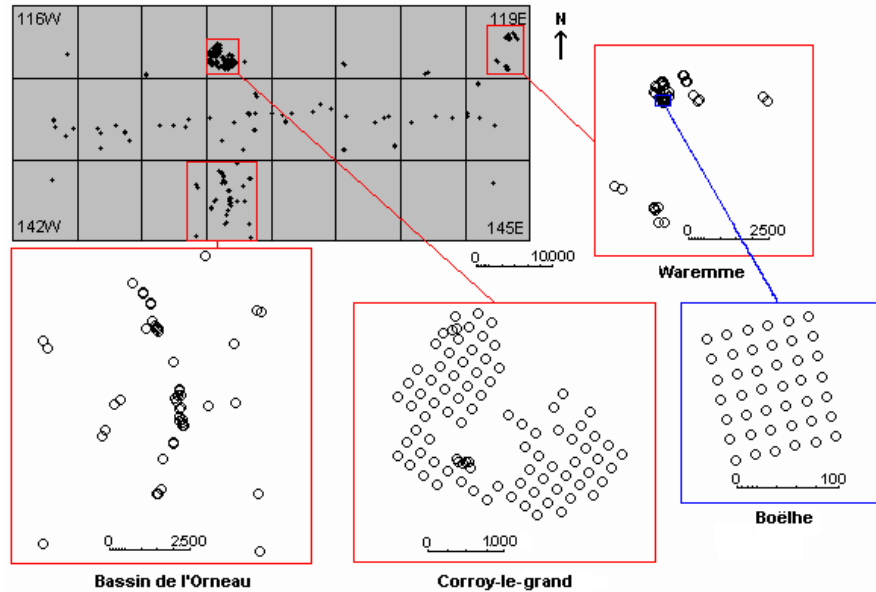
La fonction de semi-variance exprime la dissemblance entre deux points en fonction de la distance qui les sépare. Au cours de notre approche, des jalons virtuels ont été placés à des distances de 0, 25, 50, 100, 250, 500, 1 000, 2 500, 5 000 et 10 000 mètres. Ces écartements sont représentatifs de la variabilité à l'échelle de l'échantillon (variabilité opératoire), de la station (25, 50m), de la parcelle (100, 250m), du secteur (500, 1 000, 2 500m) et de la petite région naturelle (PRN – 5 000 et 10 000m).

L'estimation des semi-variances à l'échelle de la station repose partiellement sur l'échantillonnage réalisé selon des transects régionaux (*cf* titre 5.3.2 et figure II.37). Sur un certain nombre de sites de cet inventaire, des échantillons ont en effet été prélevés à une quinzaine de mètres de distance. Il s'agit là de sols de type Aba (CSB). La deuxième source de données est constituée de prélèvements effectués selon une grille à maille carrée de 20m de côté dans une parcelle agricole située près de Waremme (à Boëlhe; figure IV.10). Les sols sont de type Aba ou Abp (CSB).

L'étude de la variabilité à l'échelle parcellaire se base sur le maillage évoqué ci-avant, sur les séquences étudiées au titre 6.4.1 ainsi que sur un ensemble de paires Aba-Abp prélevées dans 26 parcelles sur la zone d'étude. Un échantillonnage systématique réalisé à Corroy à partir d'une grille à maille carrée de 250m (VERSTRAETE [1994] - figure IV.10) alimente également en données ce niveau d'investigation.

La quantification de la variabilité à l'échelle du secteur repose sur les données des différents secteurs du bassin versant de l'Orneau, de Waremme et de Corroy-le-Grand (localisation figure IV.10). Les caractérisations pédologiques de ces secteurs ont été réalisées dans le cadre de TFEs d'étudiants (respectivement WARIN [2000], MASSART [1993] et VERSTRAETE [1994]). A cette échelle, la variabilité concerne essentiellement des toposéquences. Toutefois, la grille systématique à maille de 250m apporte également son lot d'informations à l'échelle du

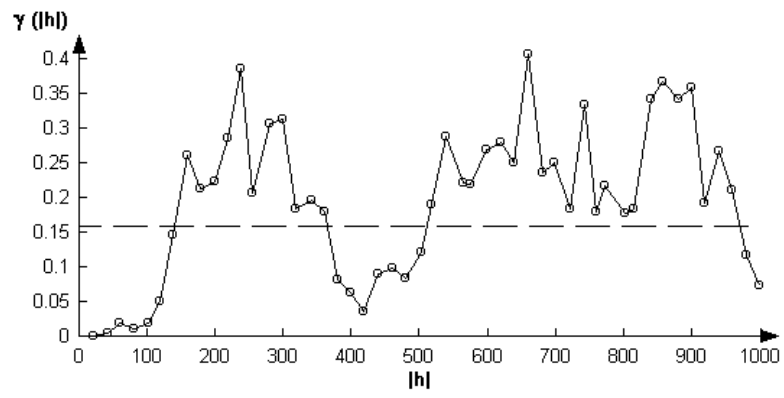
secteur.



**Figure IV. 10: Localisation des secteurs de l'Orneau, de Corroy, de Waremme, ainsi que de la parcelle de Boëlhe par rapport à la zone d'étude (en gris).**

Bien que les sols de type Aba soient sur-représentés, l'opposition Aba/Abp est présente dans les structures spatiales étudiées dès les échelles les plus détaillées. Un semi-variogramme expérimental a été obtenu (figure IV.11) après codage binaire du caractère "développement de profil" ( $p = 1$ ; les autres sigles = 0). On peut constater sur le semi-variogramme que la semi-variance augmente à partir de 100m, signe que les deux classes de développement de profil entrent dans les comparaisons de points à partir de ces distances. On notera également qu'entre 400 et 500m de distance, les points comparés appartiennent à nouveau tous à la même classe. En l'occurrence, ce sont les sols sur colluvions qui font défaut. Il est dès lors possible que la semi-variance soit sous-estimée pour cette gamme de valeurs.

La structure spatiale des teneurs en ETMs et des variables "explicatives" sera analysée préalablement aux considérations relatives à la cartographie *s.s.* Ensuite, la faisabilité de la spatialisation sera évaluée, spatialisation directe (*i.e.* sur base des teneurs mesurées en ETMs) ou indirecte par l'entremise de régressions ou de stratification typologique, à l'instar des travaux réalisés dans le cadre de l'inventaire POLLUSOL.



**Figure IV. 11: Semi-variogramme expérimental relatif à la catégorisation du développement de profil pour les horizons labourés.**



### 7.3.1 Analyse des structures spatiales

#### 7.3.1.1 Visualisation des données

L'affichage cartographique des données est nécessaire pour vérifier qu'il n'existe pas de gradients spatiaux. Les cartes relatives aux ETMs ainsi qu'aux variables Fe, argile, sable, COT et  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$  figurent en annexe 11.

Pour Zn, il est possible de suspecter l'existence d'une zone à teneur plus élevée, en bordure de Meuse à l'extrême Est de la zone étudiée (figure IV.12). Les résultats spatialisés des inventaires POLLUSOL et OWD montrent la même tendance. Pour les autres éléments, il n'apparaît à première vue aucune différenciation régionale.

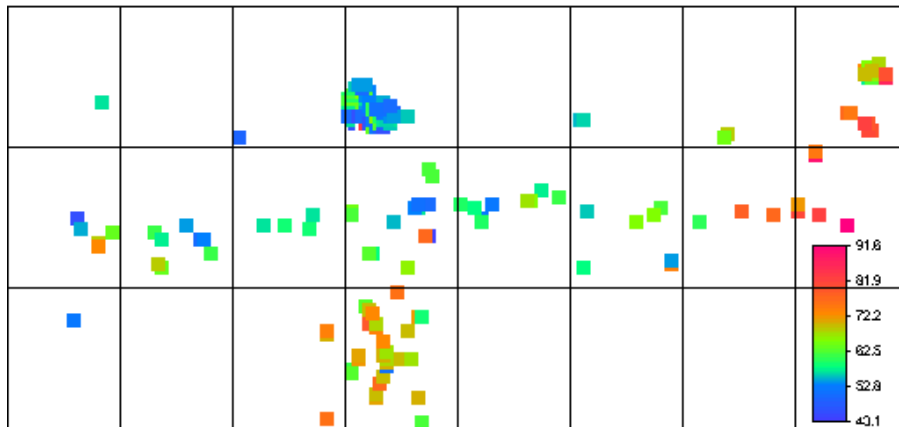


Figure IV. 12: Carte des teneurs mesurées en Zn (mg/kg) dans la zone étudiée.

Pour ce qui concerne les relations entre ETMs et variables "explicatives", elles sont évidemment les mêmes que celles décrites au titre 7.2.2.2 (approche régionale par régression): influences principales de la granulométrie ou de Fe (Cu, Zn, Ni, Cr, Co) et de COT (Cu, Zn, Pb).

Pour chaque élément, il existe une composante aléatoire (ou non expliquée par les régressions) de la variabilité qui n'est pas négligeable. A titre d'illustration, les cartes de Fe, du "nôme" Zn-Fe et des résidus de la régression de Zn par Fe et COT sont présentées ci-après.

La carte de Fe (figure IV.13), aux facteurs de la régression près, donne une image du fond pédo-géochimique en Zn.

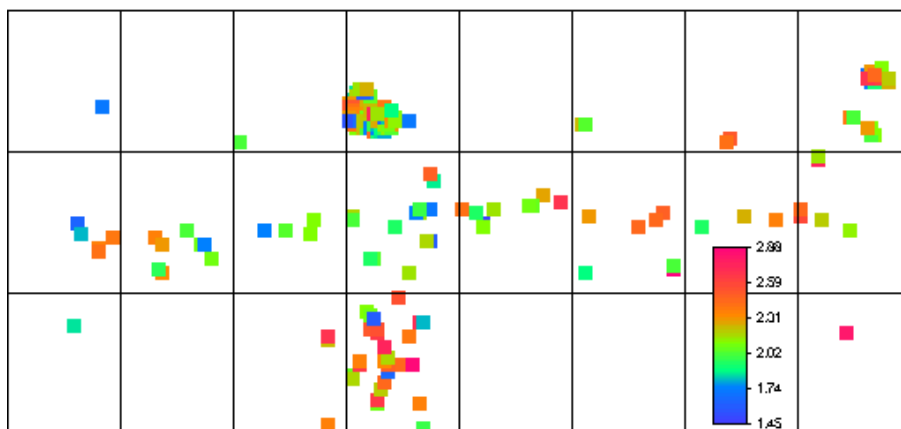


Figure IV. 13: Cartes des teneurs mesurées en Fe (g/100g) dans la zone étudiée. La variabilité des teneurs en Fe n'explique qu'une partie de celle des teneurs en Zn (figure IV.10).

La carte des teneurs "nômiales" (figure IV.14) exprime les écarts par rapport à la régression par Fe. Ceux-ci sont pour partie liés aux teneurs en COT, à des spécificités régionales et à une anthropisation différenciée.

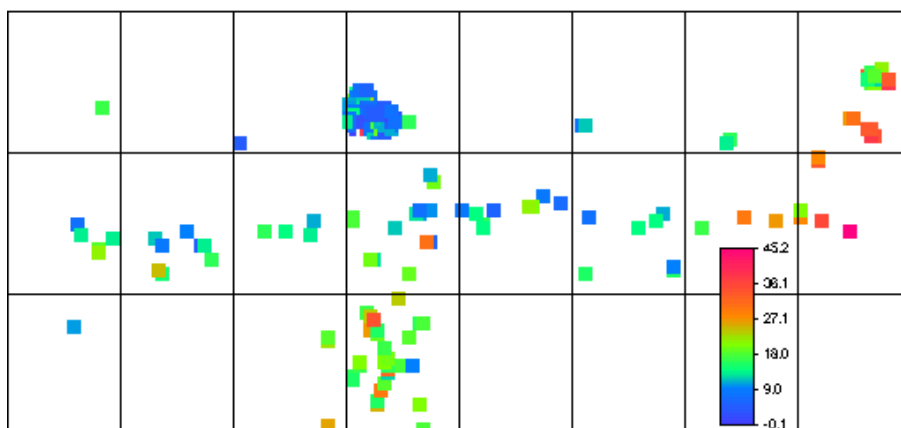
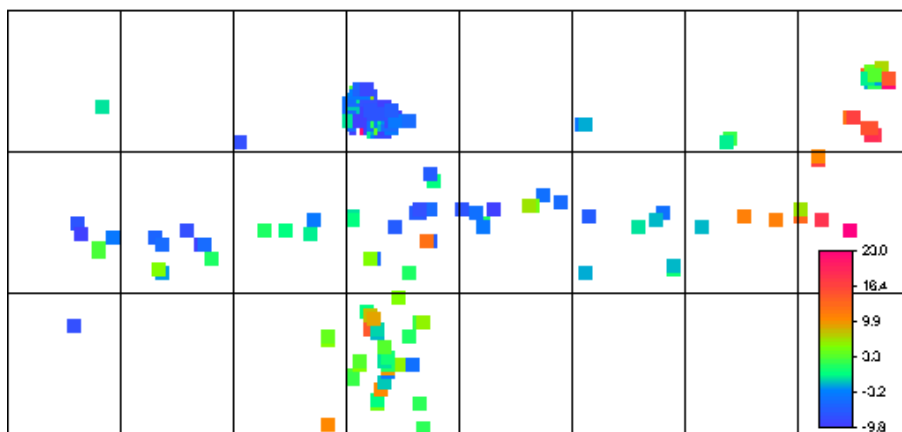


Figure IV. 14: Cartes des teneurs "nômiales" (résidus de la régression par Fe) en Zn (mg/kg) dans la zone étudiée.

Les résidus de la régression par Fe et COT (figure IV.15) constituent une composante aléatoire, non modélisable par les variables " explicatives". On constate à nouveau que la partie à l'est de la zone d'étude se singularise par des teneurs élevées, qui pourraient être liées à des contaminations industrielles, atmosphériques ou sous forme d'intrants agricoles.



**Figure IV. 15: Cartes des résidus de la régression de Zn (mg/kg) par Fe et COT. Les points situés à l'est de la carte présentent des valeurs non-négligeables.**

### 7.3.1.2 Echelles spatiales de variabilité

Les semi-variances relatives aux distances évoquées en introduction ont été évaluées pour les différents teneurs en ETMs et les variables "explicatives": Fe total, argile, sable, COT et pH<sub>H2O</sub>. Les résultats figurent aux tableaux IV.17 et IV.18 ; ils correspondent à des semi-variances relatives (par rapport à la semi-variance maximum) évaluées sur base des semi-variogrammes modélisés. L'ensemble des modèles et des semi-variogrammes figurent en annexe 11.

**Tableau IV.17: Semi-variances relatives, à différentes échelles spatiales, pour les variables Fe total, argile, sable, COT - [g/100g]<sup>2</sup> - et pH<sub>H2O</sub>**

Echelle - (m)		Fe	"0-2µm"	">50µm"	COT	pH <sub>H2O</sub>
Pépite	0	0.16	0.16	0.12	0.14	0.07
Station	25	0.40	0.43	0.19	0.22	0.12
	50	0.62	0.67	0.26	0.29	0.18
Parcelle	100	0.94	0.97	0.39	0.44	0.28
	250	1.00	1.00	0.75	0.77	0.58
Secteur	500	1.00	1.00	1.00	0.95	0.93
	1 000	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	2 500	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
P.R.N. <sup>a</sup>	5 000	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	10 000	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

<sup>a</sup> P.R.N.: Petite Région Naturelle

Fe et argile présentent la même structure spatiale (tableau IV.17). L'effet pépité vaut environ 16% de la variance totale, près de 2/3 de celle-ci est acquise à l'échelle de la station et la totalité à l'échelle de la parcelle. La portée est en effet de l'ordre de 120-130m. Cette structure spatiale commune correspond à la différenciation entre les sols limoneux de type Aba et les sols colluviaux. Il est logique que le seuil de semi-variance soit atteint à l'échelle des parcelles agricoles car il est fréquent d'observer les différentes formes principales (planes, convexes, concaves) du modelé limoneux au sein d'une même parcelle. Le semi-variogramme de l'argile et les données expérimentales sont représentés à la figure IV.16.

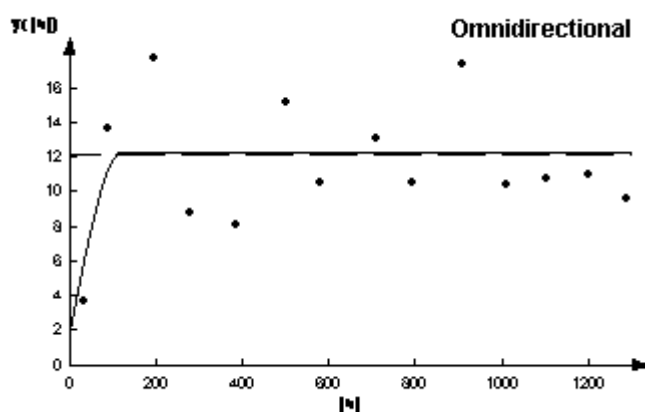


Figure IV.16: Semi-variogramme modélisé (ligne continue) et données expérimentales (points) relatifs aux teneurs en argile pour les horizons de surface (pépite: 2.0 [g/100g]<sup>2</sup>; seuil: 12.2 [g/100g]<sup>2</sup>; portée 117m)

Les teneurs en sable et en COT, ainsi que le pH<sub>H2O</sub> sont caractérisés par des portées plus longues. Selon ENGELS (1998), la variabilité spatiale serait liée à la parcelle pour COT et à l'exploitation (agricole) pour pH<sub>H2O</sub>. Nos résultats indiquent l'existence d'une autocorrélation entre parcelles voisines pour ces deux variables mais nous ne disposons pas de l'information suffisante pour juger s'il s'agit réellement d'un facteur "exploitation agricole".

Dans le cas de la variable COT, la semi-variance est estimée par un modèle gigogne<sup>6</sup> qui différencie variabilité à l'échelle de la parcelle et à l'échelle du secteur (figure IV.17). On notera que pour des distances de 500m, la semi-variance équivaut déjà à 95% de la variabilité maximum.

Pour ce qui concerne les teneurs en sable et le pH<sub>H2O</sub>, la différenciation se joue également principalement à des distances inférieures à 500m. C'est à la fois la transition entre Aba et Abp et celle de la région limoneuse vers la région sablo-limoneuse qui conditionnent la structure spatiale des teneurs en sable. Le pH est pour partie sous l'influence de la différenciation entre Aba et Abp et pour une autre partie conditionné par la gestion agricole.

***Dans les sols limoneux, la variabilité des paramètres explicatifs à l'échelle de la parcelle est proche de la variabilité maximum.***

<sup>6</sup> Plusieurs structures emboîtées sont modélisées.

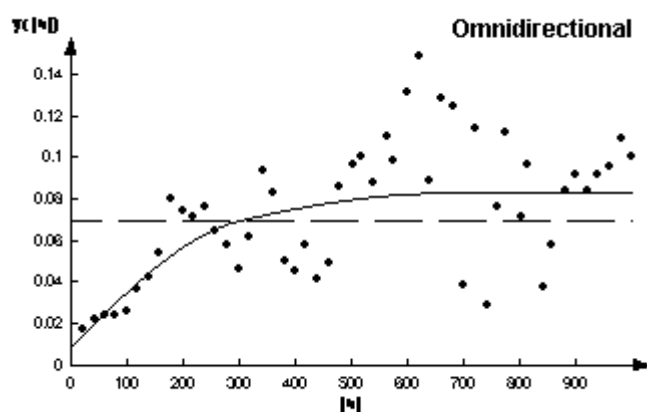


Figure IV.17: Semi-variogramme modélisé (ligne continue) et données expérimentales (points) relatifs aux teneurs en COT pour les horizons de surface (pépite: 0.01 [g/100g]<sup>2</sup>; palier\_1: 0.04 [g/100g]<sup>2</sup>; portée\_1: 300m; palier\_2: 0.07 [g/100g]<sup>2</sup>; portée\_2: 720m)

Tableau IV.18: Semi-variances relatives, à différentes échelles spatiales, pour les teneurs en ETMs - [mg/kg]<sup>2</sup>

Echelle - (m)		Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co
Pépite	0	0.23	0.08	0.11	0.55	0.23	0.14	0.04
Station	25	0.25	0.21	0.17	0.57	0.25	0.22	0.09
	50	0.28	0.33	0.23	0.59	0.28	0.30	0.14
Parcelle	100	0.34	0.50	0.33	0.64	0.32	0.46	0.25
	250	0.51	0.53	0.38	0.76	0.45	0.85	0.49
Secteur	500	0.76	0.55	0.39	0.92	0.65	1.00	0.57
	1 000	1.00	0.59	0.42	1.00	0.89	1.00	0.61
	2 500	1.00	0.70	0.48	1.00	1.00	1.00	0.71
P.R.N. <sup>a</sup>	5 000	1.00	0.86	0.59	1.00	1.00	1.00	0.86
	10 000	1.00	1.00	0.79	1.00	1.00	1.00	1.00

<sup>a</sup> P.R.N.: Petite Région Naturelle

Les teneurs en Mn (tableau IV.18) présentent un effet pépite relativement important (près d'1/4 de la variance totale). Le reste de l'auto-corrélation se distribue à peu près équitablement dans les gammes de distance 50-250m, 250-500m et 500-1 000m.

