

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

Deuxième partie – Etude des matériaux parentaux

Promoteur : Pr. L. BOCK

2003

Deuxième partie
Etude des matériaux parentaux

Liste des figures

Deuxième partie

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

Figure II.30: Evolution des teneurs en argile des matériaux parentaux selon la direction Ouest-Est.....	184
Figure II.31: Evolution des teneurs en argile des matériaux parentaux selon la direction Nord-Sud.....	184
Figure II.32: Variogramme omnidirectionnel de la teneur en argile dans les profils limoneux	185
Figure II.33: Carte des teneurs estimées en argile du limon éolien, en Région limoneuse..	187
Figure II.34: Importance des sols à profil p dans les planchettes étudiées	188
Figure II.35: carte des teneurs estimées en sables du limon éolien en Région limoneuse ...	189
Figure II.36: schéma de l'échantillonnage pour le transects O-E et N-S	191
Figure II.37: localisation des sondages des transects O-E et N-S sur le découpage des cartes IGN au 1/10.000	191
Figure II.38: plan factoriel principal relatif aux teneurs en éléments dans les horizons C "brabantiens"	198
Figure II.39: relation entre les valeurs sur le premier axe factoriel et la proportion de la fraction "0-10µm" pour les horizons C "brabantiens"	198
Figure II.40: Teneurs en argile de l'horizon C brabantien en fonction de la position géographique	199
Figure II.41: variogrammes omnidirectionnels et nombre de paires de points: pH_{H_2O} , fractions granulométriques.....	201
Figure II.42: variogrammes omnidirectionnels et nombre de paires de points: Ca, Na, Al.	202
Figure II.43: variogrammes omnidirectionnels et nombre de paires de points: Zn, Pb, Co.	203
Figure II.44: représentation des teneurs en Na (g/100g) des limons "brabantiens"	204
Figure II.45: Ecarts relatif entre les teneurs prédites par les régressions ETMs-[0-2µm] des modèles BRAB et de la coupe de Tongrinne	211

Liste des tableaux

Deuxième partie

Tableau II.1:	Poids des variables selon les quatre premiers axes factoriels.....	123
Tableau II.2:	a) Statistiques relatives aux teneurs totales en éléments majeurs dans les familles lithologiques. Teneurs totales moyennes; écart-type groupé, part de la variance "expliquée" par la classification lithologique.....	127
Tableau II.2:	b) Statistiques relatives aux teneurs totales en éléments traces dans les familles lithologiques.....	128
Tableau II.3:	Description morphologique de la coupe de Tongrinne	135
Tableau II.4	a) Coupe de Tongrinne - paramètres pédologiques classiques.....	138
Tableau II.4	b) Coupe de Tongrinne - teneurs totales.....	139
Tableau II.5:	Matrice des corrélations de Pearson pour la coupe de Tongrinne	141
Tableau II.6:	Teneurs en Zr et Ti dans quelques horizons de la coupe de Tongrinne.....	142
Tableau II.7:	Importances relatives (en %) des formes des éléments Al, Fe, Mn pour quelques horizons de la coupe de Tongrinne	148
Tableau II.8:	Critères de pertinence de la classification des horizons de la coupe de Tongrinne en unités stratigraphiques	152
Tableau II.9:	Estimations du fond géochimique sur base de la coupe de Tongrinne	154
Tableau II.10:	Principales propriétés morphologiques des horizons des quatre coupes	159
Tableau II.11:	Amplitudes de variation dans les coupes	162
Tableau II.12:	Matrice de corrélations relative aux variables mesurées sur les 4 coupes	163
Tableau II.13:	Résultats de l'analyse factorielle sur l'ensemble des horizons des quatre coupes limoneuses: saturations et communautés	168
Tableau II.14:	Résultats des analyses de variance univariées et multivariées à un critère de classification sur les quatre coupes limoneuses.....	172
Tableau II.15:	Importance relative de l'effet "site" pour les quatre coupes quaternaires sur base de l'analyse de la variance à un critère.	174
Tableau II.16:	Résultats de l'analyse de la variance à deux critères pour les quatre coupes quaternaires. Risque d'erreur de première espèce (α)	175
Tableau II.17:	Importance des effets "site" et "stratigraphie" pour les quatre coupes quaternaires sur base de l'analyse de la variance à deux critères.....	176
Tableau II.18:	Statistiques relatives à la teneur en argile pour les 793 profils.....	182
Tableau II.19 a:	Statistiques descriptives - pH, granulométrie	192
Tableau II.19 b:	Statistiques descriptives - éléments majeurs.....	192
Tableau II.19 c:	Statistiques descriptives - ETMs.....	193
Tableau II.20:	Evaluation du degré de signification de la variance observée dans les limons "brabantiens" par rapport à la variabilité opératoire	194
Tableau II.21:	Matrice des niveaux de signification des coefficients de corrélation entre les variables - horizons C "brabantiens"	196
Tableau II.22:	Variables "explicatives" utilisées dans les régressions	206
Tableau II.23:	Variance expliquée par les différentes régressions ETM - variables "explicatives" et comparaison de la variance résiduelle avec la variance opératoire.....	207
Tableau II.24:	Liste des facteurs intervenant dans les modèles de régression BRAB-VIII ...	211
Tableau II.25:	Variance expliquée par les régressions ETM -variables "factorielles" et comparaison de la variance résiduelle avec la variance opératoire	212

Table des matières

CHAPITRE 5 LE FOND MINÉRALOGIQUE ET GÉOCHIMIQUE DU LIMON ROCHE-MÈRE

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

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

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

5.1 Approche lithologique.

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

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

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

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

5.1.1 Données existantes

5.1.1.1 Minéralisations notoires

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

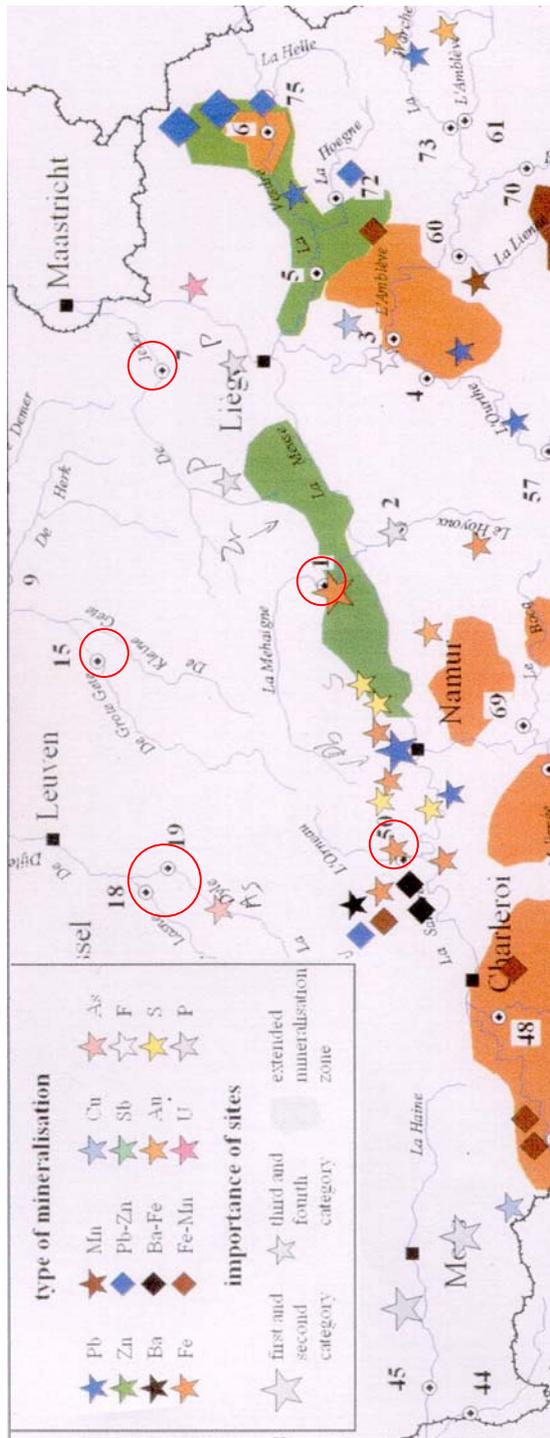


Figure II. 1: Zones de minéralisations en Région limoneuse (VAN DER SLUYS *et al.*, 1997)

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

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

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

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

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

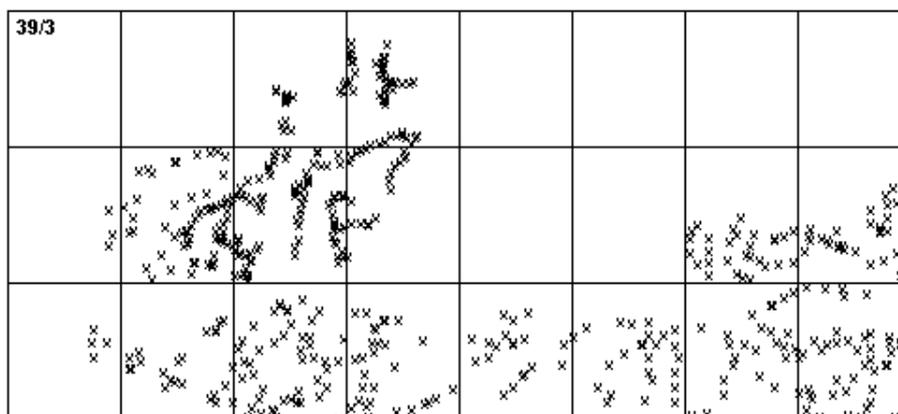


Figure II. 2: Situation des points de prélèvements de l'inventaire MARTIN-SONDAG (1985) sur le découpage des cartes IGN (coin supérieur gauche = carte 39/3).

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

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

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

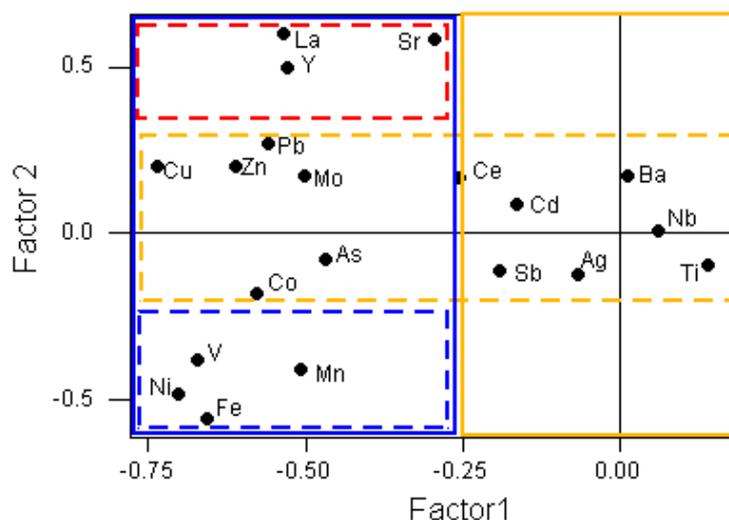


Figure II. 3: Premier plan factoriel relatif à l'inventaire MARTIN-SONDAG. Des zones de sensibilité aux facteurs sont identifiées par des bordures de couleur: rouge (sensibilité positive), orange (indifférence) et bleu (sensibilité négative). Les traits pleins se rapportent aux axes horizontaux, les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

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

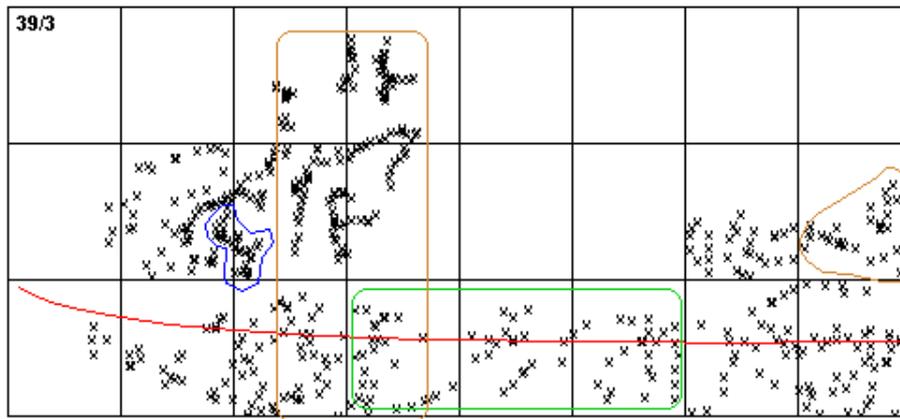


Figure II. 4: Zonage géographique des données de l'inventaire MARTIN-SONDAG en fonction des axes factoriels (1: rouge; 2: vert; 3: bleu; 4: brun).

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

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

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

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

Un regroupement des variables selon leur degré de ressemblance peut

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

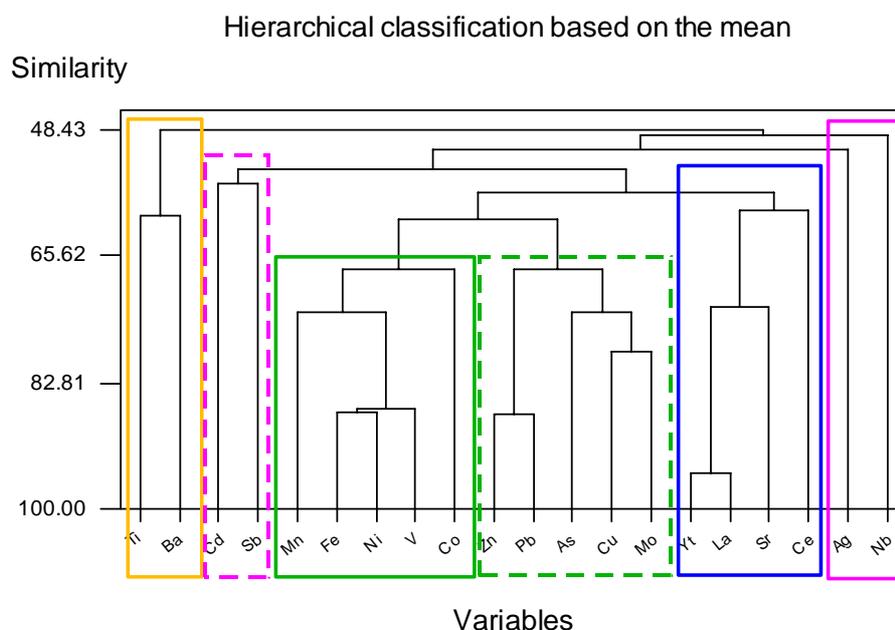


Figure II. 5: Classification hiérarchisée des variables de l'inventaire MARTIN (liaison par la moyenne, distance euclidienne)

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

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

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

5.1.2.1 Matériels et méthodes

a Positionnement stratigraphique des matériaux analysés

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

b Déterminations analytiques

Les caractérisations de laboratoire concernent uniquement les teneurs totales (HF) en Ca, Mg, K, Na, Al, Fe, Mn, Cu, Zn, Ni, Cr, Pb et Co. Les protocoles d'analyse figurent en annexe 3.

5.1.2.2 Résultats et discussions

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

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

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

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

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

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

ND : non déterminé

Les enseignements principaux de ces résultats sont:

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

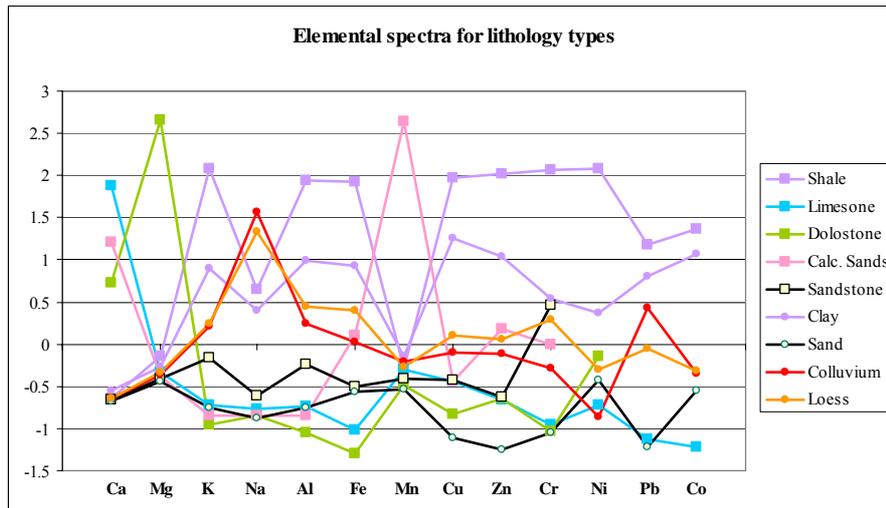


Figure II. 6: Teneurs moyennes (en valeurs centrées réduites) en éléments totaux par familles lithologiques (COLINET *et al.*, 2002a).

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

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

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

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

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

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

5.2 Approche stratigraphique

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

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

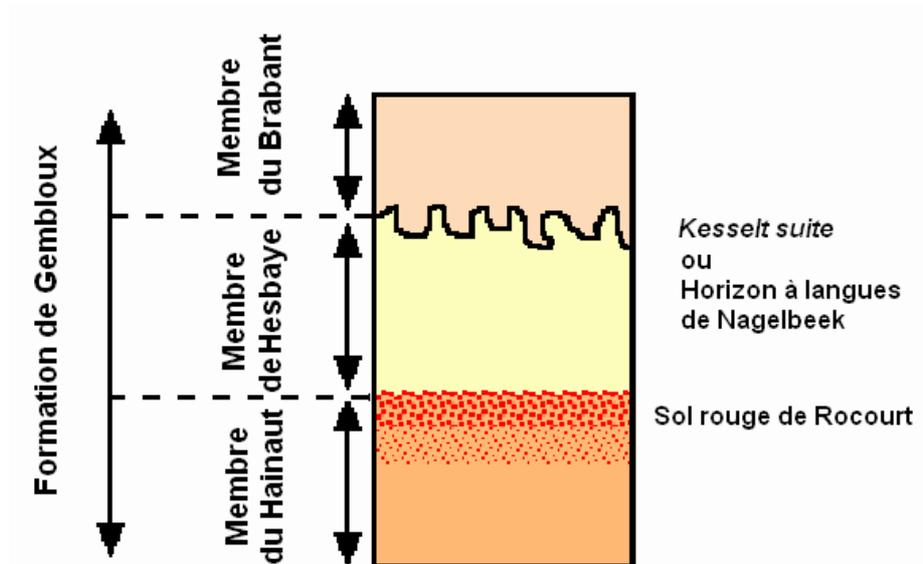


Figure II. 7: Représentation schématique d'une coupe dans les limons quaternaires de Moyenne Belgique

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

évaluer la représentativité (titre 5.2.2).

5.2.1 La coupe de Tongrinne

5.2.1.1 Matériels et méthodes

a La coupe dans son environnement physique

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

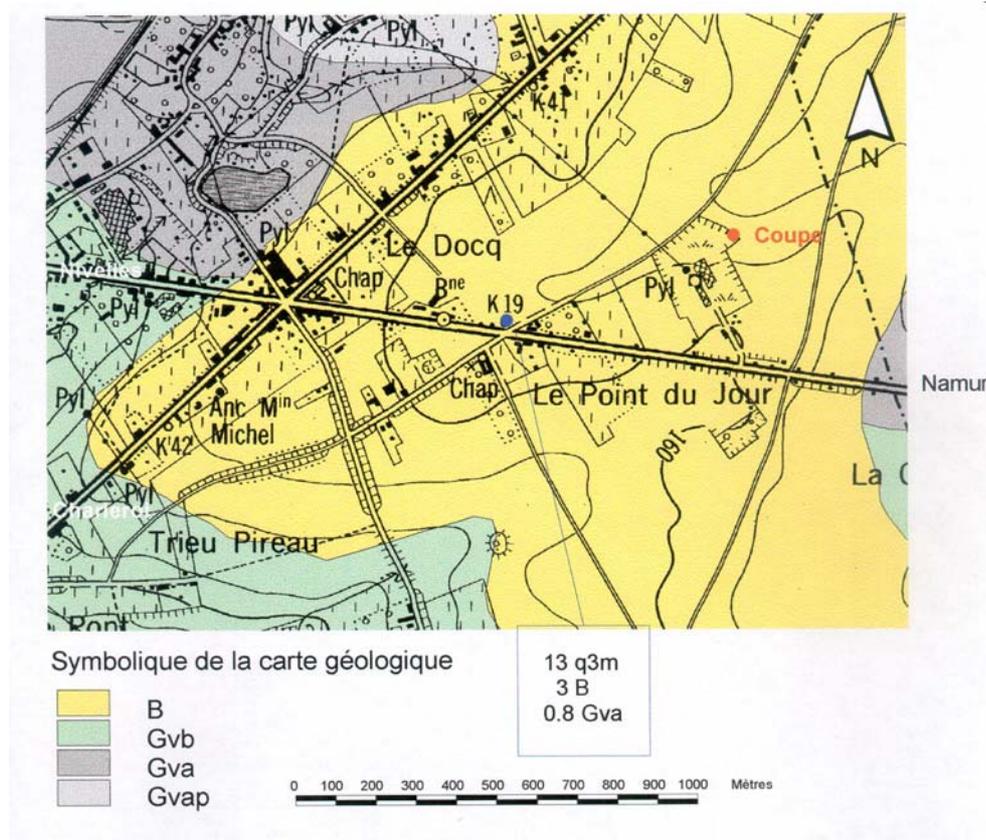


Figure II. 8: Plan de situation de la coupe de Tongrinne, sur base de la carte géologique 143 et de la carte topographique 47/1.

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

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

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

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

b Description de la coupe

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

c Déterminations analytiques

Les caractérisations de laboratoire sont les suivantes: pH_{H_2O} et pH_{KCl} , carbone organique total (COT), granulométrie (neuf fractions), carbo-nates, CEC et cations échangeables, teneurs totales en Ca, Mg, K, Na, Al, Fe, Mn, Cu, Zn, Cr, Ni, Pb, Co, et Cd. Ces analyses ont été réalisées au sein du Laboratoire de Géopédologie, à l'exception des teneurs tota-les en Cr, Pb, Co et Cd qui furent réalisées par le Laboratoire d'analyse des sols de l'INRA d'Arras dans le cadre du TFE de CORDIER (1999). Les protocoles d'analyse figurent en annexe 3.

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

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

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



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

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

Couches	Caractéristiques morphologiques des horizons	Symbole
Sol holocène	<ul style="list-style-type: none"> - horizon labouré Ap (0-30cm - non décrit); - horizon B textural (30-93/100cm); 7.5 YR 5/4; limon lourd; HCl(-); très compact; nombreuses galeries de vers de terre remplies d'un matériau sombre et brillant; transition graduelle vers le B/C; - horizon B/C (93/100-127cm); 7.5 YR 5/4; limon lourd; HCl(-); très compact; nombreuses galeries de vers de terre; taches d'oxydo-réduction et glosses dans la partie supérieure; transition graduelle vers C₁. 	<p>Ap B_t B_t B/C</p>
loess brabantien	(93/127-194/200cm); 7.5 à 8.75 YR 5/4; limon; HCl(-); compact à légèrement compact; alternance de couches millimétriques brunes et grises; fines racines; cutans dans les galeries et pores; taches d'oxydo-réduction diffuses et peu nombreuses à la base de l'horizon.	C ₁ C ₂
“Kesselt suite”	(194/200-215/225cm) horizon cryoturbé présentant des involutions de l'horizon supérieur dans l'inférieur; légèrement compact.	C ₁ /C ₁
loess hesbayaen	(215/225-272/290cm); 10 YR 5/6; limon; HCl(-); très compact; nombreuses taches d'oxydo-réduction et concrétions Fe/Mn à la base; transition ondulée et nette avec le matériel sous-jacent; présence d'un crotonas rempli de loess brabantien et traversant les sols de Warneton et Rocourt.	3C ₁ 3C ₂
Sol de Warneton	(272/290-297/300cm); 10YR 5/4 à 5/6; limon; HCl(-); très compact; alternance de couches millimétriques brunes et grises; nombreuses concrétions de Fe-Mn à la base; limite inférieure ondulée et graduelle.	E Btg
Sol de Rocourt	(297/300-350/364cm) 7.5YR 5/6 à 5/8; limon lourd à argile limoneuse; HCl(-); très compact; nombreuses taches d'oxydo-réduction au sommet; base plus argileuse présentant des «irregular fine cracks filled up with red heavy clay» (PAEPE, 1966); transition graduelle et ondulée avec le loess hermuyen.	Btg B _t B _t
loess hermuyen	(>350/364cm) 7.5 YR 5/6 à 6/6; limon; HCl(-); très compact; alternance de couches millimétriques brunes et grises; quelques taches d'oxydo-réduction.	4C

HCl(-): pas de réaction à HCl perceptible à l'œil nu

5.2.1.2 Résultats et discussion

a paramètres descriptifs

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

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

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

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

² récemment renommé "*Kesselt suite*".

