



Analyse et représentation de la couverture pédologique

Application à la caractérisation des unités
cartographiques de sols pour le programme I.G.C.S.
d'un secteur du Baugeois (49)

Céline COLLIN BELLIER

Thèse présentée à l'INSTITUT NATIONAL
d'HORTICULTURE

pour obtenir le grade de DOCTEUR de l'UNIVERSITÉ d'ANGERS

DS10 : Agronomie, productions animale et végétale, agroalimentaire

Soutenance : Vendredi 21 Juillet 2006

Membres du jury :

Pierre CURMI	Rapporteur	E.N.E.S.A. Dijon	Professeur
Philippe LAGACHERIE	Rapporteur	I.N.R.A. Montpellier	Ingénieur de recherche
Pierre FAIVRE	Examineur	Université de Savoie	Professeur
Nicola FILIPPI	Examineur	I.E.S. Ispra	Professeur
Gérard MOGUEDET	Examineur invité	Université d'Angers	Professeur
Dominique KING	Directeur de thèse	I.N.R.A. Orléans	Directeur de recherche
Jean-Pierre ROSSIGNOL	Co-directeur de thèse	I.N.H. Angers	Maître de conférences
Dominique ARROUAYS	Co-encadrant	I.N.R.A. Orléans	Ingénieur de recherche

A Grand-Père, mort le jour où j'ai su que je voulais être pédologue...

A Marc, qui l'a su mais ne m'a pas vue le devenir...

A Papy, qu'il me laisse le temps d'arriver au bout de ce projet !

A mes grands-mères

Remerciements

Bien que signée par un seul auteur, une thèse est un fruit qui, sans l'aide d'une équipe, tant technique qu'intellectuelle, rencontre « quelques » difficultés parfois insurmontables pour arriver à maturation. Je voudrais ici remercier celles et ceux qui ont été essentiels à cet ouvrage. J'espère n'oublier personne.

Je tiens, en premier lieu, à remercier Jean-Pierre ROSSIGNOL. Avant d'encadrer ces travaux, il m'avait engagée comme pédologue à l'I.N.H.. Il m'a alors permis de le remplacer pour quelques cours. C'est ici que j'ai trouvé la motivation pour m'engager dans une thèse. Après quelques secondes d'hésitation, il a accepté de transformer le C.D.D. en contrat de thèse. Pendant ces quelques années, j'ai pu apprécier son recul sur un terrain qu'il côtoie depuis longtemps, mais aussi son sens de la pédagogie. Il a su me guider aux travers du fouillis de données obtenues et il a accepté de me suivre sur certaines idées un peu en dehors des sentiers battus.

Il n'a pas été seul à m'encadrer sur ce chemin parfois chaotique. Dominique ARROUAYS, qui chapote le programme I.G.C.S. depuis le sanctuaire de la cartographie des sols, a spontanément émis cinq idées minimum de sujet de thèse et proposé Dominique KING comme directeur. Dominique KING, la porte presque toujours ouverte malgré ses nombreuses casquettes, a eu la patience de m'expliquer un nombre incalculable de fois les joies des statistiques. Pour ça, et tout le reste, je lui en sais gré.

Tous les trois ont eu la gentillesse non seulement de m'intégrer à la réflexion préalable à l'élaboration d'un sujet de recherche, mais aussi de tenir compte de mes *desiderata*. Pour ça, pour vos critiques acérées et constructives, pour votre patience et votre confiance, pour avoir su être présents, ni trop ni pas assez, je vous remercie, Messieurs!

Pierre CURMI et Philippe LAGACHERIE se sont chargés avec célérité de la lourde tâche de rapporteurs; Nicola FILIPPI et Pierre FAIVRE ont accepté de juger mon travail. Tous les quatre n'ont pas fui un déplacement en Anjou. Qu'ils reçoivent ici ma reconnaissance et ma gratitude.

Une thèse, sans financement, est plus difficile à mener. Je n'ai heureusement pas eu cette inquiétude-ci grâce à l'I.N.R.A., par un financement de la C.P.F., et la D.R.A.F. au travers des fonds F.E.O.G.A. – objectif 2 pour le programme I.G.C.S. – Pays de la Loire. Mais, une thèse, financée, sans lieu, c'est aussi peu confortable. Que l'I.N.H., au travers du *laboratoire de sciences du sol*, et les unités de science du sol de l'I.N.R.A. d'Orléans, soient remerciés pour l'accueil offert et les moyens mis à ma disposition.

Enfin, un travail de recherche appliquée en cartographie des sols n'est guère imaginable sans un terrain à étudier. Les exploitants et propriétaires de Fontaine-Milon, malgré quelques incompréhensions sur le but de ce travail (« un futur aéroport, un contournement d'agglomération, une zone industrielle? »), m'ont gentiment autorisée à creuser les sondages, à la tarière ou à la mini-pelle. Qu'ils trouvent ici mes sincères remerciements.

Le terrain... et ses tiques! Certains s'en souviennent encore... Et ce ne sont pas des pleutres! MERCI à vous, Philippe BERCHE, Mathieu CHEVALIER et Didier LALOUA pour votre aide malgré la chaleur, les sols secs et... les tiques! MERCI aussi à Pierre-Olivier COCHARD pour les quelques cours de botanique. Je n'ai guère eu le temps de les appliquer, mais je ne désespère pas...

Au paragraphe de la technique, je ne peux oublier Sébastien LEHMANN, Monsieur G.P.S. à la douce voix, ni Christian LELAY, faiseur de lames minces par excellence!

Sur un plan plus numérique, je remercie André BALANDIER et Alain COUTURIER pour

la construction d'un M.N.A. précis. Sur ce sujet des S.I.G., je serais injuste de ne point citer Joël DAROUSSIN et Véronique ANTONI non seulement pour leurs compétences, mais aussi pour m'avoir aidée à traverser certaines étapes de ma vie.

La résolution du peu de mise en forme mathématique aurait été bien moins agréable sans Vincent CHAMPELAIN et Hocine BOURENNANE, leurs connaissances en statistiques et sur R, et leurs questions parfois innocentes me forçant à être claire.

Je dois beaucoup à Sacha DESBOURDES et sa célérité à répondre à mes demandes diverses et variées.

Grâce à Magalie MAROLLEAU, Marie-Pierre POUSSINEAU et Monique SOLER, les missions, même lorsqu'elles vous font traverser l'Atlantique, ont toujours été impeccablement organisées. Et tout ça dans la bonne humeur malgré les incontournables complications administratives, comme la perte d'un passeport !

Ah... Le conseil des « anciens », rien de tel !

Michel ISAMBERT, Marcel JAMAGNE et Jean-Claude BEGON ont volontiers répondu à mes questions, même s'ils n'étaient pas toujours en accord avec mes hypothèses... Et toujours avec douceur et le sourire aux lèvres... Je leur en suis sincèrement reconnaissante.

Un MERCI plus appuyé à Michel qui, avec beaucoup de gentillesse, s'est proposé de relire ma thèse. Sa relecture professionnelle a été bienvenue et ses encouragements fort appréciés... Et des moins anciens... Denis BAIZE a toujours pris le temps de répondre à mes questions souvent floues...

Une bourse de l'Association Française pour l'Étude des Sols m'a permis d'aller présenter mes travaux lors du 18^{ème} Congrès Mondial de Science du Sol à Philadelphie. Je tiens à remercier l'association pour cette aide pécuniaire et j'espère que cette bourse Demolon permettra à de nombreux autres jeunes chercheurs de bénéficier d'une telle opportunité.

C'est en licence que j'ai rencontré Sophie LEGUEDOIS, tellement passionnée de pédologie qu'elle en parlait tout le temps ! Je n'arrivais même pas à mettre une image sur ce mot étrange... L'année d'après, Pierre FAIVRE, en une journée de cours, terrain compris, m'a permis de mettre enfin un sens à ce mot ! La fin de cette même année, Philippe DE PURY n'a pas eu peur de mon ignorance et a commencé mon immersion dans le monde de la cartographie des sols. Je leur sais gré de m'avoir amenée sur ce chemin.

La mise en forme L^AT_EXienne de cette thèse n'aurait jamais abouti sans l'aide précieuse de Frédéric DARBOUX et Sophie LEGUEDOIS. Mais, ils ne se sont pas cantonnés à la technique ! Il y a eu quelques desserts (tarte au citron, ou de Lintz), des discussions sur les réformes de la recherche et de l'enseignement supérieur, l'écologie, le chocolat... Et surtout, leur amitié, avec recul et soutien, les jours de dégringolade dans les abysses du désespoir !

Un grand MERCI aux Voxiennes et Voxiens qui m'ont redonné confiance en m'apportant leur envie de travailler avec moi, en réclamant mon rigoureux, sévère et violonistique travail de pupitre.

Pour refaire le monde et quelques franches parties de rigolade, j'ai été généreusement aidée de Florence HELIES, les « Poulettes » Christelle DERE et Céline RATIE, Julien VANHOODYDONCK, Cédric LAVEUF, à Orléans, mais aussi Benjamin FRAGNY, Mahsa JAVAHERI et Johanna VILLENAVE à Angers, et tant d'autres... Merci à tous !

J'ai passé des heures au téléphone avec Gaëtan DETAIS, Nathalie JONKHEERE et Angélique NICOLAS à nous soutenir et à philosopher. Gaëtan a attendu avec impatience la soutenance pour assouvir sa faim (il croit que je connais les arts de la table...) et n'a pu y être... ☺

A cette longue liste de l'amitié, il manque mes deux acolytes de D.E.U.G., Jean-Christophe

BOISSEAU et Jean-François DUFAYARD, jamais loin malgré la distance qui nous sépare, à me rappeler régulièrement que, quoiqu'il arrive, « la vie est belle ! ».

Que ne serais-je sans mes parents au sens large, qui ne comprennent pas forcément tout ce que je vis, mais sont curieux et me poussent toujours plus avant par leurs questionnements ? Alors, un grand MERCI à eux.

Bien qu'incluse dans le lot des parents *s.l.*, je remercie encore Irène, ma tante, pour son énergie et son recul de chercheuse. Les quelques moments passés à ses côtés m'ont toujours ressourcée et permis de voir un peu plus clair dans mes pensées.

Enfin, ma mère... Qui a eu la gentillesse de venir en plein rush pour me nourrir pendant que je rédigeais les dernières lignes et finissais la mise en page... Personne ne peut imaginer quel stress je peux transmettre s'il ne s'y est frotté ! Je l'en remercie vivement !