Les éléments Cu et Zn présentent tous deux, en plus de l'effet pépité, une structure spatiale à courte distance et une structure spatiale à longue distance (exemple pour Zn à la figure IV.18). La structure à courte distance (< 150m) peut être interprétée comme le résultat de la dépendance de ces deux éléments avec les teneurs en argile. La structure à longue distance (10 000m pour Cu, 20 000m pour Zn) résulte de la différenciation du niveau de concentration de l'horizon labouré entre PRN pour ces éléments.

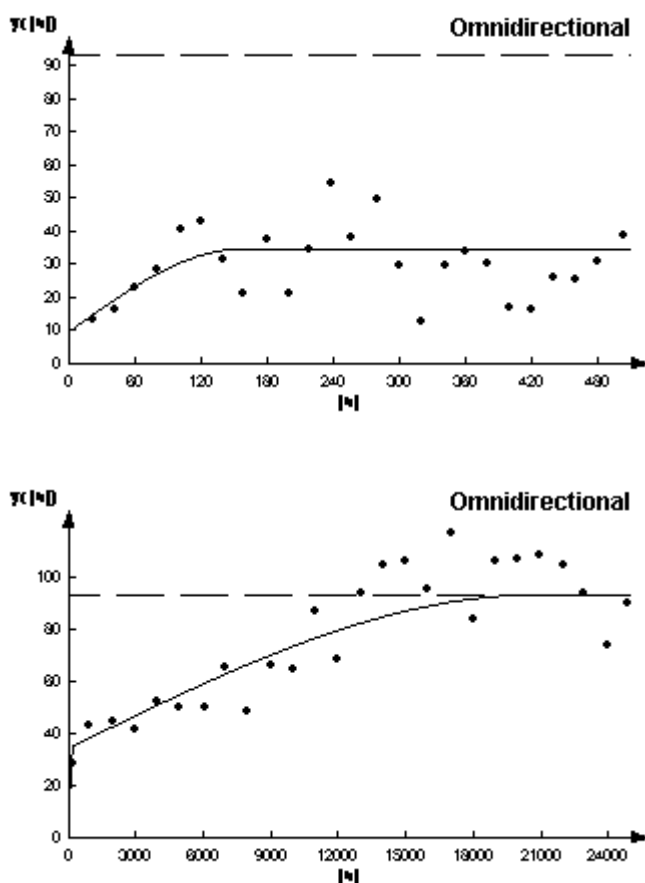


Figure IV. 18: Semi-variogrammes modélisés et données expérimentales relatifs aux teneurs en Zn ( $[mg/kg]^2$ ) à courte distance (haut) et à longue distance (bas).

La variabilité pépitique des teneurs en Ni est relativement importante (>50% de la variabilité totale). Une seule structure spatiale est observable, avec une portée de l'ordre de 800m. Il est probable que la variabilité pépitique cache une structure spatiale liée aux teneurs en argile.

Cr présente deux structures spatiales à longues portées (1 000 et 2 600m). La première est assez proche de celle de Mn, sans qu'il faille y voir de corrélation.

Pb et Co présentent tous deux une structure d'auto-corrélation à courte distance (400m). Une seconde structure existe toutefois pour Co avec une portée de l'ordre de 10 000m comme pour Cu. La variabilité est donc liée à l'échelle de la parcelle pour Pb, tandis qu'une part non négligeable (30%) de la semi-variance de Co concerne uniquement les gammes de distance supérieures à 2 500m.

La soustraction des teneurs du fond pédo-géochimique, estimées par régression avec Fe, entraîne la disparition des structures spatiales à courte distance pour Cu, Zn, Ni et Co (voir semi-variogrammes en annexe 11). Les structures spatiales à longue distance sont par contre conservées, ce qui confirme que le facteur explicatif pour les longues distances n'est pas lié au fond pédo-géochimique, du moins tel que nous l'avons modélisé.

### 7.3.1.3 Variabilité à l'échelle de la station

L'existence d'une auto-corrélation à l'échelle de la station, du site de référence, de l'observatoire peut être une source de difficultés techniques dans le cadre d'essais ou de suivis expérimentaux. En premier lieu, l'utilisation des statistiques classiques comme l'analyse de la variance ou la régression reposent sur l'indépendance des échantillons, condition qui n'est pas remplie en cas d'auto-corrélation significative. Le caractère d'indépendance nécessite que les observations soient distantes d'au moins la portée du variogramme. La quantification de celui-ci peut donc s'avérer utile pour indiquer s'il existe un risque qu'une méthode statistique ne soit pas adaptée (BHATTI *et al.*, 1991). A l'opposé, une forte variabilité spatiale (et temporelle) peut gêner la détection de changements temporeux ou la mise en évidence de l'effet d'un traitement en expérimentation (un exemple est donné par MICHELIN *et al.* [2002] par rapport au bilan d'épandages de boues en agriculture) et l'intérêt est alors à la recherche d'une distance la plus courte possible (RÖVER et KAISER, 1999). Une fois encore, la connaissance du semi-variogramme peut être utile<sup>7</sup> pour évaluer le niveau de sensibilité d'un dispositif expérimental à mesurer un changement ou un effet.

---

<sup>7</sup> utile mais pas indispensable pour autant si l'on se base sur la méthodologie mise en place dans le cadre du suivi de l'accumulation en Cu et Zn sur une parcelle de l'Observatoire de la qualité des sols (LEGROS *et al.*, 2002).



Dans tous les cas, des références sont nécessaires quant aux niveaux de variabilité existant pour cette gamme d'échelles spatiales. Les résultats des tableaux IV.17 et IV.18 constituent des premières estimations de ces niveaux de variabilité pour les sols limoneux. Il existe peu d'études relatives à la variabilité des teneurs en ETMs à cette échelle, contrairement aux paramètres liés à la matière organique, au pH, aux éléments "disponibles" ou aux propriétés structurales (ARROUAYS *et al.*, 1997; BRAGATO et PRIMAVERA, 1998; TESSIER *et al.*, 1998; TSEGAYE et HILL, 1998; RÖVER et KAISER, 1999;). Les comparaisons sont dès lors difficiles. Les résultats de la séquence d'Elnes, étudiée par CORDIER (1999) pour le RPG Nord-Pas-de-Calais et qui ne compte malheureusement que 10 points espacés de 30m, sont très semblables à la semi-variance calculée à 25m pour Fe, Mn, Cu et Zn. Les semi-variances pour Ni et Cr sont nettement inférieures dans les données CORDIER; celle pour Pb est inférieure en valeur absolue mais identique en valeur relative et la semi-variance de Co est supérieure chez CORDIER. Nous noterons également que dans un contexte nettement plus différencié (Massif central - France), BOURENNANE *et al.* (2003) obtiennent des semi-variances relatives du même ordre de grandeur pour Cr, supérieures pour Co et nettement inférieures pour Fe. Il est donc possible que la semi-variance à l'échelle de la station soit surestimée pour Ni et Cr, mais pour les autres éléments, les données du tableau IV.18 semblent cohérentes.

#### 7.3.1.4 Variabilité à la parcelle

La parcelle agricole apparaît être un niveau-clé par rapport aux échelles spatiales de variabilité. La variabilité de l'ensemble des paramètres "explicatifs" s'y trouve fortement exprimée ainsi qu'une part importante de celle des ETMs (tableaux IV.17 et IV.18).

L'importance relative de la variabilité à cette échelle trouve son origine dans l'organisation des sols selon le relief qui y est pleinement exprimée. Le problème de la comparaison entre Aba et Abp a déjà été abordé sous deux angles. Dans l'approche "toposéquence", les deux séries ont fait l'objet de comparaisons multiples. Nous pouvions conclure à une différence nette pour ce qui concerne les profils de teneurs et le niveau moyen à l'échelle du solum. Nous avons également souligné que l'horizon labouré présentait une certaine homogénéisation des teneurs pour Cu, Zn et Pb et nous avons présumé que *le critère "série de sols" n'a plus guère d'intérêt comme facteur de stratification en sols limoneux*. Cette hypothèse ne fut que partiellement confirmée par l'ap-

proche "référentiel typologique régional". En effet, car, pour peu importantes que paraissaient les différences entre séries de sols, la différenciation des Abp n'en était pas moins statistiquement significative. Nous avons également évoqué un problème d'échelle de perception des différences entre séries de sols, la variabilité des teneurs en argile à l'intérieur des séries étant relativement importante à l'échelle régionale. La comparaison des séries Aba et Abp a été approfondie à l'échelle de la parcelle agricole.

Vingt-six parcelles distribuées dans l'ensemble de la zone étudiée ont été échantillonnées. Dans chacune d'elles, l'horizon labouré a été prélevé sur un Aba et sur un Abp. Un test de nullité de la moyenne des différences de teneurs en ETMs entre Aba et Abp a été réalisé. Les résultats figurent au tableau IV.19, sous la forme d'une différence moyenne de teneur ([Aba]-[Abp]), de l'écart-type de ces différences et de leur niveau de signification statistique.

**Tableau IV. 19: Différences de teneurs en argile (g/100g) et en ETMs (mg/kg) dans l'horizon labouré entre Aba et Abp à l'échelle de la parcelle agricole: moyennes, écarts-types et niveau de signification.**

	[0-2 $\mu$ m]	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co
Moyenne	5.6	30.5	1.6	4.3	3.3	3.3	-2.9	1.0
Ecart-type	3.5	154.4	2.3	9.1	4.0	7.3	5.2	1.1
Niveau $\alpha$	***	NS	**	*	***	*	**	***

Niveau  $\alpha$ : \*\*\* très hautement significatif; \*\* hautement significatif; \* significatif; NS non significatif.

Comme on peut le constater au tableau IV.19, la différenciation entre les deux séries est prononcée pour les teneurs en argile, en moyenne un Abp présente 5.6 g/100g de moins qu'un Aba situé dans la même parcelle. La différenciation entre les deux séries est significative également pour l'ensemble des éléments, à l'exception de Mn. Les teneurs en Cu, Zn, Ni, Cr et Co sont plus élevées dans l'Aba, celles en Pb dans l'Abp.

Par rapport à l'approche "référentiel typologique régional", on retrouve les mêmes constats pour Mn, Zn, Ni, Cr et Pb avec les mêmes ordres de grandeur de différences entre les deux séries. L'approche "typologie à la parcelle" montre par contre que les différenciations en Cu et en Co sont significatives aussi et qu'elles respectent la logique du fond pédogéochimique. Nous pouvons dès lors conclure à l'intérêt de la typologie des sols "limoneux" comme facteur de stratification de l'horizon labouré à l'échelle d'une parcelle agricole. Les teneurs en Ni, Cr et Co sont gouvernées par le fond pédogéochimique; Cu et Zn par le fond et les

apports organiques; Pb par le facteur organique.

L'influence du relief à l'échelle de la parcelle n'est pas sans conséquences non plus pour ce qui concerne le traitement géostatistique des données. En effet, le relief est un facteur de dérive ("*drift*") ce qui entraîne que la valeur attendue de la teneur en un élément n'est pas constante sur la totalité de la surface de la parcelle. En pratique, il faut modéliser la dérive par rapport aux coordonnées X et Y, soustraire cette dérive des données brutes et analyser le variogramme par rapport aux résidus.

Ces opérations ont été appliquées sur la parcelle de Boëlle (*cf* localisation à la figure IV.10). A titre illustratif, les résultats vont être présentés pour Zn et Pb. Les informations d'ordre topographique et "carte des sols" sont présentées à la figure IV.19; les données brutes à la figure IV.20; les relations entre les teneurs en Zn et les variables X et Y à la figure IV.21 et le variogramme des résidus à la figure IV.22. Les résultats non-présentés ici figurent en annexe 12.

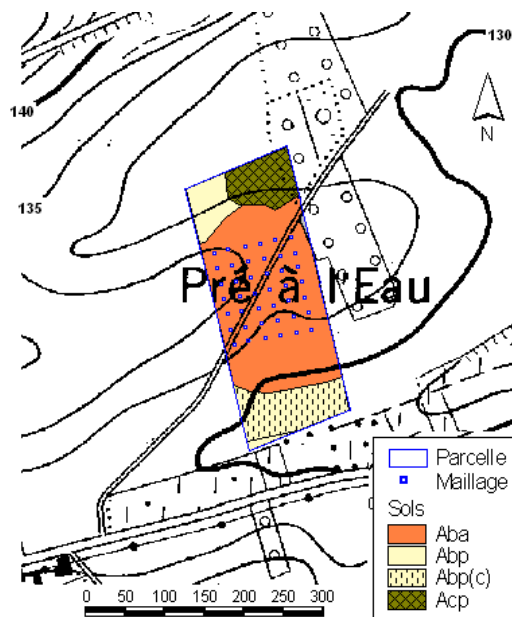
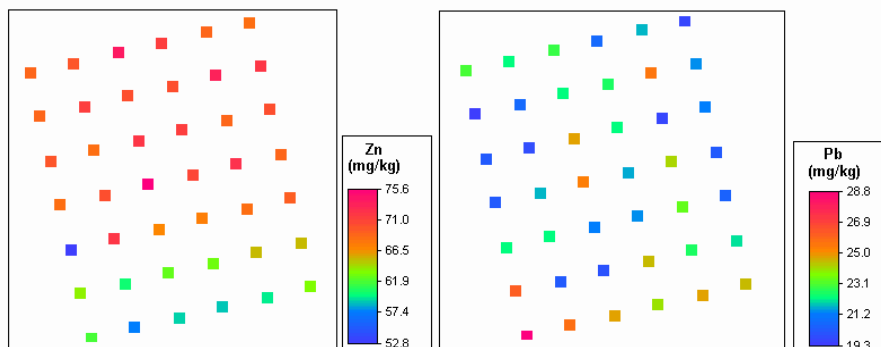


Figure IV. 19: Extraits de carte topographique (IGN- 47/2) et de carte des sols (119E) relatifs à la parcelle de Boëlle.

Le maillage dans la parcelle est situé en position sommitale d'un interfluve légèrement bombé. Les limons éoliens reposent en couverture (5 à 10 mètres d'épaisseur) sur des sables fins peu glauconifères datant de l'éocène supérieur (étage tongrien en Belgique). Malgré l'homogénéité cartographique, un gradient décroissant d'argile, du sommet de l'interfluve vers les bas de pente, est observé sur le terrain.

Ce gradient d'argile est perceptible également (et heureusement) à travers les résultats analytiques (voir cartes en annexe). Les teneurs en Zn expriment clairement l'influence du fond pédo-géochimique minéral tandis que les teneurs en Pb sont légèrement plus élevées dans les zones basses du relief (figure IV.20).



**Figure IV. 20: Cartes des teneurs (mg/kg) mesurées en Zn (gauche) et en Pb (droite) dans la parcelle de Boëlhe.**

Les gradients de teneurs liés à la topographie peuvent être modélisés par régression. Dans ce cas d'étude, le gradient topographique suit approximativement une direction Nord-Sud et la seule coordonnée Y (en mètres dans le système Lambert) suffit (figure IV.21).

Dans le cas de Zn et Pb, les résidus de la régression ne présentent plus de structure spatiale, comme en attestent leurs semi-variogrammes (figure IV.22). Les résidus peuvent donc être considérés comme aléatoires et indépendants, et sont de moyenne nulle.

Les valeurs prédites suivent donc un modèle très simple et la variance résiduelle de la régression sert de base à l'estimation d'un intervalle de confiance sur chaque teneur prédite. Teneurs estimées et intervalles de confiance (à 0.05) pour Zn et Pb sont donnés à titre illustratif à la figure IV.23. Les "structures spatiales" de Zn et Pb sont logiquement antithétiques, au facteur d'échelle près; celles des intervalles de confiance sont par contre identiques pour les deux éléments (toujours au facteur d'échelle près!).

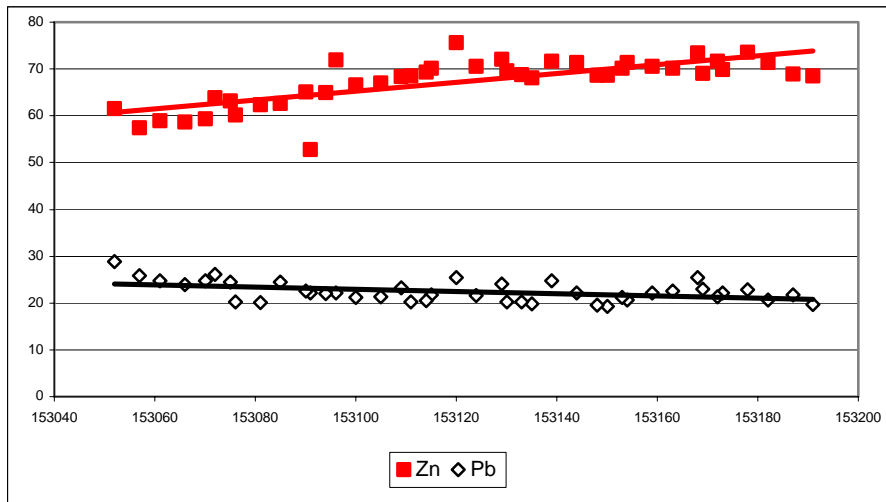


Figure IV.21: Relations entre teneurs en ETMs (Zn et Pb en mg/kg en ordonnée) et la latitude (Y en mètres en abscisse).

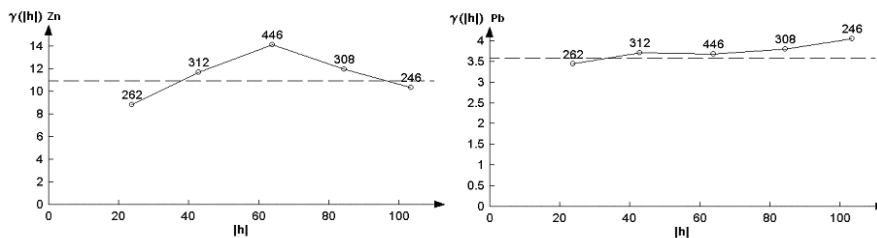


Figure IV.22: Semi-variogrammes des résidus des régressions Zn-Y (gauche) et Pb-Y ( $[\text{mg}/\text{kg}]^2$ ).

*Ces modèles présentent quelques simplifications, peut-être abusives. Ainsi, des régressions curvilinéaires avec les coordonnées Y pourraient être plus judicieuses. Pour d'autres éléments, il y a lieu de tenir compte également des coordonnées X; pour d'autres encore, la différenciation n'est pas plus importante à l'échelle de la parcelle qu'à celle de la maille. Il n'en est pas moins vrai qu'à l'échelle de la parcelle, la variabilité spatiale des teneurs en ETMs apparaît déterminée par le relief. La stratification sur base de la carte des sols, qui exprime la topographie par le critère "développement de profil" ou la régression avec des paramètres traduisant le relief sont dès lors autant d'approches pertinentes de la spatialisation des teneurs en ETMs à cette échelle.*

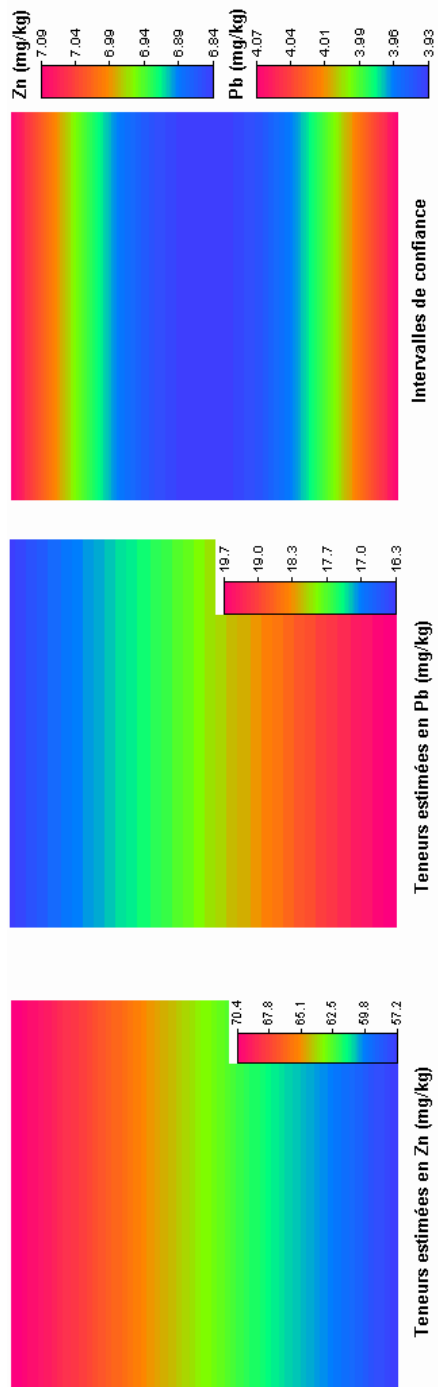
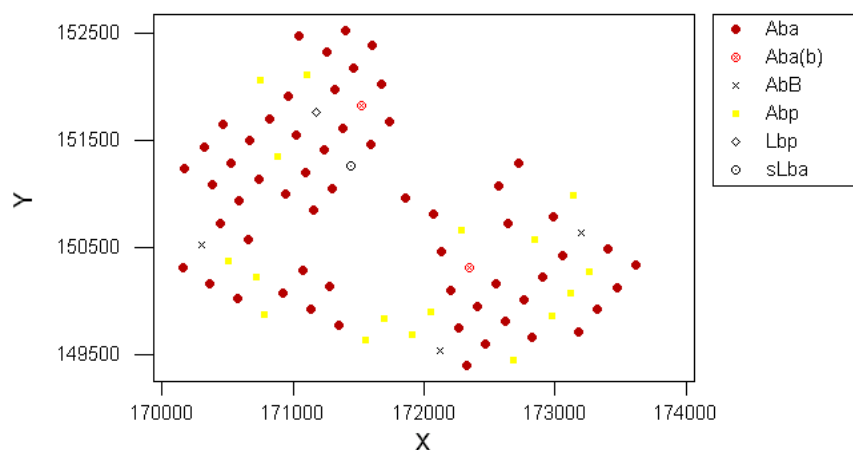


Figure IV.23: Teneurs estimées et intervalles de confiance (mg/kg) pour les teneurs en Zn et en Pb dans la parcelle de Boëlhe.