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

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

b caractérisations pédologiques de base

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

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

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

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

Membre/couche Horizon	pH		COT g/100g	Grammométrie				Complexe d'échange					V (%)	
	(H ₂ O)	(KCl)		CaCO ₃ g/100g	Argile 0-2μ	Limons 2-50μ	Sable >50μ	CEC	Ca	Mg	K	Na		
Holocène	BT ₂	7.2	5.6	0.2	tr.*	25.6	65.6	8.9	13.5	11.40	1.91	0.43	0.13	sat.*
	B/C	7.2	5.4	0.2	tr.	25.0	69.6	5.5	11.7	10.37	2.30	-	0.11	sat
Brabantien	C ₁	7.2	5.4	0.1	0.15	22.1	68.5	9.4	11.8	7.58	3.22	0.22	0.10	94
	C ₂	7.2	5.3	0.2	tr.	24.1	71.9	4.2	12.4	7.51	4.00	0.53	0.12	98
Hesbayen	C ₁	7.3	5.1	0.2	tr.	19.1	76.5	4.6	9.8	6.18	4.10	0.19	0.08	sat
	C ₂	7.3	5.3	0.2	0.15	21.0	74.1	5.0	10.2	6.01	4.01	0.28	0.06	sat
Warreton	E	7.2	5.5	0.2	tr.	15.0	81.4	3.6	6.8	4.15	2.65	0.07	0.06	sat
	BTg	7.1	5.4	0.2	tr.	17.3	74.6	8.1	7.3	4.37	2.76	0.26	0.07	sat
Rocourt	BT ₂	7.1	5.4	0.0	tr.	37.6	57.3	5.2	17.6	9.53	6.68	0.47	0.12	95
	BT ₃	7.1	5.3	0.1	tr.	27.1	67.4	5.6	13.2	7.68	5.37	0.35	0.07	sat
Hennuyen	C	7.0	5.3	0.0	tr.	22.9	67.5	9.7	10.5	5.96	4.10	0.37	0.05	sat
Amplitude de variation														
Tongrinne		0.3	0.5	0.2	0.3	22.6	24.1	6.1	10.8	7.25	4.77	0.46	0.08	-
ppds***		0.2	0.3	0.4	N.D.	2.7	5.6	4.6	2.9	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

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

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

Membre/couche Horizon	Teneurs totales*														
	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr*	Pb*	Co*	Cd	
	g/100g														
	mg/kg														
Holocène	BT ₃	0.44	0.55	1.96	0.68	5.10	2.94	532.7	17.3	59.3	30.1	-	-	-	
	B/C	0.45	0.56	2.01	0.71	5.37	2.88	537.4	17.2	59.9	28.9	57.6	17.4	11.0	
Brabantien	C ₁	0.43	0.51	1.70	0.73	4.89	2.66	504.6	15.3	53.2	29.0	56.9	16.7	11.1	
	C ₂	0.46	0.58	1.98	0.75	5.63	2.91	587.0	15.7	56.4	32.0	-	-	-	
Hesbayen	C ₁	0.28	0.38	1.59	0.52	4.50	2.22	335.3	10.2	38.9	22.1	51.8	16.0	7.7	
	C ₂	0.26	0.35	1.56	0.55	4.06	2.23	454.9	13.0	41.3	25.4	-	-	-	
Warreton	E	0.25	0.25	1.45	0.46	3.93	1.66	626.3	9.6	37.4	16.5	46.4	14.7	9.4	
	BT ₂	0.24	0.26	1.50	0.44	4.03	1.89	787.4	9.7	40.8	25.1	-	-	-	
Rocourt	BT ₂	0.29	0.55	1.61	0.38	5.95	3.60	399.0	16.6	73.4	36.2	-	-	-	
	BT ₃	0.28	0.49	1.66	0.40	5.41	3.02	326.4	12.6	53.4	23.2	65.2	17.4	9.5	
Hennuyen	C	0.31	0.43	1.75	0.51	5.06	2.60	377.0	14	45.9	24.7	55.1	16.5	10.2	
Amplitude de variation															
Tongrinne		0.22	0.33	0.56	0.37	2.02	1.94	461.0	7.7	36.0	19.7	18.8	2.7	3.4	0.0
ppds**		0.07	0.07	0.21	0.11	0.68	0.30	58.4	2.6	7.5	11.8	N.D.	N.D.	N.D.	N.I

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

** ppds: plus petite différence significative ($\alpha=0.05$)

La CEC présente une amplitude de variation 3 fois plus élevée que la ppds. Elle est très hautement significativement corrélée à la teneur en argile ($r = 0.96$). Le complexe d'échange est largement saturé en cations, principalement Ca et Mg. Dans le sol holocène, le rapport $\text{Ca}_{\text{éch.}}/\text{Mg}_{\text{éch.}}$ est supérieur à 4, témoin des pratiques agricoles en bordure du site étudié. En profondeur, ce rapport est compris entre 1.4 et 1.6.

c teneurs totales en éléments

Pour ce qui concerne la composition élémentaire (tableau II.4.b), aucun des paramètres analysés au Laboratoire de Géopédologie ne peut être considéré comme homogène. Pour les teneurs en Cr, Pb, Co et Cd, déterminées à Arras, les ppds sont probablement différentes de celles du tableau I.18³. En effet, si les amplitudes de variation de ces éléments sont inférieures aux ppds du tableau I.18, ce qui signifierait une certaine homogénéité de ces teneurs, des corrélations entre Cr, Pb et Co et d'autres paramètres de la coupe de Tongrinne sont néanmoins trouvées (tableau II.5.b). Ceci plaide en faveur d'une variabilité significative à l'échelle de la coupe, mais également tend à montrer que les ppds sont surestimées dans ce cas et qu'il convient donc de les traiter comme des indicateurs et non comme des valeurs seuil absolues.

Les teneurs en Ca, Mg, K et Na, et à fortiori la réserve totale en "bases" (TRB en cmol_c/kg) varient peu à l'intérieur d'une "entité stratigraphique", mais les différences entre celles-ci sont relativement nettes. Les horizons holocènes et "brabantiens" sont plus riches ($\text{TRB} > 180 \text{ cmol}_c/\text{kg}$), ensuite on retrouve les ensembles "hennuyens" ($\sim 150 \text{ cmol}_c/\text{kg}$), "hesbayens" ($\sim 140 \text{ cmol}_c/\text{kg}$) et de Warneton ($\sim 120 \text{ cmol}_c/\text{kg}$).

De la surface à la profondeur, les teneurs en Al et Fe évoluent parallèlement, en relation directe avec le taux d'argile. Le rapport Al/Fe semble marquer une relation inverse avec le taux d'argile.

Les teneurs en Mn semblent dépendre de la stratigraphie des dépôts limoneux: entre 500 et 600 mg/kg dans les dépôts "brabantiens", entre 350 et 470 mg/kg pour le membre hesbayen, entre 600 et 800 mg/kg dans le sol de Warneton, et entre 300 et 400 mg/kg dans le Sol de Rocourt. Au sein de chacune des unités, la variation des teneurs en Mn

³ On peut trouver chez LATRILLE (1998) des données relatives à *l'imprécision sur la mesure* du laboratoire d'Arras, sans que l'on sache s'il s'agit de variabilité analytique ou opératoire. De ces données, on peut estimer les ppds suivantes: 17 mg/kg pour Cr, 4.2 mg/kg pour Pb et Co, 0.14 mg/kg pour Cd.

semble répondre à une logique morphologique: plus les taches et concrétions de Fe/Mn sont nombreuses, plus élevées sont les teneurs en Mn. Celui-ci n'est corrélé de manière significative à aucun autre élément. Toutefois, le coefficient de corrélation entre Mn et Cd est de peu sous le seuil de signification à 5% (0.80 vs 0.81).

Tableau II. 5: Matrice des corrélations de Pearson pour la coupe de Tongrinne a) tous les horizons (n = 11).

	A%	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Cu	Zn
Ca										
Mg	0.794	0.783								
K		0.895	0.771							
Na		0.851		0.788						
Al	0.930		0.869							
Fe	0.957		0.903			0.960				
Mn										
Cu	0.722	0.874	0.962	0.859		0.801	0.830			
Zn	0.935		0.877			0.939	0.932		0.871	
Ni	0.802	0.690	0.772	0.647		0.811	0.785		0.781	0.859

A%: pourcentage d'argile

Degré de signification des corrélations: $\alpha = 0.05$; $\alpha = 0.01$; $\alpha = 0.001$.

b) horizons analysés à Arras (n = 6)

	A%	Ca	Mg	Al	Fe	Cu	Zn	Cr	Pb	Co	Cd
Cr	0.959		0.801	0.903	0.943						
Pb	0.975		0.957	0.954	0.992	0.767	0.892	0.916			
Co		0.779									

A%: pourcentage d'argile

Degré de signification des corrélations: $\alpha = 0.05$; $\alpha = 0.01$; $\alpha = 0.001$.

Les teneurs en Cu, Zn et Ni semblent globalement du même ordre de grandeur (respectivement 15, 60 et 25 mg/kg) dans les horizons "brabantiens" et "hennuyens". Les teneurs dans les horizons "hesbayens" et du Sol de Warneton sont inférieures: 10, 45 et 17 mg/kg). Ces trois éléments sont corrélés à la teneur en argile (tableau II.5), mais également pour Cu et Ni à la TRB.

Pour ce qui concerne les teneurs en Cr, Pb, Co et Cd, les éléments de différenciation suivants peuvent être notés: (i) l'influence pédologique est manifeste pour Cr et Pb avec des teneurs plus faibles dans l'horizon $_3E$ et plus élevées dans l'horizon $_4BT_3$; (ii) les teneurs en Co sont relativement homogènes, à l'exception de l'horizon "hesbayen" (teneur plus faible) mais on ne peut exclure que cette différenciation soit le fruit du

hasard analytique⁴; (iii) les teneurs en Cd sont deux fois moins élevées dans les horizons "hennuyens" que dans le reste de la coupe.

La composition élémentaire des différents horizons marque donc une certaine variabilité qui semble liée à un effet stratigraphique d'une part (un limon "brabantien" ne serait pas équivalent à un limon "hesbayen"...) et aux processus pédogénétiques d'autre part (influence des teneurs en argile et de la dynamique du Mn).

d indices stratigraphiques complémentaires

Les teneurs en Zr et Ti figurent au tableau II.6. Zr et Ti sont des éléments considérés comme très peu mobiles dans les sols et caractéristiques de phases porteuses relativement résistantes à l'altération⁵ (BREWER, 1976; BRAHY, 2000; HODSON, 2002).

Au sein d'un profil, des teneurs plus élevées par rapport au matériau parental s'expliquent par accumulation relative par départ des autres éléments (profils lessivés et profils d'altération) ou par migration mécanique (profils lessivés ou colluviaux). Par contre, des différences de teneurs entre matériaux parentaux limoneux sont à interpréter en terme de variabilité minéralogique originelle.

Tableau II. 6: Teneurs en Zr et Ti dans quelques horizons de la coupe de Tongrinne.

	Zr (mg/kg)	Ti (g/100g)
B/C	555	0.43
C ₂	558	0.45
₂ C ₁	690	0.46
₃ E	782	0.52
₃ BT _g	795	0.52
₄ BT ₂	615	0.46
₄ BT ₃	705	0.47
₄ C	646	0.46

⁴ Pour rappel, la ppds estimée à partir des données de LATRILLE (1998) est supérieure à l'amplitude de la variation sur la coupe de Tongrinne.

⁵ Dans des contextes très particuliers, des preuves de mobilité d'éléments comme Zr ou Ti ont toutefois été rapportées (LATRILLE, 1998, HODSON, 2002).

Les deux éléments présentent sur l'épaisseur de la coupe des profils parallèles, avec une augmentation nette au niveau du Sol de Warneton. Cette discontinuité peut donc refléter (i) une abondance en minéraux porteurs de Zr et Ti du matériau parental, et/ou (ii) un état d'altération beaucoup plus marqué que dans le reste de la coupe.

On notera également les niveaux de teneurs en Zr différents de l'horizon C "brabantien": (~560 mg/kg) par rapport aux "hesbaysen" et "hennuyen" (640 à 690 mg/kg).

Ceci est un argument supplémentaire en faveur d'un facteur stratigraphique déterminant pour la composition élémentaire des matériaux limoneux.

e indices qualitatifs relatifs à la fraction argileuse

La forte corrélation entre argile et CEC est un indicateur d'homogénéité dans les types d'argile présents dans les divers horizons de la coupe. Le rapport CEC/argile est compris entre 42 et 50 cmol_c/100g, à l'exception du ₃BT du Sol de Warneton (36 cmol_c/100g). Ces valeurs correspondent aux ordres de grandeurs de la CEC des illites et des minéraux de transformation de celles-ci par ouverture des feuillets (SCHROEDER, 1984).

L'interprétation semi-quantitative des diffractogrammes RX, en regard des résultats de THOREZ *et al.* (1970), confirme que: (i) l'illite domine dans l'ensemble des horizons; (ii) le contenu en kaolinite n'excède jamais 10% du total; (iii) la proportion de chlorite est relativement faible également (5%) sauf dans le ₃E de Warneton (20 à 30% sous forme d'interstratifié chlorite-smectite (d'après THOREZ *et al.*, 1970); (iv) la proportion de smectites est plus faible dans l'horizon ₃E et plus importante dans les horizons BT.

Les phases minérales porteuses de Mg dans les loess étant les chlorites primaires, les vermiculites et les smectites, principalement présentes dans les fractions granulométriques "fines", le rapport Mg/argile exprime l'importance de ces minéraux dans la fraction argileuse. D'une façon générale ce rapport est plus faible dans les horizons BT que dans les horizons C sous-jacents. Ceci peut s'expliquer par une translocation de minéraux argileux vers les BT, principalement des smectites résultant de la transformation des intergrades de chlorites et vermiculites (MAES *et al.*, 1999; BRAHY *et al.*, 2000b), mais également par une altération accrue des micas et des chlorites (VAN RANST *et al.*, 1982; HARDY *et al.*, 1999) dans les horizons supérieurs des profils tant holo-

cène que plus anciens.

Les rapports Mg/K et Al/Fe ont été utilisés par BOCK (1984), dans un autre contexte, pour *identifier des cortèges minéralogiques du type illitique ou smectitique*. Dans le cas de la coupe de Tongrinne, les faibles valeurs de Mg/K traduisent une proportion élevée d'illite, les valeurs élevées un accroissement de l'importance des chlorites, vermiculites et/ou smectites. Le rapport Al/Fe peut traduire l'importance des vermiculites d'une part (faible rapport), des kaolinites et intergrades alumineux d'autre part (rapport élevé). En première approximation, à l'échelle de la coupe ces deux rapports dépendent du pourcentage d'argile et une relation globale lie de manière linéaire Al/Fe à Mg/K (figure II.10). Plus le taux d'argile augmente, plus Mg/K augmente et Al/Fe diminue; ce qui signifierait que les BT sont proportionnellement plus riches en smectites et vermiculites.

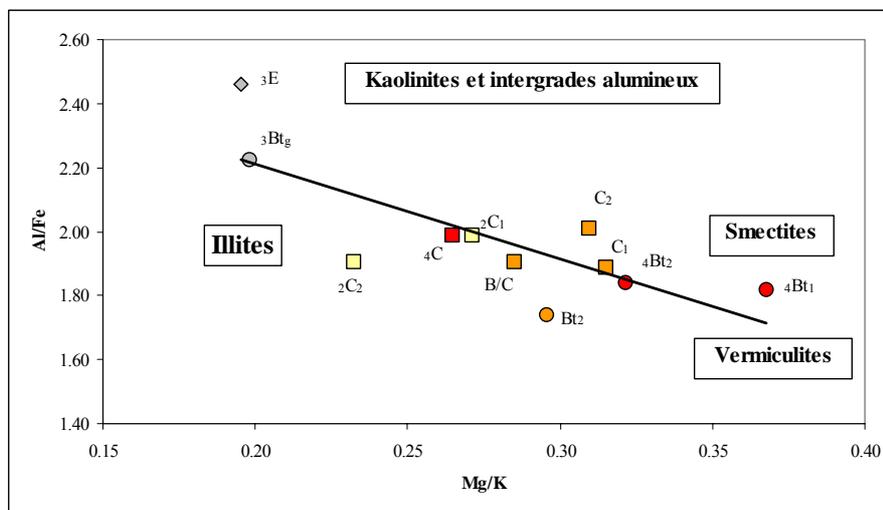


Figure II. 10: Rapports Al/Fe et Mg/K - coupe de Tongrinne

Comparés spécifiquement à leurs horizons C, les BT des sols holocène et de Warneton se distinguent davantage par le rapport Al/Fe que par celui de Mg/K. Les BT du Sol de Rocourt, quant à eux, suivent la loi générale évoquée plus haut.

L'ensemble de ces constatations plaide en faveur d'une relative homogénéité en termes de qualité des argiles. Les quelques différenciations semblent relever des processus d'illuviation avec une augmentation probable des proportions de smectites et vermiculites dans les différents horizons BT.

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

L'identification des phases porteuses des ETMs doit trouver un complément d'informations dans le fractionnement chimique de l'aluminium, du fer et du manganèse. Ces éléments sont en effet présents sous diverses formes dans les sols, en fonction de l'intensité et de la nature des processus de pédogenèse. Les résultats du fractionnement chimique par extraction séquentielle figurent au tableau II.7, sous formes de proportions par rapport au total extrait.

On constate que les formes I et II (respectivement les fractions "adsorbées" et "liées aux oxydes de Mn peu cristallisés") sont très peu importantes pour Al et Fe (< 1%). Pour Mn, la forme I représente 4% du total, alors que la forme II est logiquement la fraction la plus importante (30 à 40%).

Tableau II. 7: Importances relatives (en %) des formes des éléments Al, Fe, Mn (fractions I: Na-acétate, II: Hydroxylamine-HCl, III: Na-pyrophosphate, IV: Tamm, V: Hydroxylamine-HCl 90°C, VI: triacide) pour quelques horizons de la coupe de Tongrinne.

	Al-I	Al-II	Al-III	Al-IV	Al-V	Al-VI
C ₂	0.0	0.1	1.6	1.5	3.2	93.5
₂ C ₁	0.0	0.1	4.5	2.2	3.5	89.7
₃ E	0.1	0.2	8.6	3.4	3.9	83.8
₃ BTg	0.1	0.2	6.9	3.8	5.3	83.8
₄ BT ₂	0.1	0.0	4.3	3.4	4.9	87.3
₄ C	0.1	0.1	4.9	2.3	4.3	88.3
	Fe-I	Fe-II	Fe-III	Fe-IV	Fe-V	Fe-VI
C ₂	0.0	0.3	4.3	4.8	19.8	70.7
₂ C ₁	0.0	0.4	10.8	11.4	20.2	57.1
₃ E	0.0	0.8	19.1	22.9	12.1	45.1
₃ BTg	0.0	0.8	13.9	19.1	18.4	47.7
₄ BT ₂	0.0	0.2	6.1	10.4	18.6	64.8
₄ C	0.0	0.3	7.5	7.0	20.6	64.6
	Mn-I	Mn-II	Mn-III	Mn-IV	Mn-V	Mn-VI
C ₂	3.8	41.9	20.1	4.9	7.0	22.3
₂ C ₁	4.4	43.9	13.2	8.7	6.1	23.7
₃ E	3.3	40.8	15.9	26.6	2.1	11.2
₃ BTg	3.4	39.6	19.2	24.0	3.4	10.3
₄ BT ₂	4.4	35.0	19.5	11.8	7.9	21.5
₄ C	3.5	31.0	24.6	6.4	7.9	26.6

Pour Al, les formes III ("liées à la matière organique"), IV ("liées aux oxydes amorphes") et V ("liées aux oxydes cristallisés"), sont globalement du même ordre de grandeur, soit des valeurs assez faibles compri-

ses entre 1,5 et 5%. Font toutefois exception les horizons du Sol de Warneton qui présentent des teneurs plus élevées pour la fraction liée à la matière organique.

Pour Fe, la forme III est également plus élevée dans le Sol de Warneton, de même que la forme IV (~20% contre 10 dans le loess "hesbayen" ou 5% dans le loess "brabantien"). La forme V vaut de l'ordre de 20% du fer total, sauf dans l'horizon $_3E$ de Warneton (12%).

On retrouve le même singularisme du Sol de Warneton pour les formes IV (proportions plus élevées) et V (proportions moins élevées) de Mn .

L'importance de la forme VI, qui est censée traduire pour un élément l'importance de sa localisation à l'intérieur des silicates, est supérieure à 85% pour Al, de l'ordre de 60 à 70% pour Fe et de 20 à 25% pour Mn. Le sol de Warneton présente toutefois des proportions plus faibles en éléments sous la forme VI (Al: 84%; Fe: <50%; Mn: ~10%).

Le Sol de Warneton se distingue donc clairement des autres ensembles sur la base du fractionnement chimique. Il est caractérisé par une importance plus grande des fractions supposées "liées à la matière organique et aux oxydes amorphes" au détriment de celles liées aux oxydes cristallisés et aux réseaux silicatés . Ceci est le résultat du milieu d'altération différent pour le Sol de Warneton par rapport aux autres formations et paléosols.

On notera également que parmi les quatre autres horizons, c'est le loess "brabantien" (C_2) qui présente les proportions des formes VI d'Al et Fe les plus importantes. Ceci pourrait (i) signifier un degré d'évolution des matériaux "brabantiens" un peu moins avancé et (ii) s'expliquer par l'âge des matériaux limoneux.

g réserves en "bases" et granulométrie

Parmi les "bases", seul Mg présente une corrélation significative avec la teneur en argile. Pour ce qui concerne l'ensemble des fractions granulométriques, les coefficients de corrélation les plus élevés ont été trouvés pour Mg avec la fraction 0-10 μ m, pour K avec la fraction 0-20 μ m et pour Na avec la fraction 10-20 μ m; Ca ne présentant pas de relation linéaire apparente avec la granulométrie.

La relation Mg-"0-10 μ m" s'explique par la présence de minéraux porteurs de Mg (chlorites, vermiculites...) dans les particules les plus fines. La relation K-"0-20 μ m" exprime les influences conjointes des micas/illites et des feldspaths potassiques; les premiers étant présents dans

des particules plus fines que les seconds. La relation Na-"10-20 μ m" traduit la présence de plagioclases dans les limons fins.

Sachant que les processus d'illuviation sont reconnus dans l'ensemble des pédogénèses identifiées sur la coupe (HAESAERTS, 1999), les teneurs dans les horizons doivent être considérées par rapport aux matériaux parentaux respectifs. Il apparaît que les horizons BT présentent toujours des teneurs en Ca et Na inférieures aux horizons C; ce qui doit être perçu comme un effet de dilution des "feldspaths"⁶ par accumulation d'argile.

La TRB est donc le reflet de différences minéralogiques entre les générations de limons. Ces différences peuvent trouver leur source dans la composition originelle des loess et/ou dans les processus d'altération et de lessivage.

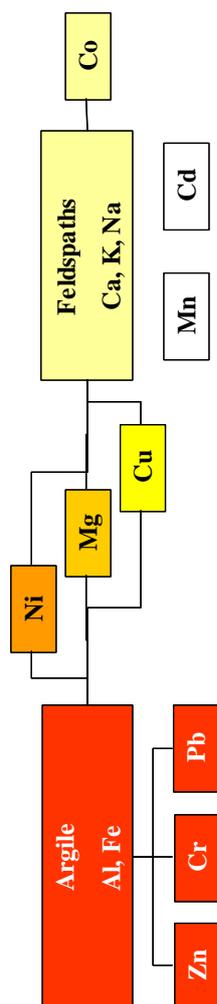
Il ressort des observations précédentes qu'il n'y a que le Sol de Warneton qui réunit un ensemble d'indices convergeant vers une différenciation des niveaux d'altération. Il serait tentant de considérer le degré d'altération des autres limons comme relativement homogène sur la coupe et d'imputer les différences actuelles de teneurs entre les horizons C "brabantiens", "hesbayens" et "hennuyens" à des différences géochimiques existant à l'origine. Toutefois, il faut garder à l'esprit que l'image actuelle des matériaux limoneux est le résultat de la superposition de nombreux processus d'altération, d'autant plus nombreux que les limons sont agés, qui se sont succédés et qu'il est impossible d'en revendiquer la maîtrise.

L'ensemble des résultats évoqués ci-avant suggère toutefois que (i) il existe un facteur stratigraphique déterminant pour la composition élémentaire des matériaux limoneux; (ii) les variations qualitatives dans les types d'argile rencontrés sont relativement peu marquées et n'ont pas d'influence notable sur les propriétés d'échange (CEC) des horizons; (iii) le Sol de Warneton se distingue par des caractères d'altération plus marqués que les autres ensembles limoneux; (iv) le contenu en "feldspaths" diffère d'un Membre limoneux à l'autre; (v) le rapport TRB/argile diminue de l'horizon C au BT, par un effet de dilution principalement de Ca et Na par l'argile illuviée.

⁶ Faute de mesure quantitative directe des feldspaths, le raisonnement porte sur les teneurs totales en bases, ce que signifient les guillemets.

h facteurs de la distribution verticale élémentaire

Sur base de leurs coefficients de corrélation (tableaux II.5 a et b), des rapprochements entre éléments peuvent être entrepris. La figure II.11 illustre ces rapprochements.



Les teneurs en argile, Al, Fe, Zn, Cr et Pb forment un groupe à forte corrélation interne. Ils constituent dès lors un pôle "argile" ou "particules fines". Ces résultats sont cohérents par rapport aux travaux de BAIZE (1997) ou de LATRILLE (1998).

Les éléments Ni, Mg et Cu présentent également des corrélations significatives avec le pôle "argile". Toutefois, ils semblent en outre influencés par les teneurs en Ca, K et Na, regroupées en un second pôle, dénommé "feldspath" en raison de l'influence supposée de ce groupe minéralogique sur les teneurs en Ca, K et Na.

Les "feldspaths" ne sont pas réputés contenir de fortes proportions d'ETMs (HARDY, 2002). Il faut probablement voir dans les apparentes relations "feldspaths"-Cu, "feldspaths"-Mg, "feldspaths"-Ni, un effet stratigraphique. En effet, comme illustré à la figure II.12, les teneurs en Mg, Cu et Ni semblent présenter une variabilité entre les générations de limons nettement supérieure à celle existant à l'intérieur de chacune de ces générations. Et les limons les plus riches en ces éléments sont également les plus riches en "bases", comme en témoignent les valeurs de la TRB (en cmol_c/kg), et les plus riches en argile.

Figure II. 11: Relations entre les éléments sur base des coefficients de corrélation.

Les éléments Mn et Cd obéissent à leur propre logique pédogénétique indépendamment de ce schéma. Co semble lié à Ca, mais cette liaison relève d'un effet stratigraphique essentiellement.

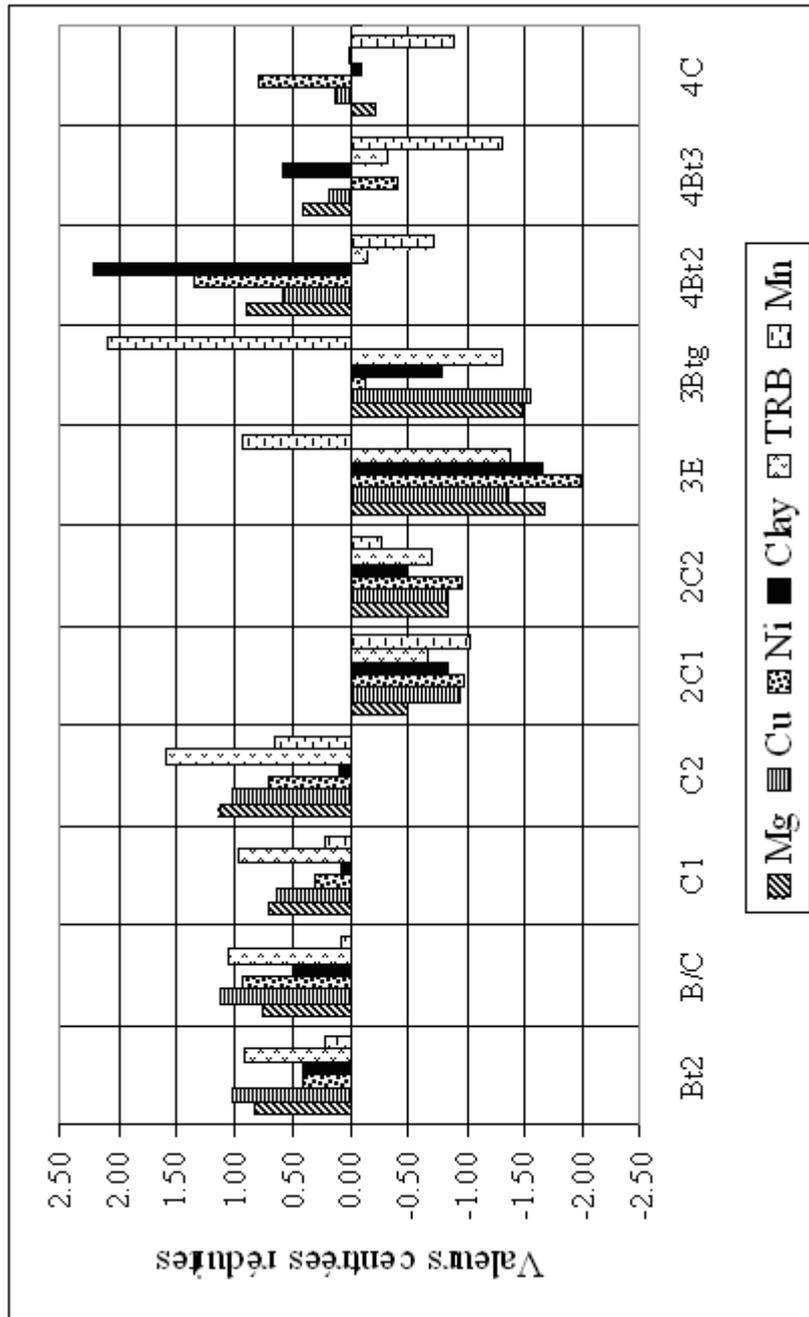


Figure II. 12: Comparaison des teneurs (centrées réduites) en Mg, Cu, Ni, Argile, TRB et Mn dans la coupe de Tongrinne.