Pour l'homme ordinaire, le monde est un champ de bataille, pour le chercheur, c'est une école et pour l'homme éveillé, c'est un jardin de jeu.

Chandra SWÂMI

Table des matières

Table des figures	xix
-------------------	-----

Liste des tableaux	xxi
--------------------	-----

1 Introduction générale	3
1.1 Contexte et enjeux sur la cartographie des sols	3
1.2 Les méthodes de cartographie des sols	4
1.3 Objectifs et présentation générale de la démarche	7

I Présentation du milieu physique, acquisition des données	9
---	----------

2 Présentation de la zone d'étude	11
2.1 Géographie : situation, topographie, climat, végétation et anthropisation .	11
2.2 Géologie	13
2.3 Pédologie succincte	14

3 Stratégie d'échantillonnages, méthodes d'acquisition des données et d'interprétation en terme de pédogenèse et de formation du relief	17
3.1 Prospection terrain : développement succinct des 2 méthodes utilisées . . .	17
3.1.1 Échantillonnage systématique	18
3.1.2 Echantillonnage orienté	18
3.2 Analyses réalisées au laboratoire sur les échantillons de sols	19
3.2.1 Analyses granulométriques	20
3.2.2 Analyses micro-morphologiques et morphoscopiques	20
3.3 Informations, compréhension des données dans l'environnement	21
3.3.1 Carte géologique	21
3.3.2 Caractérisation granulométrique des matériaux et horizons	21
3.3.2.1 Description des méthodes de comparaison	22
3.3.2.2 Choix des indices selon l'objectif fixé	23
3.3.3 Modèle Numérique d'Altitude (M.N.A.) et variables morphométriques dérivées	23

II Analyses préliminaires des données	27
--	-----------

4 Premières analyses issues de l'échantillonnage systématique :	
Examens des cartogrammes	29
4.1 La géologie	29

4.1.1	Le Sénonien (c_4)	29
4.1.2	Le Turonien supérieur (c_{3b})	30
4.1.3	La craie Tuffeau (c_{3a})	30
4.1.4	Les formations de la plaine cénomaniennne (c_{2a} et c_{2b})	33
4.2	Les volumes d'altération	33
4.2.1	Sénonien (c_4)	34
4.2.2	Turonien supérieur (c_{3b})	35
4.2.3	Turonien inférieur (c_{3a})	35
4.2.4	Cénomanienn supérieur (c_{2b})	35
4.2.5	Cénomanienn moyen (c_{2a})	35
4.3	La texture	36
4.3.1	Le Sénonien inférieur (c_4)	36
4.3.2	Le Turonien supérieur (c_{3b})	37
4.3.3	Le Turonien inférieur (c_{3a}), dit « craie Tuffeau de l'Anjou »	37
4.3.4	Le Cénomanienn supérieur - marnes à Ostracées et sables verts supérieurs - (c_{2b})	37
4.3.5	Le Cénomanienn moyen - argiles sableuses glauconieuses - (c_{2a})	38
4.3.6	Les sables des horizons de surface	38
4.4	Les réactions à HCl	39
4.5	L'hydromorphie	41
5	Résultats préliminaires issus de l'échantillonnage le long des séquences (LTS et IAS)	45
5.1	Lames minces et morphoscopie des sables	45
5.1.1	Les lames minces	45
5.1.2	La morphoscopie des sables	48
5.2	Description des sols en terme d'homogénéité granulométrique des fosses pédologiques	50
5.2.1	Le long de la lithotoposéquence (LTS)	52
5.2.2	Le long de l'isoaltiséquence (IAS)	57
5.2.3	Conclusion sur l'homogénéité des sols des LTS et IAS	62
5.3	Quelques résultats complémentaires après analyses des échantillons prélevés dans les fosses	62
5.3.1	Singularité de seuil dans les réactions HCl ou comment un seuil peut être trompeur : le cas des réactions à HCl sur les carbonates	62
5.4	Typologie des sols	65
III	Facteurs et processus à l'origine de la distribution des sols	69
6	Identification du matériau parental de sols le long d'une lithotoposéquence à partir d'équations de mélanges granulométriques	
	Réflexion sur la Lithotoposéquence (LTS)	73
6.1	Résultats et discussion	73
6.1.1	Comparaison granulométrique entre les matériaux géologiques	73
6.1.2	Comparaison granulométrique des horizons le long de chaque solum	75
6.1.3	Estimation des mélanges granulométriques dans les horizons	78

6.2	Conclusion	81
7	Influence de la morphologie du relief et du matériau parental	
	Réflexion sur l'Isoaltiséquence (IAS)	83
7.1	Résultats	83
7.1.1	Comparaison granulométrique des horizons le long de chaque profil	83
7.1.2	Estimation des mélanges granulométriques dans les horizons	85
7.2	Discussion	87
7.3	Conclusion	88
IV	Représentation des connaissances sur la distribution des sols	91
8	Modèle de représentation conceptuelle	95
8.1	Une pédogenèse polyphasique	95
8.1.1	Premier scénario	96
8.1.2	Deuxième scénario	98
8.1.3	Premier ou deuxième scénario ?	98
8.2	Visualisation tridimensionnelle des phénomènes	98
9	Explicitation du modèle de représentation choroplète :	
	Détermination des U.C.S.	103
9.1	2 U.C.S. : modèle privilégiant la géomorphologie	104
9.2	3 U.C.S. : modèle privilégiant la lithologie comme indicateur	106
9.3	4 U.C.S. : modèle privilégiant des systèmes pédologiques	106
9.4	Conclusion sur le modèle de représentation choisi au final	108
10	Approche quantitative de la localisation et de la caractérisation des U.C.S. et des U.T.S.	111
10.1	Délimitation des U.C.S.	111
10.2	Quantification de l'hétérogénéité des U.C.S.	114
10.3	Localisation d'une U.T.S. au sein des U.C.S. :	
	Exemple de l'U.T.S. Ca3	116
11	Conclusion générale et perspectives	123

Table des figures

2.1	Localisation de l'étude et hypsométrie	12
2.2	Pédologie synthétique du site issue des descriptions réalisées dans le cadre du travail I.G.C.S.-Pays de la Loire, à paraître	14
3.1	Plan d'échantillonnage des séquences	19
3.2	Échelle de répartition des fractions granulométriques de la terre fine ($< 2\text{ mm}$)	20
4.1	Extrait de la carte géologique à 1/50000 ^{ème}	30
4.2	Carte géologique réalisée à partir des sondages à la tarière à main lors de la prospection systématique	31
4.3	Photographie prise lors de l'ouverture de la fosse pédologique BC	32
4.4	Photographie prise lors de l'ouverture de la fosse pédologique BCC	33
4.5	Cartogramme présentant les différents volumes d'altération	34
4.6	Cartogramme des textures manuelles (triangle de Jamagne) sur fond géo- logique	36
4.7	Carte de synthèse des hypothèses des textures sableuses en surface	38
4.8	Cartogramme présentant les réactions à HCl 1/3N sur fond géologique	40
4.9	Cartogramme présentant les réactions à HCl 1/3N sur la carte d'hypothèse des textures sableuses (<i>cf.</i> 4.3.6)	40
4.10	Cartogramme présentant l'hydromorphie sur fond géologique	42
5.1	Carte de situation des lithotoposéquence et isoaltiséquence	46
5.2	Photographies de Topo20, en lumière analysée et en lumière polarisée, <i>gros-</i> <i>sissement</i> $\times 31.5$	47
5.3	Photographies de Topo21, en lumière analysée et en lumière polarisée, <i>gros-</i> <i>sissement</i> $\times 31.5$	47
5.4	Photographies de Topo23, en lumière analysée et en lumière polarisée, <i>gros-</i> <i>sissement</i> $\times 31.5$	48
5.5	Photographies de Topo58, en lumière analysée et en lumière polarisée, <i>gros-</i> <i>sissement</i> $\times 31.5$	48
5.6	Histogrammes des C.E.C. _{arg} (mé.kg ⁻¹) des échantillons de la LTS en fonc- tion de la profondeur	51
5.7	Histogrammes des granulométries (%) des échantillons de la LTS en fonc- tion de la profondeur	53
5.8	Histogrammes des granulométries (%) des échantillons de la LTS en fonc- tion de la profondeur	54
5.9	Histogrammes des granulométries (%) des échantillons de l'IAS en fonction de la profondeur	58

5.10	Histogrammes des granulométries (%) des échantillons de l'IAS en fonction de la profondeur	59
5.11	Histogrammes des granulométries (%) des échantillons de l'IAS en fonction de la profondeur	60
5.12	Histogramme des corrélations entre estimations au champ et analyses chimiques	63
5.13	Agrandissement de l'histogramme des corrélations entre estimations au champ et analyses chimiques	64
5.14	Cartogramme de synthèse des typologies de sols	67
6.1	Squelettes cumulés des horizons représentatifs de la granulométrie des matériaux géologiques initiaux	74
6.2	Histogramme de la granulométrie des horizons représentatifs de la granulométrie des matériaux géologiques initiaux	75
6.3	Coupe en long de la lithotoposéquence	79
7.1	Coupe en long de la partie Sud de l'isoaltiséquence	86
8.1	Exemple de CALCOSOL présentant un horizon BT	96
8.2	Etat pseudo-initial précédant la pédogenèse	97
8.3	Scénario 1, étape 1 : colluvionnement du sable sénonien en l'absence de végétation	97
8.4	Scénario 1, étape 2 : décalcarification, puis formation de LUVISOL sous une végétation forestière	97
8.5	Scénario 1, étape 3, sub-actuelle : mise en culture avec recarbonatation de la surface	97
8.6	Etat pseudo-initial précédant la pédogenèse	99
8.7	Scénario 2, étape 1 : formation d'un LUVISOL	99
8.8	Scénario 2, étape 2 : troncature du LUVISOL, le BT apparaît en surface	99
8.9	Scénario 2, étape 3, sub-actuelle : colluvionnement et mise en culture qui entraîne une recarbonatation de la surface	99
8.10	Cartographie en pseudo-3D des formations superficielles définies à partir des séquences	101
9.1	Cartogramme de synthèse des typologies de sols présents	104
9.2	Carte présentant les 2 U.C.S. telles qu'elles ont été préalablement définies	105
9.3	Coupe schématique en long présentant les 2 U.C.S. telles qu'elles ont été préalablement établies	105
9.4	Carte présentant 3 U.C.S.	107
9.5	Coupe schématique en long présentant 3 U.C.S.	107
9.6	Carte présentant 4 U.C.S.	109
9.7	Coupe schématique en long présentant 4 U.C.S.	109
10.1	Carte présentant 4 U.C.S.	111
10.2	Histogramme des rattachements sémantiques des sondages en fonction des altitudes, regroupés dans les 4 U.C.S. définies	112
10.3	Courbes des rattachements sémantiques des sondages en fonction des altitudes, regroupés dans les 4 U.C.S. définies	113
10.4	Carte présentant les 4 U.C.S. après quantification	114