### 7.3.1.5 Variabilité à l'échelle du secteur

Parmi les différents secteurs présentés au cours de ce travail, figure celui de Corroy-le-Grand, dont la localisation peut être trouvée à la figure IV.10. Une grille de points selon un maillage de 250m, échantillonnée par VERSTRAETE (1994), permet d'estimer la semi-variance de toutes les variables étudiées pour des échelles allant de 250 à 1500m environ. Les séries de sols sont principalement limoneuses, comme en témoigne la figure IV.24. Il faut noter que le secteur est bordé au sud par l'autoroute E411.



**Figure IV. 24: Grille d'échantillonnage et séries de sols pour le secteur de Corroy-le-Grand.**

Les cartes des données brutes et les variogrammes pourront être trouvés en annexe 13.

A l'exception des éléments Mn et Ni, aucune des variables étudiées ne présente de structure spatiale à cette échelle.

Pour Mn et Ni, les teneurs peuvent être prédites à l'échelle du secteur par krigeage. Teneurs estimées et erreurs standards de prédiction sont présentées aux figures IV.25 et IV.26. On y voit clairement apparaître une tache correspondant à des teneurs plus faibles en Mn, ainsi que pour Ni une certaine dichotomie entre les points situés au sud-est et ceux au nord-ouest. Les valeurs en rouge pour Ni correspondent à des teneurs anomaliques, sans que l'on en ait identifié la cause, car elles sont beaucoup plus élevées que les prédictions réalisées sur base des teneurs en Fe (figure IV.27). On notera également que les teneurs les plus faibles sont probablement sous-estimées (en raison d'un léger biais

analytique).

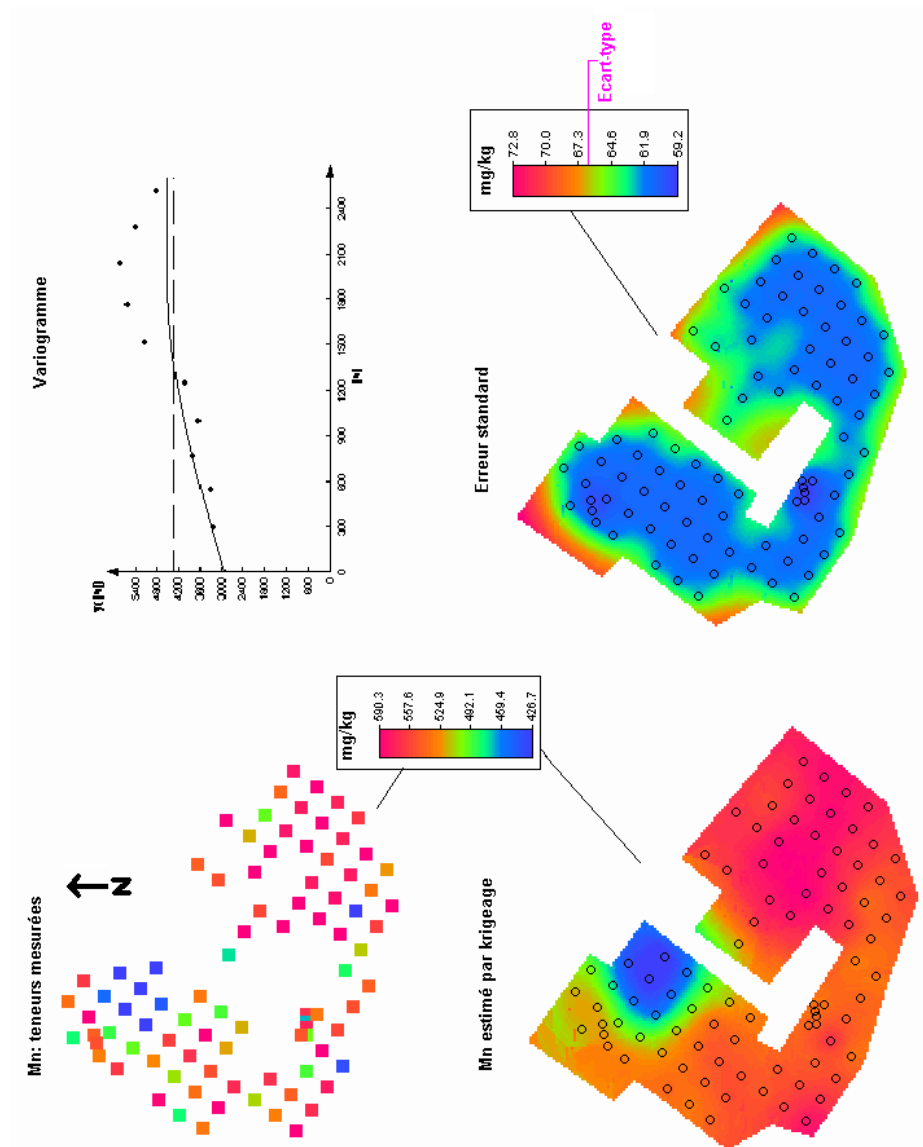


Figure IV. 25: Résultats relatifs à la prédiction spatiale des teneurs en Mn (mg/kg) par krigeage ordinaire dans le secteur de Corroy-le-Grand.



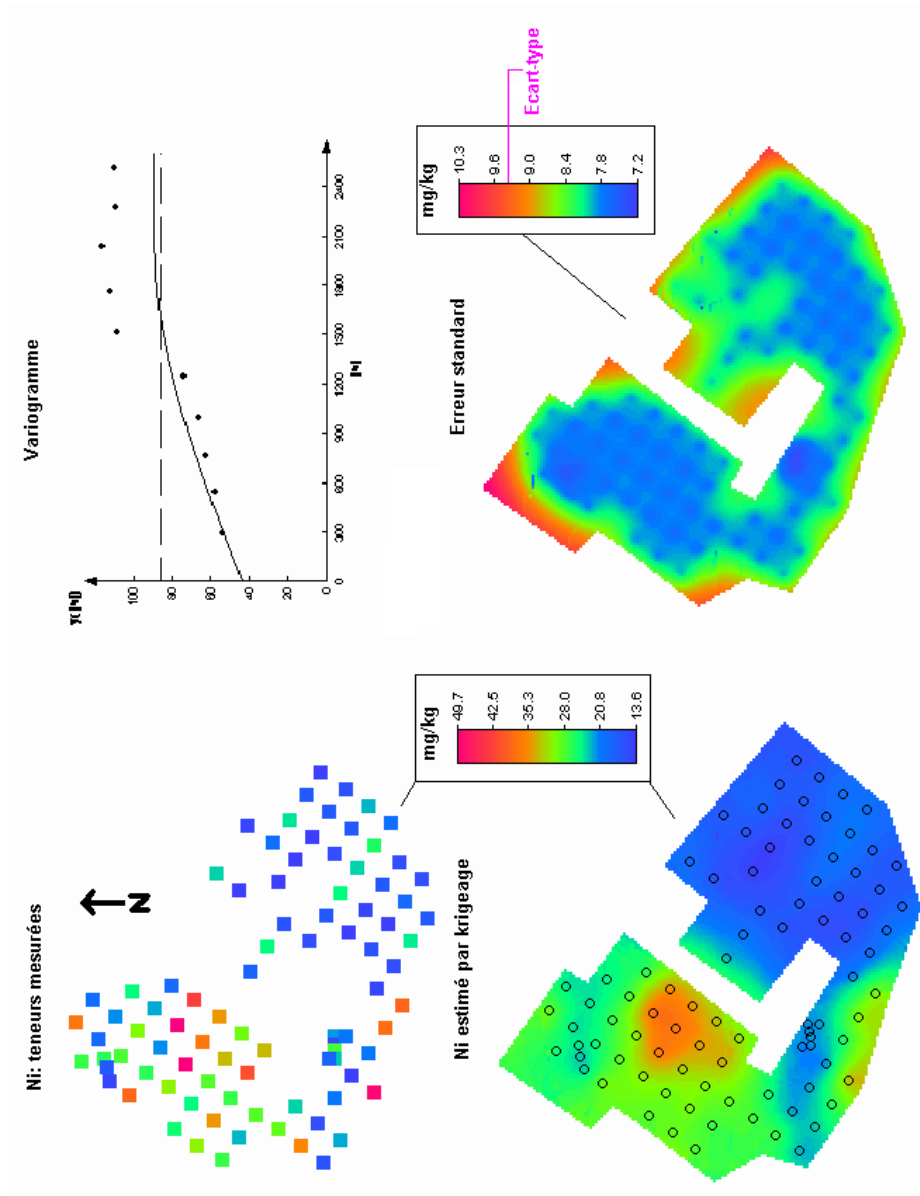
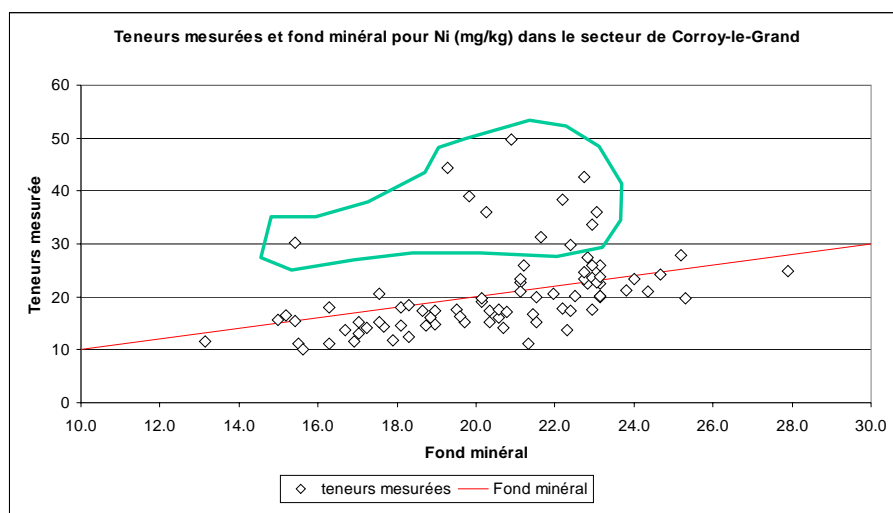


Figure IV. 26: Résultats relatifs à la prédiction spatiale des teneurs en Ni (mg/kg) par krigeage ordinaire dans le secteur de Corroy-le-Grand.



**Figure IV. 27: Identification de teneurs anormales en Ni (mg/kg) dans le secteur de Corroy-le-Grand. Les points à l'intérieur de la courbe verte présentent des teneurs beaucoup plus élevées que ce que le fond minéral laissait prévoir.**

Pour les autres éléments/variables, aucune technique d'interpolation entre les teneurs mesurées ne se justifie et la meilleure prédiction est alors donnée par la teneur moyenne.

Une analyse de la variance a été effectuée afin de vérifier la pertinence d'une stratification sur base de la distinction du caractère colluvial. Le détail des résultats figure en annexe 13. Dans le cas présent, aucune différence significative n'a été trouvée; ce qui signifie que, pour le secteur de Corroy, il n'y a pas de lieu de distinguer les teneurs moyennes par séries de sols.

*Le point essentiel à retenir pour l'analyse des structures spatiales à l'échelle du secteur, c'est l'absence de continuité spatiale que ce soit pour les variables explicatives, comme pour les teneurs en ETMs. Les gammes de distances abordées sont en effet supérieures ou équivalentes à la portée des structures pour l'argile, Fe, COT et a fortiori les teneurs en ETMs. Les structures plus longues évoquées au titre 7.3.1.2 ne sont pas perceptibles à l'échelle du secteur.*

### 7.3.1.6 Variabilité régionale

La variabilité spécifique à l'échelle régionale a été perçue principalement par l'entremise des transects ouest-est et nord-sud, relatifs aux sols de type Aba, d'une part et des comparaisons entre les différents secteurs d'autre part.

Afin de nuancer les constats réalisés sur l'ensemble des échantillons, les deux groupes (transects et secteurs) ont été analysés séparément.

L'analyse des transects doit montrer s'il existe une structure spatiale et/ou des différenciations régionales liées aux limons de plateaux. L'ensemble des cartes des données brutes et des variogrammes figurent en annexe 14.

Nous retiendrons que :

- les teneurs en Fe et argile sont globalement plus élevées dans la vallée de l'Orneau et dans la partie orientale de la zone d'étude; en référence à ce qui a été écrit précédemment, cela pourrait signifier un niveau d'érosion supérieur, à mettre en relation avec l'historique du défrichement;
- il n'y a pas de différenciation régionale pour les teneurs en sable et en COT et le  $pH_{H_2O}$ ;
- les variables "explicatives" argile, Fe et COT présentent une auto-corrélation spatiale avec une portée de l'ordre de 6 000m; les sols Aba sont donc plus semblables sur des plateaux géographiquement proches; ceci peut traduire une certaine homogénéité de gestion à l'échelle du secteur;
- Les éléments Mn, Ni et Cr ne présentent pas de différenciation régionale; au contraire de Cu (teneurs plus élevées dans la branche orientale du transect), de Zn (teneurs plus élevées à l'est et intermédiaires dans la vallée de l'Orneau), de Pb (teneurs plus élevées à l'est) et de Co (teneurs légèrement plus élevées dans la vallée de l'Orneau);
- les structures spatiales, en terme de continuité, de Cu, Cr et Co sont semblables à celles de Fe et argile;
- les teneurs en Zn et en Pb présentent une structure d'auto-corrélation à grande portée (entre 20 000 et 24 000m); signe de la présence d'entités spatiales de dimensions supérieures à celles des secteurs;
- Ni ne présente pas d'auto-corrélation spatiale à cette échelle.

Si l'on s'attache aux teneurs "nômiales" en Cu, Zn (figure IV.28) et Pb<sup>8</sup>, on peut constater que les teneurs élevées sont aléatoires pour Cu et organisées pour Zn et Pb. La partie orientale de la zone d'étude est ainsi caractérisée par une concentration "modérée" (Cu) à "forte" (Zn et Pb).

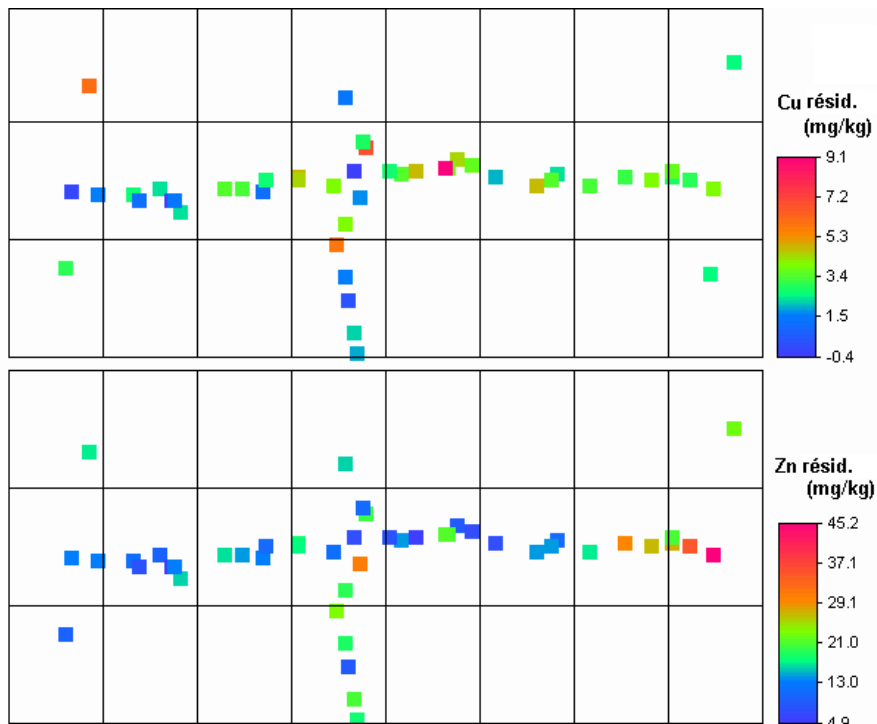


Figure IV. 28: Cartes des teneurs "nômiales" (mg/kg) pour Cu (haut) et Zn (bas).

L'analyse des différences entre secteurs a été réalisée sur base des variogrammes d'une part et d'analyse de la variance d'autre part.

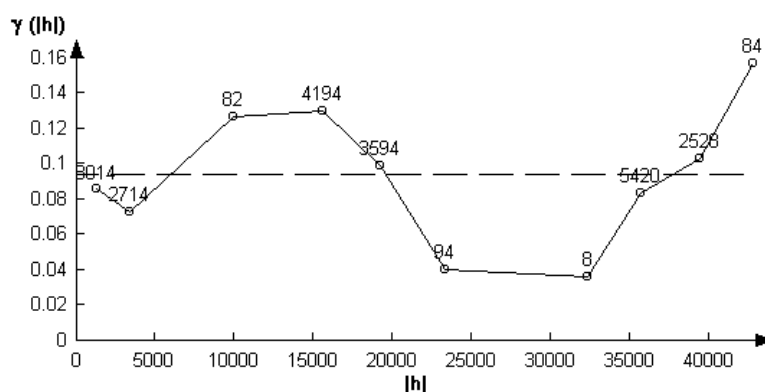
Pour les variogrammes, les distances entre les points ont été regroupées en classes de 5 000m d'intervalle. La semi-variance pour la classe des distances inférieures à 5000m traduit la variabilité à l'intérieur des secteurs. Pour des gammes de distances de l'ordre de 15 000 à 20 000m, il s'agit de la différenciation entre les secteurs de l'Orneau et de Corroy-le-Grand; pour les distances supérieures à 35 000m, ce sont les différences entre le secteur de Waremme et les deux autres qui sont représentées (voir schéma en figure IV.29).

<sup>8</sup> pour rappel, pour Pb les teneurs nômiales présentent la même configuration spatiale que les teneurs totales.

L'analyse des semi-variogrammes (annexe 14) confirme les points suivants:

- d'une manière générale, la semi-variance égale déjà la variance totale à l'intérieur du secteur, à l'exception de Cu et Zn (tant les formes totales qu'anthropiques),
- il existe des différenciations régionales pour les teneurs en Fe, argile, Cu, Zn et Pb.

Pour ce qui concerne ce dernier point, les trois secteurs étudiés, en particulier le secteur de l'Orneau, ne constituent pas obligatoirement des unités sous-régionales bien définies. A l'examen des variogrammes (exemple pour Fe à la figure IV.29), il apparaît ainsi une différence de semi-variance entre les classes 15 000 et 20 000m. Ceci signifie que les niveaux de variabilité entre le secteur de Corroy et le secteur de l'Orneau ne sont pas identiques selon que l'on considère la partie nord ou la partie sud du secteur de l'Orneau.



**Figure IV. 29: Semi-variogramme des teneurs en Fe ( $\gamma(h)$  en  $[\text{mg/kg}]^2$ ) à l'échelle régionale.**

En plus de l'analyse variographique, chaque élément a fait l'objet d'une analyse de la variance sur base du critère "secteur". Les résultats détaillés figurent en annexe 14.

Des différences significatives existent entre les trois secteurs. Les teneurs moyennes

- en Fe, argile et COT sont plus élevées dans le secteur de l'Orneau,
- en sable sont plus élevées dans le secteur de Corroy-le-Grand,
- du  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$  sont équivalentes pour tous les secteurs,

- en Mn sont moins élevées dans le secteur de Waremme;
- en Cu, Zn et Pb sont moins élevées dans le secteur de Corroy-le-Grand;
- en Ni et Co ne sont pas discriminées par le critère "secteur";

Pour ce qui concerne le niveau d'anthropisation des trois secteurs, les teneurs "résiduelles" en Cu, Zn et Pb concourent à un classement de ceux-ci selon l'ordre suivant: Corroy-le-Grand < Orneau < Waremme.

*Il existe donc bien des différenciations géographiques tant au niveau des teneurs naturelles (traduites par les teneurs en Fe et argile), que des teneurs anthropiques. Une partie de cette différenciation anthropique revêt un caractère socio-historique. Les époques de mise en culture diffèrent en effet selon les "sous-régions" et il en va de même pour les modes de gestion agricole. Il est ainsi autorisé de penser à des épandages plus importants de scories et autres résidus de l'activité sidérurgique dans la partie orientale de la zone étudiée, proche géographiquement des (anciens) bassins industriels liégeois.*

*La délimitation plus précise des différentes sous-régions (ou PRNs) semble être une perspective intéressante pour les travaux futurs.*

### **7.3.2 Evaluation de la faisabilité d'une cartographie du fond minéral et de l'état d'anthropisation**

Dans le droit prolongement de ce qui vient d'être écrit, il y a lieu d'évaluer la faisabilité d'une cartographie régionale des teneurs en ETMs liées au fond pédo-géochimique naturel et du niveau d'anthropisation, par l'intermédiaire du "nôme agricole".

Plusieurs options sont possibles en théorie: (i) une cartographie directe par interpolation entre les points de mesure, (ii) une cartographie indirecte sur base de la carte des sols, (iii) une cartographie indirecte sur base de régressions et (iv) une approche mixte.