Les principales variables explicatives de la distribution verticale des éléments dans la coupe de Tongrinne sont donc les teneurs en argile, en "bases" et en Mn; reflets de différenciations minéralogiques initiales et de processus pédogénétiques majeurs: migrations *per descendum* des argiles et redistributions des oxydes de Mn en fonction des conditions rédox.

L'analyse factorielle multivariée permet de (i) visualiser graphiquement les ressemblances de comportement entre les variables, (ii) d'illustrer les ressemblances entre horizons et (iii) de regrouper les horizons analysés en fonction de leurs ressemblances fonctionnelles.

Seules les variables relatives à la composition élémentaire ont été prises en considération, à l'exclusion de COT et Co qui sont considérées comme homogènes, de Cr, Pb et Cd en raison de valeurs manquantes. Parmi les éléments restant, certains sont clairement identifiés aux teneurs en argile (Al et Fe), à la composition minéralogique (Ca, Mg, K, Na) et aux processus d'oxydo-réduction (Mn).

Basée sur une analyse en composantes principales, dont seules les deux premières portent plus d'informations qu'une variable initiale (*eigenvalue* > 1), l'analyse factorielle fournit un plan factoriel (figure II.13) contenant 88% de la variation totale de l'ensemble des éléments sur toute la coupe. Ceci correspond à peu près au maximum de variation potentiellement explicable, eu égard aux coefficients de variation opératoires des différents éléments. Le plan factoriel exprime dès lors complètement l'influence des différents facteurs de la pédogenèse; à savoir: composition initiale et processus d'altération, de lessivage ou d'oxydo-réduction.

Le premier axe factoriel (figure II.13) oppose Mn à l'ensemble des autres éléments; le second Fe et Al aux "bases" et à Mn. Voilà les trois pôles comportementaux évoqués plus haut. Mn possède une dynamique de mobilité propre, sensible aux conditions d'oxydo-réduction; Al et Fe présentent une mobilité moindre dans les conditions de la coupe, les mouvements étant associés aux migrations mécaniques de l'argile; enfin les "bases" Ca, K et Na font partie des réseaux cristallins des minéraux et n'ont probablement que peu été sensibles aux migrations verticales. Zn présente un comportement très proche de Fe et Al, alors que Cu, Mg et Ni semblent "tirés vers le haut" par le pôle "feldspaths".

Lorsque leur composition est exprimée en coordonnées factorielles (figure II.14), les horizons de la coupe de Tongrinne se répartissent dans les quadrants en fonction de leur "appartenance stratigraphique". Les

différences entre les générations de limons semblent en effet primer sur les redistributions au sein de chaque unité.

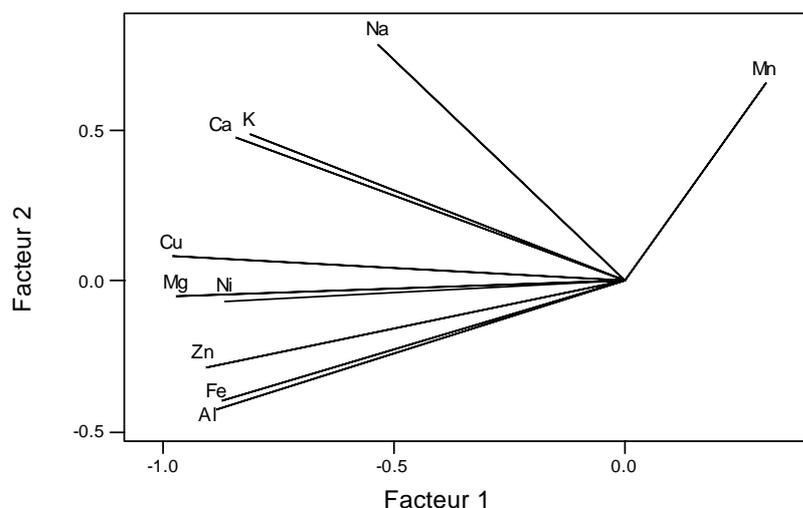


Figure II. 13: Position des variables sur le plan factoriel principal de la coupe de Tongrinne

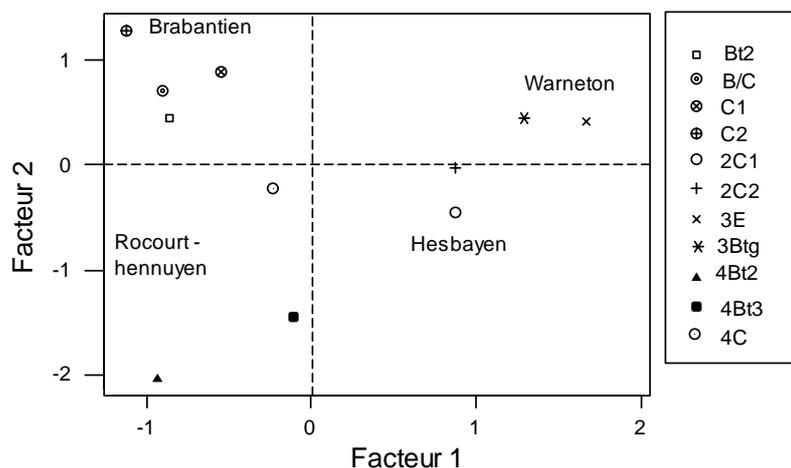


Figure II. 14: Position des échantillons de la coupe de Tongrinne sur le plan factoriel principal.

La primauté de l'effet stratigraphique est confirmée par (i) les résultats de la classification hiérarchique ascendante (figure II.15) réalisée sur base des variables précitées, et (ii) les proportions de variances "expliquées" par la stratigraphie des limons (tableau II.8).

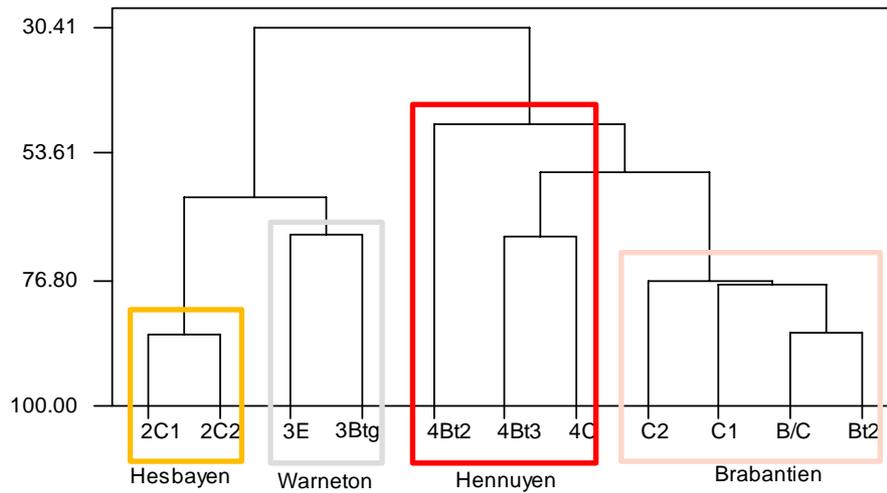


Figure II. 15: Classification hiérarchique ascendante des horizons de la coupe de Tongrinne (distance euclidienne - liaison par la moyenne). Les horizons se ressemblent davantage au sein d'une unité stratigraphique qu'entre deux unités.

Les résultats des analyses de variance univariées (modèle fixe), figurant au tableau II.8 sous formes de risques d'erreur (probabilité de se tromper lorsque l'on rejette l'hypothèse d'égalité des moyennes par unité stratigraphique) et de parts de variation prises en compte par la classification, sont révélateurs de l'importance des teneurs en éléments majeurs dans l'effet stratigraphique. Par contre, celui-ci est moins marqué pour les teneurs en argile et en ETMs y associés. Ceci s'explique par des redistributions d'argile au sein de chaque profil.

Tableau II. 8: Critères de pertinence de la classification des horizons de la coupe de Tongrinne en unités stratigraphiques.

	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Argile	
p	0.001	0.000	0.001	0.010	0.011	0.006	0.045	
classif. (%)	87.5	88.4	82.4	69.0	68.2	72.9	48.2	
	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co	Cd
p	0.002	0.000	0.011	0.053	0.365	0.206	0.044	
classif. (%)	81.0	95.8	68.1	49.1	ND	ND	ND	ND

p: probabilité associée au rejet de l'hypothèse d'égalité des moyennes.

classif (%): proportion de la variance "expliquée" par la classification.

ND : non déterminé en raison du faible nombre d'échantillons.

i décomposition de la variance et estimation du fond géochimique

Afin de réduire l'erreur sur une estimation, il peut être utile de décomposer la variance totale en une variance modélisée et une variance résiduelle. C'est alors cette dernière qui intervient dans le calcul de l'erreur de l'intervalle de confiance autour de la valeur estimée. L'évaluation de l'importance relative des composantes de la variance, et conséquemment de l'intérêt d'un modèle, peut être réalisée par l'intermédiaire du coefficient de détermination pour les relations quantitatives (DAGNELIE, 1973) et de l'analyse de la variance pour les classifications.

En vertu des corrélations observées (tableau II.5), la teneur en argile est potentiellement intéressante comme base d'un modèle de régression linéaire pour les éléments Mg, Al, Fe, Cu, Zn, Ni, Cr et Pb. L'importance de l'effet stratigraphique et l'intérêt d'une stratification sur cette base ont été démontrés (tableau II.8) pour l'ensemble des éléments, à l'exception de Cr et Pb.

En conséquence, l'estimation ponctuelle du fond géochimique sur base des résultats de la coupe de Tongrinne peut s'appuyer (i) sur l'ensemble des valeurs mesurées lorsque l'on ignore tout de l'âge du limon, (ii) sur les teneurs mesurées pour le limon correspondant de la coupe de Tongrinne lorsque l'âge du limon roche-mère est identifié ou (iii) sur base d'une relation linéaire avec un ou plusieurs paramètres "explicatifs" lorsque ceux-ci sont disponibles au point d'intérêt. Ces trois options ont fait l'objet d'une évaluation dont les résultats figurent au tableau II.9. Une teneur de fond géochimique en chaque élément est estimée en considérant que le matériau parental est (1) un limon, (2) un limon "brabantien" ou (3) un limon dont on a mesuré la teneur en argile.

Les résultats confirment (i) l'avantage de pouvoir identifier l'âge du limon pour l'ensemble des éléments et (ii) l'intérêt explicatif, plus ou moins marqué, de la teneur en argile pour la majorité des éléments aux exceptions de Na, Mn, Co et Cd.

Le resserrement des intervalles de confiance par rapport à l'option la plus générale traduit l'efficacité du modèle. Pour des limons "brabantiens", la stratification par la stratigraphie constitue le modèle le plus pertinent pour les éléments: Ca, Mg, K, Na, Mn, Cu, Ni, Cr, Co et Cd. Tous limons confondus, la régression avec la teneur en argile est utile pour les éléments: Mg, K, Al, Fe, Cu, Zn, Ni, Cr et Pb.

Tableau II. 9: Estimations du fond géochimique sur base de la coupe de Tongrinne
a) éléments majeurs (en g/100g) et TRB (cmolc/kg)

	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	TRB
1. Tous limons confondus							
Moyenne	0.34	0.45	1.71	0.56	4.90	2.60	122.0
IC95	0.17	0.23	0.38	0.26	1.32	1.07	44.3
2. Par unité stratigraphique (ex. "brabantien")							
Moyenne	0.45	0.55	1.91	0.72	5.25	2.85	148.3
IC95	0.03	0.07	0.32	0.07	0.72	0.28	14.9
3. par régression avec la teneur en argile ($Y = a + b X$)							
a	NS	0.10	1.45	NS	2.57	0.52	NS
b	NS	0.0150	0.0110	NS	0.0998	0.0891	NS
IC95	NS	0.16	0.37	NS	0.69	0.35	NS

b) ETMs (en mg/kg)

	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co	Cd
1. Tous limons confondus								
Moyenne	497.1	13.7	50.9	26.7	55.5	16.5	9.8	0.08
IC95	266.1	5.6	21.4	10.2	11.6	1.9	2.3	0.05
2. Par unité stratigraphique (ex. "brabantien")								
Moyenne	547.2	16.4	57.2	30.0	57.3	17.1	11.1	0.11
IC95	76.6	2.3	6.9	3.2	1.2	1.2	0.2	0.03
3. par régression avec la teneur en argile ($Y = a + b X$)								
a	NS	5.5	10.7	10.1	31.3	12.3	NS	NS
b	NS	0.3511	1.7210	0.7083	1.049	0.1805	NS	NS
IC95	NS	4.1	8.6	6.5	3.5	0.4	NS	NS

IC95: demi-intervalle de confiance sur la valeur prédite ($\alpha = 0.05$) ; pour les équations de régression, il s'agit de l'intervalle pour un x égal à la moyenne sur la coupe de Tongrinne, car l'IC95 d'une valeur estimée par régression dépend de la valeur de x.

NS : Non Significatif ($\alpha = 0.05$).

5.2.1.3 Conclusions

Une série de limons d'âges différents ont été étudiés sur la coupe de Tongrinne. Des différences de teneurs élémentaires, qui ne résultent pas uniquement de la variabilité opératoire, existent au sein des limons. Ces différences sont susceptibles de générer localement des différences dans la composition élémentaire ou les propriétés des horizons de surface. La majeure partie de cette variabilité résulte d'un effet stratigraphique et de la présence de paléosols. Elle est donc modélisable à l'échelle de la coupe par une série de caractéristiques directement perceptibles sur le terrain. Couleur, texture, présence de taches et concrétions liés aux phénomènes rédox permettent en effet de rattacher l'horizon à un ensemble stratigraphique et à une gamme de teneurs.

Pour ce qui concerne l'extrapolation aux matériaux limoneux non-issus de la coupe, un tableau d'estimation du fond géochimique ponctuel des sols limoneux selon trois scénarii est proposé.

Toutefois, spatialement, la prédiction de l'âge du limon roche-mère est impossible faute d'observations. Néanmoins, pour les sols limoneux décarbonatés, la connaissance de la teneur en argile et de l'importance des caractères rédox doit permettre l'estimation du fond géochimique en ETMs. L'incertitude spatiale sur le matériau parental loessique ne reste alors un problème que pour la prédiction de la TRB.

5.2.2 Corrélations avec d'autres coupes quaternaires

Dans une seconde phase de l'approche stratigraphique, la coupe de Tongrinne est comparée à trois autres coupes limoneuses profondes, qui ont été décrites et échantillonnées par CORDIER (1999). Les objectifs visés par cette comparaison sont (i) la vérification sur d'autres sites des résultats et conclusions relatifs à la coupe de Tongrinne ; (ii) l'évaluation de la représentativité des entités stratigraphiques décrites à Tongrinne par rapport à un ensemble d'horizons limoneux profonds; et (iii) l'évaluation de l'importance de "l'effet site". Le changement d'échelle opéré introduit en effet un facteur de variabilité potentiel qui est dû aux différences entre les sites; différences qui peuvent trouver leur origine dans la composition minéralogique et granulométrique des matériaux (d'autant plus probable que les sites sont éloignés les uns des autres) et dans les degrés et "directions" d'évolution de ces matériaux (en fonction de l'environnement physique du site principalement). L'importance de la position topographique et du drainage naturel sur la différenciation verticale des loess a été montrée par MANIL (1952); tandis que l'influence du site sur l'évolution minéralogique des argiles a été soulevée par THOREZ *et al.* (1970).

5.2.2.1 Matériels et méthodes

a localisation des coupes

Les coupes décrites par CORDIER (1999) (figure II.16), dans le cadre de la mise en place du RPG Nord-Pas-de-Calais, sont situées dans le prolongement occidental de la Région limoneuse belge. Les formations loessiques y ont été étudiées auparavant par PAEPE et SOMME (1970) et par JAMAGNE (1973), pour la partie méridionale du Nord-Pas-de-Calais. PAEPE et SOMME reconnaissent deux ensembles sous-régionaux (Haut-Pays et Bas-Pays) et une dizaine de petites régions naturelles (PRN). La partie méridionale a connu des conditions climatiques semblables à celles de Tongrinne (TONG), c.à.d. favorables à la conservation de la séquence weichsélienne. Deux des trois coupes (Marcoing -MCG- et Busigny -BUS) sont situées dans cette sous-région, au sein de la PRN du Cambrésis. Dans la partie septentrionale, le climat aurait subi l'influence de la proximité de la mer: des conditions plus humides auraient intensifié les processus d'érosion. Les séquences de loess sont dès lors généralement incomplètes. La coupe de Lambres-Les-Aire (LLA) présente des loess weichséliens reposant directement sur un substratum de sables cénozoïques. Les sites retenus

occupent une position de plateau ou de haut de versant (BUS) car les séquences loessiques y présentent la plus forte probabilité d'être complètes. Les horizons de surface, potentiellement contaminés, n'ont pas été étudiés.

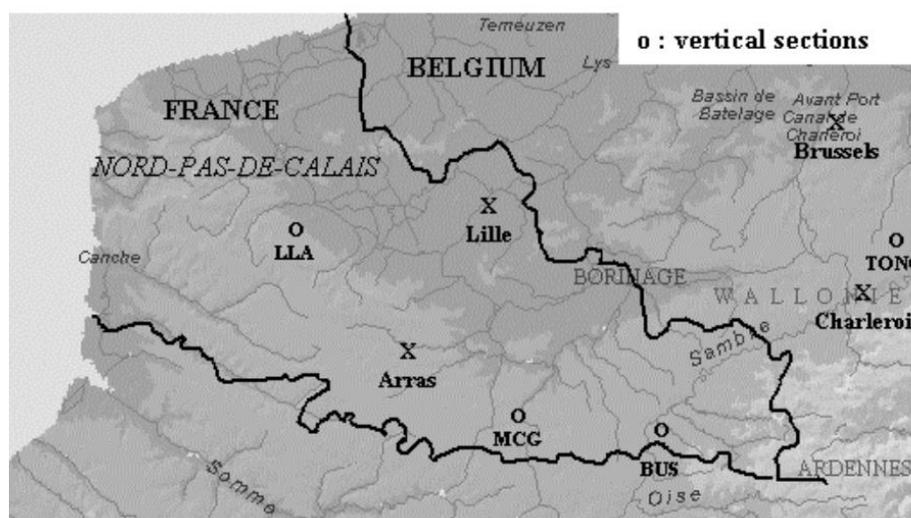


Figure II. 16: Localisation des coupes quaternaires de Tongrinne (TONG), Marcoing (MCG), Busigny (BUS) et Lambres-Les-Aire (LLA).

b description des coupes

A l'instar de la coupe TONG, les trois coupes de CORDIER ont été décrites sur les flancs d'anciennes briqueteries selon la méthodologie standardisée de description des sols de DELECOUR et KINDERMANS (1980).

c déterminations analytiques et méthodes statistiques

Les analyses -pH_{H2O}, COT, CaCO₃, granulométrie, CEC, teneurs totales (HF)- des trois coupes françaises ainsi que la détermination des teneurs totales de six horizons de la coupe TONG ont été réalisées par l'INRA d'ARRAS. Les méthodes d'analyse figurent en annexe 3.

Les méthodes statistiques comprennent (i) l'analyse de la distribution des valeurs variable par variable, en particulier de l'amplitude des variations par rapport à la variabilité opératoire, (ii) l'analyse des corrélations entre éléments, (iii) le recours à l'analyse factorielle discriminante pour l'interprétation en facteurs explicatifs et l'analyse des res-

semblances entre horizons et (iv) les analyses de la variance univariées et multivariées⁷ pour l'estimation de l'importance de l'effet site. Les méthodes statistiques ne constituent pas une fin en soi, mais doivent être perçues comme des outils pour vérifier des hypothèses conçues sur base d'une connaissance théorique et d'observations de terrain. Les représentations graphiques et calculs statistiques ont été réalisés avec les logiciels MS Excel et MINITAB 13.

5.2.2.2 Résultats et discussion

a paramètres descriptifs

La coupe de Marcoing (MAR) est décrite sur une épaisseur de 4 mètres. La séquence d'horizons (Tableau II.10) peut être décrite comme une succession d'horizons illuviaux (BT_1 , BT_2 , BT_3), brun-jaune mat, surmontant des horizons C brun-jaune non-carbonatés (C_1 , C_2), des horizons brun-jaune mat non-carbonatés et légèrement plus argileux (${}_2BT$, ${}_2C_1$), un horizon C jaune-orange mat carbonaté (${}_2C_{2ca}$), puis un horizon C brun-jaune légèrement carbonaté (${}_2C_{3ca}$). Les autres caractéristiques morphologiques remarquables sont: (i) les horizons BT du sol supérieur présentent peu de caractères redox (taches et concrétions); (ii) l'importance de ces caractères dans les horizons C supérieurs augmente vers la profondeur, particulièrement au contact de l'horizon ${}_2BT$; (iii) un horizon supplémentaire a été observé à la tarière sous le ${}_2C_{3ca}$. il présente les mêmes caractéristiques que l'horizon ${}_2C_{2ca}$. Par rapport à la coupe TONG, le sol holocène de la coupe MCG serait classé dans la même série de sols du système de classification de la Carte des sols de la Belgique.

La coupe de Busigny (BUS) atteint une profondeur de 360cm. Huit horizons ont été décrits. Les traits morphologiques principaux sont repris dans le tableau II.10. La description se résume comme suit: un horizon brun-jaune épais (C_1) présentant de nombreuses taches d'oxydo-réduction et quelques revêtements argileux en surface des agrégats, au-dessus d'un ensemble relativement homogène d'horizons jaune-orange mat (C_2 à C_7) peu à fort tachés d'oxydo-réduction, surmontant un horizon brun-jaune brillant plus compact (C_8). On notera (i) l'abon-

⁷ Des conditions d'application existent pour l'analyse de la variance multivariée: échantillonnage aléatoire et simple, multi-normalité des populations, égalité des matrices de variance et covariance. Nécessaires aux fins d'inférence statistique, elles perdent leur caractère strict dans un cadre descriptif (PALM, 2000).

dance des taches d'oxydo-réduction dans toute la coupe à l'exception de l'horizon C₄; (ii) la rareté des concentrations Fe/Mn par référence au point (i); (iii) la teinte de la matrice des horizons C₂ et C₄ plus pâle que dans le reste de la coupe; (iv) la texture relativement homogène; et (v) qu'aucun des horizons n'est carbonaté. Les processus redox semblent donc constituer le principal facteur de différenciation des horizons profonds de la coupe BUS.

Tableau II. 10: Principales propriétés morphologiques des horizons des quatre coupes dans les loess

Site / horizon	Profondeur (cm)	Classe texturale	Couleur Munsell	CaCO ₃	Caractères redox	Conc. Fe/Mn
Tongrinne						
B/C	100 - 127	Laf	7.5YR 5/4	(-)	**	*
C ₁	131 - 165	Lf	7.5YR 5/4	(-)	*	*
₂ C ₂	250 - 270	Lf	10YR 5/6	(-)	**	*
₃ BTg	280 - 285	Lf	10YR 5/4	(-)	*	***
₄ BT ₃	322 - 340	Laf	7.5YR 5/6	(-)	*	
₄ C	360 - ...	Lf	7.5YR 6/6	(-)	*	*
Marcoing						
BT ₁	44 - 76	Lf	10YR 5/6	(-)	*	*
BT ₂	76 - 105	Lf	10YR 5/4	(-)	*	*
BT ₃	105 - 135	Lf	10YR 5/4	(-)	*	*
C ₁	135 - 160	Lf	10YR 5/6	(-)	*	
C ₂	160 - 210	Lf	10YR 5/6	(-)	**	
₂ BT	210 - 255	Lf	10YR 5/4	(-)		
₂ C ₁	255 - 300	Lf	10YR 5/4	(-)		
₂ C _{2ca}	300 - 365	Lf	10YR 6/4	(++)	*	
₂ C _{3ca}	365 - 400	Lf	10YR 5/6	(+)	*	
Busigny						
C ₁	46 - 100	Lf	10YR 5/6	(-)	***	
C ₂	100 - 125	Lf	10YR 7/4	(-)	***	*
C ₃	125 - 173	Lf	10YR 6/4	(-)	**	
C ₄	173 - 192	Lf	10YR 7/4	(-)	*	
C ₅	192 - 230	Lf	10YR 6/4	(-)	**	
C ₆	230 - 280	Lf	10YR 6/4	(-)	***	*
C ₇	280 - 335	Lf	10YR 6/4	(-)	***	*
C ₈	335 - ...	Lf	10YR 6/6	(-)	**	
Lambres - les- Aire						
C ₁	40 - 62	Lf	10YR 5/3	(+)		
C _{2ca}	62 - 110	Lf	10YR 6/3	(++)	*	
C _{3ca}	110 - 165	Lf	10YR 6/3	(++)	*	
C _{3/2} C _{ca}	165 - 190	Lf	10YR 5/6	(++)	*	
₂ C	190 - >230	Lf	10YR 5/4	(+)	*	

Texture: Limon fin (Lf); Limon argileux fin (Laf).

CaCO₃: réaction visible à HCl nulle (-), faible (+), forte (++)

Caractères redox et Fe/Mn: pas (|), peu (*), plutôt nombreux (**), nombreux (***)

Le site de Lambres-les-Aire (LLA) représente une région naturelle où les dépôts loessiques couvrent des sables et grès cénozoïques ou des craies crétacées. Suite à d'importants changements tectoniques durant la transition Miocène-Pliocène, les processus d'érosion ont profondément remanié les formations cénozoïques (SOMME *In* CORDIER, 1999). En conséquence, les silexs sont fréquents dans les couches sableuses. En raison d'une exploitation extractive ancienne, seule la partie basse des dépôts loessiques subsiste dans la coupe LLA. La succession d'horizons est la suivante (tableau II.10): un horizon brun-jaune mat (C_1), faiblement carbonaté, recouvrant des horizons carbonatés jaune-orange mat (C_2 , C_3) et brun-jaune à sables fins et silexs (${}_2C$); l'horizon inférieur (${}_3C$), brun-jaune mat, est plus argileux et plus compact; moins carbonaté mais contenant toujours des silexs. Les taches d'oxydo-réduction sont très peu nombreuses à l'échelle de la coupe et les concrétions Fe/Mn absentes. Par rapport aux autres coupes, LLA se distingue par l'abondance des carbonates et l'influence du substratum tertiaire dans les horizons les plus profonds.

Quelques points importants se dégagent donc des observations de terrain de CORDIER (1999).