10.5	Histogramme des effectifs (%) en fonction des classes d'altitudes de la classe d'altitudes 52–66 m	117
10.6	Histogramme des effectifs (%) en fonction des pentes des U.T.S. incluses dans la classe d'altitudes 52–66 m	117
10.7	Histogramme des effectifs (%) en fonction des accumulations de flux des U.T.S. incluses dans la classe d'altitudes 52–66 m	118
10.8	Histogramme des effectifs (%) en fonction de l'indice de platitude MrRTF des U.T.S. incluses dans la classe d'altitudes 52–66 m	118
10.9	Histogramme des effectifs (%) en fonction des convexités horizontales et verticales des U.T.S. incluses dans la classe d'altitudes 52–66 m	119

Liste des tableaux

5.1	Morphoscopie des sables : tableau récapitulatif des effectifs (%)	49
5.2	Corrélation entre estimations au champ et analyses chimiques, d'après Baize et Jabiol (1995)	62
5.3	Classes des réactions HCl au champ	63
5.4	Tableau récapitulatif des différentes U.T.S. définies sur le secteur d'étude, et leurs caractéristiques	66
6.1	Tableau récapitulatif des comparaisons granulométriques	76
7.1	Tableau récapitulatif des comparaisons granulométriques	84
10.1	Tableau de contingences des surfaces des U.C.S. et des U.T.S., en ha . . .	115
10.2	Tableau de contingences de présence des U.C.S. et des U.T.S., en %, échantillonnage systématique	115
10.3	Tableau de contingences de présence des U.C.S. et des U.T.S., en %, intégralité des sondages	115

Introduction générale

Chapitre 1

Introduction générale

1.1 Contexte et enjeux sur la cartographie des sols

Le sol est avant tout un capital mince et fragile. Il est aujourd'hui, par la société, considéré comme une ressource consommable, quoiqu'essentielle et très lentement renouvelable. Il est ainsi soumis à des pressions croissantes. L'importance de la protection des sols est reconnue à l'échelle internationale et au sein de l'U.E. (Commission des Communautés Européennes, 2002). Au sommet de Rio (1992), les Etats participants ont adopté une série de déclarations majeures en la matière. La convention des Nations Unies de 1994 sur la lutte contre la désertification vise à prévenir et réduire la dégradation des terres, remettre en état les terres partiellement dégradées et restaurer les terres désertifiées. Nombre de politiques communautaires comprennent des dispositions concernant le sol, certaines en assurant sa protection, bien qu'il ne soit généralement pas leur sujet principal. Les politiques relatives à l'environnement, l'agriculture, le développement régional, les transports, le développement et la recherche sont parmi les politiques les plus pertinentes à considérer. (extraits du site : <http://ec.europa.eu/comm/environment/soil/>). Au niveau européen, une directive est en préparation qui devrait être présentée sous peu au conseil des ministres.

Afin de gérer au mieux l'environnement, il est nécessaire de le connaître au préalable. La connaissance des problèmes liés aux sols augmente en Europe grâce aux programmes d'inventaires cartographiques, aux systèmes de surveillance et aux bases de données géographiques. Dans le cas des couvertures pédologiques, il nous faut comprendre les processus de mise en place, d'évolution, et les rendre accessibles aux différents utilisateurs. C'est ici qu'intervient le pédologue, en tant que cartographe qui délimitent des sous-ensembles territoriaux de sols ayant des comportements homogènes pour lesquels un mode de gestion unique peut être appliqué (utilisation du sol, aménagements, itinéraire technique...).

Pour ce faire, son travail consiste à décrypter et à analyser l'organisation spatiale des couvertures pédologiques, à comprendre les lois de répartition des sols et à définir des sous-ensembles spatiaux qu'il délimite sur un fond de carte et dont il définit le contenu par un certain nombre de caractères descriptifs et de propriétés. Ensuite, il rend compte graphiquement des variations observées et transmet cette information. La représentation graphique classique de la répartition des sols est traditionnellement une carte des plages cartographiques juxtaposées. Cette carte pédologique présente une vision parmi plusieurs possibles de la réalité-terrain, et qui plus est, sous une forme réduite à l'échelle de la carte. Elle reste donc toujours un modèle simplifié de l'organisation spatiale des couvertures pédologiques.

La démarche de l'analyse spatiale s'opère en trois grandes étapes : (1) une étude préliminaire, de reconnaissance ; (2) le recueil sur le terrain des données pédologiques et relatives aux autres éléments du milieu naturel ; (3) enfin, l'organisation structurée et la représentation graphique des connaissances acquises.

L'inventaire spatial des sols a, par lui-même, un grand intérêt scientifique car il fournit des connaissances de base indispensables à de nombreux programmes de recherches. Cependant, la justification essentielle de ces travaux est de participer à la solution des problèmes d'aménagement du territoire en milieu rural ou péri-urbain. En effet, l'espace rural est investi par l'homme de fonctions diverses. Il est le support d'un certain nombre d'utilisations (activités agricoles ou non). Il doit donc être convenablement géré et ses fonctions soigneusement maintenues. La connaissance spatialisée des sols se révèle utile, voire indispensable, comme information de base préalable à toute une série d'interventions humaines (aménagement, gestion, protection).

En France, l'inventaire des sols est réalisé au sein du programme Inventaire, Gestion et Conservation des Sols (I.G.C.S.). Celui-ci comprend trois volets : (1) des secteurs de référence à grande échelle ; (2) des secteurs de connaissance pédogénétique à l'échelle de 1/100000^{ème} ; (3) un inventaire systématique du territoire à 1/250000^{ème} selon une approche régionale.

Si des précisions sont données dans les notices des cartes à 1/100000^{ème} et à 1/250000^{ème} (programme I.G.C.S.), il n'existe pas de guide I.G.C.S. à proprement parler qui définit le chemin scientifique du cartographe des sols. Toutefois, des ouvrages (Legros, 2006; Boulaine, 1975) ou des manuels, comme celui édité par Soil Survey Division Staff (1993), permettent de préciser quelque peu la démarche scientifique. Sur un plan européen, le programme E.U.S.I.S. (<http://eusols.jrc.it/esbn/EUSIS.html>) a pour objectif la constitution harmonisée d'une base de données des sols s'appuyant sur la cartographie à 1/1000000^{ème}. La partie italienne de la base étant constituée, les pédologues italiens se sont attelés à la centralisation de leurs études pédologiques locales. Il en ressort que pour obtenir une cohérence conceptuelle des données, il est nécessaire de travailler avec un manuel précis ou au moins que les différentes équipes travaillent en lien étroit (Filippi, 2004).

1.2 Les méthodes de cartographie des sols

La cartographie de ces vingt cinq dernières années est principalement fondée sur des techniques d'informatisation. Il existe peu de travaux de recherche (dont thèses) en cartographie des sols. Walter (2002) et Lagacherie (2002) présentent une synthèse des travaux des dernières décennies. La recherche en cartographie est souvent employée à des fins autres que la détermination du fonctionnement intrinsèque des sols. Elle sert, par exemple, à expliquer le fonctionnement de l'hydromorphie (Chaplot (1998) ou Chery (1995)), de l'acidité (Thomas, 1998), ou pour des études de zonage, ou encore à comprendre l'organisation spatiale du carbone dans les sols (Arrouays (1995), Lecoite *et al.* (2006)). Elle reste donc un outil développé au cas par cas, sauf pour Gaddas (2001). En effet, l'objectif de sa thèse est de proposer de nouvelles méthodes d'élaboration de cartes pédologiques autres que par les procédés classiques longs et coûteux. Le principe de base considère la couverture pédologique comme étant le résultat d'une interaction de plusieurs facteurs du milieu (géologie, relief, occupation du sol, *etc.*). Les données déjà existantes sont croisées pour une esquisse pédologique de 226 unités, puis cette esquisse est confrontée à la carte pédologique à 1/100000^{ème} qui existe dans la zone concernée. Selon les tolérances

considérées et choisies, la comparaison approche les 80 % des cas. Ceci étant, une question se pose sur la méthode développée quant à son réel apport eu égard aux résultats souhaités et à la cartographie classique. En effet, (1) le coût d'obtention des données satellitales ainsi que leur traitement est-il réellement moindre qu'un traitement plus classique ? (2) Les informations pédologiques ainsi obtenues sont-elles comparables en terme de qualité. Il existe toutefois des études plus classiques, basées sur la pédodiversité (Ibañes *et al.*, 1995) ou la pédogenèse, et utilisant une séquence d'horizons comme définition des unités cartographie (Siddik, 1983; Thomas, 1998; Bigorre, 2000; Chaplot, 1998).

Dans le début des années 80, Boulet *et al.* (1982a,b,c) développent l'« Analyse structurale », une méthode de cartographie développée à la même période que la géologie structuraliste. Ils considèrent le sol non pas comme un « tout » ponctuel mais comme étant constitué d'horizons qu'il faut cartographier en tant que volume élémentaire de sol. Dans la même période, profitant du développement de la puissance de calcul lié à l'expansion de l'informatique, Girard (1983), King (1986) et Girard *et al.* (1989) s'orientent vers une informatisation des cartographies (Jamagne et King, 2003). McBratney *et al.* (2003) font une synthèse des travaux menés dans le cadre de l'utilisation des approches numériques pour l'appréhension des sols. Dans la même veine, Carre (2002) tente la systématisation de la cartographie en utilisant des données externes au sol, *via* les Systèmes d'Informations Géographiques, allant jusqu'à définir un nouveau concept d'aide à la décision environnementale, le « terron » (Carré et McBratney, 2005).

Sur Fontaine-Guérin, Maine et Loire, Brunet (1980) a fait un essai de cartographie par séquences de sols afin de comprendre l'organisation des sols sur une zone test avant de cartographier une zone plus grande. L'intérêt de ce site est qu'il repose sur un substrat géologique et une géomorphologie identiques au nôtre. Le terrain est donc comparable au nôtre.