Il est également loisible de prédire la teneur attendue en moyenne, une gamme de valeurs fréquentes (BAIZE et RODDIER, 2002) ou une teneur-seuil présentant telle probabilité d'être dépassée (POLLUSOL).

### 7.3.2.1 cartographie directe

Pour rappel, la cartographie n'est pas un objectif premier de ce travail et, dans l'état actuel des choses, les différents jeux de données que nous possédons ne couvrent pas la zone d'étude de façon satisfaisante pour réaliser une cartographie à l'échelle régionale.

Par contre, l'approche basée sur une perception de la variabilité des teneurs en ETMs à différentes échelles d'observation nous a permis de quantifier ces différents niveaux de variabilité spatiale qui peuvent nous servir de base pour l'élaboration d'un plan d'échantillonnage à vocation cartographique.

Les résultats obtenus ont mis en avant le caractère relativement court de la portée pour les ETMs, à l'exception de Cu et Zn. Au-delà de 1 000m de distance, deux points, sans considération de la typologie des sols, peuvent à coup sûr être considérés comme indépendants pour la majorité des variables mesurées.

En conséquence, un inventaire cartographique régional portant sur les mêmes éléments que ceux étudiés au cours de ce travail devrait en principe reposer sur une grille<sup>9</sup> à maille inférieure à 400m (portée spéculative<sup>10</sup> de Pb). Si cela se conçoit à l'échelle d'un secteur, la mission est impossible à l'échelle de la zone d'étude (12 000 points de prélèvement). En outre, l'analyse propre au secteur de Corroy-le-Grand a montré que même une distance de 250m ne constitue pas toujours une garantie de pouvoir interpoler.

La prédiction d'une teneur en un point à l'échelle régionale sur base d'un krigeage des teneurs mesurées apparaît peu réaliste.

Par contre, la détection de petites régions naturelles au sein de la zone d'étude pourrait se satisfaire d'un échantillonnage moins dense. Ainsi, la couverture complète de la zone d'étude par une grille à maille de 2 kilomètres nécessiterait de l'ordre de 500 points et une maille de 5 kilomètres moins de 100 points. Un échantillonnage de type "*nested sampling*" touchant plusieurs échelles de variabilité (500m, 1km, 2 km) et reposant sur une grille à maille de 5 kilomètres constituerait certainement une approche pertinente pour en même temps couvrir la zone de

---

<sup>9</sup> Nous réduisons volontairement les plans d'échantillonnage à une grille systématique par souci de simplification!

<sup>10</sup> car, en théorie, les différences entre deux points situés à une distance  $h$  sont stationnaires.

manière complète et affiner les variogrammes relatifs à ces gammes de distances.

### 7.3.2.2 cartographie typologique

Dans l'Avalonnais (France), sur un secteur d'une surface équivalente à 9 planchettes de la carte des sols de la Belgique, BAIZE et RODDIER (2002) ont montré l'intérêt d'une approche typologique pour la cartographie des gammes de valeurs fréquentes en ETMs. Cet intérêt est fortement conditionné à l'existence (1) de contrastes entre les familles de sols et (2) d'une couverture cartographique complète.

Les différents exercices de comparaison réalisés au cours de ce travail ont montré que la série de sols au sens de la carte des Sols de la Belgique conservait une certaine pertinence en tant que critère de stratification malgré une tendance constatée à l'homogénéisation des teneurs dans l'horizon labouré. Le caractère de pertinence est toutefois d'autant moins évident que la surface considérée est importante.

En raison des spécificités géographiques déjà mentionnées, il serait certainement approprié de réaliser des inventaires complémentaires stratifiés, par rapport au découpage cartographique (par facilité) ou à un découpage plus naturel (associations de sols, bassins versants...).

Toutes les séries de sols ne sont pas utiles à distinguer et des regroupements peuvent être opérés sur des critères géomorphologiques. Le résultat consiste alors en cartes, d'allure pédopaysagère, dont les plages peuvent être caractérisées tant par des teneurs moyennes que par des paramètres liés aux distributions fréquentielles des valeurs.

L'exercice de thématization pédo-géochimique de la Carte des sols de la Belgique, moyennant le regroupement de certaines séries et la définition d'une nouvelle légende, a été réalisé sur les cartes 130E (Gembloux) et 143E (Spy). Par rapport à la légende initiale, sont (partiellement) conservés comme critères de stratification, la texture (A, G, L ou S), le développement de profil (p ou autre), la phase d'épaisseur de l'horizon A pour les sols limoneux et enfin la nature de la charge caillouteuse et la phase de profondeur pour les textures limono-caillouteuses. Le critère drainage n'est utile que pour la distinction entre sols sur colluvions et sols sur alluvions (présence d'un horizon réduit). Le format de présentation de la thèse n'autorise évidemment pas la publication à l'échelle du résultat de la thématization. Toutefois, la figure IV.30 donne un aperçu de celle-ci à l'échelle, approximative de 1:150 000. La légende ainsi que deux fenêtres plus détaillées (échelle: 1:50 000) sont



montrés à la figure IV.31.

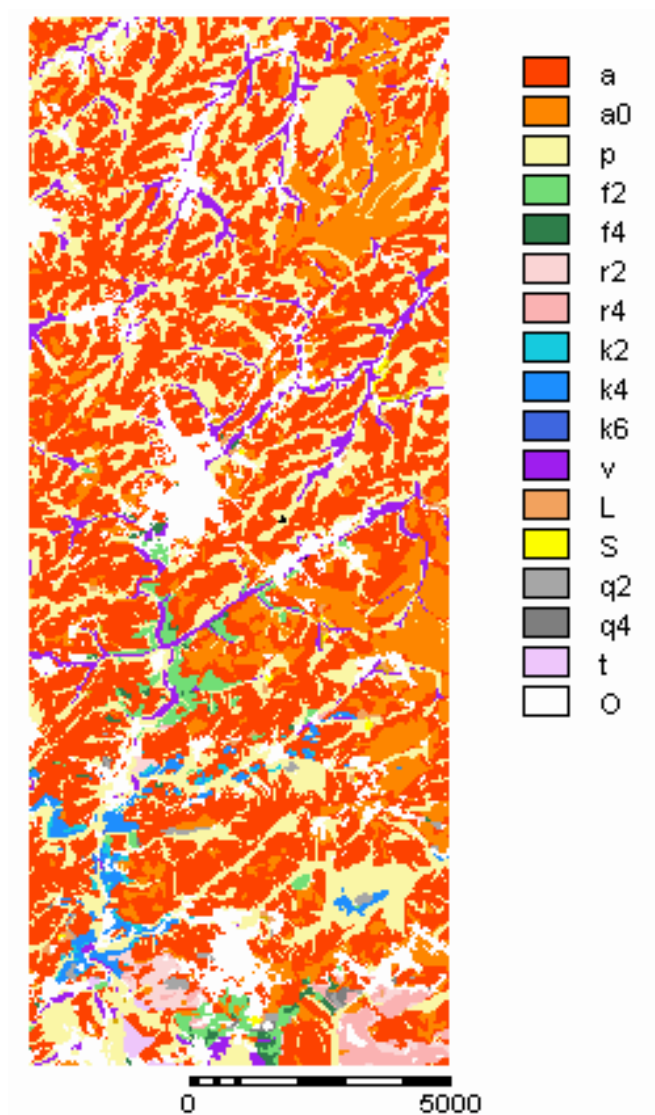


Figure IV. 30: Carte des unités pédo-géochimiques réalisée à partir des planchettes 130E et 143E de la carte des Sols de la Belgique. Voir légende à la figure IV.31.

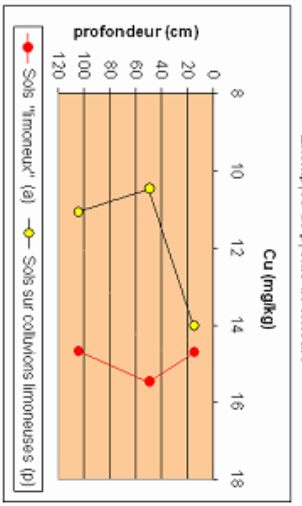
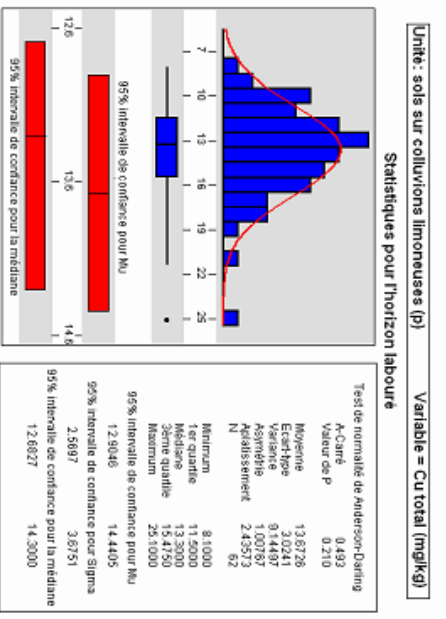
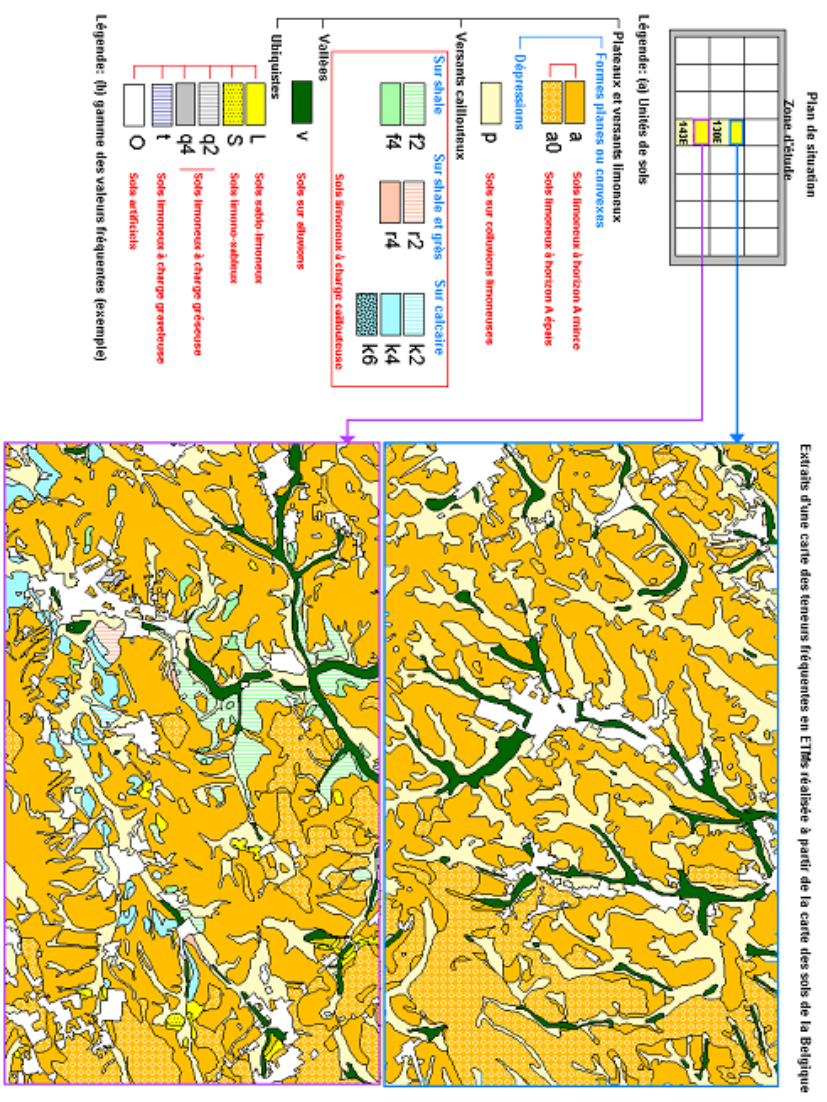


Figure IV.31. Détails de la carte pédo-géochimique (1/50 000) et explication de la légende.

L'avantage de cette méthode réside dans la complétude de la couverture cartographique des unités de sols, à une échelle détaillée. L'inconvénient majeur est que ce critère perd de sa pertinence lorsque la surface augmente, en raison de disparités géographiques, ainsi que lorsque les niveaux d'anthropisation sont très marqués (ce qui n'est heureusement pas encore le cas dans la zone d'étude).

Un autre avantage, et il est relativement conséquent, de l'approche typologique est son adéquation à représenter des profils de teneurs. Des profils moyens ou caractéristiques peuvent en effet aisément être rattachés aux différentes unités cartographiques, ce que ne permet pas une approche par interpolation.

#### 7.1.1.1 cartographie par régression

Autre méthode indirecte, une cartographie des teneurs en ETMs est réalisable à partir d'informations ancillaires, *i.e.* les différentes variables identifiées comme explicatives.

Pour être pleinement opérationnel, ce type de cartographie suppose bien évidemment (i) qu'il existe des relations causales fortes entre données primaires et ancillaires et (ii) que ces dernières soient suffisamment spatialisées.

Eu égard à la première condition, l'applicabilité de la cartographie par régression sera plus évidente (i) pour les teneurs du fond pédogéochimique minéral que pour les teneurs totales ou anthropiques et (ii) pour les éléments Cu, Zn, Ni, Cr et Co que pour Mn et Pb.

Pour ce qui concerne la seconde condition, AARDEWERK constitue la base de données la mieux pourvue à l'échelle de la zone d'étude. Elle a d'ailleurs été exploitée à des fins de cartographie des teneurs en ETMs (à l'eau régale) dans le cadre du projet POLLUSOL. Les variables à priori intéressantes pour la spatialisation y sont les teneurs en argile, en sable, en COT et le  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ .

Des variogrammes ont été établis à partir des données AARDEWERK relatives à l'horizon labouré pour la zone d'étude (*cf* annexe 15). Ces données présentent une certaine continuité spatiale jusqu'à des distances de l'ordre de 4 000 ( $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ ) à 10 000m (argile, Sable, COT). Rien ne s'oppose donc en théorie à l'interpolation par krigeage de ces quatre variables et à l'introduction des cartes obtenues dans des équations de régression ETMs-variables "explicatives".

Ces opérations sont schématisées à la figure IV.32; elles fournissent des cartes d'estimation des teneurs en ETMs (fond minéral ou teneurs totales selon le modèle utilisé) mais également des cartes de l'erreur d'estimation (qui doivent tenir compte de l'incertitude sur le krigeage des données et de la variance résiduelle de la modélisation).

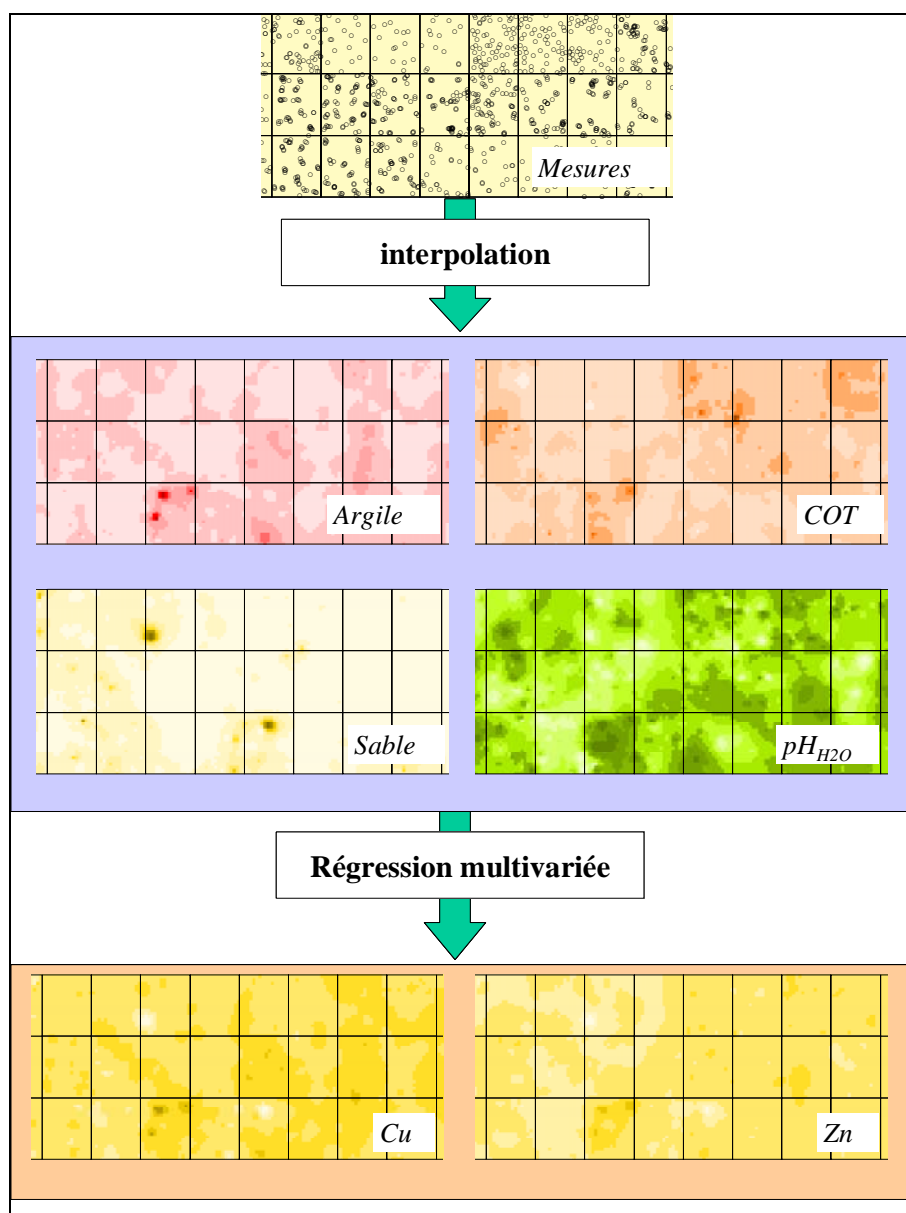


Figure IV. 1: Schéma de principe de la cartographie des teneurs en ETMs à l'échelle régionale selon une approche par régression.

Sur le principe, ce type d'approche est séduisant car il fournit des estimations ponctuelles et des cartes régionales. Toutefois, la prise en compte de structures spatiales à longues portées pour les variables "explicatives", dont l'existence soit-dit en passant contredirait les observations effectuées dans le cadre de cette étude, n'implique pas que les effets à courte distance soient modélisés de façon satisfaisante. Il a en effet été montré ci-avant que l'essentiel de la variabilité en sols limoneux se produisait à l'échelle de la parcelle, échelle largement sous-représentée dans la base AARDEWERK.

En outre, il convient de se remémorer le fameux précepte cher aux géoinformaticiens: "*Garbage In, Garbage Out*". Nous avons déjà fait état des réserves à entretenir sur la qualité des données en raison de la pléthore de modes opératoires et de laboratoires impliqués dans la caractérisation des profils de la base AARDEWERK.

Il y a donc tout lieu d'être prudent quant à l'usage potentiel des résultats d'une telle approche par régression. Nous ne saurions trop plaider pour la nécessité d'établir un inventaire cartographique des données granulométriques, du pH et des teneurs en matière organique pour lesquels l'incertitude liée aux contingences opératoires serait la plus faible possible et, dans tous les cas, maîtrisée.

Maintenant, il doit également être clair, qu'un inventaire présentant la densité d'échantillonnage de la base AARDEWERK ne peut pas servir à la prédiction à l'échelle ponctuelle, mais plutôt à l'identification d'unités régionales spécifiques.

#### 7.1.1.2 approches mixtes

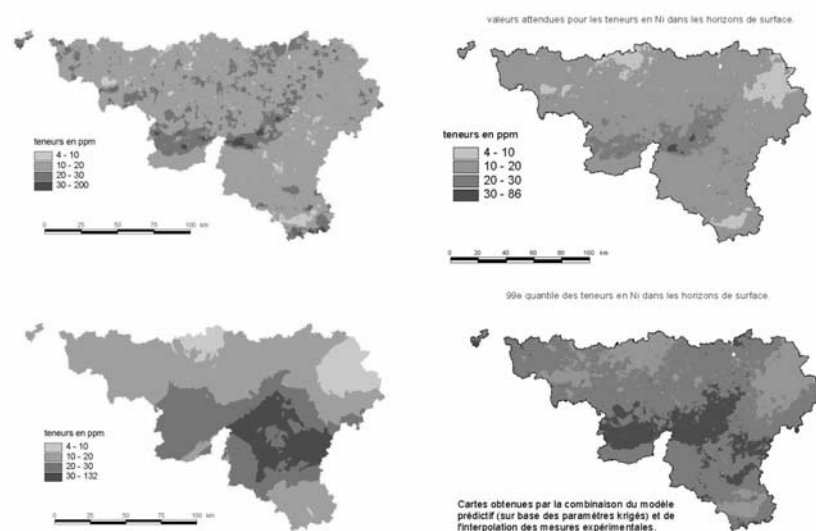
C'est probablement dans le domaine des approches mixtes que se situent les voies de recherche en spatialisation les plus prometteuses.

Les approches mixtes consistent à combiner des techniques et des types d'informations spatiales différents (cartes choroplètes, mesures directes, estimations...).

Les travaux de l'équipe du P<sup>f</sup> BOGAERT, fondés sur l'exploitation du Maximum d'Entropie Bayésien (BME, une approche développée par CHRISTAKOS, *In* D'OR et BOGAERT, 2003) semblent avoir montré une autre voie intéressante à suivre.