- Quelques horizons présentent une forte réactivité à HCl, ce qui présume une influence relativement importante de la teneur en carbonates et des propriétés liées à la valeur du pH sur la variabilité entre horizons.
- La texture, telle qu'elle peut être estimée sur le terrain, indique des teneurs plus élevées en argile ainsi qu'une plus grande différenciation entre horizons dans la coupe TONG. La coupe LLA montre une augmentation graduelle avec la profondeur des teneurs en sables fins en raison de la présence d'un substrat sableux sous les loess. La texture représente donc également un facteur potentiel de variation des teneurs en ETMs entre les horizons des différentes coupes.
- Les taches d'oxydo-réduction sont nombreuses dans la coupe BUS, sans pour autant que l'on observe de concentrations ferromanganiques. On peut suspecter que les processus redox ont été importants sans engendrer d'accumulations spectaculaires d'ETMs.

b caractéristiques pédologiques de base

Les amplitudes de variation sont reprises au tableau II.11.a. La variable COT, à l'instar des résultats de la coupe TONG, peut être considérée comme homogène. Les autres paramètres classiques des caractérisations pédologiques présentent des variabilités supérieures à la variabilité opératoire, à l'exception de la coupe BUS qui apparaît très homogène.

La comparaison des coupes confirme (i) la variabilité plus importante des paramètres liés à la basicité dans les coupes MCG et LLA, et (ii) la faible différenciation texturale des coupes MCG et BUS et la variabilité plus élevée des teneurs en argile dans la coupe TONG et en argile et en sables dans la coupe LLA.

Les amplitudes de la CEC sont du même ordre de grandeur dans les quatre coupes. Ceci pourrait signifier à première vue que la relation CEC/argile n'est pas la même d'un site à l'autre. Dans le cas de la coupe TONG, cela s'explique par la différence de méthodes de détermination de la CEC (acétate- NH_4 contre $\text{Co}(\text{NH}_3)_6\text{Cl}_3$ dans les trois autres coupes) et de l'analyse granulométrique (dispersant). Pour ce qui concerne, les trois coupes françaises, on peut considérer qu'il existe une relation linéaire simple entre CEC et teneur en argile (figure II.17) car un seul échantillon se singularise par une CEC trop faible par rapport à son pourcentage d'argile. Rien ne permet donc d'affirmer que les différents sites se caractérisent par des associations typologiques d'argiles spécifiques à chacun d'eux.

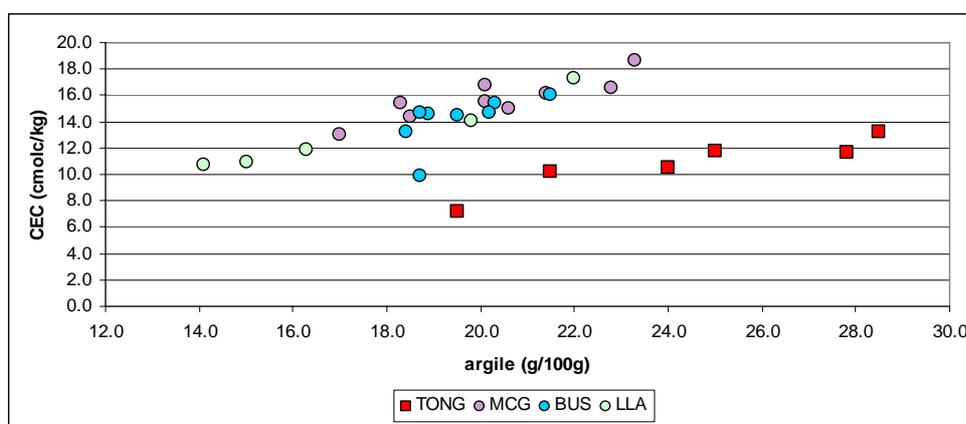


Figure II. 17: Relation CEC (cmolc/kg) - teneur en argile (g/100g) pour les échantillons des quatre coupes limoneuses.

Tableau II. 11: Amplitudes de variation dans les coupes de Tongrinne (TONG), Marcoing (MCG), Busigny (BUS) et Lambres-Les-Aire (LLA) a) des déterminations analytiques de base

Coupe	pH (H ₂ O)	COT g/100g	CaCO ₃ g/100g	Granulométrie			CEC cmol _c /kg
				0-2µm	2-50µm	>50µm	
TONG	0.3	0.1	0.3	9.0	7.8	4.1	6.0
MCG	0.8	0.2	8.7	6.3	10.4	2.9	5.6
BUS	0.4	0.1	0.0	3.1	4.1	1.6	6.2
LLA	0.7	0.0	16.3	7.9	26.9	21.1	6.5

b) des teneurs totales (HF)

Coupe	Teneurs totales						Co	Cd
	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe		
	g/100g							
TONG	0.30	0.31	0.48	0.34	1.58	1.23		
MCG	3.13	0.22	0.30	0.34	1.56	0.78		
BUS	0.06	0.08	0.19	0.11	0.63	0.52		
LLA	6.16	0.46	0.35	0.40	1.45	1.09		
Coupe	Mn	Cu	Zn	Cr	Ni	Pb	Co	Cd
	mg/kg							
TONG	484.2	7.3	15.4	18.8	12.9	2.7	3.4	0.07
MCG	340.0	4.4	19.4	7.3	10.3	3.5	2.2	0.09
BUS	247.3	3.6	4.8	8.9	5.3	4.2	4.5	0.17
LLA	216.4	6.1	20.7	22.9	12.7	4.0	4.3	0.06

c teneurs totales en éléments

A l'exception des teneurs en Cr, Pb, Co et Cd, les amplitudes du tableau II.11.b sont, pour les coupes TONG, MCG et LLA, supérieures aux statistiques de la variabilité opératoire. La coupe BUS par contre, présente des variations aux limites de ces statistiques pour tous les paramètres mesurés sauf les teneurs en Fe et Mn.

Pour ce qui concerne la composition élémentaire, (i) Ca présente logiquement une différenciation plus importante en présence d'horizons carbonatés; (ii) les différenciations de teneurs en Mg, K, Fe, Cu, Cr et Ni répondent à celle des teneurs en argile; (iii) les amplitudes de variation de Na, Al, Zn et Cd sont similaires d'une coupe à l'autre pour TONG, MCG et LLA; (iv) Mn présente une amplitude de variation bien plus importante à TONG que dans les autres coupes; et enfin (v) BUS apparaît comme la coupe la plus homogène. Il appert de ces résultats

tats une certaine cohérence avec les observations de terrain.

d relations entre variables

Les relations entre variables sont partiellement exprimées dans la matrice de corrélation (tableau II.12). Par rapport à la coupe TONG, des changements peuvent être attendus dans les valeurs des coefficients de corrélation, voire dans leurs signes, étant donné que les facteurs de différenciation changent d'un site à l'autre.

Tableau II. 12: Matrice de corrélations relative aux variables mesurées sur les quatre coupes limoneuses (n = 28)

	"0-2µm"	"2-10µm"	">50µm"	pHH2O	CaCO3	Ca	Mg	K	Na	
"2-10µm"										
">50µm"		-0.854								
pHH2O	-0.642									
CaCO3	-0.575	-0.630	0.616							
Ca	<i>-0.570</i>	-0.616	0.646	0.998						
Mg		<i>-0.400</i>	<i>0.524</i>	0.658	0.692					
K	<i>0.537</i>	<i>0.482</i>	<i>-0.486</i>	<i>-0.460</i>	-0.603	-0.579				
Na				<i>0.394</i>			<i>0.441</i>			
Al	<i>0.442</i>	<i>0.499</i>	<i>-0.463</i>		-0.588	<i>-0.560</i>		0.837		
Fe	0.595				-0.599	-0.575		0.721		
Mn									<i>0.481</i>	
Cu								0.689		
Zn	<i>0.364</i>	<i>0.376</i>			<i>-0.482</i>	<i>-0.439</i>		0.596	<i>0.421</i>	
Ni	<i>0.381</i>	<i>0.364</i>			<i>-0.501</i>	<i>-0.457</i>		0.576	<i>0.542</i>	
Cr	<i>0.553</i>				<i>-0.536</i>	<i>-0.502</i>				
Pb		0.607	<i>-0.490</i>		-0.634	-0.607		0.694		
Co								<i>0.484</i>		
Cd									<i>0.549</i>	
		Al	Fe	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co
Fe		0.901								
Mn										
Cu		0.846	0.830							
Zn		0.823	0.831	0.760						
Ni			0.757	0.713	0.921					
Cr		<i>0.518</i>	0.640	<i>0.410</i>	0.734	0.721				
Pb			0.837	0.744	0.763	0.708	0.580			
Co			0.656	0.692	0.592	0.585		0.717		
Cd			<i>0.505</i>			<i>0.409</i>	<i>0.473</i>			

On remarque : (i) les corrélations négatives entre CaCO₃ et la plupart des éléments qui indiquent un effet de dilution par les carbonates; (ii) les corrélations étroites existant entre Cu, Zn, Ni, Pb, Co et, dans une

moindre mesure, Cr et les teneurs en Al et Fe, mais n'existant pas pour les teneurs en argile; (iii) les relations entre ETMs et Mg ou K moins marquées en présence de carbonates; (iv) la faible corrélation entre Mn et les autres variables à l'exception de Cd et Na ($\alpha < 0.01$).

Les corrélations entre ETMs ou Al-Fe et argile sont beaucoup moins fortes que celles observées pour la coupe TONG. La figure II.18 illustre les relations entre teneurs en Al et en argile pour les quatre coupes.

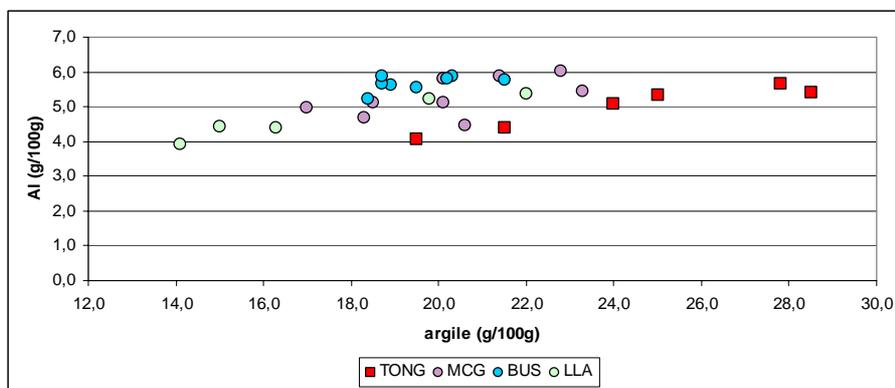


Figure II. 18: Relations Al-argile pour les 4 coupes limoneuses.

Pour les coupes TONG et LLA, la linéarité des relations est évidente. Pour les coupes MCG et BUS, la plus faible différenciation des teneurs explique l'importance relative plus élevée de la variabilité opératoire et la diminution concomitante du coefficient de corrélation. Toutefois, MCG et BUS s'inscrivent relativement bien dans la relation Al-argile de la coupe LLA. Le coefficient de corrélation entre ces deux variables considérées sur les trois coupes françaises est de 0.70 ($\alpha < 0.001$). La raison principale de la faiblesse de la signification de la relation entre Al (ou Fe) et argile semble due à la coexistence de deux relations, une pour TONG, l'autre pour les trois autres coupes. Deux explications sont possibles : (i) il s'agit d'un problème de biais dans les résultats des teneurs en argile dû à l'utilisation de deux méthodes différentes ; ou (ii) il existe réellement un facteur géographique (lithologique ou milieu d'altération) entre les coupes françaises et la coupe TONG. Ceci pose évidemment le problème de la comparaison de résultats issus de méthodes d'analyses différentes et l'incertitude actuelle ne pourra être levée qu'après la réalisation programmée de l'analyse granulométrique de l'ensemble des échantillons selon une seule méthode. En conséquence, dans l'immédiat, les régressions du tableau II.9 ne pourront pas être validées.

La corrélation entre les teneurs en Al et Fe, par contre, est très hautement significative (0.90), le rapport Al/Fe est proche de 2 (figure II.19). A noter toutefois, l'absence de corrélation statistiquement significative entre ces deux éléments pour la coupe BUS, qui présente les caractères d'homogénéité interne et d'oxydo-réduction les plus élevés. Alors, sont-ce les faibles amplitudes de variations ou des phénomènes de redistribution qui expliquent l'absence de corrélation? Probablement, les deux! Seuls les éléments Fe et Mn présentent des amplitudes significatives dans la coupe BUS et ces deux éléments ont leurs teneurs les moins élevées dans les deux horizons décolorés de la coupe.

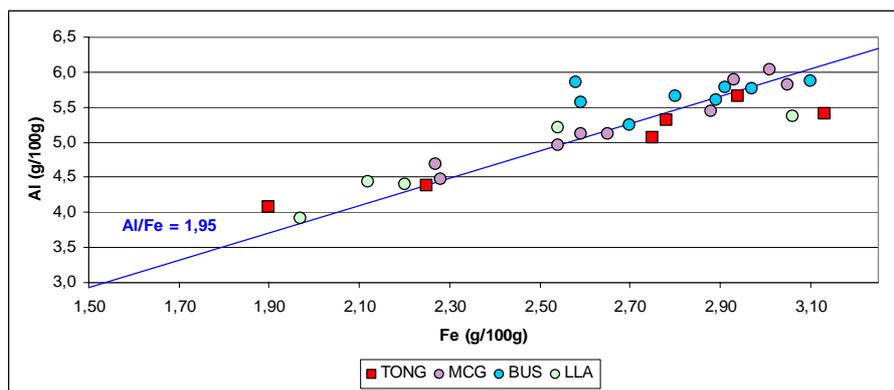


Figure II. 19: Relation Al-Fe dans les quatre coupes limoneuses.

Les éléments Cu, Zn, Ni, Cr, Pb et Co présentent des corrélations très hautement significatives avec Al et Fe (à l'exception de la relation Al-Cr qui n'est "que" hautement significative). Les ordres de grandeurs des corrélations sont comparables pour Al et pour Fe à l'échelle des quatre coupes et suivent l'ordre $Pb > Cu = Zn > Ni > Cr = Co$. Cet ordre n'est toutefois pas respecté à l'échelle des coupes individuelles et il est dès lors impossible de conjecturer sur les formes de ces éléments sans se perdre dans les tourbillons de la recherche du détail insignifiant.

Parmi les autres corrélations hautement significatives, figurent les relations entre Mn, Cd et Na. La relation Mn-Cd (figure II.20) confirme celle supposée pour la coupe de Tongrinne (titre 5.2.1.2.c). Ces deux éléments sont réputés parmi les plus mobiles des ETMs (BAIZE, 1997); une relation linéaire entre leurs teneurs dans les horizons ne semble dès lors pas illogique. Il faut noter que l'horizon de la coupe TONG le plus riche en concrétions ferro-manganiques n'entre pas dans cette relation linéaire, pas plus que l'horizon le plus profond de la coupe BUS, dont la teneur en Cd peut être qualifiée de suspecte.

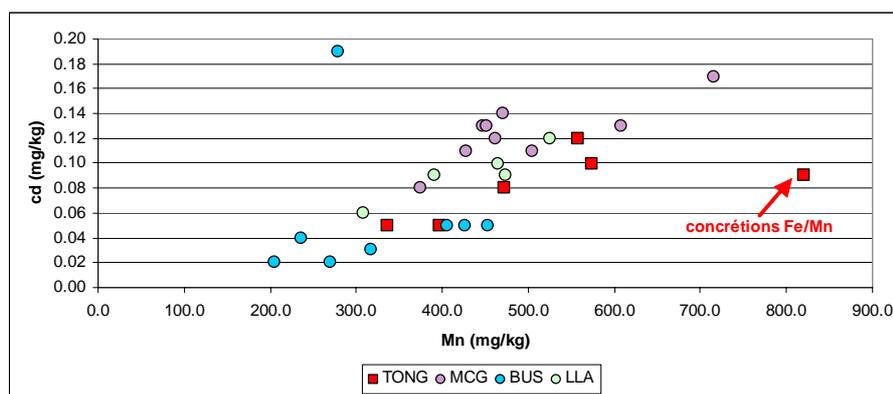


Figure II. 20: Relation Cd-Mn dans les quatre coupes quaternaires

Pour ce qui concerne la relation Na-Mn (figure II.21), les conclusions ne sont pas les mêmes. Plutôt qu'une relation linéaire, il faut voir dans le coefficient de corrélation un effet stratigraphique. Dans la coupe TONG, les horizons "brabantiens" présentent des niveaux de teneurs en Na et Mn supérieurs à ceux des limons plus vieux (titre 6.2.1.2c). Il semble que cela soit le cas également pour les coupes MCG et LLA. Dans la première, les cinq horizons qui présentent des teneurs en Na supérieures à 0.80 g/100g (figure II.21) sont les cinq horizons attribués au profil le plus jeune. Dans la seconde coupe, l'horizon C₁, de même que les horizons C_{2ca} et C_{3ca} si l'on considère les teneurs par rapport à la terre fine sans les carbonates, présentent des teneurs en Na similaires à celles des horizons "brabantiens" de la coupe TONG et du profil supérieur de la coupe MCG. Tous les autres horizons présentent des teneurs en Na comprises entre 0.50 et 0.70 g/100g.

On peut donc émettre l'hypothèse que le Na total dans les limons bien drainés constitue un marqueur stratigraphique, ou tout au moins un marqueur des limons du Weichselien supérieur. Ceux-ci composeraient le matériau parental des profils supérieurs des coupes TONG, MCG et LLA. Pour ce qui concerne la coupe BUS, par contre, les teneurs en Na sont du même ordre de grandeur que dans les limons anciens. Alors, Na est-il un marqueur? Y-a-t'il eu érosion des limons weichseliens de la coupe BUS? Est-ce le caractère hydromorphe de la coupe BUS qui explique les valeurs plus faibles des teneurs en Na? Nous ne possédons pas suffisamment d'arguments pour trancher actuellement, mais la question mérite peut-être un complément d'investigations à l'avenir.

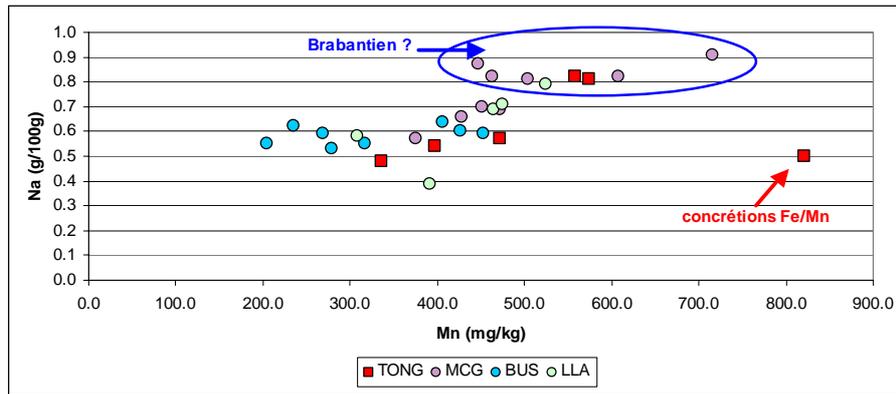


Figure II. 21: Relation Na-Mn dans les quatre coupes quaternaires

e facteurs de variation de la composition élémentaire

Une analyse factorielle a été réalisée sur l'ensemble des échantillons analysés afin de visualiser et hiérarchiser les facteurs de variation de leur composition élémentaire.

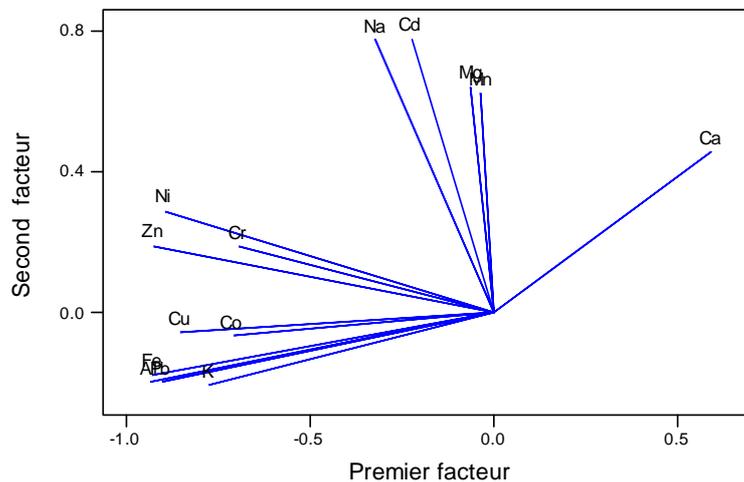


Figure II. 22: Position des variables sur le plan factoriel principal des quatre coupes limoneuses.

Les résultats de l'analyse factorielle (tableau II.13 et figure II.22) indiquent un premier axe factoriel portant 50% de la variation totale de composition élémentaire et opposant les carbonates (exprimés par la teneur en Ca) aux teneurs en éléments liés aux argiles. Il illustre l'effet diluant des carbonates sur la plupart des éléments. Le deuxième axe factoriel contient une information minéralogique (teneurs en carbonates

et plagioclases) et une information relative aux migrations de Mn et Cd, car devraient s'individualiser sur cet axe les horizons à accumulation relative ou absolue de ces deux éléments. Cet axe peut être qualifié de "stratigraphique" car il sépare les horizons "brabantiens", ou supposés tels au point précédent, des autres horizons (figure II.23).

Tableau II. 13: Résultats de l'analyse factorielle sur l'ensemble des horizons des quatre coupes limoneuses: saturations et communautés⁸.

Variable	saturations				communalité
	axe 1	axe 2	axe 3	axe4	
Ca	0.588	0.456	-0.627	0.083	0.953
Mg	-0.062	0.642	-0.721	0.060	0.938
K	-0.777	-0.207	-0.061	-0.444	0.846
Na	-0.324	0.774	0.047	-0.268	0.777
Al	-0.934	-0.196	-0.139	-0.057	0.933
Fe	-0.929	-0.177	-0.061	0.096	0.907
Mn	-0.035	0.623	0.450	-0.502	0.845
Cu	-0.854	-0.057	-0.418	0.057	0.910
Zn	-0.925	0.190	-0.009	0.145	0.913
Ni	-0.895	0.288	0.080	0.066	0.896
Cr	-0.696	0.187	0.387	0.474	0.894
Pb	-0.905	-0.198	0.019	-0.026	0.860
Co	-0.711	-0.067	-0.263	-0.211	0.624
Cd	-0.225	0.776	0.321	0.267	0.827
variance	7.041	2.523	1.648	0.913	12.125
var. relative	50.3%	18.0%	11.8%	6.5%	86.6%

L'axe 3 oppose principalement deux individus relativement pauvres en ETMs: l'horizon du Sol de Warneton ($_3\text{BT}_g$) d'une part, un horizon carbonaté de la coupe LLA d'autre part (figure II.24). Le premier est pauvre en Ca, Mg et Cu et riche en Mn. Le second est le plus riche en carbonates, Ca et Mg. Cet axe reflète quelque part un certain niveau d'altération des matériaux: décarbonatation, illuviation, "dégradation".

Le facteur 4 différencie les horizons d'accumulation de chacune des coupes ($_4\text{BT}_3$ à TONG, $_2\text{BT}$ à MCG, C_8 à BUS et $_2\text{C}$ à LLA). Deux sont des BT enfouis, deux autres des horizons d'accumulation de Cd. De l'autre côté de l'axe, se trouvent l'horizon riche en concrétions Fe/Mn ($_3\text{BT}_g$), ainsi que trois horizons caractérisés par des teneurs en K plus

⁸ Les saturations traduisent le poids des variables sur chacun des axes factoriels, les communautés correspondent à la part de la variance d'une variable exprimée par l'ensemble des axes.

élevées que les horizons environnants. Etant donné la faible variance portée par cet axe, il n'y a pas lieu d'attacher trop d'importance à sa signification. Retenons qu'il caractérise des horizons qui ont, apparemment, accumulé certains éléments préférentiellement à d'autres. Si cela peut s'expliquer pour certains éléments et certains horizons par des migrations accompagnant le lessivage des argiles (Cr) ou sous forme soluble (Cd), il est d'autres combinaisons élément-horizon pour lesquelles le lien ne saute pas aux yeux. Ceci est d'autant plus normal que les axes factoriels portent de moins en moins de covariance entre éléments et que dès lors la variabilité opératoire prend de plus en plus d'importance.

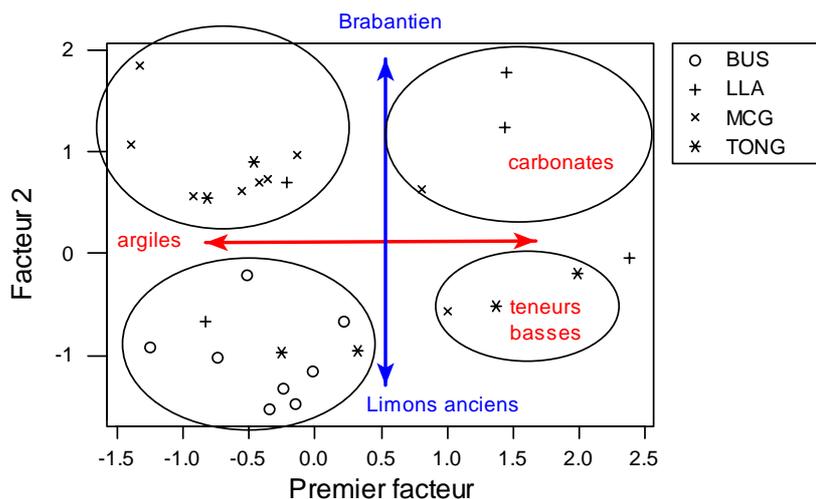


Figure II. 23: Position des échantillons des quatre coupes limoneuses sur le plan factoriel principal

La hiérarchie des facteurs de différenciation semble donc être: les teneurs en carbonates et en argile (facteur 1), la stratigraphie des matériaux (facteur 2) et leur degré d'altération (facteur 3). Quarante-vingt pour-cent de la variance totale étant portés par ces trois facteurs.

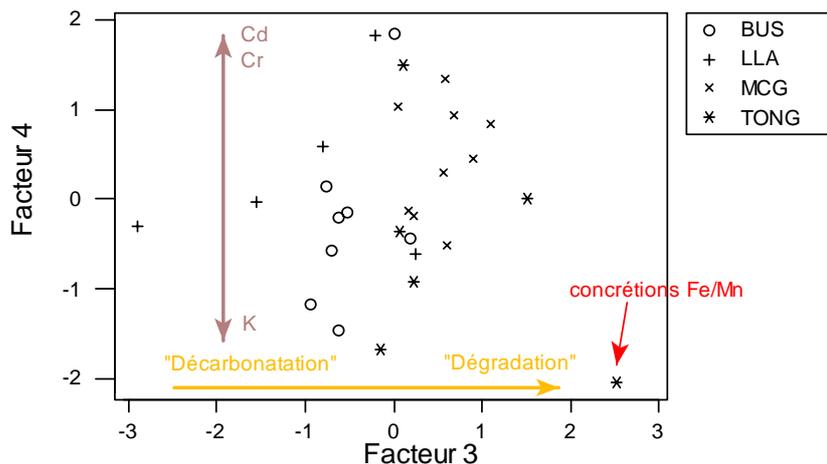


Figure II. 24: Position des échantillons des quatre coupes limoneuses selon les axes factoriels 3 et 4.

f représentativité de la coupe de Tongrinne

Une classification hiérarchique ascendante sur base de l'ensemble des variables permet de visualiser et de quantifier la ressemblance entre horizons, sur base de la totalité des résultats et non plus à partir d'un plan factoriel qui n'est jamais qu'une représentation tronquée (figure II.25).