Bien que considérant l'horizon de sol en tant que volume, l'« Analyse structurale », faute de moyens matériels facilement accessibles, n'a pu se développer jusqu'à une vraie représentation tri-dimensionnelle. L'informatique permet de simplifier cette représentation en 3D. Elle reste pourtant très peu développée car elle demande des outils numériques spécifiques difficiles à mettre en place. Dans les sciences géologiques, il existe toutefois la possibilité d'utiliser des modeleurs. Cependant, il est difficile d'utiliser un logiciel développé pour la géologie en pédologie. Il faut en effet prendre en considération un écart d'échelles latérales et verticales de représentation et de compréhension difficile à gérer.

Ameskamp (1997), s'appuyant sur un système « expert » a développé un modèle virtuel basé sur des lois de compréhension en trois dimensions de la couverture pédologique. La photo-interprétation peut aboutir à une reconstruction 3D (Peirera et Fitzpatrick, 1998), mais ceci reste dans le domaine de la représentation. Le développement des environnements de réalités virtuelles, dans la même période, et leur intégration au sein des S.I.G. (Système d'Information Géographique) dans le cadre du D.A.O. (Dessin Assisté par Ordinateur) (Germs *et al.*, 1999) a formé les premiers couplages de représentation avec l'interprétation 3D. Grunwald *et al.* (2000, 2001a,b) et Grunwald et Barak (2003) ont utilisé le V.R.M.L. (Virtual Reality Modeling Language, langage proche du H.T.M.L., HyperText Markup Language) et le logiciel GLViewD3D pour modéliser en 3D la distribution des sols après une étude par pénétrométrie.

Au-delà de la cartographie des sols, en tant que modèle de représentation, il semble donc important d'arriver à positionner l'environnement dans un espace tridimensionnel, ne serait-ce que dans son appréhension et sa compréhension, pour l'aide aux décisions (El Araby et Okeil, 2004), aidé éventuellement du V.R.M.L..

La compréhension de l'organisation des sols a entraîné depuis quelques décennies de nombreuses études. Certains, comme Boulaine (1975), ont utilisé une approche géographique de la compréhension de l'organisation des sols. Mais c'est plutôt du côté de la pédogenèse que se sont développées les études. Une des premières études est celle de Jenny (1941) qui a abouti au modèle CL.O.R.P.T. (CLimat, Organismes, Relief, matériau Parental et Temps). Jamagne (1973), puis Baize (1974), a mis en évidence le rôle du matériau parental. Boulet *et al.* (1982a,b,c), Ruellan (1985) puis Boulet *et al.* (1987), s'appuyant sur l'« Analyse structurale », ont étudié le sol non comme entité à part entière, mais comme étant constitué de volumes pédologiques, les horizons. Ils ont alors fait ressortir une variabilité latérale montante ou descendante des horizons. Plus récemment, King *et al.* (1999) ont montré le rôle du relief, comme par exemple l'effet de la pente sur l'organisation des sols.

La faune ayant un impact sur le développement des sols, Ibañez *et al.* (1995) a utilisé des indices et modèles issus des études sur l'écodiversité pour explorer, quantifier et comparer la complexité des sols.

D'autres auteurs se sont appuyés sur des études physico-chimiques de la différenciation des matériaux pour comprendre les processus de formation des sols.

Ainsi, en 1984, Hawkesworth et van Calsteren (1984) ont utilisé la géochimie et plus précisément les isotopes radiogéniques pour reconnaître différents matériaux géologiques. En 1998, Braucher (Braucher *et al.*, 1998a,b) a daté les matériaux avec le ^{10}Be présent dans les filons de quartz pour la différenciation des matériaux dans la dynamique des latérites, au Brésil. La même année, Hénocque *et al.* (1998) ont utilisé le rapport isotopique $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ pour dater les processus de lessivage dans des latérites, en Ouest-Afrique.

Bourennane *et al.* (2003) comparent les distributions spatiales des éléments (traces et majeurs) en surface et au niveau de l'altérite afin d'examiner l'impact du facteur « matériau parental ». Les auteurs concluent que l'effet de l'altérite sur la distribution spatiale des éléments chimiques est en partie caché par des processus plus dynamiques de redistributions latérales de matériaux couplés à des activités anthropiques.

Utilisant des analyses plus facilement accessibles, Baize (1983) s'est appuyé sur la granulométrie (8 fractions) pour caractériser les PLANOSOLS. Il a alors défini des écarts fondés sur les différences granulométriques d'un horizon de sol à l'autre. Ces écarts ont permis de différencier les horizons obtenus par processus pédologiques (lessivage/accumulation) et ceux formés par juxtaposition de matériaux. Chittleborough *et al.* (1984) se sont aussi appuyés sur la granulométrie pour expliquer les forts contrastes texturaux issus de processus sédimentaires - altération chimique et physique, illuviation des argiles -, contrastes existants au sein des sols formant une des extrémités de quatre chronoséquences. Le Calvez (1979), se basant sur la granulométrie et les analyses courantes en pédologie - matière organique, C.E.C. - a tenté d'écrire des équations qui montreraient comment les matériaux se mélangent préalablement et/ou simultanément à la formation d'un sol.

Busacca et Singer (1989) ont quantifié l'homogénéité du matériau parental à partir du squelette granulométrique mais aussi de la fluorescence des rayons X sur les limons.

Le premier à utiliser la méthode isoquartz semble être Lelong (1969). Les principes de calculs sont repris dès 1971 par Sodom et Arnaud (1971), puis par Guillet *et al.* (1975) qui calculent un bilan de masse isoquartz pour les feldspath et les « complexes lessivants ». Ezzaim *et al.* (1999) définissent des PODZOSOLS par cette méthode en quantifiant les pertes et les gains de matière correspondant au développement des différents horizons (Lelong *et al.*, 1984).

1.3 Objectifs et présentation générale de la démarche

Comme nous venons de le voir, il existe de nombreuses méthodes d'analyse de la distribution spatiale des sols. Les approches numériques se sont développées avec la croissance des moyens informatiques aboutissant à un nombre élevé de modèles (McBratney *et al.*, 2003). Toutefois, ceux-ci sont encore peu utilisés de façon opérationnelle dans les programmes d'inventaire sur de grands territoires. Ceci est dû au coût relativement élevé de l'information numérique à acquérir, à la grande diversité et non moins grande complexité des systèmes pédologiques et enfin, au respect des standards des méthodes instruites dans des programmes d'inventaire déjà anciens.

L'objectif de ce travail vise à enrichir la méthode choisie par le programme français Inventaire, Gestion et Cartographie des Sols (I.G.C.S.) initié par le ministère de l'Agriculture dans les années 1990 et repris en 2001 par le G.I.S. Sol. Le but est d'explicitier le raisonnement pédologique développé en amont de la représentation cartographique. En effet, la carte (qu'elle soit sur papier ou numérique) n'exprime que le résultat d'un raisonnement et non le raisonnement lui-même. Or, dans de nombreux cas, il est essentiel que l'utilisateur final ait connaissance de ce raisonnement soit pour l'appliquer sur une zone distincte de celle où il a été élaboré, soit pour l'utiliser à bon escient pour des champs thématiques non envisagés par le cartographe lui-même.

Les voies envisagées pour expliciter la démarche inscrite dans le programme I.G.C.S. sont les suivantes :

- (1) développer une analyses des systèmes pédologiques selon des séquences d'échantillonnage recoupant les principaux facteurs en cause dans la formation des sols ;
- (2) envisager une telle analyse selon une vision tridimensionnelle propre aux couvertures pédologiques ;
- (3) identifier et, si possible, quantifier les processus pédogénétiques en cause dans la différenciation spatiale des sols ;
- (4) proposer des modes de représentation conceptuelle, cartographique et statistique de la variabilité des sols complémentaires de ceux proposés dans le cadre du programme I.G.C.S. (*i.e.* le modèle choroplète et le système DONESOL) ;

Cette approche est développée à partir d'un site « modèle » appartenant au programme I.G.C.S. de la région Pays de la Loire à l'échelle de 1/250000^{ème}. Malgré le caractère spécifique du site, la démarche se veut généralisable dans son principe à d'autres territoires.

Le document est divisé en neuf chapitres regroupés en quatre parties. La première partie concerne la présentation de la zone d'étude et l'acquisition des données. Dans la seconde partie, nous procédons à une première analyse des données permettant d'élaborer des hypothèses sur la formation des sols. La troisième partie présente les résultats des travaux menés sur deux séquences orientées, l'une dans le sens de la pente et l'autre le long d'une courbe de niveau. Enfin, la quatrième et dernière partie propose plusieurs méthodes susceptibles de compléter les informations actuellement renseignées dans le programme I.G.C.S.. Ce dernier aspect devrait fournir aux utilisateurs non seulement la description de la variabilité des sols mais aussi les moyens et méthodes utilisés pour reconnaître et expliciter cette variabilité.

Première partie

Présentation du milieu physique,
acquisition des données

Chapitre 2

Présentation de la zone d'étude

Introduction

La zone d'étude a été choisie en fonction de deux priorités majeures : (1) satisfaire aux objectifs I.G.C.S. en Pays de la Loire et (2) être relativement variée, tant au niveau de la topographie que de la géologie. De plus, la partie schisteuse, à l'Ouest d'Angers, comporte plusieurs études sur la compréhension des sols (Chaplot (1998), Chaplot *et al.* (2000), *etc...*). Ainsi, nous avons opté pour un secteur à l'Est d'Angers qui appartient à une petite région naturelle nommée le Baugeois. Le trait remarquable du paysage est un relief en buttes qui se répètent sur un large territoire. Une première étude des sols ayant été faite *via* le programme I.G.C.S. et la carte à 1/100000^{ème} d'Angers, nous présentons brièvement les caractéristiques physiques du milieu.

2.1 Géographie : situation, topographie, climat, végétation et anthropisation

L'étude se situe dans le Sud-Ouest du bassin parisien (fig. 2.1), sur les auréoles transgressives. Cette partie de l'Anjou est appelée « Anjou blanc » en raison des affleurements de craie tuffeau qui le caractérisent. Cette région s'étend de la vallée du Loir, au Nord, à la vallée de l'Argenton, au Sud, qui la sépare du Poitou. La Vienne, puis le Lude, forme une frontière naturelle avec la Touraine. Enfin, la limite Ouest est formée par une cuesta. En avant de celle-ci se trouve une série de buttes témoins isolées plus ou moins loin du Massif Armoricaïn. Cet ensemble est formé de deux petites régions séparées par la Loire et sa vallée. Rive gauche, se trouve le Saumurois et rive droite, celui qui va nous intéresser, le Baugeois.