Ainsi, dans le cadre du projet POLLUSOL, des résultats obtenus d'une part par krigeage des teneurs mesurées et d'autre part à l'aide d'un modèle prédictif (régression en fonction des variables pH, argile et COT)

aboutissaient à deux cartes *assez peu semblables* (exemple à la figure IV.33). Une approche BME a permis de fusionner ces résultats et d'obtenir une carte unique basée conjointement sur les valeurs d'ETMs voisines dans l'espace et les valeurs du pourcentage d'argile, de matière organique, du pH et pour laquelle *l'incertitude sur les valeurs prédites en ETMs est plus faible que l'incertitude associée à chacune des deux cartes obtenues séparément*.



**Figure IV. 2: illustration de l'approche BME. Cartes des teneurs estimées en Ni (mg/kg en Région wallonne): teneurs attendues par krigeage direct (haut à gauche), par régression (bas à gauche), par l'approche BME (haut à droite) et estimation du 99<sup>e</sup> quantile par BME (bas à droite) – (POLLUSOL 2003).**

Nous ne pourrions citer tous les développements possibles. Mais, si intégrer des mesures directes, des données ancillaires, des paramètres topographiques, des informations qualitatives d'ordre géomorphologique et lithologique, les limites de la carte des sols... semble *a priori* relever de la gageure, quelle ne serait pas la puissance d'un tel outil?

### 7.1.2 Conclusions

L'analyse des structures spatiales à différentes échelles a montré que l'essentiel de la variabilité en sols limoneux échoit à des distances relativement courtes. Parmi les variables "explicatives", les teneurs en Fe et en argile sont gouvernées par la topographie et la différenciation est maximum entre les formes convexes et concaves d'un même versant. Pour COT et  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ , par contre, l'origine de la variabilité est principalement anthropique, même si ces deux variables ne sont pas complètement indépendantes de la teneur en argile. Les limites du parcellaire agricole, ou de l'exploitation, constituent dès lors des "lignes de rupture" plus ou moins franches dont il conviendrait de tenir compte pour la spatialisation de ces variables. La caractérisation d'une parcelle dans une autre région naturelle a montré qu'il fallait également se préoccuper de l'évolution historique du parcellaire (BOCK *et al.*, 2002).

L'ensemble des ETMs étudiés, sauf Mn, affichent également une structure spatiale à courte distance. Cependant pour Cu, Zn et Pb, une structure spatiale à portée plus longue a également été constatée. Celle-ci est à mettre en relation avec une différenciation régionale de ces teneurs qui correspond à des niveaux d'anthropisation différents. L'analyse des résultats à l'échelle régionale a montré la nécessité d'une définition spatiale des différentes unités géographiques qui composent la zone d'étude.

Dans l'état actuel des choses, le seul outil de prédiction spatialisée, à l'échelle de la zone d'étude, qui représente une avancée par rapport aux simples teneurs moyennes est la carte dérivée de l'approche typologique. Elle est cependant perfectible par une densification de l'échantillonnage des séries non-limoneuses et par une meilleure définition des spécificités régionales.

La cartographie directe souffre d'un manque de données tant en terme de distribution générale que de densité. La cartographie indirecte par régression présente deux types de lacunes: le manque de liaison avec les variables ancillaires pour les teneurs anthropiques et le défaut de confiance dans la validité des données ancillaires existantes.

Les approches mixtes constituent certainement une voie de recherche intéressante afin de valoriser au mieux les nombreuses informations, tant quantitatives que qualitatives, existantes. Toutefois, des efforts de caractérisation des propriétés de base des sols doivent certainement encore être consentis car la connaissance de l'état des sols au niveau

régional reste plus que parcellaire.

## **7.2 Approches ponctuelles et locales**

Après les considérations relatives à la définition d'un référentiel régional et à la prédiction spatiale des teneurs en ETMs, les problèmes de références sont abordés à une échelle plus ponctuelle. Nous allons en effet illustrer en quoi les étapes précédentes peuvent être utiles pour l'analyse et l'interprétation des résultats provenant d'expérimentations de plein champ.

### **7.2.1 Expérimentations CRAGx**

En 1990, des échantillons étaient prélevés dans des parcelles d'essais du Centre de Recherches agronomiques de Gembloux (CRAGx). Les expérimentations du CRAGx concernent le suivi à long terme des restitutions de matières organiques diverses en agriculture; l'échantillonnage avait été opéré dans le cadre du fractionnement de la matière organique. Divers échantillons ont été sélectionnés en vue de la détermination des teneurs totales.

Trois traitements ont été retenus: (i) pas d'apport de matières organiques (témoin), (ii) enfouissement des sous-produits de récolte, apport de 40 Tonnes de lisier de porc tous les 3 ans, engrais vert tous les 3 ans, écume de sucrerie toutes les trois rotations (lisier+) et (iii) apport de 40 tonnes de fumier tous les trois ans (fumier). Trois échantillons provenant de trois blocs de placettes ont été analysés pour chacun des traitements.

Les placettes ont une taille de l'ordre de 150m<sup>2</sup>; la distance, de centre à centre, entre toutes ces unités d'échantillonnage est comprise entre 20 et 200m.

D'après un levé cartographique réalisé au 1:1 000, les placettes sont implantées sur des sols de type Aca et Ada, soit des "sols limoneux à horizon BT à drainage naturel modéré à imparfait". Le champ d'essais est annoncé comme homogène en terme de composition texturale (environ 20% d'argile dans l'horizon labouré). Le pH<sub>H2O</sub> est compris entre 7.0 et 7.6 selon les traitements, les teneurs en COT entre 0.74 et 0.98g/100g.

Le premier point à discuter par rapport à ce qui précède concerne l'homogénéité texturale des parcelles. Les résultats discutés au cours de

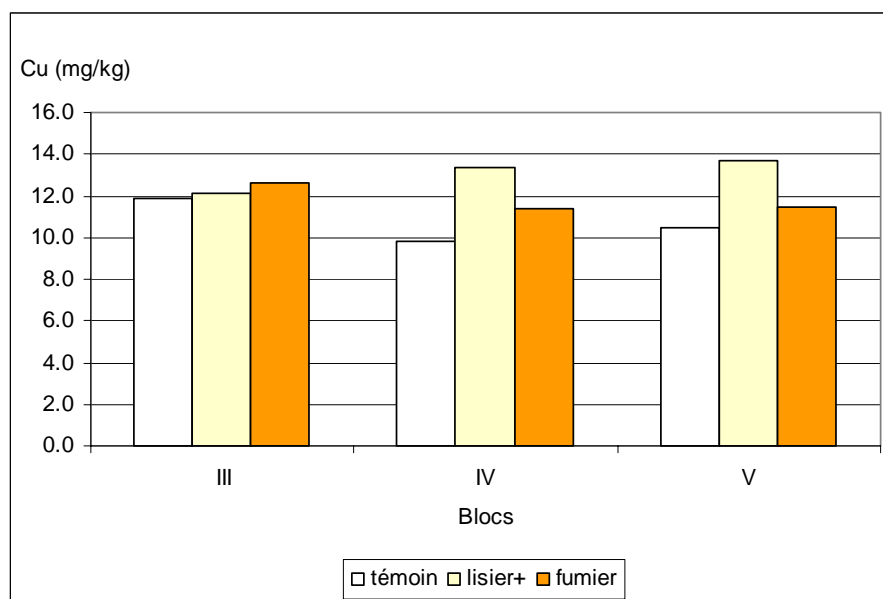


l'approche spatiale montrent en effet qu'à des distances de 200m la variabilité des teneurs en Fe et en argile est importante (dans le sens de la pente, il est vrai!). Et, à des distances de l'ordre de 25m, la variabilité correspond déjà à plus de 40% de la variance totale pour ces deux variables. On peut dès lors légitimement émettre des réserves quant à l'homogénéité texturale annoncée.

Nous nous sommes intéressés essentiellement aux éléments Cu et Zn en raison de leur occurrence notoire dans les résidus d'élevage.

Les teneurs en Cu sont présentées à la figure IV.33. On peut y voir que les traitements présentent une réponse homogène dans le premier bloc et que dans les deux autres, les teneurs suivent l'ordre:

témoin < fumier < lisier+. L'analyse de la variance (cf annexe 16) ne permet toutefois pas de conclure à une différence entre les traitements.



**Figure IV. 3: Teneurs en Cu (mg/kg) par traitement et par bloc dans l'expérimentation CRAGx.**

Prendre en considération le risque de variabilité naturelle des teneurs entre les différentes placettes revient à relativiser les résultats par rapport à un élément de référence, Fe ou argile en l'occurrence. Nous avons donc examiné les relations entre Cu et Fe pour les différents traitements (figure IV.34). Il devient clair alors que (i) les apports de matière organique se sont soldés par une augmentation des teneurs en Cu et (ii) que la différence entre le traitement lisier+ et le traitement fumier est pour une partie importante imputable aux différences de teneur en

Fe (ou en argile) entre les placettes. Les analyses de la variance effectuées sur les résidus de la régression par les teneurs en Fe (annexe 16) confirment ces constats visuels, qui sont d'ailleurs identiques pour Zn.

**La variabilité à l'échelle parcellaire devrait donc être mieux caractérisée au moment de l'implantation d'un champ d'essais.**

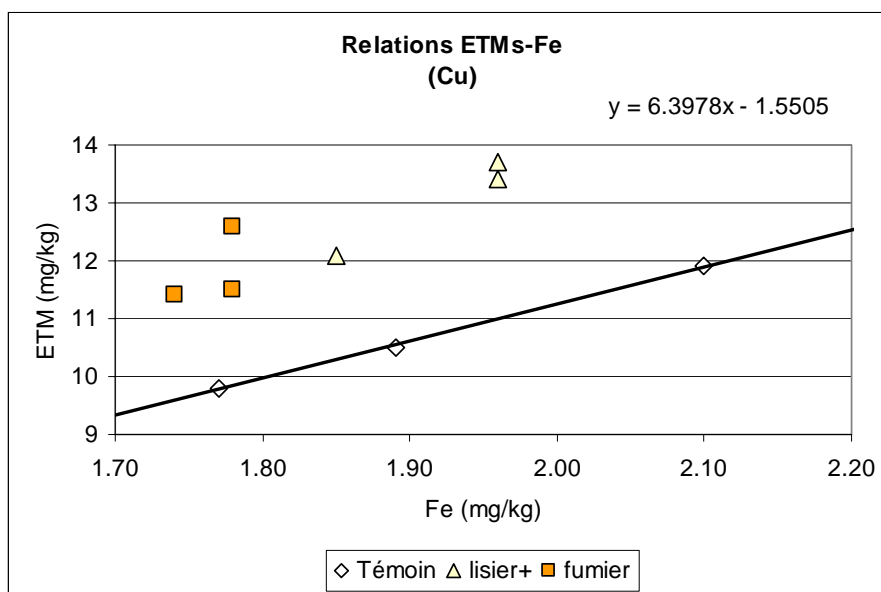


Figure IV. 4: Relations entre les teneurs en Cu et en Fe différenciées par type de traitement. La ligne blanche correspond à la droite de régression relative aux placettes sans apports.

### 7.2.2 Agriculture biologique

Dans le cadre de l'établissement d'un référentiel sur l'état organique des terres en Région limoneuse (BOCK *et al.*, 1993), des échantillons ont été prélevés en 1991 dans une exploitation agricole pratiquant l'agrobiologie près de Waremme.

Les modalités agricoles ont été présentées par MATHIEU *et al.* (1993). Elles sont d'importance secondaire dans le cadre de cet exercice. Huit échantillons ont été prélevés dans quatre parcelles différenciées principalement par l'âge de la conversion à l'agrobiologie : 15 ans (= parcelle "luzerne"), 7 ans ("Pomme de terre"), 5 ans ("froment") et une prairie permanente. Dans chaque parcelle un échantillon a été prélevé en position de plateau (Aba) et un dans une dépression (Abp).

Les résultats des caractérisations de base et des déterminations des teneurs totales en Fe, Cu et Zn figurent au tableau IV.20. On notera que

les facteurs de différenciation principaux pour les variables "explicatives" sont les teneurs en argile entre Aba et Abp, donc au sein d'une même parcelle, et les teneurs en COT entre parcelles.

**Tableau IV. 1: Analyses de bases (MATHIEU *et al*, 1993) et teneurs totales en Fe, Cu et Zn dans les parcelles d'agrobiologie.**

Parcelle	Sol	Argile	pH <sub>H2O</sub>	pH <sub>KCl</sub>	COT	Fe	Cu	Zn
		(%)			(%)	(g/100g)	(mg/kg)	
Prairie	Aba	17.9	7.4	7.0	2.0	2.28	18.8	109.4
	Abp	16.1	7.2	6.8	2.0	1.96	13.9	72.4
Luzerne	Aba	18.5	7.1	6.5	1.7	2.27	17.6	89.3
	Abp	11.4	7.3	6.9	1.4	1.56	14.7	73.6
P. de terre	Aba	20.3	7.4	7.0	1.4	2.21	15.5	70.2
	Abp	15.0	6.7	5.7	1.4	1.77	14.2	68.7
Froment	Aba	21.9	7.4	6.7	1.2	2.47	13.6	71.0
	Abp	14.7	7.2	6.2	1.0	1.72	14.8	64.8

En première approche, les niveaux de teneurs en Cu et surtout en Zn sont nettement plus élevés que les teneurs moyennes régionales (tableau IV.15) et l'on pourrait conclure que la pratique de l'agrobiologie engendre une accumulation supérieure à la moyenne en Cu et en Zn dans l'horizon labouré.

Par contre, si l'on se souvient que c'est toute la partie orientale de la zone d'étude, dont fait partie le secteur de Waremme, qui présente des niveaux de teneurs plus élevés en ces éléments, on peut constater (figure IV.35) que les teneurs en Zn dans les parcelles agrobiologiques ne sont pas supérieures à la moyenne calculée pour le secteur de Waremme.

*Cet exemple illustre bien la nécessité de considérer à titre de référence des moyennes locales plutôt que moyennes régionales et accentue de ce fait le besoin de définition géographique de sous-régions spécifiques, quelles que soient les causes de ces spécificités.*

Pour l'anecdote, les figures IV.35 et IV.36 illustrent l'importance respective des facteurs "argile" et "matière organique" dans le déterminisme des teneurs en Zn. La granulométrie semble jouer un rôle beaucoup moins important que la teneur en matière organique. Toutefois, la combinaison de ces deux facteurs n'exprime pas complètement la variabilité des teneurs en ETMs observée entre les différents échantillons.

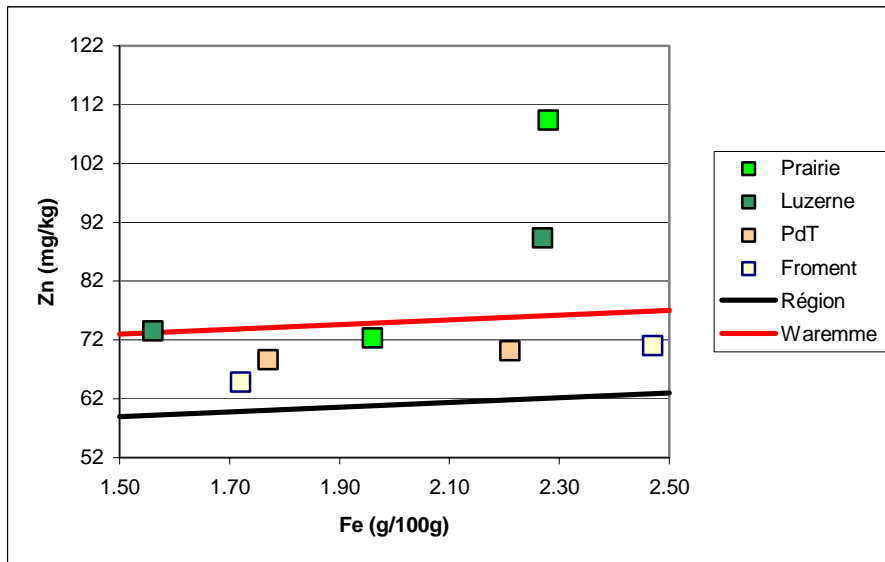


Figure IV. 5: Relations entre les teneurs en Zn et en Fe différenciées par parcelle agrobiologique. La ligne blanche correspond aux teneurs attendues à l'échelle régionale, la ligne rouge à l'échelle du secteur de Waremme.

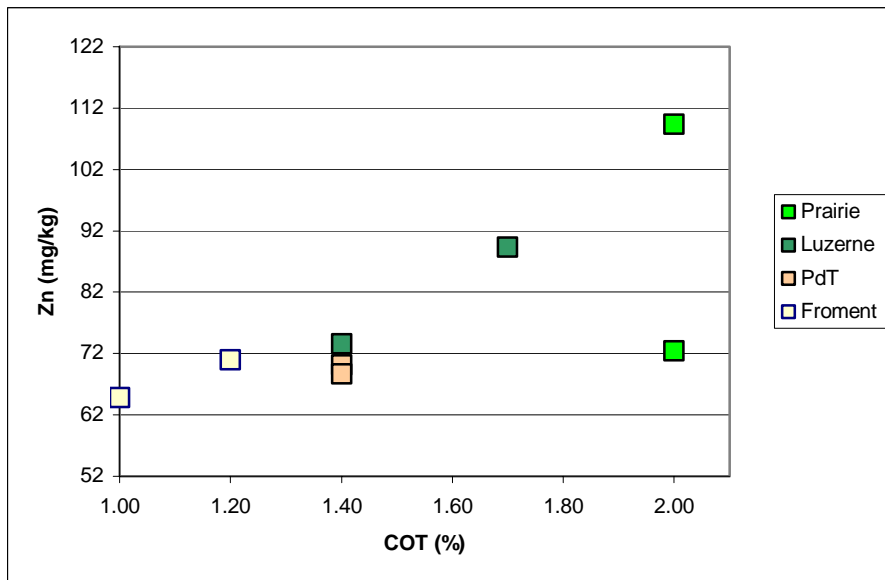


Figure IV. 6: Relations entre les teneurs en Zn et en COT différenciées par parcelle agrobiologique.

### 7.2.3 Bilan de 10 années d'irrigation avec des eaux résiduaires d'une industrie agro-alimentaire (Waremme)

Toujours dans le secteur de Waremme, une industrie agro-alimentaire a mis en place un système de valorisation de ses eaux résiduaires à travers l'irrigation sur des parcelles cultivées. Le secteur de Waremme a fait l'objet d'une caractérisation en 1992 au tout début des irrigations (MASSART, 1993).

En 2002, soit 10 ans après l'installation du projet, quelques parcelles ont fait l'objet de nouveaux prélèvements afin de vérifier si la valorisation agricole se double d'effets sur les teneurs en ETMs.

Sept sites dans quatre parcelles ont été revisités (4 Aba et 3 Abp). Les teneurs totales des échantillons de 1992 et 2002 ont toutes été mesurées en 2002; les biais analytiques sont dès lors minimisés. Par contre, la précision du positionnement géographique des sites en 2002 par rapport à ceux de 1992 est inférieure à 50m mais ne peut être garantie sous les 25m. Pour ces gammes d'échelle, cela signifie que les paires de points qui vont faire l'objet des comparaisons présentent une variabilité potentielle naturelle estimée par la semi-variance, soit respectivement 2.28 et 21.82 [mg/kg]<sup>2</sup> pour Cu et Zn, *i.e.* des variabilités environ 3 fois plus élevées que la variabilité opératoire.

Classiquement en statistiques (DAGNELIE, 1975), ce type d'évaluation peut être réalisé à partir d'un test d'égalité des moyennes, avec des échantillons associés par paires. La variabilité à l'échelle décimétrique est potentiellement un facteur de réduction de la puissance des tests statistiques.

Les différences entre les teneurs en Cu mesurées sur les deux lots d'échantillons sont représentées à la figure IV.37. On peut remarquer que par rapport à la ligne rouge, qui symbolise la stricte égalité entre les deux jeux de données, toutes les mesures effectuées sur les données "2002" sont supérieures aux "1992", sauf une. La première impression à la vue de cette figure est que l'irrigation provoque au bout de 10 ans une accumulation de Cu indéniable.

Plutôt que de soustraire directement les teneurs, il est plus juste de tenir compte des différences de teneurs en Fe entre les échantillons d'une même paire. Nous avons dès lors représenté les teneurs en Cu des échantillons des deux jeux de données par rapport aux teneurs en Fe à la figure IV.38. Le constat d'accumulation par l'irrigation doit être nuancé car force est de constater que, par rapport aux teneurs en Fe, il n'y a plus que quatre échantillons du groupe 2002 qui présentent des

signes d'accumulation, et parmi eux, l'un présentait déjà des teneurs élevées en 1992.