Les résultats obtenus à partir d'une classification sur base de liaisons par la moyenne et des distances euclidiennes indiquent que (i) les horizons carbonatés (2, 3, 4 et 19) sont différents des non-carbonatés; (ii) les horizons de la coupe MCG et le C₁ de LLA sont très proches des horizons "brabantiens" de la coupe TONG; (iii) les horizons de la coupe BUS et l'horizon profond de la coupe LLA (2C) sont chimiquement proches des limons "hennuyens" de la coupe TONG; (iv) les quelques horizons (2C_{2ca} et 2C_{3ca} de la coupe MCG) qui s'écartent de cette bipartition présentent plus de similarités avec le limon hesbayen et l'horizon de Warneton (coupe TONG).

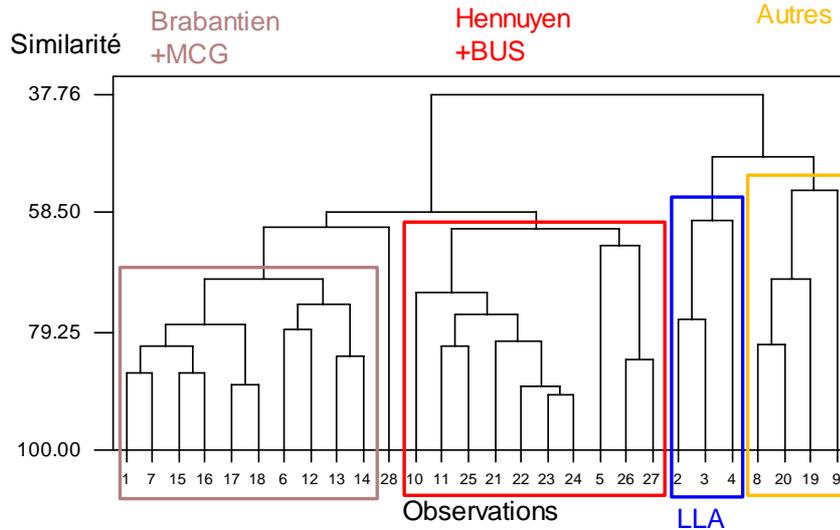


Figure II. 25: Classification hiérarchique ascendante des horizons des quatre coupes limoneuses (liaison par la moyenne - distances euclidiennes). Les observations 1 à 5 correspondent à LLA, 6 à 11 à TONG, 12 à 20 à MCG et 21 à 28 à BUS.

En conclusion, les coupes LLA et TONG apparaissent bien comme les plus différenciées chimiquement parlant, comme cela avait été supposé dès la phase d'observation sur le terrain. En outre, les unités stratigraphiques de la coupe TONG peuvent être considérées comme représentatives des teneurs naturelles dans les limons de profondeur non-carbonatés.

g Importance de l'effet site

Un regroupement clair des horizons par coupe traduit un facteur de différenciation locale ("effet site") important. La variabilité entre horizons d'une même coupe est alors moins importante que celle existant entre les horizons provenant de deux coupes différentes.

De la même façon que pour l'étude de la coupe TONG, l'analyse de la variance doit permettre d'estimer l'importance de ces variabilités. Dans le cas d'un modèle aléatoire -les sites retenus sont représentatifs d'une infinité de situations-, l'équation des écarts par rapport à la moyenne s'écrit:

$X_{ik} - m = A_i + D_{ik}$ (DAGNELIE, 1975) où

A_i = effet aléatoire (site) de moyenne nulle et d'écart-type σ_A et

D_{ik} = effet résiduel de moyenne nulle et d'écart-type σ .

Il est clair qu'aucune analyse de la variance ni aucun test non-paramétrique ne sont nécessaires pour déterminer que les coupes sont différentes en raison de la répartition inégale des horizons carbonatés dans les coupes. L'analyse statistique a donc porté uniquement sur les horizons non-carbonatés (24 individus au lieu de 28). Ont été réalisées des analyses de la variance à un facteur (le site ou la coupe) pour chaque variable considérée individuellement, ainsi qu'une analyse de la variance sur base de l'ensemble des variables. Les résultats figurent au tableau II.14. sous la forme de probabilités associées au risque de se tromper en rejetant l'hypothèse d'égalité des moyennes entre coupes. Le détail des résultats peut être trouvé en annexe 4.

Tableau II. 14: Résultats des analyses de variance univariées et multivariées à un critère de classification sur les quatre coupes limoneuses.

Analyse (a) multivariée - Site	Wilks	Lawley- Hotelling	Pillai		
		0.000	0.000	0.000	
(b) univariée - Site	Ca	Mg	K	Na	Al
	0.000	0.305	0.420	0.026	0.085
	Fe	Mn	Cu	Zn	Cr
	0.712	0.019	0.084	0.084	0.000
	Ni	Pb	Co	Cd	
	0.054	0.018	0.155	0.015	

Les conditions d'application de l'analyse de la variance à des fins d'inférence (note infrapaginale n°7) ne sont pas remplies. Toutefois, celles-ci ne sont pas strictement nécessaires pour déterminer si les coupes diffèrent les unes des autres (il faut alors se donner une marge de sécurité pour le risque de première espèce), ni pour estimer les moyennes ou les variances, contrairement aux intervalles de confiance sur ces estimations

Les résultats d'analyse des variances conduisent à considérer les coupes différentes (pour un niveau $\alpha < 0.04$ ⁹) pour les variables Ca, Na, Mn, Cr, Pb et Cd. En outre, tous les critères d'analyse multivariée convergent pour rejeter de la même manière l'hypothèse d'égalité des moyennes

⁹ DAGNELIE (1975a) estime que le niveau α de 0.05 peut devenir une fourchette de 0.04 à 0.07.

nes.

Ce sont les coupes MCG et BUS qui présentent le plus de dissimilarités entre elles (distances de MAHALANOBIS les plus élevées¹⁰), ainsi que le montre la figure II.26, résultat d'une analyse factorielle discriminante -i.e. qui tient compte de l'information relative au site pour l'examen des corrélations. Les coupes TONG et LLA sont très proches sur le facteur 1 mais nettement distinctes selon le facteur 2.

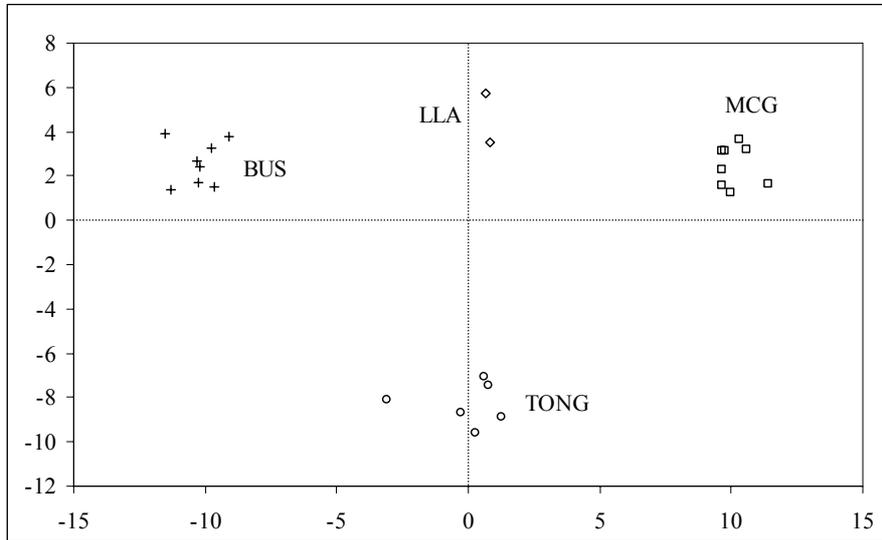


Figure II. 26: Représentation des quatre coupes limoneuses sur le plan principal en analyse factorielle discriminante.

L'effet "site" (A_i estimé par $\hat{\sigma}_A$) peut être considéré comme significatif. Il résulte principalement des variables Ca (59% de sa variabilité est liée aux différences entre les coupes - tableau II.15), Cr (52%), Na, Mn, Pb et Cd (25-30%).

Il apparaît que l'effet "site" concerne peu les variables liées à l'argile, comme Al, Fe, Cu, Zn, Ni ou Co. Ceci signifie que (i) des corrélations entre ETMs et teneurs en Al ou Fe sont d'application plus large que celle d'une coupe isolée; et (ii) le recours aux régressions ETMs-argile est théoriquement¹¹ envisageable pour la prédiction spatiale des teneurs en ETMs.

¹⁰ cf titre 4.3.2

¹¹ Pour peu que les différences entre la coupe TONG et les autres coupes soient en grande partie imputables à la différence de méthode analytique.

Tableau II. 15: Importance relative de l'effet "site" pour les quatre coupes quaternaires sur base de l'analyse de la variance à un critère. Ecart-type factoriel et complément de la variance relative.

Univarié	Ca	Mg	K	Na	Al
	0.11	0.00	0.00	0.09	0.00
s_A $1-(s_{rés}^2 / s_T^2)$	0.593	0.000	0.000	0.268	0.000
	Fe	Mn	Cu	Zn	Cr
	0.00	96.0	0.0	0.0	5.6
s_A $1-(s_{rés}^2 / s_T^2)$	0.000	0.294	0.000	0.000	0.521
	Ni	Pb	Co	Cd	
	0.0	0.9	0.0	0.11	
s_A $1-(s_{rés}^2 / s_T^2)$	0.000	0.297	0.000	0.312	

Une autre manière d'aborder l'effet "site" consiste à stratifier les horizons des coupes selon deux critères: le site et la stratigraphie. Il existe des indices morphologiques et analytiques permettant de diviser les coupes en ensembles stratigraphiques.

Le modèle d'analyse de la variance est dans ce cas un modèle mixte: le site est considéré comme un facteur aléatoire -les quatre coupes représentent une infinité de lieux possibles-, la stratigraphie comme un facteur fixe -on comparera un nombre limité de niveaux stratigraphiques. Le modèle théorique s'écrit:

$$X_{ijk} - m_{...} = a_i + B_j + C_{ij} + D_{ijk} \text{ (DAGNELIE, 1975) où}$$

a_i = effet fixe (stratigraphique);

B_j = effet aléatoire (site) de moyenne nulle et d'écart-type σ_B ;

C_{ij} = terme d'interaction de moyenne nulle et d'écart-type σ_C ;

D_{ijk} = terme résiduel de moyenne nulle et d'écart-type σ .

Deux ensembles ont été retenus à TONG (brabantien et hennuyen), MCG (Bt_1 à C_2 et ${}_2C_1$ à ${}_2C_{3ca}$) et LLA (C_1 contre ${}_2C$) et un seul à BUS. Le caractère stratigraphique se résume à "limon supérieur" (A) et "limon inférieur" (B). L'ensemble de la coupe BUS a été cataloguée "B", et la modalité BUS-(A) a été estimée par les teneurs moyennes des limons supérieurs des trois autres coupes. Les remarques relatives aux conditions d'application restent valables.

Les résultats des analyses de variance multivariée (tableau II.16) indiquent (i) un effet "site" probable, (ii) un effet "stratigraphie" significatif ($\alpha < 0.04$); et (iii) l'absence d'interaction entre effets "site" et "stratigraphie" ($\alpha \gg 0.04$). Ce point signifie donc que les différences entre niveaux A et B sont globalement les mêmes quel que soit le site, mais également que les différences entre les coupes sont les mêmes pour les niveaux A et B.

Tableau II. 16: Résultats de l'analyse de la variance à deux critères pour les quatre coupes quaternaires. Risque d'erreur de première espèce (α).

Analyse multivariée - Site - Stratigraphie - Interaction	Wilks	Lawley-Hotelling	Pillai		
	0.001	0.092	0.000		
	0.011	0.011	0.011		
	0.127	0.263	0.425		
Univarié	Ca	Mg	K	Na	Al
	0.000	0.925	0.014	0.002	0.613
- Site	0.000	0.023	0.011	0.000	0.540
	- Stratigraphie	0.104	0.886	0.390	0.044
- Interaction	Fe	Mn	Cu	Zn	Cr
	0.606	0.819	0.090	0.704	0.017
- Site	0.421	0.003	0.570	0.377	0.325
	- Stratigraphie	0.238	0.753	0.101	0.237
- Interaction	Ni	Pb	Co	Cd	
	0.503	0.413	0.605	0.373	
- Site	0.041	0.917	0.666	0.064	
	- Stratigraphie	0.511	0.823	0.480	0.687
- Interaction					

Les analyse univariées (tableau II.16) montrent la signification (i) de l'effet "site" pour les variables Ca, K, Na et Cr; (ii) de l'effet "stratigraphie" pour Ca, Mg, K, Na et Mn; et (iii) de l'interaction des effets uniquement pour le Cr, mais la différence A-B n'est particulière que pour la coupe BUS dont une des deux valeurs est estimée. Le premier point signifie que les niveaux de teneurs en "bases", à l'exception de Mg, ne sont pas identiques d'un endroit à l'autre, ou en d'autres termes que la distribution régionale des teneurs en "feldspaths" n'est pas homogène; le deuxième point que la distribution minéralogique dépend également de l'âge des limons; le troisième point que les différences de teneurs entre limons anciens et jeunes restent du même ordre de grandeur en tout lieu.

Comment interpréter ce dernier point si ce n'est par une stabilité temporelle des sources de limons éoliens des différents sites ou par le fait que le facteur stratigraphique reflète davantage l'action de processus évolutifs qu'une différence de richesse minéralogique originelle?

Les effets du modèle théorique sont estimés au tableau II.17. L'effet fixe est l'écart entre la moyenne d'une "modalité stratigraphique" et la moyenne générale. Etant donné qu'il n'y a que deux modalités possibles, les effets de ces deux modalités sont identiques en valeur absolue et de sens contraire. La valeur absolue figure au tableau II.17 pour les éléments dont l'effet est significatif ($\alpha < 0.04$). Les effets aléatoires sont exprimés par l'écart-type factoriel et l'écart-type d'interaction lors-

qu'ils sont significatifs. L'écart-type résiduel est estimé par la racine carrée du carré moyen résiduel de l'analyse de la variance si les effets factoriels sont significatifs, par l'écart-type de la population si aucun facteur de stratification n'est retenu.

Tableau II. 17: Importance des effets "site" et "stratigraphie" pour les quatre coupes quaternaires sur base de l'analyse de la variance à deux critères.

Univarié (g/100g)	Ca	Mg	K	Na	Al
- a _i (strat.)	0.11	0.05	0.04	0.16	0.00
- σ _B (site)	0.02	0.00	0.02	0.01	0.00
- σ _C (interaction)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
- σ (résiduel)	0.04	0.05	0.07	0.04	0.37
(mg/kg)	Fe	Mn	Cu	Zn	Cr
- a _i (stratig.)	0.00	121.7	0.0	0.0	2.4
- σ _B (site)	0.00	0.0	0.0	0.0	0.2
- σ _C (interaction)	0.00	0.0	0.0	0.0	1.2
- σ (résiduel)	0.22	88.9	1.3	4.1	3.2
	Ni	Pb	Co	Cd	
- a _i (stratig.)	0.0	0.0	0.0	0.00	
- σ _B (site)	0.0	0.0	0.0	0.00	
- σ _C (interaction)	0.0	0.0	0.0	0.00	
- σ (résiduel)	2.8	1.4	1.2	0.04	

On notera (i) la faiblesse relative de l'effet "site" par rapport à l'effet "stratigraphie", (ii) l'effet "stratigraphie" très bien marqué pour Ca et Na et (iii) l'écart-type résiduel de Mn largement supérieur à la variabilité opératoire, signe qu'un autre facteur explicatif est à rechercher pour cet élément.

Par rapport à l'étude de la coupe TONG, les éléments présentent globalement les mêmes tendances: effet "argile" pour Al, Fe et les ETMs sauf Mn et Cd, effet stratigraphique pour Ca, Mg, K, Na et Mn.

L'effet "site", de prime abord important pour les éléments Ca, Cr, Na, Mn, Pb et Cd se révèle après la prise en compte d'un facteur stratigraphique nettement moins significatif, sauf pour Ca et Na. Si cela se confirmait, cela signifierait que le choix d'un site de référence importe peu pour les limons pourvu que l'on y reconnaisse plusieurs générations de limons.

5.2.3 Conclusions

Pour caractériser la variabilité des teneurs en ETMs dans les matériaux parentaux loessiques, une approche basée sur leur reconnaissance et leur caractérisation stratigraphiques et (paléo-) pédologiques, ainsi que sur une analyse statistique multivariée, a été mise en oeuvre. Malgré leur réputation d'homogénéité, les loess présentent une variabilité, à la fois stratigraphique et géographique. L'analyse multivariée a permis de (i) visualiser les facteurs de la variabilité et les corrélations entre éléments, (ii) de regrouper les individus sur base de leur composition et (iii) d'estimer l'importance de l'effet site. L'analyse statistique permet en outre de quantifier l'intérêt de stratifications sur base de la stratigraphie et de la pédologie.

Pour considérer la représentativité d'une coupe de référence, la plus grande attention devrait être prêtée à son environnement naturel (géologie, position topographique, historique d'occupation...), facteur déterminant pour la nature et l'intensité des processus de pédogenèse et morphogenèse. En ce qui concerne, la représentativité des Membres lithostratigraphiques identifiés sur la coupe de Tongrinne, tous les horizons non-carbonatés des trois autres coupes ont pu être rattachés à un des Membres de Tongrinne. Ces opérations de rattachement ne présentent pas de valeur stratigraphique stricte. Ils ne font qu'exprimer le caractère référentiel de la coupe de Tongrinne en matière de composition chimique des loess non-carbonatés.

Au sein d'une même coupe stratigraphique, la variabilité résulte principalement de la présence de paléosols enfouis. Les redistributions d'argile et les processus redox semblent être les facteurs-clés des différences entre horizons. Les caractéristiques et propriétés actuelles des limons anciens résultent toutefois d'un écheveau de processus complexe à démêler. Lorsque l'on compare plusieurs coupes profondes, l'influence du site d'étude sur la variabilité apparaît d'abord non négligeable pour quelques éléments (jusqu'à plus de 50% pour Ca et Cr). Toutefois, une stratification complémentaire sur base de la stratigraphie supposée des limons permet de nuancer cet effet "site". Celui-ci devient très faible, l'essentiel de la variation s'expliquant par l'âge des matériaux. Les principaux facteurs de variation entre les sites restent les teneurs en argile, les quantités de minéraux porteurs d'éléments et l'intensité des processus redox.

L'effet "site" concernant peu les variables liées à l'argile, comme Al, Fe, Cu, Zn, Ni, Pb et Co, (i) des corrélations entre ETMs et teneurs en Al ou Fe sont d'application plus large que celle d'une coupe isolée; et (ii) le recours aux régressions ETMs-argile est envisageable pour la prédiction spatiale des teneurs en ETMs dans les limons.

5.3 Approche régionale (Horizons C)

Après l'étude des substrats (5.1) et des limons en coupes profondes (5.2), la variabilité de la composition en ETMs des matériaux parentaux est abordée ci-après sous l'angle de la différenciation régionale des limons "brabantiens".

L'importance de l'effet stratigraphique ainsi que celle des redistributions d'argiles ont été montrées. L'objectif de cette partie de l'étude est (i) de vérifier si les corrélations entre ETMs, Al, Fe et teneurs en argiles constatées à un niveau ponctuel existent toujours à une échelle régionale et (ii) d'évaluer l'existence ou non de disparités ou de gradients régionaux. A l'échelle de la Belgique, un gradient granulométrique des dépôts de couverture existe du Nord au Sud. Il peut être intéressant de vérifier si ce gradient existe également à l'intérieur de la région limoneuse.

Un *zoom* stratigraphique est donc opéré sur les loess les plus jeunes en même temps qu'un "*travelling* arrière" depuis la coupe de Tongrinne vers la zone d'étude et la région limoneuse.

Un constat sera d'abord réalisé à partir des données existantes (Base de données AARDEWERK) relatives à la granulométrie des limons éoliens. Ensuite, les structures spatiales des teneurs en ETMs seront étudiées, en relation avec la granulométrie, sur base de transects Est-Ouest et Nord-Sud.

5.3.1 Exploitation des données existantes

La base de données relatives aux caractérisations de profils-types réalisées en complément du levé de la Carte des sols de la Belgique comprend les résultats d'analyse d'environ 70 000 horizons répartis en 13 000 profils (figure II.27). Certains paramètres comme la texture, particulièrement pour les horizons profonds, peuvent être considérés comme peu sujets à évolution temporelle. Ils sont donc potentiellement exploitables pour étudier la distribution spatiale des matériaux parentaux limoneux à une échelle régionale.

Il faut toutefois noter que les méthodes d'analyse granulométrique n'ont pas été identiques d'une planchette à l'autre (figure II.28). La nature du dispersant (NH_4OH , Na-acétate + NH_4 -oxalate, Na-hexamétaphosphate) et l'appareillage de mesure (hydromètre à chaîne ou pipette ROBINSON) constituent une source de variation opératoire

additive. Il existe donc un biais potentiel d'une carte à une autre qui peut se marquer par une exagération (voire la création) de différences anecdotiques ou par une atténuation de différences réelles. L'information relative aux méthodes d'analyse utilisées n'est malheureusement pas disponible pour toutes les planchettes.

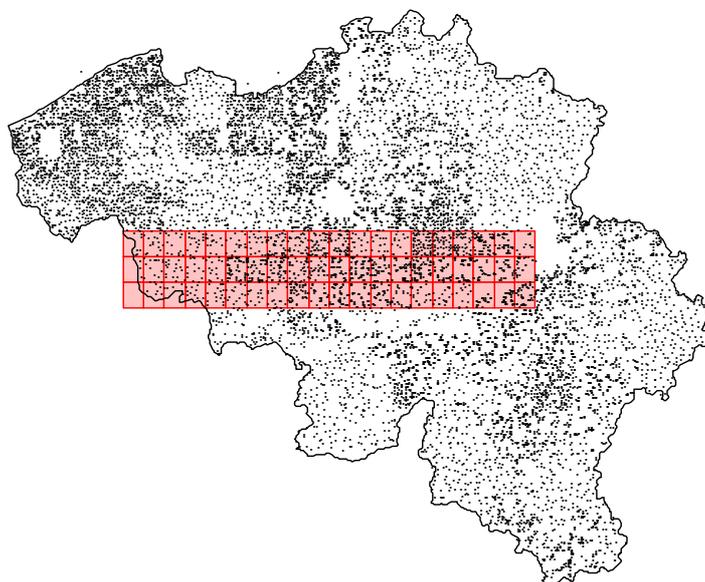


Figure II. 27: Localisation des profils de la base de données AARDEWERK et des planchettes de la Carte des sols de la Belgique utilisées pour le premier niveau de sélection.

5.3.1.1 Sélection des profils de la base de données AARDEWERK

Etant donné l'objectif poursuivi, une sélection doit être opérée parmi les profils de la base de données. Le premier facteur de tri est géographique: la zone délimitée par les planchettes 111W à 120E, 124W à 133E et 137W à 146E (figure II.28) correspond à peu près à la partie wallonne de la région limoneuse. 1 972 profils y ont été décrits. Parmi ceux-ci ne sont retenus que ceux susceptibles de présenter un horizon C "brabantien": soit les séries (CSB) à texture limoneuse (A) et développement de profil à horizon BT (a, a(b), c et B).

Une deuxième source de biais est due à la sélection initiale des profils décrits. L'objectif poursuivi étant l'illustration des principales typologies, le nombre de profils décrits par type de sols ne reflète que partiellement l'extension spatiale des différentes typologies.

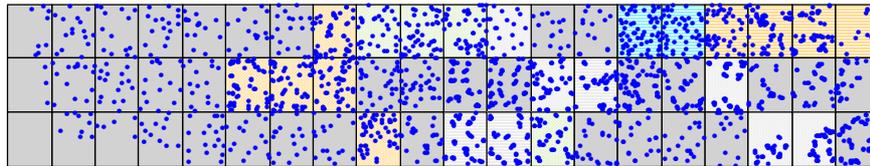


Figure II. 28: Répartition des profils de la base AARDEWERK (points bleus) retenus pour l'analyse spatiale de la granulométrie. En fond les méthodes d'analyse utilisées -dispersant: NH_4OH (bleu clair), mélange $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{Na-oxalate}$ (orange), Na-hexamétaphosphate (vert), pas d'information (gris); appareil: pipette ROBINSON (lignes horizontales), hydromètre à chaîne (lignes obliques), pas d'information (fond uni).

5.3.1.2 Analyse statistique

L'analyse statistique des données concerne (i) l'étude de la normalité de la population des horizons retenus et (ii) l'étude géostatistique de la distribution des teneurs en argile.

Les analyses statistiques classiques ont été réalisées avec MINITAB 13.1, l'étude géostatistique avec VARIOWIN pour l'analyse du variogramme et ILWIS 2.2 pour le krigeage.

5.3.1.3 Résultats et discussion

a normalité de la population

953 horizons de 793 profils¹² ont servi à l'analyse spatiale de la granulométrie des limons éoliens. Les paramètres statistiques classiques figurent au tableau II.18. On notera les valeurs de la moyenne et la médiane légèrement différentes (respectivement 18.4 et 18.9), traduisant une faible dissymétrie négative. Le coefficient d'aplatissement (1.18) traduit un pic plus marqué que pour une courbe normale (figure II.29). La population ne peut d'ailleurs pas être considérée comme normale eu égard à la statistique du test de normalité (< 0.0005). Rappelons toutefois que le grand nombre d'échantillons augmente la sensibilité des tests de signification (WEBSTER, 2001), et que dans ce cas-ci il est plus judicieux d'examiner les coefficients de dissymétrie et d'aplatissement qui sont relativement faibles.

La répartition spatiale des profils à l'échelle de la région n'est pas homogène (figure II.28). Il s'agit d'une source de biais supplémentaire.

¹² Pour certains profils deux, voire trois, horizons répondent aux critères d'horizon C limoneux. Biais pour biais, nous avons choisi de ne pas choisir!

Celles-ci semblent nombreuses et elles doivent inciter à la prudence dans l'interprétation des données.

Tableau II. 18: Statistiques relatives à la teneur en argile pour les 793 profils

Moyenne	18.4	Minimum	3.0
Ecart-type	4.2	Q ₁ ^a	16.0
Variance	17.90	Médiane	18.9
CV (%) ^a	22.8	Q ₃ ^a	21.0
Asymétrie	-0.24	Maximum	39.0
Aplatissement	1.18	N ^a	952
Normalité ^b valeur de p	0.000	ICméd95 ^a	18.0 - 19.0

^a CV: coefficient de variation; Q₁: premier quartile; Q₃: troisième quartile; N: effectif de la population; ICméd95: intervalle de confiance de la médiane sur base du test du signe à 1 échantillon.

^b Test de normalité: Anderson-Darling.