Le Baugeois est constitué de plusieurs buttes, plateaux et petites plaines. Le site sur lequel a été fait l'étude se situe à Fontaine-Milon, à 30 km à l'Est d'Angers, dans le Maine et Loire (49). L'étude elle-même porte sur une zone de quelques 200 ha situés dans la partie Nord-Est de la commune. Les 200 ha ont été choisis de façon à avoir une séquence complète allant de la butte, à l'Ouest, au ruisseau, à l'Est. Le terrain comporte un dénivelé de 50 m sur une longueur de 2500 m. Comme le montre la carte de la figure 2.1, la par-

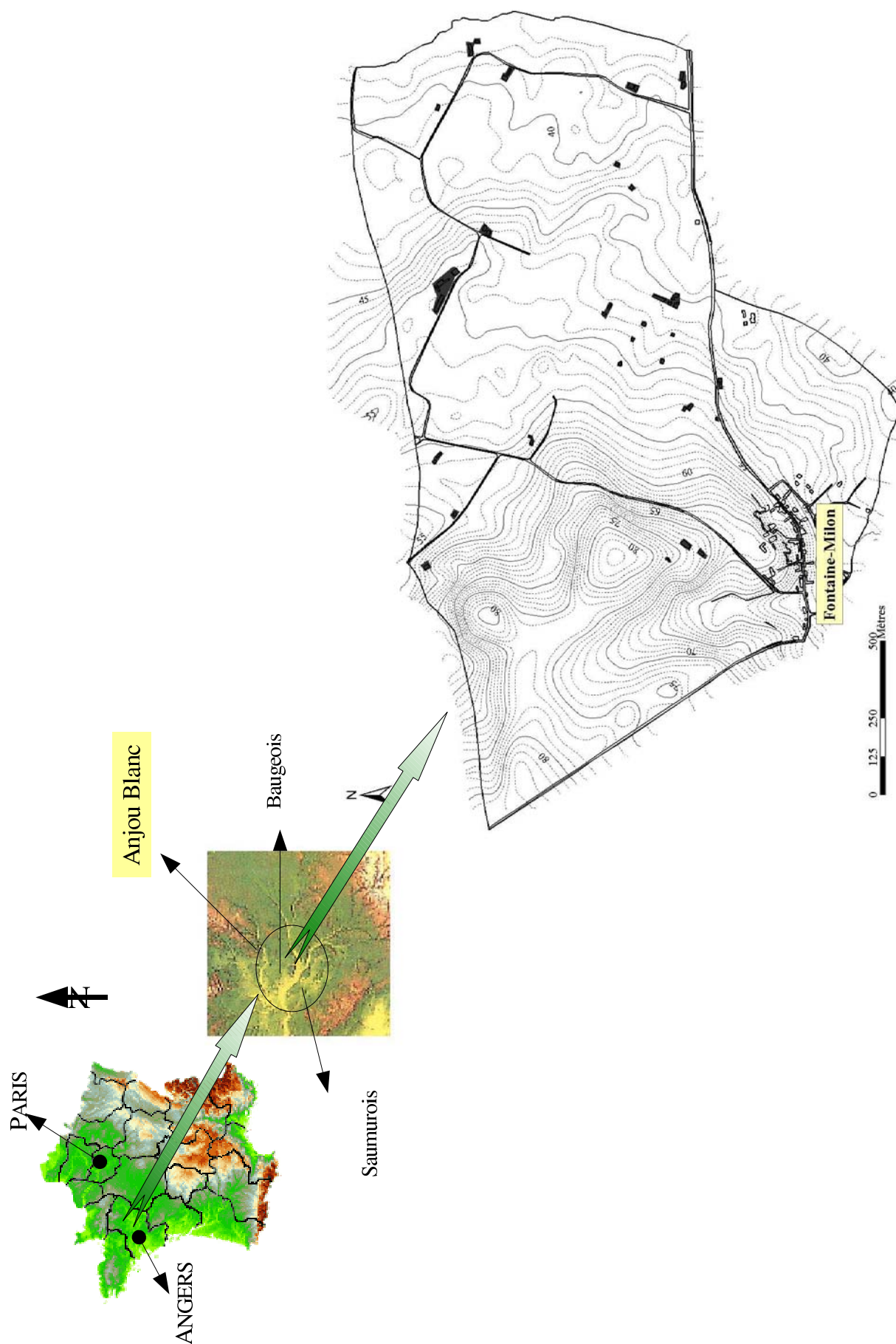


FIG. 2.1: Localisation de l'étude et hypsométrie

tie Est présente un paysage plutôt mou alors que le tiers Ouest forme une butte-plateau caractéristique du Baugeois.

Ouverts l'hiver aux influences atlantiques, mais coiffés l'été par les hautes pressions des Açores et abrités en toute saison des vents du nord par l'écran des collines de Normandie et du Perche, les Pays de la Loire reçoivent des précipitations faibles (de 600 à 700 mm). Avec un ensoleillement de 60 à 80 heures en Janvier, de 230 à 250 heures en Juillet, supérieur à ceux de la région parisienne et des régions de l'Est, ils enregistrent des moyennes de température de 3 ou 4°C en hiver et de 19°C en été. Des excès comme la sécheresse de l'été de 1976 ou les froids rigoureux de 1985 et 1986 n'altèrent pas le caractère riant du climat ligérien.

L'agriculture représente environ la moitié de la surface totale. Au cours du siècle dernier, et principalement depuis les années 1960, la région du Baugeois a connu trois remembrements principaux, le dernier en 1997, conduits en parallèle à une mécanisation de l'agriculture. L'irrigation et le drainage se sont aussi développés. De ce fait, de nombreuses haies ont disparu. *A contrario*, les bois restent encore correctement représentés, à raison d'un tiers environ de la surface de la zone d'études. Cette présence de bois et bosquets peut s'expliquer par une volonté des éleveurs de garder de l'ombre pour leurs animaux ou peut-être aussi par la moindre qualité agronomique des sols sous ces bois. La majeure partie de ceux-ci se trouvent principalement sur le plateau et ne sont que très peu naturels, composés de peuplement acidophiles (résineux, châtaigniers, principalement, accompagnés de fougères, houx, phragons, *etc.*...). Pour le reste des bois, il s'agit de peuplement neutrophile à tendance hydrophile, avec des peupleraies dans la partie la plus à l'Est de la plaine. Les prairies ne représentent qu'une faible proportion de cette zone (environ 1/6) et se positionnent plutôt dans la plaine. En conclusion sur la végétation, la couverture végétale est, pour le haut une forêt à tendance acidophile puis des champs agricoles et des prairies semi-artificielles. Quelques bosquets, composés principalement de feuillus, ainsi que des peupleraies, viennent agrémenter les champs.

2.2 Géologie

Le Baugeois est situé à la limite Sud-Ouest du bassin parisien. Il se compose de cinq substrats géologiques principaux, du Cénomanien moyen au Sénonien (*cf.* coupe fig.2.2).

Le Cénomanien moyen c_{2a} est composé d'argiles plus ou moins sableuses et glauconieuses. Elles sont surmontées par des marnes glauconieuses à Ostracées du Cénomanien supérieur c_{2b} . Par endroit, ces ostracées forment une lumachelle qui arme le paysage. Ces 2 substrats du Cénomanien forment une unité que nous appelons « plaine cénomanienne ». Louail (1984), dans sa thèse d'état, a montré que le Cénomanien moyen a subi différents types de dépôts qui induisent de fortes variations latérales de faciès. L'hétérogénéité dans ce milieu est donc aussi bien latérale que verticale.

Cette plaine cénomanienne est surmontée d'un plateau. La conformation de celui-ci est un dépôt du Sénonien c_4 constitué majoritairement de sables mais aussi d'argile en profondeur, argile qui ne se retrouve pas systématiquement. Par endroit, les sables ont « concrétionné », formant une dalle siliceuse, plus ou moins épaisse selon son emplacement, aussi appelé silcrète. Mouyoungou (1990), dans une thèse sur les silcrètes du Sénonien, dans laquelle il étudie aussi le Turonien, précise la provenance pédologique de cette silcrète, et affirme qu'elle se serait formée en quatre périodes de silicifications, comme dans le reste du bassin parisien. En contrebas de ce plateau, se trouvent les sables glauconieux

du Turonien supérieur c_{3b} , formation verte de faible puissance. Elle repose elle-même sur le Turonien inférieur c_{3a} , ici aussi connu sous l'appellation de craie Tuffeau de l'Anjou. Il présente une hétérogénéité verticale décrite dans les notices des feuilles géologiques à 1/50000^{ème} de Longué (Brossé et Louail, 1976) ou d'Angers (Calvet, 1976). Mouyoungou (1990) précise quelque peu la composition minéralogique en observant des teneurs élevées en éléments mineurs, avec principalement une association de Zn, Pb et V.

A ces substrats dits « en place » se surimposent d'autres matériaux issus d'un environnement proche. Il s'agit de sables d'origine soit éoliennes (N), soit colluvionnés depuis le plateau sénonien. Les colluvions peuvent se retrouver sur plusieurs centaines de mètres en contrebas du plateau. Elles se reconnaissent grâce à la présence d'horizons sableux en surface. Les sables éoliens, quant à eux, n'ont pas été ici définis par les géologues mais ils se trouvent sur la carte de Longué à quelques kilomètres au Sud de Fontaine-Milon. Ils auraient été apportés à l'époque quaternaire par des vents du Sud-ouest depuis les grèves de la Loire et les plaines cénomaniennes. Il est possible de les distinguer grâce à une morphologie en dune arasée composée exclusivement de sables. Or, ici, nous retrouvons cette morphologie. Nous en déduisons donc que les sables éoliens sont présents.