*A la lumière des relations entre Cu et Fe, il est donc préférable de rester réservé quant à la conclusion d'un éventuel impact de l'irrigation par des eaux usées sur les teneurs en Cu et de préconiser un complément d'investigation pour régler la question.*

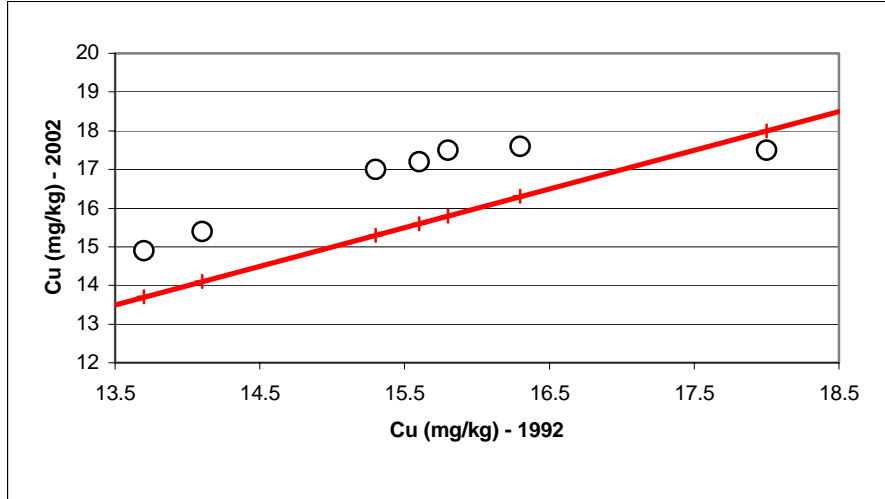


Figure IV. 7: Relation entre les teneurs en Cu (mg/kg) dans les données 2002 et 1992. La ligne rouge symbolise l'égalité entre les données.

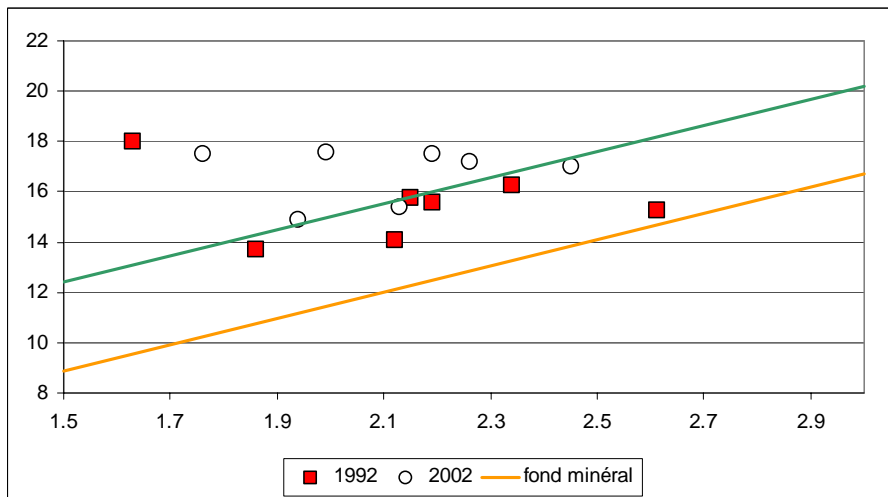


Figure IV. 8: Relations Cu-Fe différenciées par jeu de données. La ligne orange symbolise le fond modélisé moyen à l'échelle régionale; la ligne verte correspond à la limite supérieure (à 95%) du même fond modélisé.

#### 7.2.4 Conclusions

Les quelques exemples qui précèdent illustrent le danger d'une simplification des références en matière de teneur en ETMs. Leur variabilité naturelle dans les sols doit en effet inciter à la prudence tant pour la définition de seuils de "normalité" que pour des comparaisons de différents modes de gestion des intrants agricoles.

Il doit être clair que plus on dispose d'information, descriptive, corrélative ou hiérarchisante, à-côté de la mesure, plus finement celle-ci pourra être interprétée. Un référentiel bâti uniquement sur une population de teneurs mesurées de la variable considérée sera donc d'autant moins puissant que la population-source des échantillons sur lesquels les teneurs sont mesurées est hétérogène. En simplifiant légèrement, cela signifie que la portée d'un tel référentiel dépend de l'échelle spatiale considérée. Au niveau local, une teneur moyenne, un quantile peuvent parfois s'avérer suffisant. A une échelle régionale, les intervalles de confiance s'allongent et le pouvoir discriminant du référentiel diminue d'autant.





## **Conclusions et perspectives**

## **Objectifs et démarche**

Les sols cultivés sont par la force des choses anthropisés. L'horizon labouré, réceptacle d'intrants divers désirés ou non, est au coeur même du cycle de nombreux éléments; il est le siège de processus capitaux en termes agricoles et environnementaux.

Les éléments traces métalliques suscitent des inquiétudes antagonistes, parfois sous le couvert de pseudonymes. Certains sont indispensables pour le règne végétal et/ou animal à faible dose. La plupart peuvent toutefois être à l'origine de toxicités. Il semble que l'ambiance physico-chimique des sols agricoles soit généralement peu propice aux migrations des ETMs vers des compartiments environnementalement sensibles et les différents flux actuels génèreraient une accumulation plus ou moins lente des ETMs dans l'horizon labouré.

Dans ce contexte, la distinction des apports naturels et anthropiques est importante pour (i) comprendre le fonctionnement des ETMs dans les sols, (ii) définir des bases d'évaluation de pratiques agricoles, de détection de contaminations ou de suivi à long terme de teneurs régionales.

Les objectifs de ce travail étaient donc de contribuer (i) à une réflexion méthodologique pour la définition d'un référentiel-ETMs pour les sols agricoles et (ii) à une meilleure connaissance de l'état des sols et de leur degré d'anthropisation. Une démarche méthodologique a dès lors été établie et mise en oeuvre autour de la caractérisation du déterminisme spatial naturel des teneurs en ETMs et de l'évaluation du degré d'anthropisation actuel des sols agricoles. Une zone d'étude en Région limoneuse belge a été définie.

## **Résultats**

La première phase, réalisée en trois étapes, concernait l'étude des matériaux parentaux.

La majorité des sols de la zone d'étude sont issus de loess. Toutefois, localement, le matériau parental peut être constitué par une formation pré-quadernaire, dont les lithologies les plus représentatives sont les shales, les grès, les calcaires pour les roches cohérentes et les argiles et les sables pour les roches meubles.

Des références ont donc d'abord été acquises ou ordonnées pour situer les niveaux de teneurs dans les limons par rapport aux autres

lithologies. Cette étape a en outre permis d'établir des signatures élémentaires pour les différentes familles lithologiques.

Les limons quaternaires ont ensuite été étudiés à partir de coupes profondes. L'étude de la coupe de Tongrinne a mis en évidence une variabilité significative des teneurs en éléments, résultant à la fois de processus pédogénétiques, anciens principalement, et de nuances de composition minéralogique selon l'âge des matériaux. L'importance des teneurs en argile, ainsi que Fe et Al qui y sont fortement corrélés, en tant que facteur "explicatif" des teneurs en ETMs dans les loess a été montrée. La représentativité de la coupe de Tongrinne par rapport aux teneurs dans les loess a été confirmée par l'étude corrélative de trois autres coupes profondes.

L'analyse géographique d'horizons C de loess a permis de conclure à une relative homogénéité, à une absence de continuité spatiale et à l'actualité du caractère explicatif majeur des teneurs en argile et en oxydes d'Al, Fe et Mn.

La deuxième phase du travail avait pour objet les différenciations d'ordre pédogénétique en volumes de sols. Elle comprend deux approches complémentaires.

Au cours de l'approche "*solum*", les relations entre ETMs et facteurs "explicatifs" ont été confirmées. Différents constats ont été réalisés. Certains éléments (Pb en forêt, Zn et Cu sous culture) s'accumulent dans les horizons de surface. La mise en culture entraîne une homogénéisation des teneurs en surface et une resaturation du complexe d'échange. La présence de caractères rédoxymorphes ne se double pas d'une différenciation chimique pour les "*solums* limoneux". Et enfin, il apparaît une variabilité spatiale entre sols de même typologie conditionnée par des facteurs aléatoires locaux.

L'étude de l'organisation des sols selon le relief a montré une accentuation de la différenciation des teneurs en ETMs entre les différents volumes de sols. La différenciation principale pour les sols de "plateaux" concerne les sols à horizon BT d'une part et les sols sur colluvions d'autre part. Pour les sols "de versants", la morphogenèse est responsable de l'occurrence de nombreux sols portant la marque d'un substrat dans un ou plusieurs de leurs horizons. Pour la zone étudiée, nous avons toutefois constaté que les sols de versants à caractère de "limon sur substrat" pouvaient être considérés comme des sols "limoneux" car les teneurs en ETMs y suivent les mêmes lois pédo-

géochimiques.

Des gammes de teneurs représentatives des horizons principaux de sols "limoneux" cultivés ont été établies. Elles sont très proches de celles du Référentiel-ETM du RPG Nord-Pas-de-Calais, et traduisent un niveau de contamination relativement faible.

La dernière phase dans la démarche visait la définition d'un référentiel spatialisé pour l'horizon labouré, avec pour double perspective la détection de teneurs aberrantes et la prédiction spatiale de teneurs "normales".

Une comparaison de modèles d'estimation des teneurs du fond pédogéochimique minéral par régressions multiple a d'abord été effectuée. Celle-ci a montré l'intérêt de modèles simples basés sur des régressions avec l'argile ou le fer total.

L'approche d'un référentiel au niveau régional montre que la pertinence de celui-ci en tant que base de détection des contaminations locales sera d'autant plus affirmée qu'il prendra en considération un certain nombre d'informations ancillaires. Celles-ci permettant de réduire les intervalles de confiance autour des estimations. Il a en outre été montré l'importance de la reconnaissance de spécificités propres à des "Petites Régions Naturelles" au sein de la zone d'étude.

Les différentes approches cartographiques ont permis d'estimer la variabilité des teneurs en ETMs à plusieurs niveaux d'échelle spatiale. Elles ont également montré l'inadéquation des techniques classiques de géostatistique pour réaliser une cartographie de détail sur une large zone à un coût raisonnable, en raison de l'importance de la variabilité à courte distance. Par contre, la carte des sols de la Belgique peut servir de base à une cartographie géochimique, moyennant un travail de révision de la légende.

## **Perspectives**

Beaucoup d'efforts et de temps ont été consacrés pour la caractérisation d'une Région agricole pourtant réputée homogène. Néanmoins, beaucoup de choses restent à faire encore, car si ce travail apporte un certain nombre de réponses, il a également permis de soulever quelques questions complémentaires.

En premier lieu, l'exploitation des données acquises dans le cadre de ce travail devrait faire l'objet de davantage d'investigations, principalement dans le domaine de l'intégration cartographique des différentes sources de données. Il y a des voies de recherche en matière de formalisme topographique ou de géostatistiques avancées. Des initiatives d'intégration multiple de jeux de données diversifiés existent. Il y a probablement des synergies à rechercher avec d'autres acteurs de la Recherche pour toujours mieux définir les potentialités et les limites des approches intégratrices mais également pour mieux se définir par rapport aux autres.

Ensuite, il reste tout un travail d'identification de spécificités sous-régionales, de caractérisation de Petites Région Naturelles au sein de la Région limoneuse et à fortiori en Région wallonne. La méthodologie devrait alors être allégée pour aller directement au but poursuivi. Ce travail est porteur d'enseignements à cet égard. L'estimation de la variabilité spatiale par exemple doit pouvoir servir de guide pour la planification d'un échantillonnage destiné à une cartographie. Il y a toutefois lieu de ne pas être trop exigeant par rapport au niveau de détail à attendre d'une cartographie des teneurs naturelles en ETMs.

Parallèlement à une meilleure définition des niveaux de teneurs naturelles, les activités de recherche devraient progressivement s'orienter vers la caractérisation d'anthropisations en milieu contrôlé (expérimentations de plein champ ou en laboratoire) et de contaminations avérées.

Nous citerons également les aspects de spéciation, de mobilité et de réponse-plante qui sont loin d'avoir livré tous leurs "secrets" .

## Références bibliographiques

ADRIAENSEN W., BOUCKAERT J., VAN HERREWEGHE S., BOUCHET A., SWENNEN R. [2000]. Soil geochemistry in and around the town of Marche-en-famenne (Wallonia, S-Belgium). *Geologica Belgica* 3/3-4: 309-330.

AFNOR [1999]. *Qualité des sols*. Vol. 1, 566p.

ALEXANDRE J., THOREZ J. [1995]. Au Secondaire et au Tertiaire, L'Ardenne tropicale. L'altération des roches et les climats anciens. *In L'Ardenne. Essai de Géographie physique*. A. DEMOULIN Ed. Sci. Dpt. Géographie physique et Quaternaire, ULg, 238p.

ALLOWAY B.J. [1990]. *Heavy metals in soils*. Blackie Academic & Professional. Glasgow. 339p.

ALLOWAY [1997]. The mobilisation of trace elements in soils. *In* PROST (Ed.) *Contaminated Soils*. Proceedings of the third International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements. Paris, 15-19may 1995.

ANDERSEN M.K., RAULUND-RASMUSSEN K., HANSEN H.C.B., STROBEL B.W. [2002]. Distribution and fractionation of heavy metals in pairs of arable and afforested soils in Denmark. *Eur. J. of Soil Sci.* 53 : 491-502.

ANDERSSON A. [1992] *Trace elements in agricultural soils – fluxes, balances and background values* – Swedish Environmental Protection Agency, report 4077.

ANDERSSON A. [1979] On the distribution of heavy metals as compared to some other elements between grain size fractions in soils. *Swedish J. agric. Res.* 9, 7-13.

ANDERSSON A. [1977]. The distribution of heavy metals in soils and soil material as influenced by the ionic radius. *Swedish J. of Agric. Res.*, 7: 79-83.

ARROUAYS D., VION I., JOLIVET Cl., GUYON D., COUTURIER A., WILBERT J. [1997]. Variabilité intraparcellaire de quelques propriétés des sols sableux des Landes de Gascogne (France). Conséquences sur la stratégie d'échantillonnage agronomique. *Etude et Gestion des Sols*, 4, 1: 5-16.

Références bibliographiques

ATLAS DE BELGIQUE [1970]. *Géologie et Lithologie*.

BAIZE D. [1997]. *Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France)*. INRA, Paris, 408 p.

BAIZE D. [1994]. Teneurs totales en "métaux lourds" dans les sols français. Premiers résultats du programme ASPITET. *Le courrier de l'Environnement de l'INRA*, n° 22: 37-46.

BAIZE D. [s.d.]. Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols français. URL: <http://etm.orleans.inra.fr/webetmbi.htm>  
Dernière visite 17/05/2003.

BAIZE D., CHRETIEN J. [1994]. Les couvertures pédologiques de la plate-forme sinémurienne en Bourgogne. Particularités morphologiques et pédo-géochimiques. *Etude et Gestion des Sols* 2: 7-27.

BAIZE D., DESLAIS W., GAIFFE M. [1999]. Anomalies naturelles en Cadmium dans les sols de France. *Etude et Gestion des Sols* 6 (2): 85-104.

BAIZE D., PAQUEREAU H. [1997]. Teneurs totales en éléments traces dans les sols agricoles de Seine-et-Marne. *Etude et Gestion des Sols* 4 (2): 77-94.

BAIZE D., RODDIER S. [2002]. Approche typologique d'une cartographie pédogéochimique. Exemple de l'Avallonnais. In BAIZE et TERCE coord. Sci. *Les éléments traces métalliques dans les sols. Approches fonctionnelles et spatiales*. INRA, 565p.

BAIZE D., SALPETEUR I., BIDEAU L., CORNU S., ITARD Y., KING D., MOUVET C., SALVADOR-BLANES S. [2002]. Fonds pédogéochimiques naturels - concepts et spatialisation. *Comm. orale. Forum Qualité des Sols*, Paris, 15-16mai 2002.

BAQUET V., LEJEUNE J.-L. [1982]. *Etude de sols à pseudogley dans le temps et l'espace*. TFE FUSAGx: 323p.

BRAGATO G. et PRIMAVERA F. [1998]. Manuring and soil type influence on spatial variation of soil organic matter properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 1313-1319.

BENAMGHAR A. [2002]. Etude statistique et géostatistique multivariée de l'inventaire géochimique des ressources métallifères de la Wallonie. Application à l'estimation et à l'interprétation des cartes de risques de pollution en métaux lourds. Thèse de doctorat. UCL,

#### Références bibliographiques

Louvain-la-Neuve, 333p.

BISHOP T.F.A., McBRATNEY A.B. [2001]. A comparison of prediction methods for the creation of field-extent soil property maps. *Geoderma* 103: 149-160.

BIANCHINI G., LAVIANO R., LOVO S., VACCARO C. [2002]. Chemical-mineralogical characterisation of clay sediments around Ferrara (Italy): a tool for an environmental analysis. *App. Clay Sci.*, 21, 165-176.

BIERKENS M.F.P., BURROUGH P.A. [1993]. The indicator approach to categorical soil data. I. Theory. *Journal of Soil Science*, 44: 361-368.

BOCK L. [1996]. Le sol dans tous ses états. Arguments de pédologie opérationnelle. Communication au séminaire "Echantillonnage et Environnement". 26-27/02/1996. Fondation Universitaire Luxembourgeoise. Arlon. Belgique.

BOCK L. [1994]. Analyses de sols et gestion de l'espace. Plaidoyer pour leur cadrage géomorphopédologique dans les projets, expertises et services de conseil. *Etude et Gestion des Sols*, 1: 23-33.

BOCK L. [1984]. *L'intégration chronospatiale des accumulations calcaires. Approche morphopédologique et géochimique dans un paysage semi-aride de l'Atlas tellien (Algérie)*. Thèse de doctorat FUSAGx, Gembloux.

BOCK L., LAROCHE J., GENOT V., COLINET G., LACROIX D. [2002]. Intérêt des cartes pédologiques pour la caractérisation géochimique des sols. Cas d'une parcelle en Condroz. In BAIZE et TERCE coord. *Sci. Les éléments traces métalliques dans les sols. Approches fonctionnelles et spatiales*. INRA, 565p.

BOGAERT P. [2000]. *Fondements de géostatistiques*. Notes de cours. Université Catholique de Louvain-la-Neuve.

BOGAERT P., D'OR D. [2002]. Estimating soil properties from thematic soil maps: the Bayesian Maximum Entropy approach. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66 (5): 1492-1500.

BOURG A.C.M., 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: 229-244.

## Références bibliographiques



BRADY N.C., WEIL R.R. [1996]. *The nature and properties of soils*. Prentice Hal Int. Eds. 740p.

BRAHY V., DECKERS J., DELVAUX B. [2000a]. Estimation of soil weathering stage and acid neutralizing capacity in a toposequence Luvisol-Cambisol on loess under deciduous forest in Belgium. *Eur. J. Soil Sci.* 51, 1-13.

BRAHY V., TITEUX H., ISERENTANT A., DELVAUX B. [2000b]. Surface podzolization in Cambisol under deciduous forest in the Belgian loess belt. *Eur. J. Soil Sci.* 51, 15-26.

BRAHY V. [2000]. *Fonctionnement de sols forestiers acides dérivés de limon loessique au sein d'une toposéquence Luvisol-Cambisol*. Thèse de doctorat, UCL Louvain-la-Neuve, 183p.

BREJDA J.J., MOORMAN T.B., SMITH J.L., KARLEN D.L., ALLAN D. L., DAO T.H. [2000]. Distribution and variability of surface soil properties at a regional scale. *Soil Sci. Soc. Am. J.*: 64: 974-982.

BROHEE J.C., MARCOEN J.M., NAUD J., AGNEESSENS R., LAROCHE J., CHARLIER G., ROMNEE J.M., DARDENNE P., CRELOT I., DELCARTE E. [2002a]. Validation de méthodes performantes d'analyse globale des éléments chimiques (dont la XRF: Spectrométrie de Fluorescence X), appliquées aux terres cultivées et aux intrants valorisables en agriculture. Convention Ministère de la Région Wallonne (DGA) -FUSAGx. Rapport final. 104p. (+ 1 volume annexé).

BROHEE J.C., MARCOEN J.M., NAUD J., AGNEESSENS R., DELCARTE E. [2002b]. Validation de méthodes performantes d'analyse globale des éléments chimiques (dont la XRF: Spectrométrie de Fluorescence X), appliquées aux terres cultivées et aux intrants valorisables en agriculture. Etat d'avancement des travaux pour la période 26.07.01 au 26.12.01 (Val XRF - rapport 4) -Réunion du Comité d'accompagnement du 07.02.02. Convention Ministère de la Région Wallonne. 28p.

BRULARD T. [1962]. *La Hesbaye. Etude géographique d'Economie Rurale*. Bibliothèque de L'Institut de Géographie Paul Michotte. Université catholique de Louvain, Série B, fasc. 10. Librairie Universitaire Uystpruyst. Louvain: 305p.

BURROUGH P.A. [1986]. *Principles of Geographical Information*

Références bibliographiques

- Systems for land resources assesment*. Clarendon Press Oxford. 193p.
- CAMOBRECO V.J., RICHARDS B.K., STEENHUIS T.S., PEVERLY J.H., McBRIDE M.B.[1996]. Movement of heavy metals through undisturbed and homogenized soil columns. *Soil Science*, 161(11): 740-750.
- CAMPY M., MACAIRE J.J. [1989]. *Géologie des formations superficielles. Géodynamique, faciès, utilisation*. Masson. Paris, 433p.
- CARLETTI I. [2000]. *Analyse des ressources patrimoniales d'un territoire pour l'identification de circuits thématiques. Application à la Vallée de l'Orneau*. TFE FUSAGx, 753p. + annexes.
- CELARDIN [2002]. Approche semi-quantitative de la mobilité. In BAIZE et TERCE coord. Sci. *Les éléments traces métalliques dans les sols. Approches fonctionnelles et spatiales*.INRA, 565p.
- CHALINE [1985].*Histoire de l'homme et des climats au Quaternaire*. Doin ed. Paris, 365p.
- CHAIGNON [2001]. *Biodisponibilité du cuivre dans la rhizosphère de différentes plantes cultivées. Cas de sols viticoles contaminés par des fongicides*. Thèse de doctorat INRA - Université Aix-MarseilleIII, 183p.
- CHAMPION F., GUILITTE P. [1978]. *Contribution à l'étude de sols hydromorphes développés sur loess en Hesbaye Gembloutoise*. TFE FUSAGx: 191p.
- CHAPLOT V., WALTER C., CURMI P., HOLLIER-LAROUSSE A. [2000]. The use of auxiliary geophysical data to improve a soil-landscape model. *Soil Science* 165 (12): 961-970.
- CHARLATCHKA R., CAMBIER P., BOURGEOIS S. [1997]. Mobilization of trace metals in contaminated soils under anaerobic conditions. In PROST (Ed.) *Contaminated Soils*. Proceedings of the third International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements. Paris, 15-19may 1995.
- COLINET G. [1999]. *Contribution à l'étude du sol de Gembloux*. TFE DEA, FUSAGx, Gembloux. 69p.
- COLLECTIF [2003]. *Mobilité et transfert racinaire des éléments en traces:influence des micro-organismes du sol*. TEC&DOC. Paris, 282p.
- COLLECTIF [1998a]. *Contamination des sols par les éléments en*

#### Références bibliographiques

*traces: les risques et leur gestion*. Rapport de l'Académie des Sciences, 42. TEC&DOC. Paris, 440p.