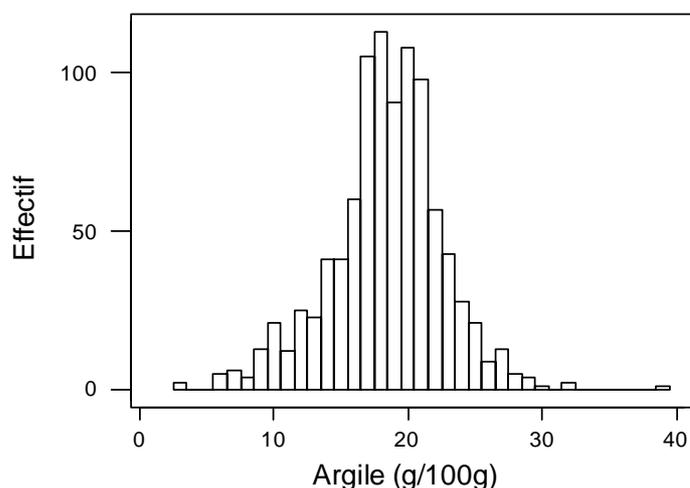


Figure II. 29: Histogramme des fréquences des teneurs en argile dans les horizons C limoneux de la base AARDEWERK.

b absence de gradients spatiaux

Les valeurs des teneurs argiles sont représentées par rapport à la position des profils selon un axe Ouest-Est (figure II.30) et un axe Nord-Sud (figure II.31). Ces représentations permettent de conclure à l'absence de gradient d'argile visible à l'échelle régionale. Les conditions

d'application de l'analyse géostatistique peuvent dès lors raisonnablement être considérées comme remplies. L'examen des figures II.30 et II.31 permet de supposer également que la composante aléatoire des teneurs en argile présente une certaine auto-corrélation spatiale (champ continu), mais également un effet de pépité important (brusques variations).

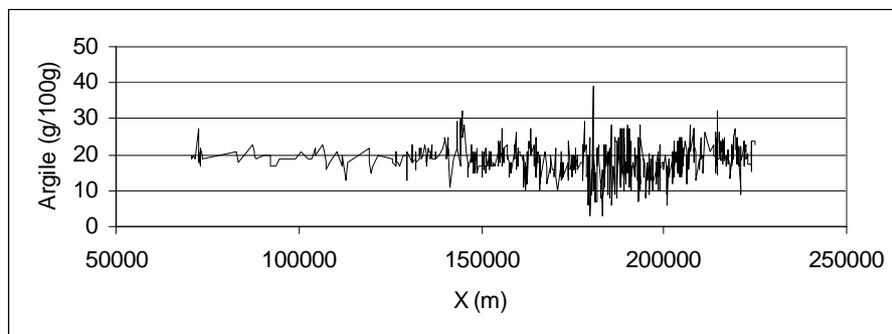


Figure II. 30: Evolution des teneurs en argile des matériaux parentaux selon la direction Ouest-Est.

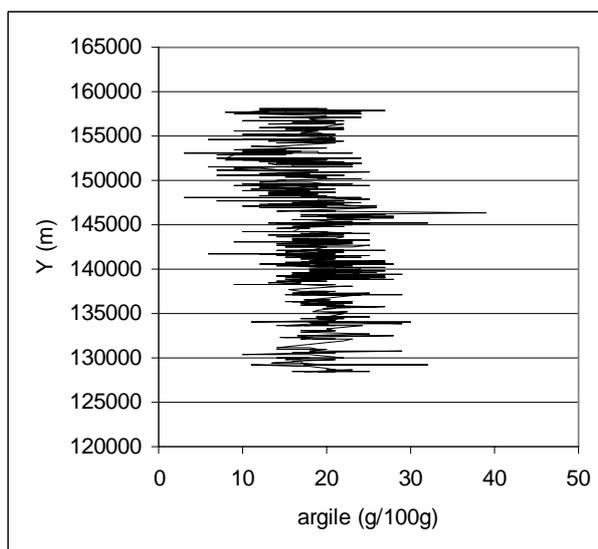


Figure II. 31: Evolution des teneurs en argile des matériaux parentaux selon la direction Nord-Sud.

c analyse variographique

L'analyse de la structure spatiale de la teneur en argile permet de conclure à l'isotropie de la semi-variance. Un modèle sphérique (pépité: 12.50; palier 22.84; portée: 12120m) peut être ajusté aux valeurs obser-

vées (figure II.32).

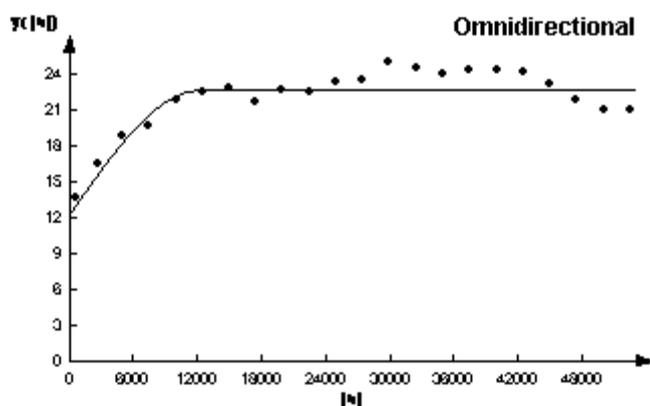


Figure II. 32: Variogramme omnidirectionnel de la teneur en argile dans les profils limoneux (modèle sphérique: 12.50; 22.84; 12120).

Le modèle retenu confirme (i) l'existence de l'auto-corrélation (la semi-variance augmente avec la distance entre les points de mesure) et (ii) l'importance de l'effet pépité ($12,50 \text{ [g/100g]}^2$ par rapport à une variance totale de 22.84).

L'effet pépité contient la variabilité opératoire et la variabilité sur des distances inférieures aux distances observées (ici $< 600\text{m}$). La variabilité opératoire est difficile à estimer en raison du manque d'informations relatives aux méthodes et aux laboratoires d'analyse. Elle est certainement supérieure à celle qui accompagne les mesures effectuées au sein du seul Laboratoire de Géopédologie ($1 \text{ à } 3 \text{ [g/100g]}^2$). Toutefois, elle n'explique probablement pas la totalité de l'effet pépité et la variabilité aux échelles métrique à hectométrique ne peut être négligée.

La valeur du palier (22.84 [g/100g]^2) renseigne sur la "vraie" valeur de la variance totale, supérieure à celle obtenue au tableau II.18 sans tenir compte de la dépendance (spatiale) entre les points. Ceci signifie qu'il faut être prudent dans l'usage des statistiques classiques basées sur l'indépendance entre les points, en raison d'un biais potentiel dû à l'auto-corrélation.

La valeur de la portée (environ 12 kms) indique qu'au-delà de cette distance deux points peuvent être considérés comme indépendants. Pour réaliser une cartographie par interpolation, par contre, le voisinage d'un point à estimer contenant un minimum de points de mesure doit se baser sur des dimensions inférieures à cette distance.

d cartographie des teneurs en argile

Une carte obtenue par krigeage sur base du variogramme modélisé est présentée à la figure II.33. L'absence de gradient granulométrique perceptible est clairement illustrée.

Les teneurs en argiles varient entre 9 et 30g/100g. Les teneurs inférieures à 9 et supérieures à 30 ont été "éliminées" par moyennage des horizons C d'un même profil. Une zone plus "pauvre" en argiles se singularise au Nord-Est de la carte. Elle correspond à l'extension des planchettes 118 W et E.

Faut-il y voir un effet "analytique"? Peut-être, les échantillons analysés pour les cartes 118 ont été dispersés avec un réactif différent des autres planchettes.

On ne peut exclure *a priori* que la vallée de la Gette présente une épaisseur de limons moins importante en raison de processus morphogénétiques plus intenses. Les faibles teneurs en argile dans le limon éolien s'expliqueraient alors par l'influence du substrat sableux.

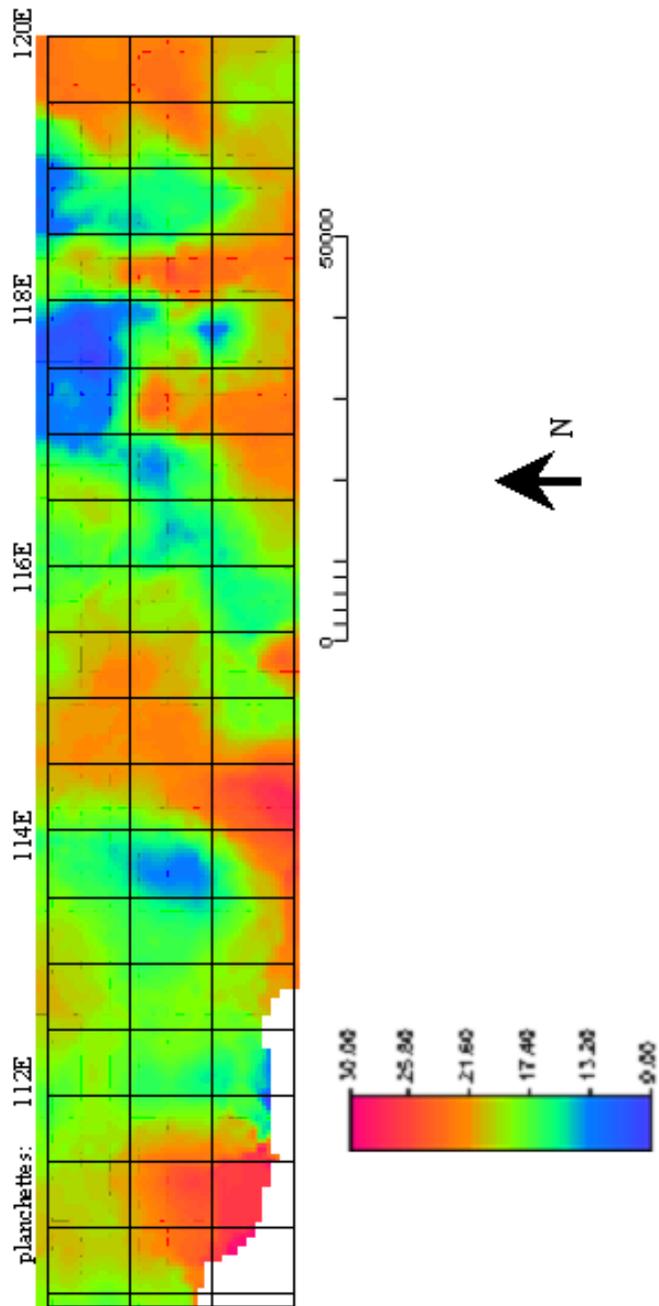


Figure II. 33: Carte des teneurs estimées en argile du limon éolien, en Région limoneuse.

Toutefois, teneurs en argiles et teneurs en sables (figure II.35) ne convergent pas vers cette explication. On ne peut en effet considérer sur base des résultats d'analyse que les teneurs en sables soient plus élevées dans cette zone.

Pas plus d'ailleurs que les informations disponibles sur d'autres sources documentaires:

- ❑ les épaisseurs des limons renseignées sur la carte géologique 118 (1/40 000) ne sont pas inférieures à celles des cartes voisines 117 et 119, ce qui devrait être le cas si les processus d'érosion y avaient été plus intenses;
- ❑ l'analyse morphométrique (pentes) du relief d'après le MNT de la Région Wallonne sur l'étendue de la carte ne montre pas de singularisme par rapport aux régions voisines; et
- ❑ les statistiques relatives à l'importance spatiale des colluvions et alluvions sur les cartes 118 W et E ne diffèrent pas significativement des planchettes voisines (figure II.34).

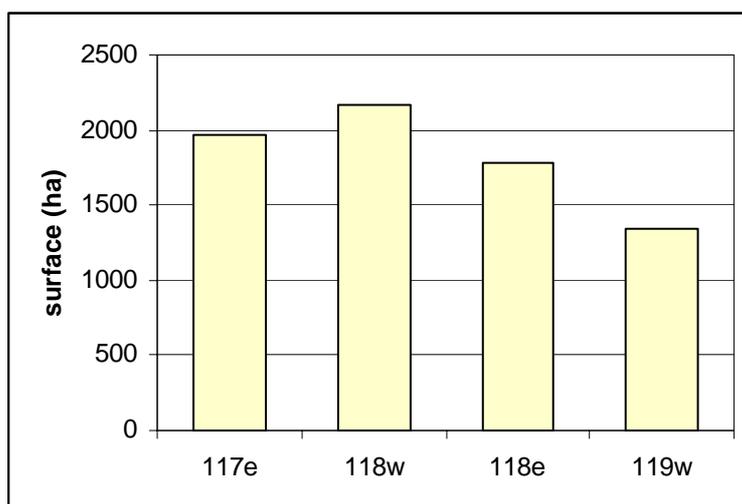


Figure II. 34: Importance des sols à profil p dans les planchettes étudiées.

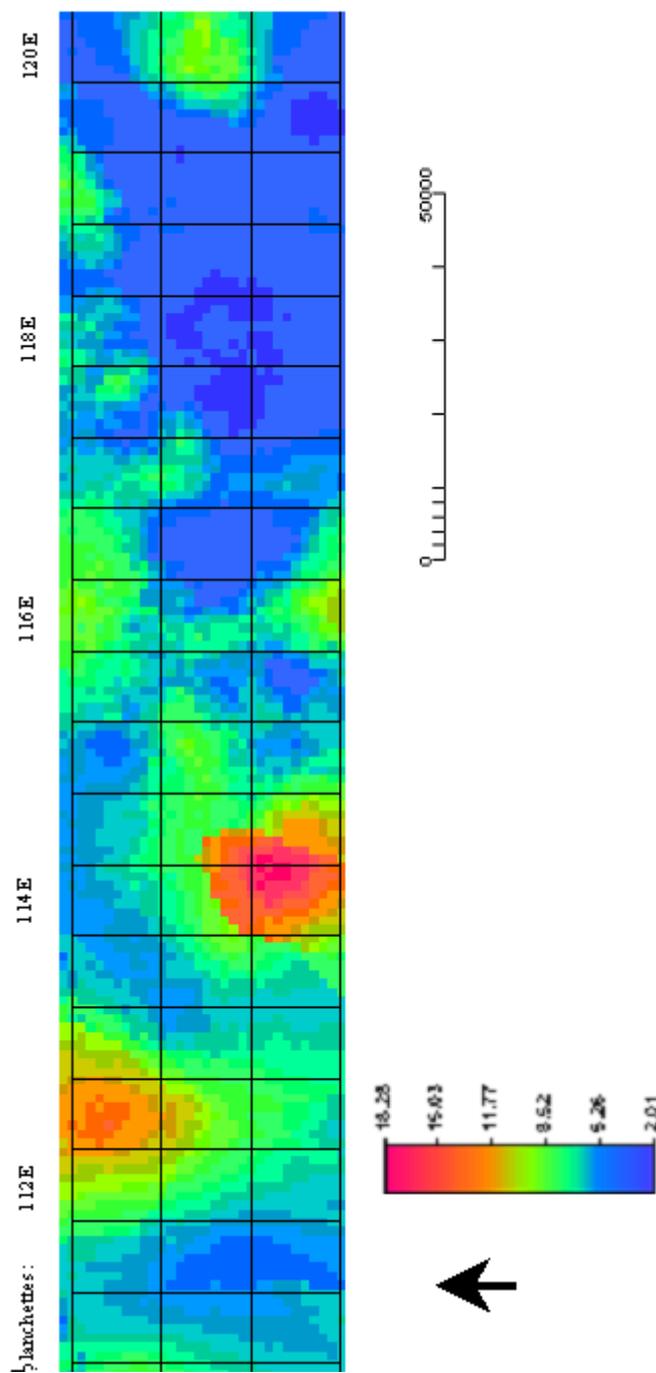


Figure II. 35: Carte des teneurs estimées en sables du limon éolien en Région limousine.

5.3.1.4 Conclusions

L'analyse des données de la base AARDEWERK permet d'estimer des teneurs en argiles pour les limons éoliens de couverture. Ces données ne permettent pas de déceler de gradient granulométrique marqué selon les directions Ouest-Est ou Nord-Sud. Soit ces gradients n'existent pas, soit ils sont masqués par les différents biais existant dans le jeu de données.

L'exercice mené sur une zone présentant des valeurs estimées relativement faibles n'a pu apporter aucun argument explicatif. Il s'agirait soit d'un effet analytique, soit d'un effet aléatoire.

Les données existantes ne permettant pas de mettre en évidence de gradient granulométrique, la question sera poursuivie à travers l'analyse des données originales au titre suivant.

5.3.2 Transects régionaux

Une campagne d'échantillonnage, ciblée sur le loess brabantien, a été menée dans la zone d'étude. Des sondages ont été effectués jusqu'à une profondeur de deux mètres avec description et prélèvement des horizons caractéristiques. L'horizon C "brabantien" a été prélevé à une profondeur la plus proche possible de 150cm. Les sites ont été choisis en position de plateau ou de haut de versant à pente faible de façon à appréhender plusieurs échelles de variation spatiale.

Les objectifs de cette étude sont de vérifier, à travers l'analyse des structures spatiales de la granulométrie et des teneurs en ETMs, (i) l'existence ou l'absence de gradient granulométrique ou minéralogique et (ii) la validité des relations entre éléments établies à partir de la coupe de Tongrinne.

5.3.2.1 Matériels et méthodes

a localisation des transects

Des sites de prélèvements ont été identifiés sur base de la carte des sols pour comparer des échantillons d'horizons C prélevés en situations morphologiques et pédologiques comparables selon un axe Ouest-Est (du méridien de Nivelles à celui de Waremme) et un axe Nord-Sud (parallèles de Waremme et Jemeppe-sur-Sambre).

Le choix des sites a été opéré de manière aléatoire dans des parcelles

agricoles, en essayant de respecter une distance principale entre les sites de l'ordre de 2 000 mètres. En chacun des sites, un deuxième sondage a été réalisé, soit à 15 mètres, soit à 800 mètres du premier sondage dans une direction aléatoire (figure II.36). La distance de 800 mètres correspond à l'ordre de grandeur de la distance entre deux plateaux successifs.

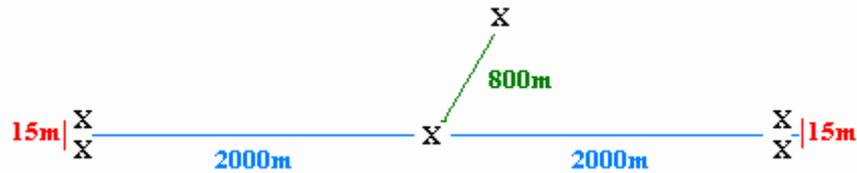


Figure II. 36: Schéma de l'échantillonnage pour les transects O-E et N-S .

Des prélèvements complémentaires ont été effectués afin de répartir les sondages sur les quatre coins de la zone étudiée (figure II.37).

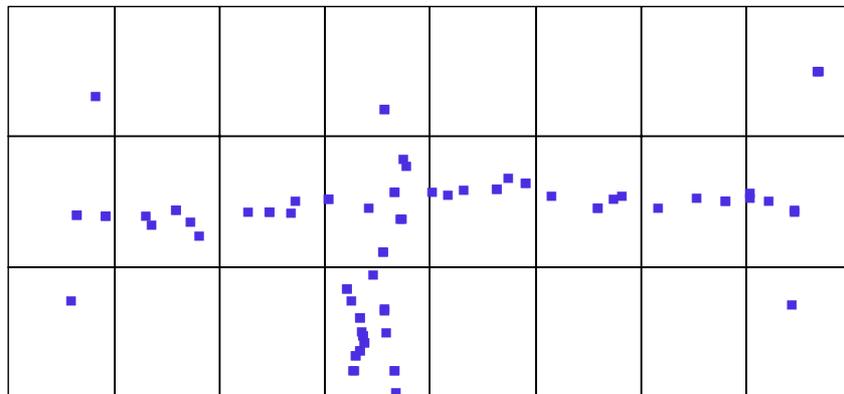


Figure II. 37: Localisation des sondages des transects O-E et N-S sur le découpage des cartes IGN au 1/10.000 (coin supérieur gauche = IGN 39/3).

b échantillonnage et description

Les sondages ont été décrits selon une méthodologie simplifiée et standardisée pour la description des sols. Un exemple de fiche synthétique des observations est repris en annexe 3. Les horizons ont été délimités sur base de leur couleur (MUNSELL soil color chart), de leur texture, de propriétés physiques (résistance, comportement, humidité) et de l'expression de caractères liés aux processus d'oxydo-réduction ou à une charge caillouteuse. En outre, chaque sondage fait l'objet d'un cadrage géomorphologique.

c déterminations analytiques

Les caractérisations de laboratoire sont les suivantes: $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ et pH_{KCl} , granulométrie (neuf fractions), teneurs totales en Ca, Mg, K, Na, Al, Fe, Mn, Cu, Zn, Ni, Cr, Pb, et Co. Ces analyses ont été réalisées au sein du Laboratoire de Géopédologie, à l'exception du dosage des teneurs totales en Cr, Pb, et Co qui fut réalisé par le laboratoire du BEAGx. Les protocoles d'analyse figurent en annexe 3.

Les analyses statistiques classiques ont été réalisées avec MINITAB 13, les aspects géostatistiques avec VARIOWIN et ILWIS 2.2.

5.3.2.2 Résultats et discussions

a pH, granulométrie et teneurs totales en éléments majeurs

Les statistiques descriptives relatives aux pH, aux fractions granulométriques "0-2 μm " (argiles), "0-10 μm " (argiles + la plupart des minéraux feldspathiques) et ">50 μm " (sables), ainsi qu'aux teneurs en éléments majeurs figurent au tableau II.19 a et b. Sont donnés dans le tableau les paramètres classiques de position et de dispersion, ainsi que les indices de dissymétrie, d'aplatissement, le risque d'erreur pour le rejet de l'hypothèse de normalité des populations, les limites de confiance de la médiane sur base du test du signe à 1 échantillon (cf MINITAB) et, en cas de normalité, les limites de confiance (95%) de la moyenne et de l'écart-type.

Les pH (H_2O et KCl) sont relativement homogènes, 50% des résultats sont compris dans les intervalles 7.3 / 7.8 et 5.7 / 6.3, respectivement. Les valeurs inférieures à 6.5 (2 occurrences) pour le $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ apparaissent comme des valeurs aberrantes (*i.e.* inférieures à $Q_1 - 1.5*[Q_3 - Q_1]$ ou supérieures à $Q_3 + 1.5*[Q_3 - Q_1]$, selon les usages en vigueur [MINITAB; BAIZE, 1997]). Il en va de même pour les valeurs de pH_{KCl} inférieures à 4.8 (2 valeurs) ou supérieures à 7.2 (2 valeurs).

Les fractions granulométriques "0-2 μm " et "0-10 μm " présentent une variation relativement faible ($\text{CV} < 12\%$), contrairement à la fraction ">50 μm " ($\text{CV} = 56.5\%$). Pour ces fractions, les teneurs inférieures à 18.8% ("0-2 μm "), à 27.1% ("0-10 μm ") ou supérieures à 18.2% (">50 μm ") constituent des valeurs aberrantes. En conséquence directe, les deux dernières fractions s'écartent de la normalité par une asymétrie droite modérée ("0-10 μm ") ou gauche prononcée (">50 μm "). Celle-ci résulte essentiellement de deux sondages effectués à Waremme.

Tableau II. 19 a: Statistiques descriptives - pH, granulométrie

	pH		granulométrie		
	H ₂ O	KCl	0-2µm	0-10µm	>50µm
Moyenne	7.5	6.0	24.0	33.1	8.5
Ecart-type	0.39	0.5	2.4	3.7	4.8
CV (%) ^a	5.2	8.3	10.0	11.2	56.5
Dissymétrie	- 1.05	-0.65	-0.48	-0.95	2.29
Aplatissement	2.01	3.28	0.36	1.93	8.07
normalité - p ^b	0.006	0.001	0.115	0.001	0.000
ICµ95% ^a	-	-	23.5 / 24.5	-	-
ICσ95% ^a	-	-	2.0 / 2.8	-	-
Minimum	6.1	4.2	17.1	19.6	2.1
Q ₁ ^a	7.3	5.7	22.9	31.9	5.7
Médiane	7.6	6.1	24.1	33.2	7.6
Q ₃ ^a	7.8	6.3	25.5	35.1	10.7
Maximum	8.1	7.6	29.1	40.2	30.9
N ^a	82	82	82	82	82
ICméd95% ^a	7.4 / 7.6	6.0 / 6.2	23.7 / 24.6	32.8 / 34.0	6.4 / 8.7

b) éléments majeurs.

	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe
	g/100g					
Moyenne	0.48	0.48	1.69	0.72	5.11	2.58
Ecart-type	0.05	0.04	0.13	0.05	0.33	0.16
CV (%) ^a	10.4	8.3	7.7	6.9	6.5	6.2
Dissymétrie	0.38	-0.79	-0.25	0.22	-0.18	-0.40
Aplatissement	1.71	0.34	1.16	0.95	-0.49	0.26
normalité - p ^b	0.001	0.000	0.050	0.088	0.350	0.802
ICµ95% ^a	-	-	1.65 / 1.71	0.71 / 0.73	5.04 / 5.18	2.55 / 2.62
ICσ95% ^a	-	-	0.11 / 0.15	0.05 / 0.06	0.28 / 0.39	0.14 / 0.19
Minimum	0.34	0.37	1.33	0.59	4.42	2.10
Q ₁ ^a	0.45	0.46	1.61	0.69	4.91	2.47
Médiane	0.48	0.49	1.69	0.71	5.10	2.60
Q ₃ ^a	0.50	0.51	1.75	0.76	5.40	2.70
Maximum	0.65	0.56	2.04	0.90	5.72	2.94
N ^a	82	82	82	82	82	82
ICméd95% ^a	0.47 / 0.49	0.47 / 0.49	1.65 / 1.73	0.71 / 0.73	5.01 / 5.19	2.54 / 2.63

c) ETMs

	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co
	mg/100g						
Moyenne	473.9	15.1	53.4	28.0	59.0	14.1	9.9
Ecart-type	66.7	1.8	5.0	3.4	10.4	1.88	1.5
CV (%) ^a	14.1	11.9	9.4	12.1	17.6	13.3	15.1
Dissymétrie	1.43	-0.83	0.39	0.29	-0.30	-0.69	0.43
Aplatissement	7.02	0.30	1.63	0.02	-0.23	0.38	0.52
normalité - p	0.003	0.002	0.287	0.118	0.389	0.177	0.476
IC _μ 95% ^a	-	-	52.3 / 54.5	27.2 / 28.9	56.1 / 61.4	13.6 / 14.6	9.4 / 10.3
ICσ95% ^a	-	-	4.3 / 5.9	2.9 / 4.1	9.0 / 12.4	1.39 / 2.30	1.2 / 1.9
Minimum	315.1	9.9	42.6	20.5	30.3	8.9	7.0
Q ₁ ^a	439.6	14.0	50.3	25.8	51.1	13.2	9.0
Médiane	464.5	15.4	54.0	27.6	59.5	14.2	9.7
Q ₃ ^a	506.0	16.4	56.6	30.1	66.9	15.4	10.6
Maximum	807.6	18.2	71.7	37.1	78.8	17.2	14.0
N ^a	82	82	82	68	75	75	41
ICmédi95% ^a	451.7 / 484.9	15.2 / 15.9	52.0 / 54.8	26.5 / 28.5	56.4 / 62.7	13.5 / 14.8	9.3 / 10.2

^a CV : coefficient de variation; Q₁ : premier quartile; Q₃ : troisième quartile; N : effectif de la population; IC_μ95% et ICσ95% : intervalles de confiance de la moyenne et de l'écart-type; ICmédi95% : intervalle de confiance de la médiane sur base du test du signe à 1 échantillon.
^b Test de normalité : Anderson-Darling.

On notera que la distribution des teneurs en argile est nettement décalée vers la droite (teneurs supérieures) par rapport à celle de la base AARDEWERK. Ceci peut être dû à un biais analytique et/ou au fait que la population d'horizon C "brabantiens" est plus homogène car ciblée sur un horizon reconnu sur le terrain, ce qui n'est pas possible avec la base AARDEWERK.