2.3 Pédologie succincte

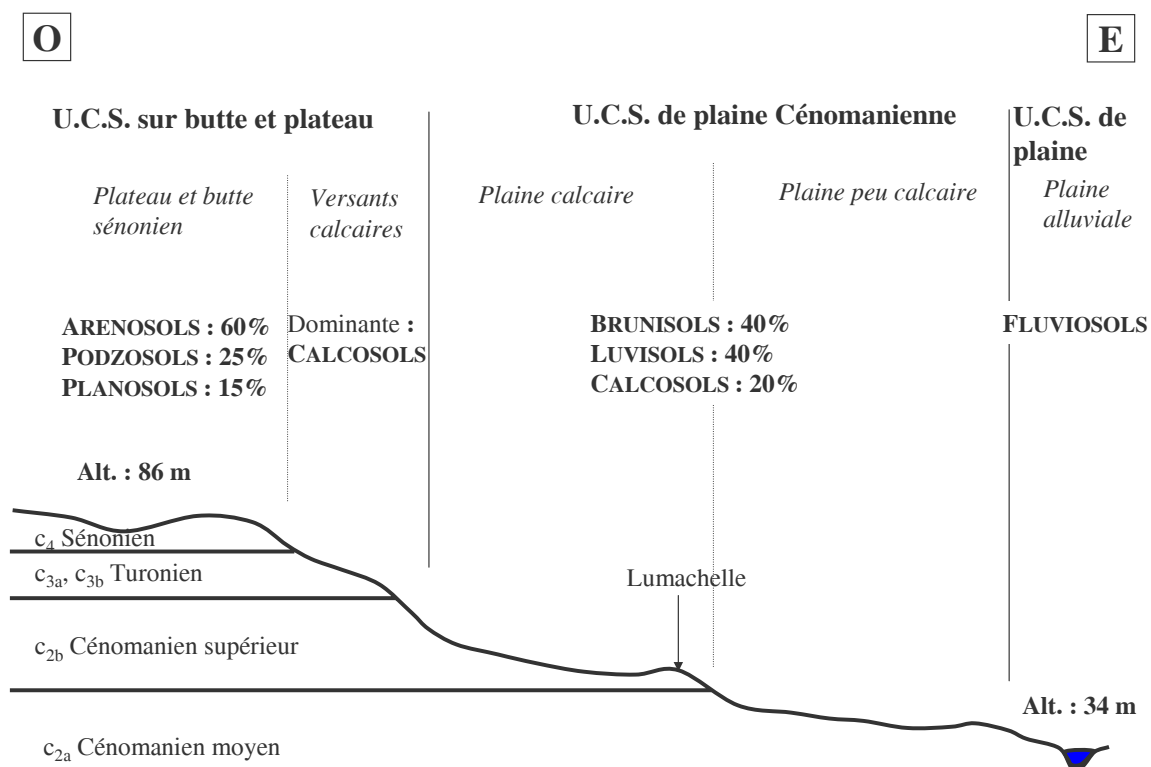


FIG. 2.2: Pédologie synthétique du site issue des descriptions réalisées dans le cadre du travail I.G.C.S.-Pays de la Loire, à paraître

Le présent travail fait suite à des études faites dans le cadre de la carte des sols à 1/100000^{ème} de la feuille d'Angers ainsi que du programme Inventaire, Gestion et Conser-

vation des Sols (I.G.C.S.). La coupe 2.2, ainsi que les fiches synthétiques en annexe 11, présentent un résumé des conclusions concernant la pédologie de la zone d'étude.

Sur cette zone, deux unités cartographiques de sols (U.C.S.) ont été définies. Les limites de ces unités s'appuient sur les formes du relief qui reflètent également les couches géologiques sub-horizontales dans cette partie du Bassin Parisien. A l'Est, l'unité de plaine cénomaniennne est formée par les Cénomaniens moyen c_{2a} et supérieur c_{2b} ; à l'Ouest, l'unité de plateau et butte est constituée par les substrats géologiques des Turoniens inférieur c_{3a} , Supérieur c_{3b} et du Sénonien c_4 .

L'U.C.S. de plaine est définie par près de 40 % de LUVISOLS plus ou moins rédoxiques, 40 % de BRUNISOLS et 20 % de CALCOSOLS plus ou moins épais ; ces sols sont développés sur les argiles sableuses du Cénomaniens moyen (c_{2a}) et les marnes à Ostracées du Cénomaniens supérieur (c_{2b}). Au dessus de cette U.C.S. de plaine se trouve l'U.C.S. de pentes et plateaux que forment la superposition Turonien sous Sénonien. 60 % de sa surface sont répartis sur les plateaux sableux et sont constitués de sols s'échelonnant de l'ARENOSOL au PODZOSOL, avec quelques PLANOSOLS. Les 40 % restants sont développés sur les pentes et se composent principalement de CALCOSOLS peu épais et de RENDOSOLS. Nous pouvons aussi y trouver quelques BRUNISOLS peu développés et des COLLUVIOSOLS plus sableux.

Chapitre 3

Stratégie d'échantillonnages, méthodes d'acquisition des données et d'interprétation en terme de pédogenèse et de formation du relief

Introduction

La formation des sols et leur distribution spatiale dépendent des facteurs environnementaux que sont le climat, la lithologie, le relief, la végétation et l'anthropisation (Jenny, 1941). Les travaux réalisés précédemment sur le secteur d'étude et dans ses environs conduisent à privilégier, à cette échelle, la géologie et le relief comme facteurs principaux contrôlant la formation des sols. La complexité du milieu physique implique une analyse fine des matériaux parentaux (variabilité des faciès, dépôts éoliens allochtones. . .). L'agriculture est certainement un facteur supplémentaire à prendre en compte mais nous ne disposons ni d'un secteur suffisamment grand pour croiser les différents modes d'occupation des sols, ni d'une connaissance détaillée de l'historique de cette occupation. De plus, nous constatons un lien fort entre les modes d'occupation et les autres facteurs que sont la géologie et le relief.

3.1 Prospection terrain : développement succinct des 2 méthodes utilisées

Nous devons analyser 230 ha de champs agricoles, de prairie et de forêt en terme d'organisation des sols. La stratégie d'échantillonnage repose sur deux modes différents. Le premier mode est construit sans hypothèse préalable, selon un quadrillage systématique afin de couvrir toute la zone et avoir ainsi une vision quasi exhaustive de la diversité des sols présents sur la zone d'étude. A l'inverse, le second mode d'échantillonnage est dit « orienté » puisqu'il s'agit de sélectionner les sites d'observations en fonction des facteurs considérés comme les plus déterminants dans la formation des sols, en l'occurrence le

matériau géologique initial et la topographie. Deux transects ont donc été choisis afin de recouper les principales lithologies ainsi que les principales formes du relief.

3.1.1 Échantillonnage systématique

L'échantillonnage systématique a consisté en un ensemble de 230 sondages à la tarière à main, soit une densité d'environ un sondage par hectare. A chaque sondage correspond une fiche (*cf.* fiche exemple en annexe) sur laquelle sont notées des informations de type pédologiques mais aussi de repérage sur le terrain.

Cette dernière comprend le nom du sondage, la date du levé, avec les conditions météorologiques du moment, les coordonnées géographiques relevées systématiquement à l'aide d'un G.P.S. *Leica 500*, la topographie et les éléments géo-morphologiques généraux et proches du sondage, le substrat déterminé sur le terrain et un levé succinct de la végétation.

En ce qui concerne les informations pédologiques, sur chaque horizon, il s'agit, de la limite inférieure (ou profondeur de disparition), la texture, la couleur générale définie avec la charte Munsell (Munsell, 1992), tout comme la présence éventuelle de taches dont la quantité est estimée à l'œil - de 0 (pas de tache visible à l'œil nu) à « +++ » (taches présentes pour presque la moitié de l'échantillon en quantité). Sont aussi notées la présence de concrétions ferro-manganiques et leur type, les réactions à la solution de HCl 1/3 N - de 0 à « +++ » - ainsi que la présence d'éléments grossiers - quantité approximative, taille et type, quand celui-ci peut être déterminé. Une place est laissée à des remarques annexes.

3.1.2 Échantillonnage orienté

La prospection orientée s'appuie sur le principe de l'échantillonnage utilisé dans le cadre de l'« analyse structurale » (Boulet *et al.*, 1982a,b,c). L'idée principale est « [...] d'analyser l'organisation spatiale, *aussi bien verticale que latérale*, de couvertures meubles depuis la ligne de partage des eaux jusqu'au thalweg adjacent. La méthode consiste à examiner d'abord, sur le transect choisi, 3 fosses en haut, mi- et bas de pente, puis à faire des observations intermédiaires d'autant plus nombreuses et rapprochées que les variations latérales s'avèrent rapides et importantes. »

Il n'a pas été possible de découpler lithologie et topographie. La méthode a donc été adaptée pour tenir compte de la forte variabilité des sols ainsi que des contraintes temporelles. Le premier transect que nous avons choisi est ainsi une lithotoposéquence de 2,5 km environ qui traverse le terrain d'Ouest en Est. Les autres séquences ne sont pas des transects *s.s.* mais des lithoséquences (*cf.* fig.3.1). Un premier pas de 50 m a été choisi arbitrairement. Chaque échantillon d'horizon prélevé à la tarière a été conservé dans un pédo-comparateur¹ de façon à pouvoir comparer les sondages entre eux. Lorsque les sondages différaient par au moins une caractéristique (nombre d'horizons, texture, couleur, réaction à HCl, quantité d'éléments grossiers), des sondages intermédiaires ont été décrits, tout en gardant une distance minimale de 10 m, dans un souci de représentativité et d'échelle de travail.

En conclusion, nous avons employé deux méthodes différentes d'échantillonnage. Le mode systématique couvre l'ensemble de la zone, amenant ainsi un aperçu global de la pédodiversité. Le mode « orienté » permet un début de compréhension de l'organisation

¹Caisse comportant des boîtes de 3*3*3 cm³ cartonnées et mobiles permettant la comparaison visuelle d'échantillon de chaque horizon