COLLECTIF [1998b]. *Risques sanitaires liés aux boues d'épuration des eaux urbaines*. Direction Générale de la Santé. TEC&DOC. Paris, 106p.

CORDIER L. [1999]. *Les éléments en traces dans les limons du Nord Pas-de-Calais (France)*. Contribution à l'établissement d'un référentiel pédo-géochimique. TFE, FUSAGx, Gembloux, Belgium.

CORNELIS C., GEUZENS P. [1993]. *Actergrondgehalten van een aantal anorganische en organische verontreinigingen in vlamse bodems – voorstel voor referentiewaarden*. Rapport MIE/DI/9327, VITO, Afdeling Leefmilieu, 42p.

COTTENIE A., VERLOO M., KIEKENS L. [1974]. La situation des sols belges en éléments traces. *In* Compte rendu de la Semaine d'étude Sol et fertilisation, 3-7 sept. 1973, *Bulletin des Recherches Agronomiques de Gembloux*: 180-190.

DAGNELIE P. [1986]. *Analyse statistique à plusieurs variables*. Presses agronomiques de Gembloux, 362p.

DAGNELIE P. [1975]. *Théorie et méthodes statistiques*. Applications agronomiques. Tome II. Presses agronomiques de Gembloux, 463p.

DAGNELIE P. [1973]. *Théorie et méthodes statistiques*. Applications agronomiques. Tome I. Presses agronomiques de Gembloux, 378p.

DELECOUR F. [1968]. Distribution des oligo-éléments Cuivre, Zinc et Molybdène dans les Sols Forestiers de l'Ardenne Belge. I. Formes Totales. *Pédologie* 18 (1): 43-62.

DELECOUR F., KINDERMANS M. [1980]. *Manuel de description des sols*. Service de la Science du Sol, FUSAGx, Gembloux.

DELCARTE E. [1988]. *Contribution à la caractérisation analytique de contaminants métalliques des écosystèmes terrestres*. PhD thesis, FUSAGx, 277p.

DE MATOS A.T., FONTES M.P.F., DA COSTA L.M., MARTINEZ M.A. [2001]. Mobility of heavy metals as related to soil chemical and mineralogical characteristics of Brazilian soils. *Environmental Pollution*, 111, 429-435.

DEMOUGEOT-RENARD H., de FOUQUET C. [2001]. La

#### Références bibliographiques

géostatistique au service de l'environnement. 1. Un atout pour le diagnostic des friches industrielles. *Environnement & Technique* 208, 40-44.

DEMOULIN A. [1993]. L'origine de l'axe Sambre-Meuse. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, 116 (1), 29-41.

DE TEMMERMAN L.O., ISTAS J.R., HOENIG M., DUPIRE S., LEDENT G., VAN ELSSEN Y., BAETEN H., DE MEYER A. [1982]. Définition des teneurs "normales" des éléments en trace de certains sols belges en tant que critère de base pour la détection et l'interprétation de la pollution des sols en général. *Revue de l'Agriculture* (2) 35: 1915-1944.

DGRNE [1994]. Le sol. In *Etat de l'Environnement Wallon* (EEW 94), Dachelet A. éd., et Hallet C. pour la partie, Min. de la Rég. Wall. 467 p.

DGRNE [2000]. *Etat de l'Environnement Wallon*.

DGRNE [2001a]. *Etat de l'Environnement Wallon*.

DGRNE [2001b]. *Inventaire de la qualité des sols en Région wallonne*. Première édition. Juin 2001. XXpp. + annexes.

D'OR D., BOGAERT P. [2003]. Continuous-valued map reconstruction with the Bayesian Maximum Entropy. *Geoderma*, 112: 169-178.

DUDAL R. [1953]. Etude morphologique et génétique d'une séquence de sols sur limon loessique. *Agricultura* 1: 119-163.

DUDKA [1992]. Factor analysis of total element concentrations in surface soils of Poland. *The Science of the Total Environment* 121: 39-52

DUDKA, MARKERT [1992]. Baseline corrections of As, Ba, Be, Li, Nb, Sr, and V in surface soils of Poland. *The Science of the Total Environment* 122: 279-290

DUDKOWSKI A. [2000]. L'épandage agricole des boues de stations d'épuration d'eaux usées urbaines. *Le Courrier de l'Environnement de l'INRA* 41, 134-135 (mis en ligne sur <http://www.inra.fr/dpenv/lesboues.htm>.)

EMMANUEL , EREL [2002]. Implications from concentrations and isotopic data for Pb partitioning processes in soils. *Geochem. and Cosmochim. Acta* 66 (14): 2517-2527.

## Références bibliographiques

- ERIKSSON J [1990]: A field study on factors influencing Cd levels in soils and in grains of oats and winter wheat. - *Water, Air and Soil Pollution* 53, 69-81.
- ERIKSSON J, ÖBORN I, JANSSON G & ANDERSSON A [1996] Factors influencing Cd content in crops - Results from Swedish field investigations. *Swedish J. agric. Res.* 26, 125-133.
- FAGERIA N.K., BALIGAR V.C., CLARK R.B. [2002]. Micronutrients in crop production. *Adv. in Agronomy* 77, 185-268.
- FAO [1998]. World Reference Base for Soil Resources. *World Soil Resources Reports* 84, Rome: 88p.
- FAVROT J.C., ARROUAYS D., BORNAND M., GIRARD M.C., HARDY R. [1994]. Informatisation et spatialisation de la ressource sol: le programme «Inventaire, Gestion et conservation des sols». *Cahiers Agricultures*; 3: 237-46.
- FORD R.G., SCHEINOST A.C., SPARKS D.L. [2001]. Frontiers in metal sorption/precipitation mechanisms on soil mineral surfaces. *Adv. in Agronomy*, 74, 41-62.
- FOURNEAU R. [1985]. Les régions géomorphologiques de Wallonie. *G.E.O.*, 18 (2), 3-35.
- GASCUEL-ODOUX Ch., WALTER C., VOLTZ M. [1993]. Intérêt du couplage des méthodes géostatistiques et de cartographie des sols pour l'estimation spatiale. *Sciences du Sol*, 31 (4): 193-213.
- GASCUEL-ODOUX Ch., GRIMALDI M., VEILLON L. [1991]. Apport de la géostatistique à l'analyse morphologique du sol: cas d'un transect représentatif de la plaine côtière guyanaise. *Sciences du Sol*, 29 (3): 189-209.
- GENOT V. [1999]. *Arguments géomorphopédologiques pour le cadrage de sites, la gestion agronomique et l'évaluation environnementale*. Cas d'études en Condroz. TFE FUSAGx, Gembloux. Belgique
- GIRARD M-C, KING D. [1988]. Un algorithme interactif pour la classification des horizons de la couverture pédologique: DIMITRI. *Sciences du Sol*, 26 (2): 81-102.
- GONG C., DONAHOE R.J. [1997]. An experimental study of heavy metal attenuation and mobility in sandy loam soils. *Applied geochemistry*, 12, 243-254.

#### Références bibliographiques

- GOODY D.C., SHAND P., KINNIBURGH D.G., RIEMSDIJK W.H. [1995]. Field-based partition coefficients for trace elements in soil solutions. *Eur. J. of Soil Science*, 46, 265-285.
- GOOSSENS D. [2000]. The Belgian loess deposits: an overview. In Historical and present-day soil erosion processes in Central Belgium. *Pedologie-Themata* 9, 7-12.
- GOOVAERTS P. [1999]. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. *Geoderma* 89: 1-45.
- GOOVAERTS P., JOURNEL A.G. [1995]. Integrating soil map information in modelling the spatial variation of continuous soil properties. *Eur. Journal of Soil Science*, 46: 397-414.
- GOOVAERTS P., WEBSTER R. [1994]. Scale-dependent correlation between topsoil copper and cobalt concentrations in Scotland. *Eur. J. of Soil Sci.* 45, 79-95.
- GUADALIX M.E., PARDO M.T. [1995]. Zinc sorption by acid tropical soils as affected by cultivation. *Eur. J. of Soil Science* 46, 317-322.
- GULLENTOPS F, BOGEMANS, De MOOR G., PAULISSEN E., PISSART A. [2001]. Quaternary lithostratigraphic units (Belgium). *Geologica Belgica* 4 1/2: 153-164.
- HAESAERTS P., MESTDAGH H., BOSQUET D. [1999]. The sequence of Remicourt (Hebaye, Belgium): new insights on the pedo- and chronostratigraphy of the Rocourt Soil. *Geologica Belgica* 2/3-4: 5-27.
- HAESAERTS P. [1984]. Aspects de l'évolution du paysage et de l'environnement en Belgique au Quaternaire. In CAHEN D. et HAESAERTS P. eds. *Peuples chasseurs de la Belgique préhistorique dans leur cadre naturel*. Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique: 27-40.
- HAN F.X., KINGERY W.L., SELIM H.M., GERARD P.D. [2000]. Accumulation of heavy metals in a long-term poultry waste-amended soil. *Soil Science*, 165, 3, 260-268.
- HARDY M. [2002]. Identification des minéraux porteurs d'ETM dans des sols issus de matériaux limoneux. In BAIZE et TERCE coord. *Sci. Les éléments traces métalliques dans les sols. Approches fonctionnelles et spatiales*. INRA, 565p.

#### Références bibliographiques

- HARDY M., JAMAGNE M., ELSASS F., ROBERT M., CHESNEAU D. [1999]. Mineralogical development of the silt fractions of a podzoluvisol on loess in the Paris Basin (France). *Eur. J. Soil Sci.* 50, 443-456.
- HODGSON J.F., GEERING H.R., NORVELL W.A. [1965]. Micronutrient cation complexes in soil solution: partition between complexed and uncomplexed forms by solvent extraction. *Proc. Soil Sci. Soc. Americ.*, 29, 665-669.
- HOUOT et SCHWARTZ [2002]. Risques de contamination des sols engendrés par le recyclage des déchets. *Comm. orale. Forum Qualité des Sols*, Paris 15-16mai 2002.
- AFES [1995]. *Référentiel pédologique. Principaux sols d'Europe*. INRA, Paris, 222p.
- JAMAGNE M. [1993]. Evolution dans les conceptions de la cartographie des sols. *Pedologie XLIII-1*: 59-115.
- JAMAGNE M. [1973]. *Contribution à l'étude pédogénétique des formations loessiques du Nord de la France*. PhD thesis, FUSAGx. Gembloux.
- JOLIVET C. [2000]. Le carbone organique des sols des Landes de Gascogne. Variabilité spatiale et effets des pratiques sylvicoles et agricoles. Thèse, Université de Bourgogne: 313p.
- JUSTE C. [1988]. Appréciation de la mobilité et de la biodisponibilité des éléments en traces du sol. *Sciences du Sol*, 26, 2, 103-112.
- JUVIGNE E. [1977]. Zone de dispersion et âge des poussières volcaniques du tuf de Rocourt. *Ann. Soc. Géol. de Belg.* 100, 13-22.
- JUVIGNE E. [1976]. La stratigraphie du Quaternaire. *In Géomorphologie de la Belgique. Hommage au Professeur P. MACAR*, Liège, 169-179.
- KHOKHLOVA T.I. [1967]. Content and Distribution of Micro-Elements in the Soils of the Kuznetsk Forest Steppe. *Sov. Soil Sci.* 1: 47-53.
- KING D. [1986]. *Modélisation cartographique du comportement des sols basée sur l'étude de la mise en valeur du "Marais de Rochefort"*. PhD thesis, INRA Paris, 243p.
- KLEBER A., MAILÄNDER R., ZECH W. [1998]. Stratigraphic

#### Références bibliographiques

approach to alteration in mineral soils: the heavy metal example. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 1647-1650.

KUNTZE H., FLEIGE H., HINDEL R., WIPPERMANN T., FILIPINSKI M., GRUPE M., PLUQUET E. [1991]. Empfindlichkeit der Böden gegenüber geogenen und anthropogenen Gehalten an Schwermetallen - Empfehlungen für die Praxis. In ROSENKRANZ D., BACHMAN G., KÖNIG W., EINSELE G. (eds). *Bödenschutz - Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser*. Kapitel 1530, 86 S. Erich Schmidt Verlag, Berlin.

LAMBERTY E. [1990]. *Traficabilité en milieux forestier et agricole comparés*. TFE FUSAGx: 103p. + annexes.

LANGOHR R. [2001]. L'anthropisation du paysage pédologique agricole de la Belgique depuis le Néolithique ancien. Apports de l'archéopédologie. *Etude et Gestion des Sols* 8 (2): 103-118.

LANGOHR R., SANDERS J. [1985]. The belgian loess belt in the last 20,000 years: evolution of soils and relief in the Zoniën forest. In BOARDMAN J. (ed.) *Soils and Quaternary landscape evolution*. John Wiley & sons: 354-366.

LANGOHR R., SANDERS J. [1984]. Apport de la pédologie à la reconstitution du paléoenvironnement en Belgique au quaternaire. In CAHEN D. et HAESAERTS P. eds. *Peuples chasseurs de la Belgique préhistorique dans leur cadre naturel*. Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique, 41-52.

LATRILLE C. [1998]. *Localisation des éléments traces métalliques dans les sols. Application au fonds géochimique naturel*. PhD. INRA - Nancy University.

LECOUTRE [1998]. *Méthodes de statistiques multifactorielles. Analyse en Composantes Principales*. Site: <http://epeire.univ-rouen.fr/stats/ACP>, visité en avril 1999.

LEE B.D., CARTER B.J., BASTA N.T., WEAVER B. [1997]. Factors Influencing Heavy Metal Distribution in Six Oklahoma Benchmark Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 218-223.

LEENHARDT D., VOLTZ M., BORNAND M., WEBSTER R. [1994]. Evaluating soil maps for prediction of soil water properties. *Eur. Journal of Soil Science*, 45: 293-301.

#### Références bibliographiques



LEGROS J.P., MARTIN S., BAIZE D., RIVIERE J.-M., LEPRETRE A. [2002]. Accumulation de cuivre et de zinc dans une parcelle de l'observatoire de la qualité des sols (OQS). In BAIZE et TERCE coord. Sci. *Les éléments traces métalliques dans les sols. Approches fonctionnelles et spatiales*. INRA, 565p.

LEGROS J.P. [1996]. Cartographies des sols. De l'analyse spatiale à la gestion des territoires. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Collection Gérer l'environnement, (10), Lausanne, 321 p.

LI Z., SCHUMAN L.M.[1996]. Heavy metal movement in metal-contaminated soil profiles. *Soil Science* 161 (10), 656-666.

LOZET J., MATHIEU C. [2002]. *Dictionnaire de science du sol*. 4<sup>e</sup> édition. TEC&DOC, Paris, 575p.

MAC BRIDE M.B., RICHARDS B.K., STEENHUIS T., SPIERS G. [1999]. Long-term leaching of trace elements in a heavily sludge-amended silty clay loam soil. *Soil Science* 164 (9): 613-623

MAC BRIDE M.B., RICHARDS B.K., STEENHUIS T., RUSSO J.J., SAUVE S. [1997]. Mobility and solubility of toxic metals and nutrients in soil fifteen years after sludge application. *Soil Science* 162 (7): 487-500.

MAC GRATH [1997]. Behaviour of trace elements in terrestrial ecosystems. In PROST (Ed.) *Contaminated Soils*. Proceedings of the third International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements. Paris, 15-19may 1995.

MAC GRATH, LOVELAND [1992]. *The soil geochemical Atlas of England and Wales*. Glasgow: Blackie Academic & Professionnal. 101p.

MAES E., ISERENTANT A., HERBAUTS J., DELVAUX B. [1999]. Influence of the nature of clay minerals on the fixation of radiocaesium traces in an acid brown earth-podzol weathering sequence. *Eur. J. of Soil Sci.*, 50, 117-125.

MANIL G., DELECOUR F. [1958]. Identification en Belgique de loess typiques anté-rissiens, probablement d'âge Mindel. *Bull. de la Soc. belge de Géol., de Paléontol. et d'Hydrol.* 66: 203-211.

MANIL G. [1960]. Quelques observations sur les loess anciens de Belgique. *Biuletyn Peryglacjalny*, 9, 83-90.

#### Références bibliographiques

- MANIL G. [1952]. Quelques considérations générales sur la stratigraphie quaternaire et la pédogénèse à propos de la description de trois coupes de Loess (Hesbaye Gembloutoise). *Ann. Soc. Géol. de Belg.* 75: 153-165.
- MANIL G. [1949]. Le Quaternaire des environs de Gembloux. La tranchée de Mazy. *Bull. Soc. Belge Géol.* 58: 139-152.
- MARTIN [1998]. Les sources de pollution des sols. In STENGEL P. et GELIN S. coord. *Sol: interface fragile*. INRA. 214p.
- MASSON V. [1986]. *Caractérisation et comparaison de l'évolution du solum dans deux séquences de profils de sols bruns, sous forêt et sous culture, en Région limoneuse de Nivelles (Houtain-le-Mont)*. TFE FUSAGx: 103p.
- MICHELIN J., BOURGEOIS S., WIART J., BERMOND A. [2002]. Bilan dans un sol agricole suite à des apports réguliers depuis 1985. In BAIZE et TERCE coord. *Sci. Les éléments traces métalliques dans les sols. Approches fonctionnelles et spatiales*. INRA, 565p.
- MORERA M.T., ECHEVERRIA J.C., MAZKIARAN C., GARRIDO J.J. [2001]. Isotherms and sequential extraction procedures for evaluating sorption and distribution of heavy metals in soils. *Env. Pollution*, 113, 429-435.
- NAVAS A., MACHIN J. [2002]. Spatial distribution of heavy metals and arsenic in soils of Aragón (northeast Spain): controlling factors and environmental implications. *Applied geochemistry* 17: 961-973.
- NEF J.-L. [1977]. *Contribution à l'étude des sols hydromorphes en Hesbaye Gembloutoise*. TFE FUSAGx: 173p.
- NEUBAUER U., FURRER G., SCHULIN R. [2002]. Heavy metal sorption on soil minerals affected by the siderophore desferrioxamine B: the role of Fe(III) (hydr)oxides and dissolved Fe(III). *Eur. J. of Soil Science*, 53, 45-55.
- NOIRFALISE A. [1988]. Les régions naturelles de la Belgique. *G.E.O.* 23:3-25.
- OERTEL A.C. [1961]. Relation between trace element concentrations in soil and parent material. *J. of Soil Sci.* 12 (1): 119-128.
- PAEPE R., VANHOORNE R. [1976]. The Quaternary of Belgium in its relationship to the stratigraphical legend of the geological Map.

#### Références bibliographiques

*Service Géologique de Belgique*, Mémoire N° 18, 38p.

PAEPE R. [1968]. Les sols fossiles pléistocènes de la Belgique. *Pédologie* 18 (2): 176-188.

PAEPE R. [1966]. Comparative stratigraphy of Würm loess deposits in Belgium and Austria. *Bull. de la Soc. belge de Géol., de Paléontol. et d'Hydrol.* 75 (2): 203-216.

PALM R. [2000]. L'analyse de la variance multivariée et l'analyse canonique discriminante: principes et applications. *Notes stat. Inform.* (Gembloux) 2000/1, 40p.

PECROT A. [1956]. *Etude détaillée des sols de la Hesbaye occidentale. Application à quelque problèmes d'actualités.* Centre de Cartographie des Sols, 295 p.

PEDRO G. [1987]. Géochimie, minéralogie et organisation des sols. Aspects coordonnés des problèmes pédogénétiques. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XXIII, 3: 169-186.

PEDRO G., DELMAS A.B.[1970]. Les principes géochimiques de la distribution des éléments-traces dans les sols. *Ann. agron.* 21 (5): 483-518.

POLLUSOL (BOCK L., BOGAERT P., COLINET G., DELCARTE E., DELVAUX B., DUCARME F., LAROCHE J., MAESEN P., MARCOEN J.M., SONNET P., WIBRIN M-A par ordre alphabétique) [2003]. Convention d'étude Pollusol : Etablissement et cartographie des teneurs 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 ». SONNET P. coord. (SPAQuE-UCL-FUSAGx-BEAGx-CAFX), 125p.

POUQUET J. [1966] *Les sols et la géographie. Initiation géopédologique.* Soc. d'Edition d'Enseignement Supérieur, Paris, 267p.