Les teneurs en éléments majeurs se caractérisent par des populations normales (K, Na, Al et Fe) ou non (Ca et Mg). Les variations sont à nouveau relativement faibles. Les coefficients de variation, inférieurs à 10.5%, sont pour chaque élément à peine supérieurs à ceux de la variabilité opératoire (tableau I.18). Les variances du jeu de données sont

néanmoins statistiquement différentes¹³ des variances opératoires (tableau II.20) sauf pour Na et Fe. Les amplitudes, par contre, sont nettement supérieures aux ppds, en raison de l'influence de quelques valeurs extrêmes.

Tableau II. 20: Evaluation du degré de signification de la variance observée dans les limons "brabantiens" par rapport à la variabilité opératoire.

Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn
[**]	[***]	***	NS	*	NS	[***]
Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co	0-2 μ m
[***]	***	NS	(NS)	(***)	***	***

NS: Non Significatif; Niveaux de signification: * = 0.05, ** = 0.01, *** = 0.001
(): variabilité inférieure à la variabilité opératoire; []: population non-normale.

Même si les variances sont différentes des variances opératoires, pour les distributions de fréquences groupées autour de la moyenne (et de la médiane), on peut supposer que la variabilité sera essentiellement d'ordre opératoire et que, dès lors, elle présentera au mieux une très faible structure spatiale.

b teneurs totales en ETMs

Les statistiques relatives aux ETMs sont présentées au tableau II.19.c. Les coefficients de variation sont légèrement supérieurs à ceux de la variabilité opératoire (tableau I.18) pour Mn, Cu, Zn et Co, et du même ordre de grandeur ou inférieurs pour Ni, Cr et Pb. Les variables Mn et Cu s'écartent de la normalité par quelques valeurs extrêmes qui peuvent être considérées comme aberrantes: <340.0 (2 occurrences) ou >605.6 mg/kg (2 occurrences) pour Mn et < 10.4 mg/kg pour Cu (2 occurrences). Les variables Zn, Ni, Pb et Co, bien qu'affichant une statistique p relative à la normalité plus élevée, présentent des valeurs aberrantes également; respectivement >66.0 (2), >36.6 (1), <10.0 (2) et >13.0 (1) mg/kg.

Les individus concernés par les aberrations dans les teneurs mesurées ne sont pas les mêmes d'une variable à l'autre, ce qui rend la recherche d'un facteur explicatif naturel plus difficile. En effet, à l'exception de Mn qui présente un comportement particulier, il est logique d'attendre

¹³ Les tests relatifs à la variance sont très sensibles à la non-normalité de la population. Toutefois, le degré élevé de signification obtenu pour Ca, Mg, Mn et Cu, les variables non-normales, est un gage de non-identité des deux variances.

d'un facteur naturel dans les limons un enrichissement (par illuviation...) ou un appauvrissement (par dilution par un substrat sableux...) généralisé à plusieurs éléments.

Exprimée en terme de variance, la variabilité des limons "brabantiens" est plus élevée que celle résultant de l'analyse (tableau II.20) pour Mn, Cu, Zn et Co, contrairement aux trois éléments qui présentent la variabilité opératoire la plus élevée (Ni, Cr et Pb).

D'une manière générale toutefois, les variations moyennes de composition élémentaire sont relativement faibles dans les limons "brabantiens"; toutes sont inférieures à celles observées à l'échelle de la coupe de Tongrinne.

c relations entre éléments

En raison de ce qui précède, c.à.d. l'importance relative de la variabilité opératoire dans la variabilité totale, on doit s'attendre à observer de faibles niveaux de corrélations entre les variables.

Le tableau II.21 regroupe les coefficients de corrélations (PEARSON) entre les variables mesurées sur les limons "brabantiens". Les valeurs de r sont toujours inférieures à 0.70, à l'exception de la relation entre les deux pH (0.80), et le plus souvent inférieures à 0.60. On notera:

- le niveau élevé de signification des relations entre certaines variables, ce qui est rassurant pour la qualité des analyses et tend une nouvelle fois à indiquer que les statistiques du tableau I.18 surestiment la variabilité opératoire, notamment pour Ni et Pb;
- Mg, K, Al, Fe, Cu, Zn, Ni et Co forment un groupe étroitement lié aux particules fines (0-10µm davantage encore que 0-2µm sauf pour Co);
- Ca présente une relation de constitution avec les particules fines et une relation fonctionnelle probable avec le pH.
- Pb montre également des teneurs à la fois influencées par la proportion de particules fines et par le pH;
- Cr et les teneurs en sables ne présentent aucune relation linéaire avec d'autres variables.

On retrouve donc apparemment la dépendance entre ETMs et argile malgré des niveaux de variation relativement faibles par rapport à la variabilité opératoire.

Tableau II. 21: Matrice des coefficients de corrélation entre les variables - horizons C "brabantiens".

	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co	0-2	0-10	S	pHeau
Mg	0.444																
K	0.331	0.707															
Na																	
Al	0.365	0.570	0.381														
Fe	0.314	0.626	0.560		0.512												
Mn	0.288	0.265	0.248		0.357	0.470											
Cu	0.392	0.666	0.555		0.557	0.536											
Zn	0.397	0.563	0.508		0.544	0.501		0.559									
Ni	0.367	0.353	0.375		0.374	0.321	0.512	0.507	0.355								
Cr																	
Pb	0.577	0.334			0.276	0.326		0.355	0.393	0.307							
Co			0.348		0.361	0.601		0.414	0.476								
0-2	0.367	0.426	0.354		0.486	0.468		0.531	0.368	0.256		0.303	0.607				
0-10	0.459	0.633	0.577		0.577	0.613	0.332	0.584	0.438	0.284		0.301	0.555	0.767			
S																	
pHeau	0.461											0.358	0.443	0.307	0.276		
pHKCl	0.451											0.262					0.801

L'analyse factorielle n'ajoute que peu d'information: toutes les variables, sauf Na et Cr, contribuent dans le même sens au premier axe factoriel (fig. II.38); celui-ci exprime l'importance relative des fractions granulométriques fines (fig. II.39).

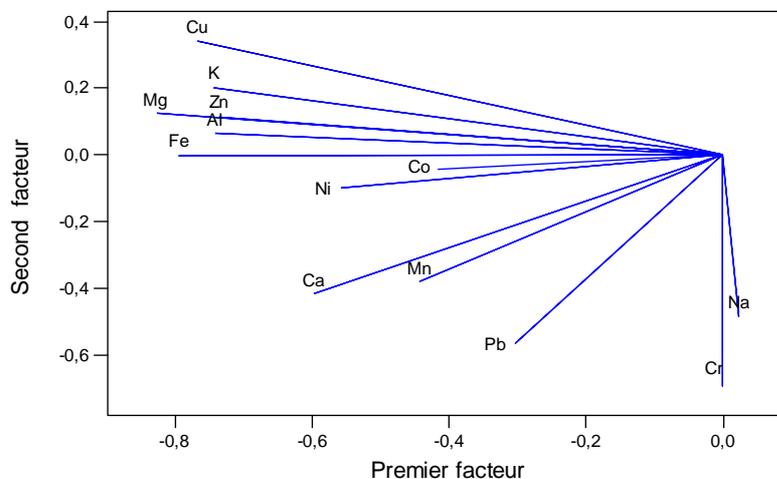


Figure II. 38: Plan factoriel principal relatif aux teneurs en éléments dans les horizons C "brabantiens".

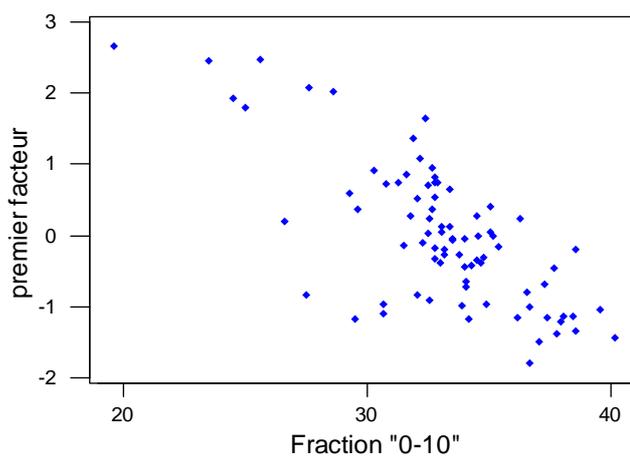


Figure II. 39: Relation entre les valeurs sur le premier axe factoriel et la proportion de la fraction "0-10µm" pour les horizons C "brabantiens".

d structures spatiales

La faiblesse relative de la variabilité de constitution élémentaire des horizons C "brabantiens" ainsi que l'influence de la teneur en argiles et limons fins sur celle-ci ont été constatées. La structure spatiale de ces éléments sera donc étudiée en relation avec celle des teneurs en argiles.

Dans un premier temps, l'examen des teneurs en argile de l'horizon C «brabantien» en fonction de la position géographique (figure II.40) ne montre pas de gradient d'argile quel que soit l'axe considéré.

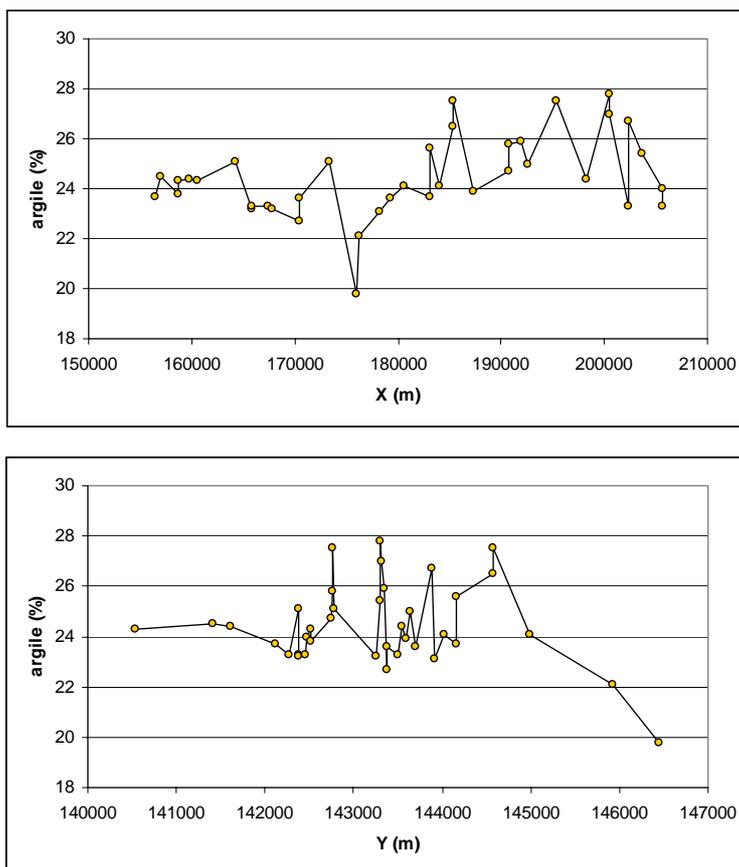


Figure II. 40: Teneurs en argile de l'horizon C «brabantien» en fonction de la position géographique (X et Y en mètres - coordonnées dans le système de projection Lambert 1972).

Pour ce qui concerne les teneurs totales en éléments, et particulièrement les éléments liés aux teneurs en argiles, aucun gradient géographique n'a pu être mis en évidence non plus, à l'exception des éléments Ni et Co. Ces derniers présentent en effet une relation linéaire avec la latitude de l'ordre de 0.1 mg/kg par kilomètre. Pour Co, la part de la variance

"expliquée" par la régression linéaire selon l'axe nord-sud (Y) vaut 27.6%, alors que pour Ni elle est inférieure à 7%.

Aucun gradient granulométrique ne contribue dès lors à expliquer de manière satisfaisante la distribution spatiale des éléments étudiés.

En absence de gradient marqué, la continuité spatiale des teneurs en éléments est analysée sur base des variogrammes omnidirectionnels, dont les plus représentatifs sont présentés dans les figures II.41 à II.43.

Pour ce qui concerne les variables pH_{H_2O} , pH_{KCl} et les fractions granulométriques, on ne remarque aucune dépendance spatiale nette aux échelles considérées (figure II.41). Les variogrammes des pH sont très semblables; ceux des fractions "0-2 μ m" et "0-10 μ m" également.

Pour les pH, ces résultats n'ont rien de surprenant vu le degré d'homogénéité relativement élevé au sein de l'échantillon étudié. On peut s'interroger par contre sur les résultats relatifs à la granulométrie. Le variogramme de la figure II.41 est totalement différent de celui établi sur base des données AARDEWERK (figure II.32). Les différences majeures entre les deux jeux de données résident dans (i) l'effectif des échantillons et (ii) l'homogénéité des méthodes d'échantillonnage et d'analyse pour le transect régional. Il s'agit toujours du même type d'horizon reconnu sur le terrain par la même personne et analysé selon le même protocole. Les données de la base AARDEWERK, bien que plus nombreuses, sont plus hétéroclites et elles ne garantissent donc pas la représentativité des limons "brabantiens" mais plutôt celle d'un ensemble de matériaux limoneux "indifférenciés" au point de vue stratigraphique.

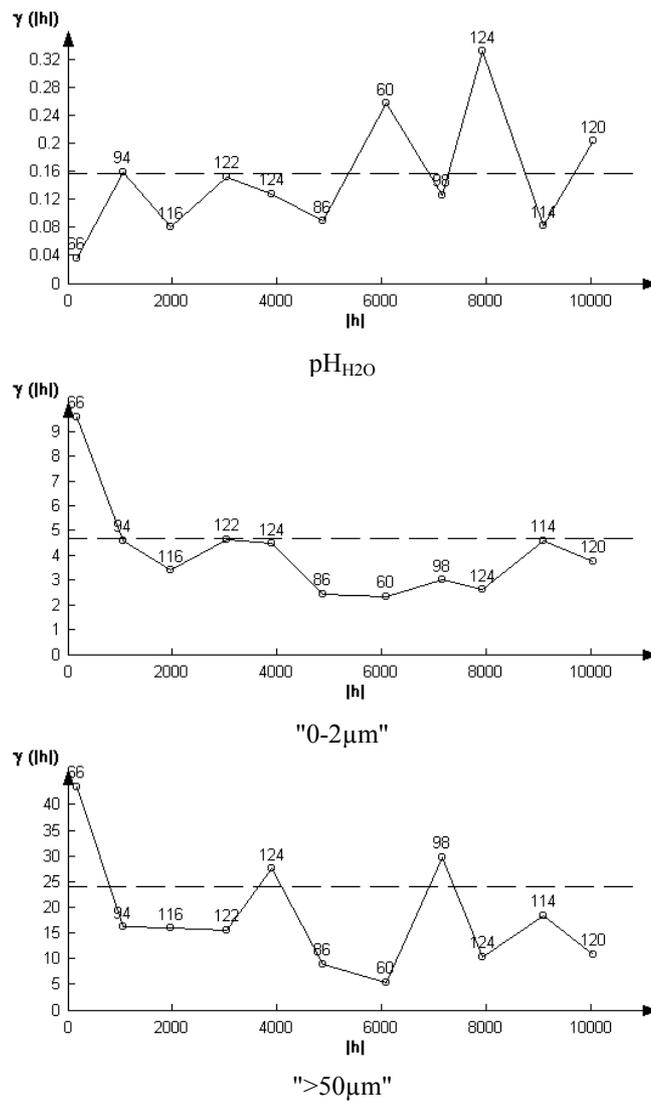


Figure II. 41: Variogrammes omnidirectionnels et nombre de paires de points. pH_{H2O}, fractions granulométriques ("0-2μm", ">50μm")

Pour les éléments majeurs, seul Na présente en apparence une certaine auto-corrélation spatiale, la semi-variance montrant une tendance à l'augmentation en fonction de la distance entre les points, jusqu'à une portée de l'ordre de 4000m. Cette auto-corrélation est en réalité due à la présence de valeurs extrêmes pour des sondages relativement isolés géographiquement (figure II.44), ce qui engendre une sous-estimation de la variabilité à courte distance.

Le variogramme de Al est lui représentatif de ceux de Mg, K et Fe. La semi-variance décimétrique est du même ordre de grandeur que celles relatives à des distances plus importantes.

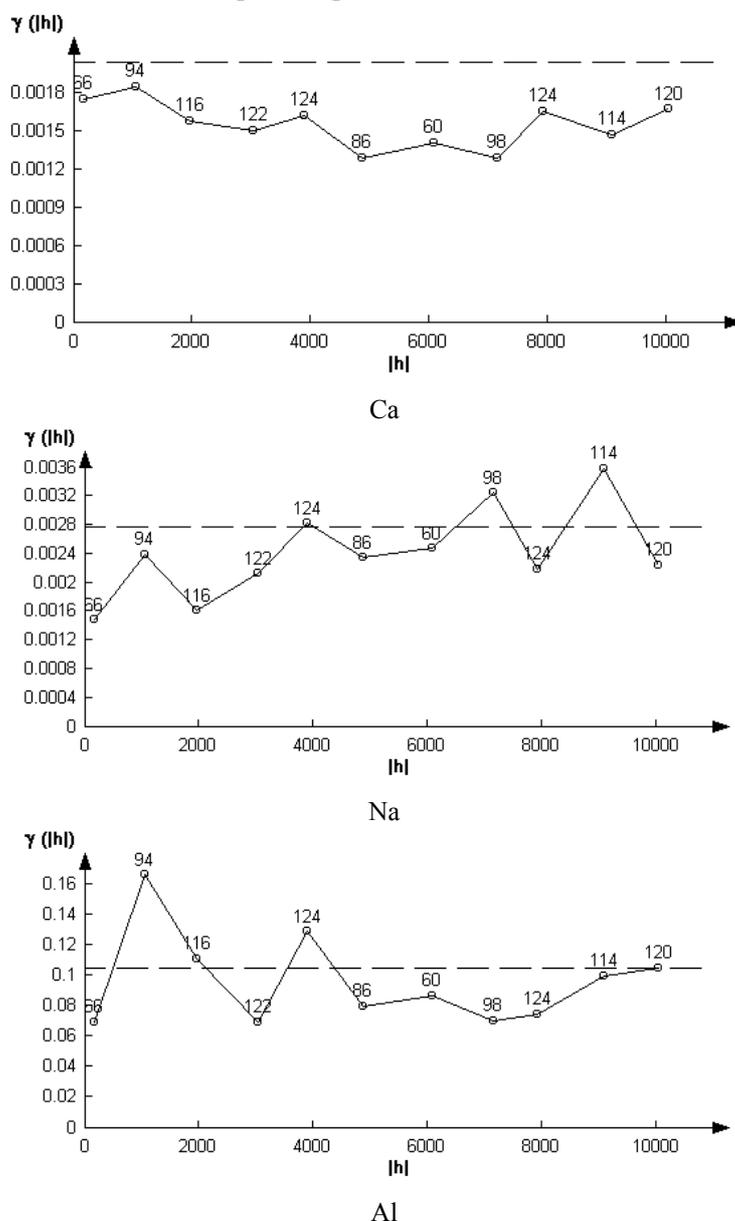
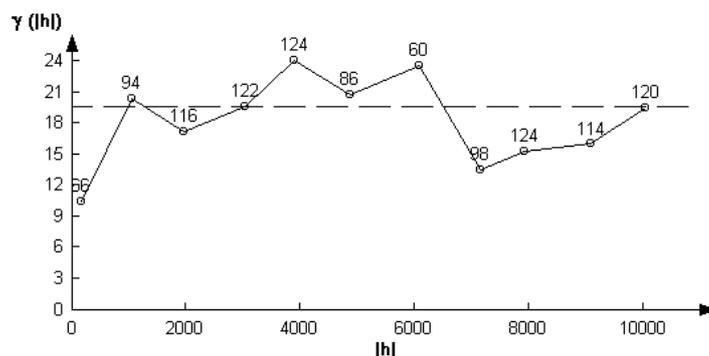


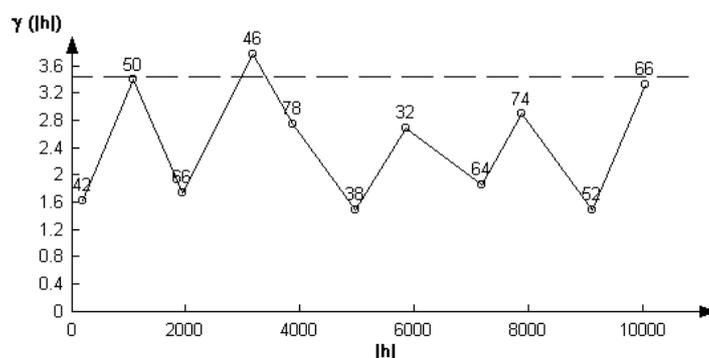
Figure II. 42: Variogrammes omnidirectionnels et nombre de paires de points. Eléments majeurs (Ca, Na et Al)

Pour ce qui concerne les ETMs, Mn, Cu et Ni présentent des profils variographiques semblables à celui de la fraction "0-2 μ m", Zn un profil

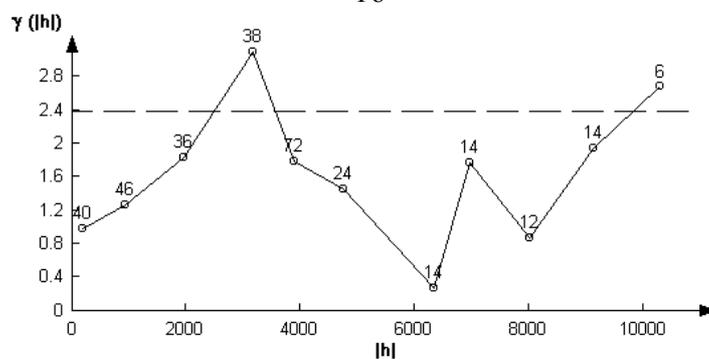
similaire à celui du pH, Cr un profil linéaire horizontal, Pb un profil en dents de scie à base horizontale également. Co présente une auto-corrélation pour des gammes de distances inférieures à 4000m. La deuxième moitié du variogramme est malheureusement inutilisable en raison d'un nombre de paires de points trop faible.



Zn



Pb



Co

Figure II. 43: Variogrammes omnidirectionnels et nombre de paires de points. ETMs (Zn, Pb et Co)

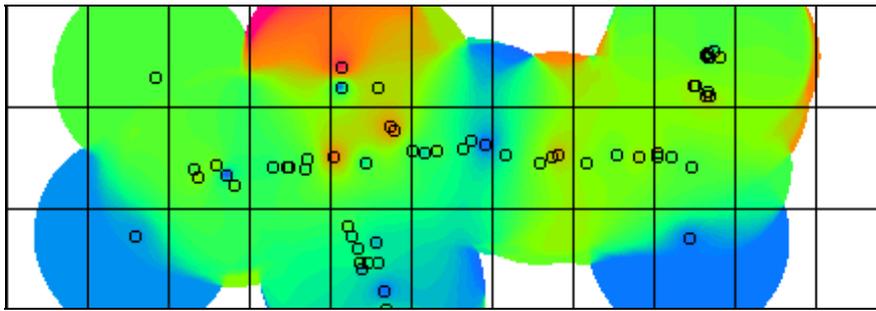


Figure II. 44: Représentation des teneurs en Na (g/100g) des horizons C "brabantiens" (interpolation de type moyenne mobile) sur le découpage des cartes des sols (coin supérieur gauche = 116E). Les couleurs traduisent des teneurs entre 0.60 (bleu) et 0.90 g/100g (rouge).

Les données relatives à l'échantillonnage régional ne montrent pas de gradient marqué dans la différenciation régionale des paramètres étudiés ni de dépendance spatiale aux échelles appréhendées.

e incidences sur l'estimation du fond géochimique

L'indépendance entre les échantillons, vérifiée par l'analyse spatiale, est une condition nécessaire pour un certain nombre d'opérations (estimation, comparaison, inférence...) relevant des statistiques "classiques".

Nous pourrions dès lors considérer comme valides les estimations des valeurs moyennes et des variances du tableau II.19, ainsi que les coefficients de corrélation entre éléments et variables "explicatives", dont les niveaux de signification figurent au tableau II.21.

Des régressions statistiques peuvent également être recherchées entre les teneurs en ETMs et les paramètres "explicatifs".

D'une manière générale, pour favoriser le caractère généralisable des relations, il est préférable de privilégier les équations de la forme:

$$[\text{ETM}] = a + \sum_{i=1}^n b_i * [\text{PP}_i] - \sum_{i=1}^k c_i * [\text{PD}_i]$$

où $\sum_{i=1}^n b_i * [\text{PP}_i]$ représente la somme des contributions des n phases porteuses (PP - fractions granulométriques fines, FeOOH...) et

$\sum_{i=1}^k c_i * [\text{PD}_i]$ la somme des contributions des k phases diluantes

(quartz, carbonates...).

Le recours à des variables indirectes qui ne sont pas assimilées à des phases porteuses ou diluantes présente des dangers:

- représentativité trop locale (coordonnées X et Y par exemple);
- différence de cinétique (le pH peut évoluer plus vite que les teneurs totales).
- ...

Toutefois, si les matériaux parentaux des sols sont différents d'une étude à une autre, les phases porteuses et diluantes peuvent y avoir des significations différentes également. On se gardera d'utiliser la fraction "0-2 μ m" comme phase porteuse si les types d'argile sont très différents; de la même façon, il n'est pas pertinent d'utiliser la fraction "20-50 μ m" comme phase diluante pour des sols développés sur shales, pour ne citer que cet exemple.

L'universalité des relations de régression dépend évidemment des paramètres utilisés. Si les matériaux parentaux sont hétérogènes, la régression doit se baser sur des critères minéralogiques. Dans les matériaux loessiques, la minéralogie peut *a priori* être traduite par des classes granulométriques. Dans une région donnée, on peut imaginer la présence d'un gradient granulométrique dans une ou plusieurs directions. Les coordonnées X et Y peuvent alors être utilisées à la place des classes granulométriques *etc.*

Quant à l'intérêt des régressions, il est forcément subordonné à la disponibilité des variables utilisées. Les variables mesurées dans le cadre de ce travail (pHs, fractions granulométriques, teneurs totales en Al, Fe, Ca, Mg, K ou Na) ne font pas forcément l'objet d'un inventaire systématique dans d'autres travaux.

Nous avons dès lors réalisé des analyses de régression avec les variables précitées, plus les coordonnées X et Y, selon plusieurs niveaux de disponibilité de ces informations :

- (i) toutes les variables "explicatives",
- (ii) l'ensemble des variables "explicatives" hors les "bases" Ca, Mg, K et Na,
- (iii) les variables "explicatives" disponibles dans la base AARDEWERK (soit X, Y, pH_{H2O}, pH_{KCl}, "0-2 μ m", "0-10 μ m", et ">50 μ m"),

- (iv) les teneurs en argile,
- (v) les teneurs en Al_{HF} , Fe_{HF} et Mn_{HF} .

La procédure de régression comprend une analyse des meilleurs sous-ensembles de variables sur base des coefficients R^2 et $R^2_{ajusté}$ ¹⁴. Une fois la sélection des variables effectuées, l'analyse en régression proprement-dite est réalisée. Un modèle de régression n'est retenu que si tous les coefficients de régression sont significativement différents de 0 ($\alpha = 0.05$).