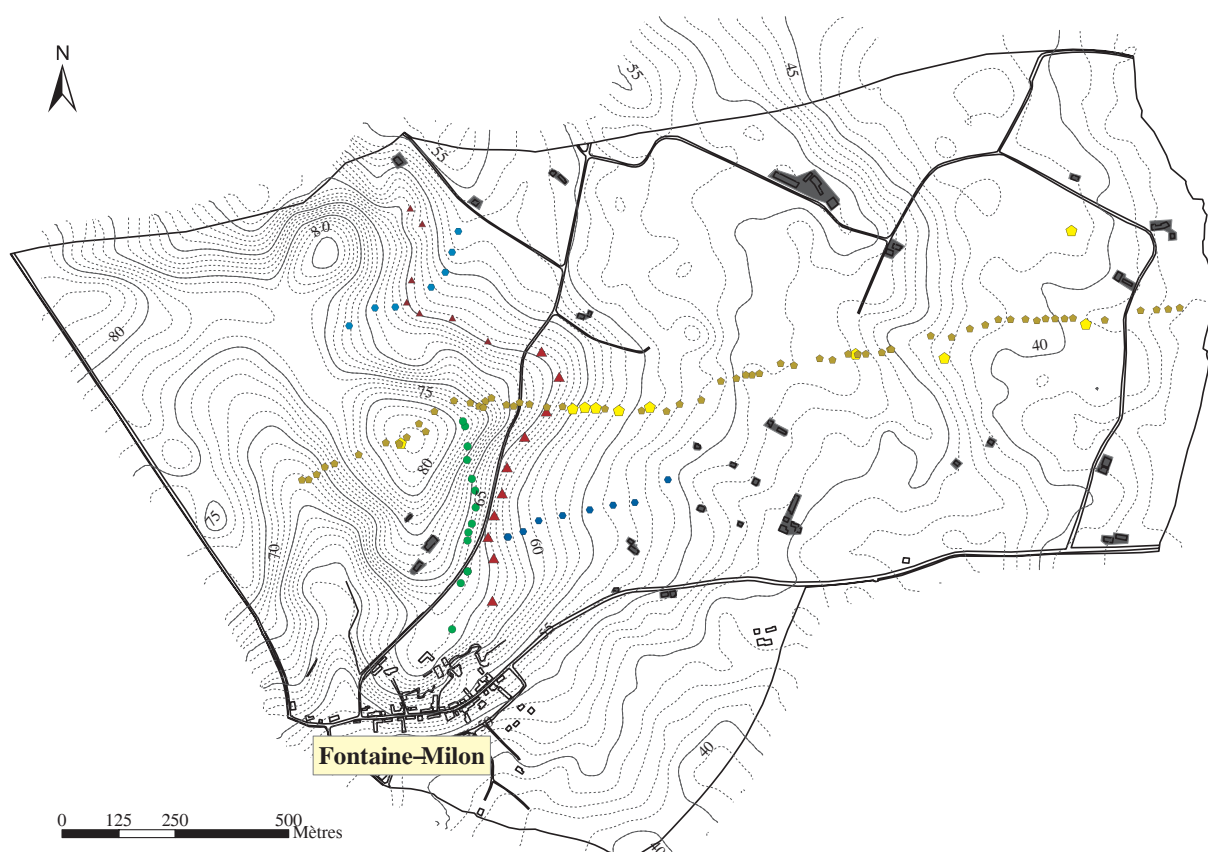


FIG. 3.1: Plan d'échantillonnage des séquences

des sols dans le paysage. En conséquence, l'association de ces deux méthodes offre une complémentarité qui allie une compréhension de l'organisation des sols avec une vision quasi-exhaustive de la pédodiversité.

3.2 Analyses réalisées au laboratoire sur les échantillons de sols

Vingt fosses ont été ouvertes dans deux séquences, la lithotoposéquence, et l'autre est une isoaltiséquence. Celle-ci a été choisie dans la craie c_{3a} en suivant une courbe de niveau afin d'observer l'effet de la morphologie du paysage sur les sols.

L'ensemble des échantillons prélevés a été analysé selon les méthodes habituelles utilisées en cartographie des sols (granulométrie, C.E.C., pH, matière organique sur les horizons supérieurs). Dans cet ensemble, quatre fosses étaient toutefois quasi-identiques 2 à 2, seules deux d'entre elles ont été prises en compte pour les analyses. Une sélection d'échantillons a été orientée pour l'étude au microscope de lames minces et de la morphoscopie de grains de sables.

3.2.1 Analyses granulométriques

La granulométrie et les squelettes

Les échantillons prélevés ont été analysés par le Laboratoire d'Analyses des Sols, I.N.R.A. d'Arras, de façon à obtenir, entre autres, les granulométries 8 fractions avec et sans décarbonatation. Ces fractions sont les argiles, les limons, fin et grossier, et les sables, très fin à très grossier, comme indiqué sur l'échelle de la figure 3.2. Les granulométries, avec et sans décarbonatation, permettent de « vérifier la filiation pédogénétique entre des horizons calcaires et d'autres qui ne le sont pas (ou ne le sont plus) » (Baize, 1988). Afin de « savoir si [le] calcaire se situe plutôt dans les fractions A et L_f ou [...] dans les fractions sableuses », la granulométrie obtenue avec décarbonatation de ces échantillons calcaires sera ultérieurement comparée à la granulométrie sans décarbonatation. Huit fractions granulométriques permettent ainsi une analyse plus détaillée, avec une comparaison quantitative des différences texturales entre horizons. Le report des courbes cumulatives sur graphe est un moyen efficace pour comparer des matériaux, superposés ou non.

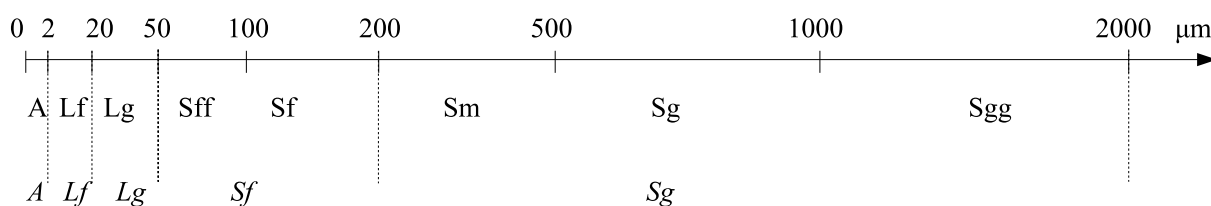


FIG. 3.2: Échelle de répartition des fractions granulométriques de la terre fine (< 2 mm)

Le squelette², quant à lui, ne considère que les particules les moins mobiles (sables et limons). En effet, les particules les plus mobiles ont pu, au cours de la pédogenèse, subir un phénomène d'illuviation, de lessivage latéral, une destruction chimique, s'accumuler ou apparaître par micro-division de particules plus grosses (Baize et Girard, 1995).

La réflexion sur la granulométrie se base sur différents graphiques. Les graphiques de proportion de chaque fraction en fonction de la profondeur, souvent en cumulé, permettent de visualiser chaque profil dans son ensemble. Les graphiques, en cumulé et non-cumulé, de proportions en fonction de chaque fraction, facilitent la comparaison des horizons les uns par rapport aux autres.

3.2.2 Analyses micro-morphologiques et morphoscopiques

Lames minces

Pour des raisons économiques et temporelles, seul l'horizon BT/Béta, défini après ouvertures des fosses et réflexion sur la granulométrie, a été sélectionné pour la réalisation de lames minces. Cinq fosses présentaient cet horizon. Nous avons donc fait un retour sur le terrain pour prélever huit échantillons à la tarière à mouton de 10 cm de diamètre dans cet horizon. Les échantillons ont ensuite été mis dans un récipient, non compressés, puis intégralement recouverts d'acétone avant d'être imprégnés de résine. Comme dit plus

²Le squelette permet d'exprimer les différentes fractions granulométriques limoneuses et sableuses en % de leur somme, les argiles ayant été exclues par une règle de trois (Baize et Jabiol, 1995)

haut, les prélèvements de deux fosses n'ont pas été envoyés pour analyses à l'I.N.R.A. d'Arras. Comme l'horizon BT semblait présent dans ces deux fosses, nous avons effectué l'imprégnation en résine des échantillons secs des horizons BT/Béta de ces deux fosses.

Une fois la mise en résine effectuée, il s'agissait d'opérer le polissage. Une dizaine de lames minces a ainsi été réalisée par Christian Lelay, de l'I.N.R.A. d'Orléans, U.R. Science du Sol, d'après Guilloire (1980) et Murphy (1986).

Etude morphoscopique des sables

Certains matériaux semblant être allochtones, nous avons décidé d'utiliser l'étude morphoscopique des sables pour déterminer leurs origines.

La préparation des échantillons est réalisée (1), en nettoyant les sables (suppression des carbonates et de la matière organique, si nécessaire, et défloculation des argiles et limons), (2), en les tamisant, de façon à extraire les différentes fractions sableuses définies au paragraphe 3.2.1. L'observation des grains est faite à la loupe binoculaire, sur un fond noir pour mieux percevoir les contours des grains de sables. La taille la plus appropriée pour l'observation est celle de 0.3 mm (Berthois, 1971). Cependant, l'érosion éolienne se perçoit mieux vers 0.7 mm. C'est pourquoi la classe principalement observée a été celle de 0.2-0.5 mm (S_m) puis celle de 0.5-1 mm (S_g). Les interprétations sur l'origine des sables déduites de l'analyse morphoscopique reposent sur une approche quantitative. Cailleux (1937) et Cailleux et Tricart (1959) indiquent, pour la caractérisation morphoscopique proprement dite : (1) si le pourcentage des émoussés luisants est supérieur à 30 %, l'usure par la mer est certaine ; (2) s'il est inférieur à 20 %, il est possible que l'origine des sables soit fluviale ; (3) les sables éoliens sont, *a priori*, très caractéristiques puisque les grains dont la taille est proche de 0.5 mm sont très arrondis et dépolis.

3.3 Informations, compréhension des données dans l'environnement

3.3.1 Carte géologique

La zone d'étude est intégralement couverte par la carte géologique à 1/50000^{ème} de Longué, XVI-22 (Brossé et Louail, 1976). Les méthodes d'acquisition des données et l'échelle de travail employées par les géologues sont différentes de celles utilisées par les pédologues et entraînent des difficultés de cartage. En effet, le BRGM travaille à 1/25000^{ème} pour une carte à 1/50000^{ème}, en se basant beaucoup sur des observations de surface ou en carrière, et sur quelques forages, alors que nous avons travaillé par sondages à l'aide de tarières, avec un maillage de 100 m environ, soit une échelle de l'ordre de 1/10000^{ème}, puis à l'aide de sondages (à la tarière et avec des fosses) plus resserrés. Nous pouvons donc nous poser des questions quant à la fiabilité de certaines limites géologiques à l'échelle très détaillée de notre étude. Nous vérifierons donc la cohérence cartographique entre les deux approches.

3.3.2 Caractérisation granulométrique des matériaux et horizons

Dans un premier temps, nous avons comparé les différents matériaux géologiques initiaux en recherchant une spécificité éventuelle de leur signature granulométrique. Pour ce

faire, nous sommes partis des histogrammes des courbes cumulées et non-cumulées de leur squelette granulométrique.

Dans un deuxième temps, nous avons comparé, au sein de chaque solum, chaque horizon (1) à l'horizon immédiatement sous-jacent, et (2) à l'horizon le plus profond identifié comme matériau géologique potentiellement à l'origine de la genèse du sol sus-jacent.