PRUDENTE D., BAIZE D., DUBOIS J.-P. [2002]. Le cadmium naturel dans une forêt du haut Jura français. *In* BAIZE et TERCE coord. *Sci. Les éléments traces métalliques dans les sols. Approches fonctionnelles et spatiales.* INRA, 565p.

QUEVAUVILLER P. [2001]. *Métrologie en chimie de l'environnement.* Paris: TEC&DOC. 257p.

#### Références bibliographiques

RANDLE K., HARTMANN E.H. [1995]. Applications of the continuous-flow stirred-cell (CFSC) technique: II. the adsorption behaviour of Na, Cs, Sr, Cu, Ni, and Pb on humic acids. *Eur. J. of Soil Science*, 46, 303-315.

REIMANN C., SIEWERS U., TARVAINEN T., BITYUKOVA L., ERIKSSON J., GILUCIS A., GREGORAUSKIENE V., LUKASHEV V., MATINIAN N.N., PASIECZNA A. [2000]. Baltic soil survey: total concentrations of major and selected trace elements in arable soils from 10 countries around Baltic Sea. *The Science of the Total Environment* 257: 155-170.

ROBBEZ-MASSON J.M. [1994]. *Reconnaissance et délimitation de motifs d'organisation spatiale. Application à la cartographie des pédopaysages*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier, 161 p.

ROBERT [1996]. *Le sol: interface dans l'environnement, ressource pour le développement*. Masson. Paris, 244 p.

RÖVER M., KAISER E-A. [1999]. Spatial heterogeneity within the plough layer: low and moderate variability of soil properties. *Soil Biol. Biochem.* 31: 175-187.

SALVADOR-BLANES S. [2002]. *Déterminisme de la distribution spatiale des éléments majeurs et traces dans les sols en contexte métamorphique (Plateau d'Aigurande, nord du Massif central, France)*. thèse, Université de Tours, 287p.

SANDERS J., BAES R., LANGOHR R. [1986]. Micromorphology of a dry flat-bottomed valley soil in the Zonien Forest, loess belt of Middle Belgium. *Pédologie* 36, 227-302.

SCHLESINGER W.H. [1991]. *Biogeochemistry. An Analysis of Global Change*. Academic Press Inc. San Diego. California: 443p.

SHIBLI S.A.R. [1999]. *Geostatistics - Frequently Asked Questions*. Site: <http://curie.ei.jrc.it/faq/index.html> - visité en juin 1999.

SINOWSKI W., AUERSWALD K. [1999]. Using relief parameters in a discriminant analysis to stratify geological areas with different spatial variability of soil properties. *Geoderma* 89: 113-128.

SMITH S.R. [1996]. *Agricultural recycling of sewage sludge and the environment*. CAB International. 382p.

#### Références bibliographiques

SONDAG F. [1985]. Geochemical inventory in the stream sediments over the paleozoic formations of Belgium. *Bulletin de la Société Belge de Géologie*. 94(2), 159-163.

SONDAG F., MARTIN H. [1985]. *Inventaire géochimique des ressources métallifères de la Wallonie*. Synthèse générale et rapport de fin de recherches. Projet ministère de l'économie wallonne, UCL, Unité de géologie, 1984, 15p.

SONNET P., BENAMGHAR [2000]. Evaluation de la qualité géochimique des berges pour le dépôt des produits de curage des cours d'eau. Rapport final de convention Université Catholique de Louvain-la-Neuve-Région Wallonne (DGRNE).

STEIN A., HOOGERWERF M., BOUMA J. [1988]. Use of soil map delineation to improve (co)-kriging of point data on moisture deficits. *Geoderma*, 43:163-177.

STENGEL P. [1998]. *Sol : interface fragile*. INRA ed. Paris, 214p.

STENGER R., PRIESACK E., BEESE F. [2002]. Spatial variation of nitrate-N and related soil properties at the plot- scale. *Geoderma* 105: 259-275.

STERCKEMAN T., DOUAY F., BAIZE D., FOURRIER H., PROIX N., CORDIER L., SCHVARTZ. [2002]. Constitution d'un référentiel pédogéochimique régional: méthodologie et premiers résultats. In BAIZE et TERCE coord. Sci. *Les éléments traces métalliques dans les sols. Approches fonctionnelles et spatiales*. INRA, 565p.

STERCKEMAN T., DOUAY F., FOURRIER H., PROIX N. (2003) "Référentiel Pédo-Géochimique du Nord - Pas de Calais ". Rapport INRA-ISA 127 p. (+ annexes).

STOLT M.H., BAKER J.C., SIMPSON T.W. [1993]. Soil-landscape Relationships in Virginia: I. Soil Variability and Parent Material Uniformity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 414-421.

SWAINE D.J., MITCHELL R.L. [1960]. Trace-element distribution in soil profiles. *J. of Soil Sci.* 11 (2): 347-368.

TARVAINEN T., KALLIO E. [2002]. Baselines of certain bioavailable and total heavy metal concentrations in Finland. *Applied Geochemistry* 17: 975-980.

TAVERNIER R., MARECHAL R. [1958]. Carte des associations de

#### Références bibliographiques

sols. *Pédologie* VIII: 134-182.

TESSIER L., GREGORICH E.G., TOPP E. [1998]. Spatial variability of soil microbial biomass measured by the fumigation extraction method, and Kec as affected by depth and manure application. *Soil Biol. Biochem.* 30:1369-1377.

THOREZ J., BOURGUIGNON P., PAEPE R. [1970]. Etude préliminaire des associations de minéraux argileux des loess pléistocènes en Belgique. *Ann. Soc. Géol. Belgique* 93: 265-285.

TILLER K.G., GERTH J., BRÜMMER G. [1984a]. The sorption of Cd, Zn, and Ni by soil clay fractions: procedures for partition of bound forms and their interpretation. *Geoderma*, 34, 1-16.

TILLER K.G., GERTH J., BRÜMMER G. [1984b]. The relative affinities of Cd, Ni and Zn for different soil clay fractions and goethite. *Geoderma*, 34, 17-34.

TRANTAFILIS J., HUCKEL A.I., ODEH I.O.A. [2001]. Comparison of statistical prediction methods for estimating field-scale clay content using different combination of ancillary variables. *Soil Science*, 166 (6):415-427.

TROLARD F., BOURRIE G., JAFFREZIC A. [2002]. Distribution spatiale et mobilité des ETM en région d'élevage intensif. In BAIZE et TERCE coord. Sci. *Les éléments traces métalliques dans les sols. Approches fonctionnelles et spatiales*. INRA, 565p.

TSEGAYE T., HILL R.L. [1998]. Intensive tillage effects on spatial variability of soil physical properties. *Soil Science*: 143-154.

VAN DER SLUYS J., BRUSSELMANS A., DE VOS W., SWENNEN R. [1997]. Regional Geochemical mapping of overbank and stream sediments in Belgium and Luxembourg. Vol. III. Geochemical maps of Belgium and Luxembourg based on overbank and active stream sediments. *Prof. paper Service Géol. de Belgique*, N° 283.

VAN MEIRVENNE M. [1998]. Predictive Quality of the Belgian Soil Survey Information. *Pédologie-Themata*, n°5: 21-29.

VAN RANST E., DE CONNINCK F., TAVERNIER R., LANGHOR R. [1982]. Mineralogy in silty to loamy soils of central and high Belgium in respect to autochthonous and allochthonous materials. *Bulletin de la Société Belge de Géologie* 1, 27-44.

#### Références bibliographiques

- VAN RIEMSDIJK W.H., BENEDETTI M.F., HIEMSTRA T. [1997]. Possibilities for predicting mobility of trace elements in soils via modeling. In PROST (Ed.) *Contaminated Soils*. Proceedings of the third International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements. Paris, 15-19may 1995.
- VAN VLIET-LANOE B. [1990]. The genesis and age of the argillic horizon in Weischelian loess of northwestern Europe. *Quaternary International* 5: 49-56.
- VAN VLIET B., LANGOHR R. [1981]. Correlation between fragipans and permafrost with special reference to silty Weichselian deposits in Belgium and Northern France. *Catena* 8 : 137-154.
- VOLTZ M., LAGACHERIE P., LOUCHART X. [1997]. Predicting soil properties over a region using sample information from a mapped reference area. *Eur. Journal of Soil Science*, 48: 19-30.
- VOLTZ M., WEBSTER R. [1990]. A comparison of kriging, cubic splines and classification for predicting soil properties from sample information. *Journal of Soil Science*, 41: 473-490.
- WALTER C. [1993]. L'estimation de propriétés du sol par krigeage d'indicatrices confrontée à celle dérivée d'une carte pédologique. *Science du Sol*, 31 (4):215-231.
- WALTER C., CURMI P. [1998]. Les sols du bassin versant du Coët-Dan: organisation, variabilité spatiale et cartographie. In CHEVERRY C. *Agriculture intensive et qualité des eaux*. INRA, Paris: 85-105.
- WARIN A. [2000]. Contribution à la détermination du fond géopédochimique naturel dans les limons de Hesbaye gembloutoise. TFE FUSAGx, 75p.
- WEBSTER R. [2001]. Statistics to support soil research and their presentation. *European Journal of Soil Science* 52: 331-340.
- WEBSTER R., [1991]. Local disjunctive kriging of soil properties with change of support. *Journal of Soil Science*, 42: 301-318.
- WEBSTER R., ATTEIA O., DUBOIS J.-P. [1994]. Coregionalization of trace metals in the soil in the Swiss Jura. *Eur. Journal of Soil Science*, 45: 205-218.
- WEBSTER R., OLIVER M.A. [2001]. *Geostatistics for environmental scientists*. J. Wiley & Sons, Ltd.

#### Références bibliographiques

WEBSTER R., OLIVER M.A. [1990]. *Statistical Methods in Soil and Land Resource Survey*. Oxford University Press. New-York, 316 p.

WEBSTER R., OLIVER M.A. [1989]. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. VI. Disjunctive kriging and mapping the conditionnal probability. *Journal of Soil Science*, 40: 497-512..

WEBSTER R., PAYNE R.W. [2002]. Analysing repeated measurements in soil monitoring and experimentation *Eur. J. of Soil Sci.*, 53: 1-13.

WITTER [1996]. Towards zero accumulation of heavy metals in soils. An imperative or a fad? *Fertilizer Research* 43: 225-233.

Références bibliographiques



## *Glossaire*

Ci-après se trouvent les acceptions qu'il faut donner à certains termes utilisés dans le texte de la thèse.

*Association de sols* (MARECHAL et TAVERNIER, 1974) :

unité cartographique groupant des unités taxonomiques parfois très diverses, mais qui se rencontrent associées de façon souvent fort imbriquée sur des aires relativement étendues.

*Biodisponibilité* (COLLECTIF, 2003):

capacité d'un élément à être absorbé ou prélevé par un organisme vivant.

*Coefficient de distribution  $K_d$*  (COLLECTIF, 2003):

paramètre utilisé pour quantifier la distribution d'un élément trace entre phases solide et dissoute;  
rapport, à l'équilibre, entre la concentration de l'espèce étudiée dans la phase solide et sa concentration dans la phase liquide.

*Couverture pédologique* (AFES, 1995) :

terme utilisé pour désigner "le sol" en tant qu'objet naturel, continu et tridimensionnel, ...en perpétuelle évolution.

*Eléments traces* (BAIZE et TERCE, 2002) :

Eléments chimiques, constituants de la croûte terrestre, dont la concentration est pour chacun d'eux inférieure à 0,1% ; certains sont toxiques ; l'expression "*métaux lourds*" est souvent employée abusivement car certains éléments traces toxiques ne sont pas des métaux (As, Se) et d'autres présentent une masse volumique relativement faible ( $< 6\text{g/cm}^3$ ) ; les *macro-* et *micro-éléments* se distinguent par leurs teneurs mesurées dans le domaine du vivant. 0,01% de la matière sèche constitue le seuil de partage entre ces deux groupes. Parmi les micro-éléments, les *oligo-éléments* sont indispensables au déroulement des processus biologiques.

*Exactitude* (QUEVAUVILLER, 2001) :

étroitesse de l'accord entre le résultat d'un mesurage et une valeur vraie du mesurande ;

la *répétabilité* est l'étroitesse de l'accord entre les résultats des mesurages successifs du même mesurande dans les mêmes conditions de mesure ;

la *reproductibilité* est l'étroitesse de l'accord entre les résultats des mesurages du même mesurande en faisant varier les conditions de mesure.

*Facteur de transfert* (COLLECTIF, 2003) :

rapport de la concentration d'un élément dans un compartiment donné à celle du "niveau trophique inférieur".

*Fidélité* (QUEVAUVILLER, 2001) :

aptitude d'un instrument de mesure à donner des indications très voisines lors de l'application répétée du même mesurande dans les mêmes conditions de mesure.

*Fond géochimique*:

concentration d'un élément résultant de l'héritage de la roche-mère.

*Fond pédo-géochimique naturel* (FPGN - BAIZE, 1997):

teneur en un élément dans le sol résultant des processus d'héritage, de transferts pédologiques et du cycle biogéochimique (synonyme: teneur naturelle).

*Gley* (voir Réductique ou Hydromorphie).

*Gleyification* :

Phénomène par lequel se créent dans le sol un horizon à *gley* ou à *pseudogley*.

*Horizon* (AFES, 1995) :

unité élémentaire correspondant à un volume de couverture pédologique suffisamment homogène par rapport à l'échelle d'investigation.

*Hydromorphie* :

manifestation morphologique de l'engorgement dans un horizon ou un solum sous la forme de taches, de ségrégations, de colorations ou de décolorations (BAIZE, en cours de publication) ;

lorsque l'hydromorphie est temporaire, interviennent pendant la période hivernale d'engorgement une réduction et une mobilisation partielle du fer et du manganèse, suivie de leur précipitation localisée sous forme de taches rouille ou de concrétions, par réoxydation, alors que la nappe disparaît en été ; il y a formation du *pseudogley* (LOZET et MATHIEU, 2002) ;

lorsque l'hydromorphie est permanente, la nappe est très réductrice , le fer est principalement à l'état ferreux (horizon *gley*, symbolisé G).

*Justesse* (QUEVAUVILLER, 2001) :

aptitude d'un instrument de mesure à donner des indications exemptes d'erreur systématique.

*Lessivage* (LOZET et MATHIEU, 2002):

entraînement mécanique d'argile en suspension le long des fentes ou autres vides... différent de

*lixiviation* qui concerne la migration d'éléments solubles (nitrates, alcalins, silice...).

*Lixiviation* (voir lessivage).

*Loi chorologique* (JAMAGNE *et al.*, 1993) :

loi (ou supposée telle) de répartition des sols dans le paysage;

une *séquence de sols* est un ensemble de sols connexes dont la répartition géographique se retrouve constamment dans un ordre déterminé; (synonyme: *combinaison de sols* - école russe de pédologie);

une *chaîne de sols* (ou *caténa*) est un ensemble de sols liés génétiquement, chacun d'eux ayant reçu des autres ou cédé aux autres certains de ses constituants;

lorsque les sols sont associés sans règle de répartition identifiée, on parle de *juxtaposition de sols*.

*Macro-éléments* (voir Eléments traces).

*Marmorisation* (LOZET et MATHIEU, 2002) :

formation de marbrures, *i.e.* de taches ou veines de couleurs différentes dispersées dans le matériau-sol dont la couleur est plus ou moins uniforme (synonyme bariolage).

*Métaux lourds* (voir Eléments traces).

*Micro-éléments* (voir Eléments traces).

*Minéralomasse* (BAIZE et TERCE, 2002) :

masse totale des éléments minéraux présents dans les organismes d'une biocénose, d'une communauté ou d'un peuplement (Synonyme de cendres totales).

*Mobilité* (BAIZE, 1997) :

aptitude d'un élément à passer dans des compartiments du sol où il est de moins en moins énergiquement retenu ; notion distincte de migration qui implique un déplacement physique.

*Modèle d'organisation de sols* (JAMAGNE *et al.*, 1993) :

synonyme d'*Unité de Fonctionnement de sols*, fragment d'unité de paysage ou de modelé dont on connaît l'organisation et dont on perçoit la dynamique de fonctionnement.

*Oligo-éléments* (voir Eléments traces).

*Pédopaysage* :

ensemble des horizons pédologiques et des éléments paysagiques (végétation, effet des activités humaines, géomorphologie, hydrologie, roches-mères ou substrats) dont l'organisation spatiale permet de définir, dans son ensemble, tout ou partie d'une couverture pédologique; (AFES, 1995)

dans l'approche de cartographie pédopaysagère, les unités éponymes constituent le niveau supérieur dans la série de structures emboîtées: horizons - unités typologiques - unités cartographiques - unités de fonctionnement - pédopaysage (JAMAGNE *et al.*, 1993).

*Profil* (AFES, 1995) :

séquence d'informations concernant un solum, ordonnée de haut en bas. Informations relatives à des caractères visuels (profil structural) ou bien à une seule variable (profil calcaire,

profil hydrique, profil granulométrique) ou bien à des considérations plus synthétiques (profil d'altération, profil cultural); notion différente de solum.

*Pseudogley* (voir rédoxique ou hydromorphie).

*Rédoximorphe* (LOZET et MATHIEU, 2002) :

caractère associé à l'humidité et formé suite à la réduction, au mouvement et à l'oxydation des composés fer-manganèse dans un sol subissant une alternance périodique de saturation et de désaturation par l'eau.

*Rédoxique* (AFES, 1995) :

symbole -g, qualifie un horizon caractérisé par une juxtaposition de plages, de traînées grises et de taches, de nodules, voire de concrétions de couleur rouille (synonyme d'horizon à *pseudogley*); la répartition du fer est très hétérogène

*Réductique* (AFES, 1995) :

qualifie un horizon caractérisé par une couleur dominante grise (gris bleuâtre, gris verdâtre) et une répartition du fer plutôt homogène (synonyme d'horizon de gley);

*Répétabilité* (voir Exactitude).

*Reproductibilité* (voir Exactitude).

*Résistance* (COLLECTIF, 2003):

aptitude d'un organisme à survivre en présence d'éléments toxiques grâce à des mécanismes agissant directement contre la toxicité des éléments.

*Série de sols* :

ou type de sol détaillé: type de sol existant localement, développé dans un matériau parental précis, parfaitement caractérisé pédologiquement (BAIZE, 1997);

notion différente de la série de sols CSB qui est l'unité fondamentale de la typologie CSB mais qui ne présente pas de définition géographique précise;

*Solum* (AFES, 1995) :

tranche verticale d'une couverture pédologique observable dans une fosse ou une tranchée. On intègre dans le solum une épaisseur suffisante de la roche sous-jacente pour en permettre la caractérisation; notion différente de profil.

*Spéciation* (BAIZE et TERCE, 2002) :

définition de la forme chimique dans laquelle se trouve un élément, ou de la phase porteuse à laquelle il est associé dans un milieu donné.

*Teneurs agricoles habituelles* (BAIZE, 2002):

gamme de valeurs fréquemment observées pour une série de sols sous agriculture "normale" (synonyme: teneurs agricoles usuelles, fréquentes, normales...).

*Teneurs pseudo-totales* (voir teneurs totales).

*Teneurs totales* :

concentration d'un élément mesurée après mise en solution de tous les constituants d'un échantillon de sol;

différent de *teneur pseudo-totale* pour laquelle les réactifs mis en oeuvre ne permettent pas la dissolution complète de toutes les formes des éléments concernés: ex. HNO<sub>3</sub>, "Eau régale" ...

*Tolérance* (COLLECTIF, 2003):

capacité d'un organisme à se développer en présence d'éléments toxiques.

Les termes spécifiques à la Carte des Sols de la Belgique (CSB) sont expliqués dans l'annexe 1.

## Liste des acronymes

- AAS: *Atomic Absorption Spectrometry*. Spectrométrie d'absorption atomique.
- ADEME: Agence de l'Environnement et de la maîtrise de l'énergie.
- ARVA : Association de recherche et de valorisation en agriculture.
- ASPITET: Apports d'une Stratification Pédologique pour l'Interprétation des Teneurs en Eléments Traces. Programme de Recherche de l'INRA.
- BEAGx: Bureau d'Etudes et d'Analyses de Gembloux.
- BRGM: Bureau de Recherche Géologique et Minière (France).
- CRAGx: Centre de Recherches Agronomiques de Gembloux.
- CSB: Carte des Sols de la Belgique.
- DGRNE : Direction générale des ressources naturelles et de l'environnement.
- ER : Mise en solution par attaque à « l'eau régale »
- FPGN: Fond Pédo-Géochimique Naturel.
- FUSAGx: Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux.
- HF : Mise en solution par attaque triacide dont l'acide fluorhydrique
- ICP: *Inductively Coupled Plasma*...Plasma induit par haute fréquence.
- INRA: Institut National de la Recherche Agronomique (France).
- INIEX : Institut National des Industries Extractives
- IRC: Institut de Recherches Chimiques.
- ISSeP : Institut Scientifique de Service Public
- MO : Matière organique
- MOD : Matière organique dissoute
- MOS : Matière organique du sol
- NGR: *National Geochemical Reconnaissance*.
- OWD: Office Wallon des Déchets.
- REQUASUD : Réseau Qualité Sud
- RPG: Référentiel Pédo-Géochimique.
- SPAQuE: Société Publique d'Aide à la Qualité de l'Environnement.

UCL: Université Catholique de Louvain-la-Neuve  
TRB: *Total Reserve in Base*, réserve totale en bases (Ca, Mg, K, Na) exprimée en cmol/kg.  
VITO: *Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek* - Institut flamand pour la recherche technologique  
XRF: *X-Ray Fluorescence* – fluorescence X