Toutes ces régressions forment un ensemble de modèles trop lourd à présenter dans ce texte. Le détail des résultats figure donc en annexe 5. Les variables "explicatives" des différents modèles figurent au tableau II.22 tandis que leur adéquation à "expliquer" les variations de teneurs en ETMs fait l'objet du tableau II.23. Ces modèles permettent donc théoriquement d'estimer des teneurs géochimiques en ETMs dans les limons "brabantiens" pour plusieurs niveaux de richesse en information indirecte (ou secondaire).

La comparaison des carrés moyens résiduels, issus des régressions, à la variabilité opératoire est un moyen de déterminer dans quelle mesure la variabilité résiduelle porte encore de l'information "explicable" autrement que par les aléas analytiques. Elle peut s'effectuer de diverses manières: test de conformité de variance (ou test χ^2), test F, test de HARTLEY, test de BARTLETT (DAGNELIE, 1975). Les deux premiers tests ont été effectués. Le premier consiste à vérifier si une valeur déterminée (en l'occurrence $\hat{\sigma}_{opér.}^2$) est comprise dans l'intervalle de confiance autour de la variance résiduelle. Le nombre de degrés de liberté étant supérieur à 30, le test χ^2 peut être remplacé par un test u¹⁵. Le test F, par contre, est basé sur le rapport de deux variances¹⁶; il prend en considération l'incertitude sur l'estimation de la variance opératoire.

¹⁴ $R^2_{ajusté}$ prend en compte les degrés de liberté. En effet, si une variable est ajoutée à l'équation R^2 augmentera même si cette variable n'a pas de valeur réelle (MINITAB).

¹⁵ $u_{obs} = \left| \sqrt{2SCE / \sigma_{opér.}^2} - \sqrt{2n - 3} \right|$ (DAGNELIE, 1975)

¹⁶ $F_{obs} = \frac{\hat{\sigma}_{max}^2}{\hat{\sigma}_{min}^2}$ (DAGNELIE, 1975)

Tableau II. 22: Variables "explicatives" utilisées dans les régressions.

	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co
I	[K - Na - Al - 0-2μ - 0-10μ - S - Y]	[K - Al]	[Al - Fe]	[Ca - K - Al - 0-2μ - Y]	-	[Ca]	$\frac{[Mg - Fe - S - X - Y - pH_{H2O} - pH_{KCl}]}{pH_{KCl}}$
II	[Fe]	[Al - Fe - S]	[Al - Fe]	[Al - Y]	-	[pH _{H2O} - Al]	[Fe - S - Y]
III	[0-2μ - 0-10μ]	[0-10μ]	[0-10μ]	[0-10μ]	-	[pH _{H2O}]	[0-2μ - Y]
IV				[0-2μ]			
V				[Al - Fe - Mn]			
VI				[Al - Fe]			
VII				[Fe]			

Tableau II. 23: Variance expliquée (R²) par les différentes régressions ETM - variables "explicatives" et comparaison de la variance résiduelle avec la variance opératoire (probabilités d'après les statistiques u et F) .

ETM	Mn	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co
Variance totale (mg/kg) ²	4443.56	3.21	24.80	11.56	107.95	3.52	2.20
Régression ^a	R ² et (nombre de paramètres hors la constante)						
I	48.5 (7)	44.8 (2)	36.3 (2)	35.8 (5)	NS	33.3 (1)	84.4 (7)
II	22.1 (1)	43.0 (3)	36.3 (2)	18.6 (2)	NS	19.6 (2)	67.4 (3)
III	15.4 (2)	34.1 (1)	19.2 (1)	8.1 (1)	NS	12.8 (1)	45.7 (2)
IV	NS	28.2	13.6	6.6	NS	9.2	36.9
V [Al, Fe, Mn]	-	49.3	NS	NS	NS	NS	NS
VI [Al, Fe]	NS	39.6	36.3	NS	NS	NS	NS
VII [Fe]	22.1	28.7	25.1	10.3	NS	10.6	36.1
Régression	Niveaux de probabilité sur base de u _{obs} ^b						
I	***	NS	NS	NS	IND	(***)	(**)
II	***	NS	NS	NS	IND	(***)	NS
III	***	**	***	NS	IND	(**)	NS
IV	IND	***	***	NS	IND	(**)	NS
V [Al, Fe, Mn]	-	NS	IND	IND	IND	IND	IND
VI [Al, Fe]	IND	*	NS	IND	IND	IND	IND
VII [Fe]	***	***	**	NS	IND	(**)	NS
Régression	Niveaux de probabilité sur base de F _{obs} ^b						
I	*	NS	NS	NS	IND	(***)	(**)
II	***	NS	NS	NS	IND	(**)	NS
III	***	NS	NS	NS	IND	(*)	NS
IV	IND	NS	NS	NS	IND	(*)	NS
V [Al, Fe, Mn]	-	NS	IND	IND	IND	IND	IND
VI [Al, Fe]	IND	NS	NS	IND	IND	IND	IND
VII [Fe]	***	NS	NS	NS	IND	(*)	NS

a: Régressions: (I) sur base de toutes les variables explicatives; (II) idem I moins Ca, Mg, K et Na; (III) idem II moins Al et Fe; (IV) sur base de la teneur en argile granulométrique et (V) sur base des éléments Al, Fe et Mn.

b: niveaux de probabilité: * = p < 0.05; ** = p < 0.01; *** = p < 0.001.

NS: Non significatif; IND: indéterminé ; () : variance inférieure à la variance opératoire.

On notera que:

- Cr ne présente de relation linéaire avec aucune variable "explicative", ce que l'on savait déjà de l'analyse de la matrice des corrélations;
- à l'exception de Co, les proportions de variances "expliquées"¹⁷ les plus favorables restent inférieures à 50%;
- au niveau I¹⁸, les "bases" Ca, Mg, K et Na interviennent comme variables "explicatives" dans les régressions de tous les ETMs sauf Cr et Zn, mais jamais toutes ensemble (K et Na pour Mn, K pour Cu, K et Ca pour Ni, Ca pour Pb et Mg pour Co);
- le nombre de paramètres entrant dans les régressions est relativement faible eu égard au nombre total de paramètres possibles (13), ce qui traduit des modèles relativement simples, en particulier pour Pb (régression en fonction de Ca uniquement), Cu et Zn (régressions avec K et Al pour Cu, Al et Fe pour Zn); les modèles pour Mn et Co sont par contre plus complexes ;
- au niveau II, les R² diminuent nettement pour Ni, Pb et Co; pour Ni et Co, cette diminution va de pair avec une simplification accrue des modèles; les fractions granulométriques interviennent peu en tant que variables "explicatives" (">50µm" pour Cu et Co);
- au niveau III, le meilleur prédicteur est sans conteste la fraction "0-10µm" qui intervient pour Mn (avec la fraction "0-2µm" comme cofacteur), Cu, Zn et Ni (comme seul facteur) ;
- au niveau IV (ETM-"0-2µm"), les coefficients de régression sont significatifs pour tous les éléments sauf Mn et Cr ;
- Au niveau V, Fe est un "meilleur" estimateur que la fraction "0-2µm" pour Mn et Zn, mais du même acabit pour les autres éléments; la nuance existant entre argile granulométrique et teneurs en Al et Fe totaux semble particulièrement importante pour Zn;

¹⁷ On peut toutefois s'interroger sur la pertinence de certaines de ces équations dont les niveaux de R²_{ajusté} semblent trop élevés, eu égard à l'importance de la variabilité opératoire. Comment croire, en effet, que l'on puisse expliquer 80% de la variance totale en Co par une combinaison de variables alors que la variabilité opératoire doit être comprise entre 25 et 45% de celle-ci? Ce constat doit donc inciter à la prudence quant au caractère extrapolable de ces équations!

¹⁸ Les modèles de régression relatifs aux limons "brabantiens" seront dénommés BRAB-I, BRAB-II... selon les niveaux présentés au tableau II.22.

- Mn est un facteur "explicatif" pour Cu ;
- les niveaux de signification des variances résiduelles par rapport aux variances opératoires obtenus par les tests F sont inférieurs à ceux des tests u ; sur base des premiers, toutes les régressions "expliqueraient" chacune tout ce qui est "explicable" à l'exception de Mn; les résultats des tests u sont plus nuancés;
- les variances résiduelles des régressions aux niveaux I et II ne sont pas significativement différentes des variances opératoires à l'exception de Mn;
- pour Pb et Co au niveau I et Pb aux niveaux II à IV, toutefois, les variances résiduelles sont inférieures aux variances opératoires. Pour Co, la cause réside dans la complexité du modèle I qui à force d'arguments "explique" des variations par des covariations qui ne sont probablement que fortuites; pour Pb, il s'agit plus vraisemblablement d'une manifestation de la surestimation de la variabilité opératoire;
- aux niveaux III et IV pour Cu et Zn, selon le test u, les fractions granulométriques "n'expliqueraient" pas toute la variabilité factorisable;
- Aux niveaux V à VII, le constat est le même pour Fe considéré en tant que seul facteur; tandis que la combinaison [Fe-Al] suffit à "expliquer" la variance de Zn.

La figure II.45 illustre les différences existant dans les prédictions entre les modèles BRAB-IV (ETMs-"0-2 μ m") et ceux de la coupe de Tongrinne. Pour Cu, les écarts sont relativement faibles (1.0 mg/kg pour une teneur en argile de 20%); les teneurs sont systématiquement plus élevées avec le modèle BRAB. Pour Zn, les écarts sont relativement faibles dans la zone de validité des teneurs en argile, *i.e.* dans la gamme des teneurs des points utilisés pour les régressions. Par contre, hors de cette zone, les divergences deviennent très importantes. Les teneurs prédites en Ni et Pb par les modèles BRAB-IV tendent vers les valeurs des modèles TONG pour des teneurs en argile supérieures à 40%. Dans la gamme des teneurs en argile des limons BRAB, les écarts entre les deux séries de modèles sont de l'ordre de 3 et 5mg/kg pour Pb et Ni, respectivement, ce qui reste très raisonnable.

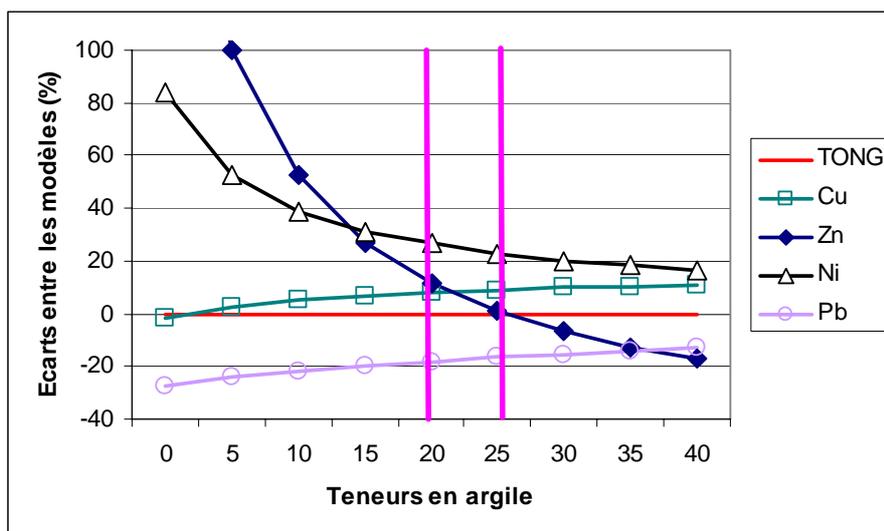


Figure II. 45: Ecart relatif entre les teneurs prédites par les régressions ETMs-[0-2 μ m] des modèles BRAB et de la coupe de Tongrinne (TONG): $100 \times ([BRAB]-[TONG])/TONG$. En rose, teneurs en argile entre lesquelles les modèles ont été calibrés.

En dehors de la gamme des teneurs en argile utilisées pour calibrer les modèles, les modèles BRAB-IV et TONG pour les différents éléments sont très différents, à l'exception de ceux pour Cu. Cela pose des questions quant à leur validité pour exprimer des relations en-dehors du domaine dans lequel ils ont été réalisés. Sans préjuger de leur qualité, les modèles BRAB sont basés sur de nombreuses données peu différenciées et les modèles TONG ont été établis à partir de peu de données bien différenciées.

Une remarque générale peut être formulée à l'encontre des modèles BRAB qui font intervenir plusieurs variables "explicatives". Celles-ci ne sont pas indépendantes et la prise en considération de leur corrélation rend parfois délicate la distinction entre phases porteuses et phases diluantes dans les modèles.

Un moyen de s'affranchir de la dépendance entre les variables "explicatives" réside dans leur factorisation. Une analyse factorielle a été menée sur les variables principales (Ca, Mg, K, Na, Al, Fe, Mn, "0-2 μ m", ">50 μ m", pH_{H2O} et pH_{KCl}) afin de créer des facteurs indépendants entre eux qui synthétisent l'information contenue dans ces variables. Les analyses de régression entre les ETMs et les facteurs sont alors menées (BRAB-VIII dans la suite du texte).

Quatre facteurs ont été construits, qui portent 75% de la variabilité totale entre les variables "explicatives". Le détail de l'analyse peut être trouvé en annexe X. Le premier facteur oppose les phases porteuses fines (<2µm) à la phase diluante des sables (>50µm), le deuxième facteur correspond au niveau d'acidité/basicité du milieu, le troisième facteur exprime les phases porteuses des "bases" qui ne se trouvent pas dans la fraction granulométrique "0-2µm", *i.e.* les minéraux des fractions limoneuses fines, et le quatrième facteur est lié aux teneurs en Mn principalement.

L'examen du tableau II.24 confirme l'importance des phases porteuses fines et diluantes sableuses sur les teneurs en ETMs, le facteur 1 étant présent dans tous les modèles sauf le Cr. En outre, il constitue le seul facteur pour Zn, Ni et Pb. Cu et Cr apparaissent influencés par le niveau d'acidité/basicité (facteur 2), alors que Co est sous l'influence des facteurs 3 et 4, *i.e.* des "feldspaths" et des processus rédox. La liaison de Co au groupe "feldspaths" avait déjà été remarquée lors de l'étude de la coupe de Tongrinne et interprétée comme une manifestation de la stratigraphie. Ce constat mériterait peut-être un complément d'investigation dans le futur. Les seuls points réellement nouveaux sont les apparentes relations entre les éléments Cu et Cr et le niveau de pH.

Tableau II. 24: Facteurs intervenant dans les modèles de régression BRAB-VIII

ETM	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co
Facteur						
1	OUI	OUI	OUI	-	OUI	OUI
2	OUI	-	-	OUI	-	-
3	-	-	-	-	-	OUI
4	-	-	-	-	-	OUI

Les régressions sont évaluées au tableau II.25 sur le même principe que celles du tableau II.22.

Les niveaux de R^2 atteints par les régressions BRAB-VIII sont équivalents à ceux de BRAB-I (Cu et Zn), BRAB-II (Ni et Pb) ou BRAB-III (Co), et une régression significative a été établie pour Cr. Les variances résiduelles ne sont pas statistiquement supérieures aux variances opératoires ce qui signifie que toute la variance "explicable est expliquée". La factorisation présente l'avantage de rendre les relations plus claires avec les différentes phases porteuses et les conditions de milieu en tenant compte des corrélations entre les variables explicatives. Elle a le désavantage de ne pas supporter les données manquantes. La factorisation évaluée ici n'est malheureusement pas applicable à des jeux de

données pour lesquels au moins une des variables utilisées (Ca, Mg, K, Na, Al, Fe, Mn, "0-2 μ m", ">50 μ m", pH_{H2O} et pH_{KCl}) serait manquante.

Tableau II. 25: Variance expliquée (R²) par les régressions ETM -variables "factorielles" et comparaison de la variance résiduelle avec la variance opératoire (probabilités d'après les statistiques u et F) .

ETM	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Co
R ²	49.3	34.6	20.9	8.5	20.1	47.8
Niveau de p de u _{obs} ^a	NS	NS	NS	NS	(***)	NS
Niveau de p de F _{obs} ^a	NS	NS	NS	NS	(**)	NS

a: niveaux de probabilité: * = p < 0.05; ** = p < 0.01; *** = p < 0.001.

NS: Non significatif; () : variance inférieure à la variance opératoire.

Les équations qui font l'objet d'une évaluation aux tableaux II.23 et II.25 présentent un intérêt car elles réduisent toutes la variabilité du jeu de données étudié. Toutefois, ces modèles ne sont jusqu'à présent validés que pour le jeu de données étudié, représentatif des horizons C du loess "brabantien".

Il est légitime de s'interroger sur le champ de validité des modèles "brabantiens". Faut-il restreindre les résultats aux horizons "brabantiens" ou peut-on au contraire élargir leur portée à d'autres matériaux limoneux et, de ce fait, s'affranchir de la stratigraphie et de son incertitude spatiale? La reconnaissance du caractère brabantien dans les solums bruns lessivés n'est pas toujours une tâche aisée, pas plus d'ailleurs que la distinction entre un "véritable" horizon C et un horizon de transition entre horizons BT et C. Dès lors un modèle applicable aux horizons de profondeur moyenne¹⁹ dans les solums bruns lessivés, voire dans les sols limoneux au sens large, présenterait plus d'intérêt pratique. Une première comparaison entre les modèles BRAB-IV et TONG a montré que l'extrapolation des modèles n'est pas si évidente.

Il semble toutefois opportun de d'abord examiner l'influence de la pédogenèse sur la différenciation spatiale des teneurs en ETMs avant de vérifier si les horizons des solums obéissent aux mêmes lois que les

¹⁹ *i.e.* sous l'horizon de surface et à portée de tarière de cartographe (plus une allonge d'un mètre pour les plus courageux!). Ces horizons seront qualifiés de "profonds" entre guillemets dans la suite du texte, laissant le terme profond sans guillemet pour les horizons situés à une profondeur supérieure à 2 mètres.

matériaux parentaux limoneux. Ceci sera l'objet du prochain chapitre.

5.3.2.3 Conclusions

Dans l'ensemble, les paramètres mesurés sur cet échantillon représentatif de la population des horizons C "brabantiens" présentent une homogénéité relativement importante. La variabilité opératoire constitue dès lors un facteur "explicatif" majeur des différences observées.

L'analyse des corrélations et l'analyse factorielle multivariée confirment néanmoins l'importance des teneurs en argile sur celles en Mg, K, Al, Fe, Cu, Zn, Ni et Co.

Un gradient granulométrique (diminution de la fraction "0-2 μ m" et augmentation de la fraction ">50 μ m" du Sud vers le Nord) est suspecté mais il ne se traduit pas ou peu (Co et Ni) en effets sur les teneurs en éléments traces.

L'analyse géostatistique a permis de conclure à l'absence d'autocorrélation spatiale aux échelles d'observation prises en considération (d'une dizaine de mètres à plusieurs kilomètres) pour la majorité des éléments étudiés. Les techniques d'interpolation ne se justifient donc pas pour la spatialisation des teneurs en ETMs dans les horizons C "brabantiens". La teneur moyenne est l'estimateur le plus pertinent au niveau régional.

A l'échelle ponctuelle, les analyses en régression uni- ou multivariée permettent de donner des estimations des teneurs naturelles dans les horizons C des loess "brabantiens", *i.e.* du fond géochimique du solum le mieux représenté en Région limoneuse, sur base de variables ancillaires. La factorisation de celles-ci a confirmé l'importance, dans l'ordre décroissant, de la fraction "0-2 μ m", du pH, des minéraux des fractions limoneuses fines et enfin des processus rédox (perçus par l'intermédiaire des teneurs en Mn). Mn et Cr ne suivent toutefois pas ce schéma ; la teneur moyenne restant le meilleur prédicteur. Ces constatations convergent vers celles réalisées sur la coupe de Tongrinne. Au moins, un point reste en suspens pour l'instant, celui qui concerne la validation des régressions, tant BRAB que TONG, pour des horizons limoneux "profonds" indifférenciés. Cette question fera l'objet d'un développement au cours du prochain chapitre.

5.4 Conclusions relatives à l'approche matériau parental

La première partie de l'étude des matériaux parentaux a consisté en l'acquisition d'un certain nombre de références relatives tant aux matériaux limoneux qu'aux substrats anciens. Cette ébauche d'inventaire lithochimique devra dans le futur être complétée d'autres analyses, notamment pour préciser les ordres de grandeur des variations pépétiques, de première importance pour l'estimation de la variabilité opératoire, et des variations dans et entre les grandes familles lithologiques.

Une série de limons d'âges différents ont ensuite été étudiés sur la coupe de Tongrinne. Des variations significatives de teneurs élémentaires ont été constatées. Ces différences sont susceptibles de générer localement des différences dans la composition élémentaire ou les propriétés des horizons de surface. La majeure partie de cette variabilité résulte d'un effet stratigraphique et de la présence de paléosols. Un tableau d'estimation du fond pédogéochimique ponctuel des sols limoneux selon trois scénarii est proposé. Il illustre notamment les gains de précision apportés soit par la reconnaissance du membre auquel appartient le limon, soit par la mesure de la teneur en argile.

Il en résulte que si spatialement, la prédiction de l'âge du limon roche-mère est impossible faute d'observations, la connaissance de la teneur en argile et de l'importance des caractères rédox doit néanmoins permettre l'estimation du fond pédogéochimique en ETMs. L'incertitude spatiale sur le matériau parental loessique ne reste alors un problème que pour la prédiction des éléments de la TRB.

Malgré leur réputation d'homogénéité, les loess présentent une variabilité, à la fois stratigraphique et locale, en témoignent les résultats obtenus sur trois autres coupes quaternaires.

Pour considérer la représentativité d'une coupe de référence, la plus grande attention devrait être prêtée à son environnement naturel (géologie, position topographique, historique d'occupation...), facteur déterminant pour la nature et l'intensité des processus de pédogenèse et morphogenèse. En ce qui concerne la représentativité des membres identifiés sur la coupe de Tongrinne, tous les horizons non-carbonatés des trois autres coupes ont pu être rattachés chimiquement à un des membres de Tongrinne.

L'analyse multivariée des quatre coupes a permis de (i) visualiser les facteurs de la variabilité et les corrélations entre éléments, (ii) de regrouper les individus sur base de leur composition et (iii) d'estimer l'importance de l'effet site. Au sein d'une même coupe stratigraphique, la variabilité résulte principalement de la présence de paléosols enfouis. Les redistributions d'argile et les processus redox sont les facteurs-clés des différences entre horizons. Lorsque l'on compare plusieurs coupes profondes, l'influence du site d'étude sur la variabilité apparaît d'abord non négligeable pour quelques éléments (jusqu'à plus de 50% pour Ca et Cr). Toutefois, une stratification complémentaire sur base de la stratigraphie supposée des limons permet de nuancer cet effet "site". Celui-ci devient alors très faible, l'essentiel de la variation s'expliquant par l'âge des matériaux. Les principaux facteurs de variation entre les sites restent les teneurs en argile, en carbonates et en "feldspaths" ainsi que l'intensité des processus redox.

L'effet "site" concernant peu les variables liées à l'argile, comme Al, Fe, Cu, Zn, Ni, Pb et Co, (i) des corrélations entre ETMs et teneurs en Al ou Fe sont d'application plus large que celle d'une coupe isolée; et (ii) le recours aux régressions ETMs-argile est envisageable pour la prédiction spatiale des teneurs en ETMs.

Une approche régionale a été menée sur les horizons C des limons de couverture afin de vérifier les conclusions tirées de l'analyse des coupes quaternaires. L'analyse de données existantes (AARDEWERK) ou originales n'a permis de mettre en évidence, à l'échelle de la région étudiée, ni gradient granulométrique ni continuité spatiale dans les loess du Membre du Brabant.

Les horizons C "brabantiens" présentent une homogénéité relativement importante et la variabilité opératoire constitue dès lors un facteur "explicatif" majeur des différences observées. L'analyse des corrélations et l'analyse factorielle multivariée ont néanmoins confirmé l'importance des teneurs en argile sur celles en Mg, K, Al, Fe, Cu, Zn, Ni et Co.

Les techniques d'interpolation ne se justifient pas pour la spatialisation des teneurs en ETMs dans les horizons C "brabantiens". La teneur moyenne est l'estimateur le plus pertinent au niveau régional. A l'échelle ponctuelle, par contre, des analyses en régression uni- ou multivariée permettent de donner des estimations des teneurs naturelles dans les horizons C des loess "brabantiens", *i.e.* des estimations du fond géochimique du solum le mieux représenté en Région limoneuse, sur base de variables ancillaires. La factorisation de celles-ci a confirmé

l'importance, dans l'ordre décroissant, de la fraction "0-2 μ m", du pH, des minéraux des fractions limoneuses fines et enfin des processus rédox (perçus par l'intermédiaire des teneurs en Mn). Mn et Cr ne suivent toutefois pas ce schéma ; la teneur moyenne restant le meilleur prédicteur.

Pour que l'incertitude relative à l'âge des matériaux limoneux ne se traduise pas en incertitude spatiale, il faut disposer d'un maximum de données ancillaires spatialisées. Les variables corrélées à l'argile sont théoriquement spatialisables par l'intermédiaire de bases de données granulométriques (moyennant toutes les précautions d'usage). Toutefois, les modèles régressifs ETMs-"0-2 μ m" doivent encore faire l'objet d'une validation pour être extrapolés à des horizons limoneux stratigraphiquement indifférenciés, comme on en trouve dans la base de données AARDEWERK. Un élément comme Mn, par contre, ne présente pour l'instant de relation évidente avec aucune variable "explicative" et l'information utile à sa spatialisation se résume à la teneur moyenne et à l'écart-type de la population BRAB.

Table des matières

CHAPITRE 5	LE FOND MINERALOGIQUE ET GEOCHIMIQUE DU <i>LIMON ROCHE-MERE</i>	119
5.1	<i>Approche lithologique</i>	119
5.1.1	Données existantes.....	120
5.1.1.1	Minéralisations notoires.....	120
5.1.1.2	Les données de la cartographie géochimique des sédiments et limons d'inondation en Belgique et au Luxembourg (VAN DER SLUYS et al., 1997) .	122
5.1.1.3	Les données de l'Inventaire géochimique du paléozoïque (MARTIN et SONDAG, 1985).....	122
5.1.2	Roches-mères limoneuses et substrats anciens dans la vallée de l'Orneau	126
5.1.2.1	Matériels et méthodes.....	126
5.1.2.2	Résultats et discussions.....	126
5.2	<i>Approche stratigraphique</i>	130
5.2.1	La coupe de Tongrinne.....	131
5.2.1.1	Matériels et méthodes.....	131
5.2.1.2	Résultats et discussion.....	136
5.2.1.3	Conclusions.....	155
5.2.2	Corrélations avec d'autres coupes quaternaires.....	156
5.2.2.1	Matériels et méthodes.....	156
5.2.2.2	Résultats et discussion.....	158
5.2.3	Conclusions.....	177
5.3	<i>Approche régionale (Horizons C)</i>	179
5.3.1	Exploitation des données existantes.....	179
5.3.1.1	Sélection des profils de la base de données AARDEWERK.....	180
5.3.1.2	Analyse statistique.....	181
5.3.1.3	Résultats et discussion.....	181
5.3.1.4	Conclusions.....	189
5.3.2	Transects régionaux.....	189
5.3.2.1	Matériels et méthodes.....	189
5.3.2.2	Résultats et discussions.....	191
5.3.2.3	Conclusions.....	213
5.4	<i>Conclusions relatives à l'approche matériau parental</i>	214