3.3.2.1 Description des méthodes de comparaison

La comparaison des horizons se base sur le squelette granulométrique selon 7 fractions (2 limons et 5 sables, *cf.* fig. 3.2) (Baize, 1988). La fraction fine - $< 2 \mu\text{m}$ - est supprimée du calcul car elle est trop mobile et trop altérable pour permettre une comparaison des horizons basée sur leur constitution actuelle.

Afin de déterminer les matériaux constitutifs des horizons, nous avons procédé à des comparaisons entre horizons. Cette comparaison utilise deux méthodes de calculs : (1) un ratio entre fractions sableuses et (2) une distance granulométrique.

(1) Estimation de la ressemblance entre deux horizons par le calcul d'un « ratio » entre fractions sableuses :

Il existe de nombreuses possibilités de combinaison pour calculer un ratio. Pour déterminer le ratio le plus approprié, nous avons procédé par élimination. Primo, les particules les plus grossières étant moins sujettes au transport et moins sensibles à l'altération, nous avons écarté les particules les plus fines, *i.e.* les limons. Secundo, les quantités de sables doivent être suffisamment élevées pour rester représentatives et diminuer les incertitudes analytiques, ce qui écarte les sables les plus grossiers, qui ne sont ici présents qu'en faible proportion. Il en ressort que le plus approprié est le ratio s_g/s_m (*cf.* fig. 3.2), selon le calcul :

$$r = \frac{(s_g/s_m)_U}{(s_g/s_m)_D} \quad (3.1)$$

où D et U sont deux horizons que nous souhaitons comparer, D étant le plus profond des deux.

Les analyses granulométriques présentent une incertitude non négligeable, qui peut rendre obsolète le calcul d'un ratio. Pour notre raisonnement, nous décidons que 20 % d'erreur est tolérée. Nous admettons alors :

- $r < 80\%$ ou $r > 120\%$: H_U différent de H_D ;
- $80\% < r < 120\%$: H_U ressemblant à H_D .

(2) Calcul de l'homogénéité d'un solum par le calcul de la « distance granulométrique » entre deux horizons contigus :

Nous avons choisi la distance granulométrique proposée par Baize (1983). Pour deux horizons U et D, celle-ci est définie comme la somme (en valeur absolue) des écarts entre les sept fractions du squelette de ces deux horizons, selon la formule :

$$E_b = \sum_{x=l_f}^{s_{gg}} |x_D - x_U| \quad (3.2)$$

où x représente les différentes fractions granulométriques l_f , l_g , s_{ff} , s_f , s_m , s_g et s_{gg} de deux horizons D et U. Si, le long d'un solum, il n'apparaît aucune différenciation forte

entre deux horizons successifs, nous pouvons dire que ce solum est granulométriquement homogène (Baize, 1983). Ainsi, nous avons :

- $E_b < 20$: profil très homogène ;
- $20 < E_b < 40$: profil assez homogène ;
- $40 < E_b < 60$: incertitude quant à l'homogénéité du profil ;
- $E_b > 60$: profil hétérogène.

3.3.2.2 Choix des indices selon l'objectif fixé

Ces deux méthodes de comparaison sont applicables pour déterminer : (1) si les horizons ont un lien de parenté granulométrique avec le matériau sous-jacent, (2) si le solum est homogène. Nous avons choisi l'une ou l'autre méthode selon l'objectif recherché. Ainsi, les ratios r ont été utilisés pour comparer les horizons d'un solum au matériau géologique initial sous-jacent, tandis que les distances granulométriques E_b ont permis d'apprécier globalement l'homogénéité des profils. En effet, entre un horizon supérieur et le matériau géologique initial, il existe de fortes probabilités pour qu'il y ait eu des transformations physiques et/ou chimiques ; l'évolution granulométrique par altération, appauvrissement ou illuviation, peut être non-négligeable. Or, si toutes les particules sont affectées, la taille des grains entre en compte. Ainsi, les limons, particules les plus fines du squelette, développent des surfaces d'échanges supérieures à celles des sables et risquent d'être proportionnellement plus sensibles à l'altération (Legros, 1982). Par contre, si nous souhaitons comparer deux horizons contigus, il semble judicieux de considérer le squelette dans son ensemble. Ainsi, les ratios permettront la comparaison des horizons au substrat sous-jacent et les distances granulométriques serviront pour l'observation de l'homogénéité intrinsèque des solum.

3.3.3 Modèle Numérique d'Altitude (M.N.A.) et variables morphométriques dérivées

Acquisition et élaboration du M.N.A.

Le M.N.A. a été créé par photo-interprétation au sein de l'École Supérieure des Géomètres Topographes (<http://www.esgt.cnam.fr/>). Le logiciel utilisé permet un traitement d'images semi-automatique avec vision stéréoscopique. Développé par M. Egels de l'I.G.N., « Poivilliers » est à but éducatif et ne peut être vendu. Le travail a été effectué par Marc Toselli sous la direction d'André Balandier, responsable du Laboratoire de Photogrammétrie. Le résultat est un fichier de points altimétriques à extrapoler. Ceci a été fait par J. Daroussin comme suit :

- (1) Initialisation ;
- (2) Convertir les points altimétriques de l'E.S.G.T. de *.dxf en couverture ;
- (3) Définir le système de projection ;
- (4) Supprimer les points aberrants manuellement ;
- (5) Construire l'enveloppe convexe du semis de points ;
- (6) Construire la zone d'interpolation (périmètre de la zone) ;
- (7) Supprimer les points sous forêt car la hauteur des arbres, très variable, induit une erreur difficilement corrigible. Ces points seront compensés par des points extraits du M.N.A. de l'I.G.N. ;
- (8) Construire, dans l'enveloppe, les zones forestières où les altitudes doivent provenir du M.N.A. de l'I.G.N. ;

- (9) Comparer les altitudes du M.N.A. de l'E.S.G.T. avec celles des M.N.A. de l'I.G.N. et de S.R.T.M. (Shuttle Radar Topography Mission, mission de partenariat entre la N.A.S.A et la N.G.A. - National Gallery of Art). Celles-ci sont considérées comme des références et le M.N.A. de l'E.S.G.T. sera corrigé de la moyenne des différences des altitudes si nécessaire ;
- (10) Créer le TIN ;
- (11) Créer le M.N.A. ;
- (12) Caler le M.N.A. de l'I.G.N. sur le M.N.A. de l'E.S.G.T. ;
- (13) Sous forêt, récupérer les altitudes I.G.N. ;
- (14) Supprimer les points I.G.N. qui semblent aberrants ;
- (15) Dans les zones planes, corriger l'altitude des points I.G.N. « à la main », pour obtenir un relief proche de celui visible par stéréoscopie sur les photographies aériennes ;
- (16) Reconstruire le M.N.A. de l'E.S.G.T. à partir de l'ensemble de ces éléments : 16.1 - Re-crée le TIN ; 16.2 - Re-crée le M.N.A. ;
- (17) Mise en base, ménage et fin.

Calcul des variables dérivées

Les analyses morphométriques du relief au travers du calcul d'indices dérivés du M.N.A. ont été réalisées à l'aide d'algorithmes développés par J. Daroussin au sein du système ArcInfo..

- (1) Courbes de niveau (mètres) ;
- (2) Intensité de la pente (%) ;
- (3) Azimuth de la ligne de plus grande pente (degrés) ;
- (4) Formes du relief (convexités et concavités, horizontales et verticales) (sans unités) ;
- (5) Direction des flux (1 = est, 2 = sud-est, 4 = sud, *etc.*... jusqu'à 128 = nord-est, -1 = indéterminé parce que plat) et surfaces drainées (nombre de pixels) ;
- (6) Zones de flux nul ou presque (codées 1) ;
- (7) Réseau hydrologique ;
- (8) Distance au réseau hydraulique (mètres) ;
- (9) Potential drainage density (PDD) (nombre de pixels) ;
- (10) MultiResolution index of Valley Bottom Flatness MRVBF ou MultiResolution index of Ridge Top Flatness (sans unités) (Gallant et Dowling, 2003) ;
- (11) Distance à la butte sénonienne (mètres) ;

L'ensemble des informations est transféré sur les points de sondages afin d'effectuer les traitements statistiques et de mettre en évidence d'éventuelles relations entre les caractéristiques du relief et les variables des sols.

Conclusion

Nous avons présenté, dans ce chapitre, une brève description de deux méthodes complémentaires d'échantillonnage pédologique sur le terrain. Ces méthodes permettent une première caractérisation des sols ainsi qu'un début de compréhension de leur organisation. Elles sont similaires aux méthodes d'acquisition utilisées lors des études cartographiques réalisées dans le cadre des inventaires pédologiques. Elles aboutissent à des modèles empiriques mais ne permettent pas de quantification.

Il faut souligner qu'un échantillonnage systématique nous est apparu indispensable, d'une part, pour assurer une vision quasi-exhaustive de la diversité des sols, et d'autre part, pour

permettre une estimation quantitative de cette diversité. Faute de temps, nous n'avons pas abordé la question du pas de cet échantillonnage systématique sauf au travers des séquences analysés plus en détail.

Cette approche par séquence permet quant à elle d'orienter l'échantillonnage afin de privilégier l'effet d'un facteur pris isolément. Toutefois, le long de la lithotoposéquence, nous n'avons pas pu dissocier les deux facteurs principaux que sont la géologie et le relief. Aussi, reconnaissant l'importance du relief dans la variabilité de sols, nous avons introduit une séquence originale : l'isoaltiséquence.

L'échantillonnage systématique ne se fonde pas sur une analyse du milieu, contrairement à l'échantillonnage orienté selon ces séquences. Il s'appuie en effet sur la mise en place d'hypothèses sur la formation et la distribution spatiale des sols. Le choix de ces séquences est donc déterminante pour la suite des travaux.

Par ailleurs, nous avons numérisé l'ensemble des données, dans un souci de quantification et de traitements numériques ultérieurs.

Enfin, nous avons procédé à des analyses complémentaires afin d'améliorer la compréhension des facteurs de pédogenèse : (1) granulométrie pour tenter de définir le matériau parental, et (2) variables externes dérivées du M.N.A., pour estimer les paramètres du relief et quantifier leur éventuel effet sur l'organisation des sols.

Comme pour les stratégies d'échantillonnages, le choix des méthodes et des indicateurs mis en place sont déterminants pour l'ensemble des traitements et interprétations ultérieurs.

Deuxième partie

Analyses préliminaires des données

Chapitre 4

Premières analyses issues de l'échantillonnage systématique : Examens des cartogrammes

Introduction

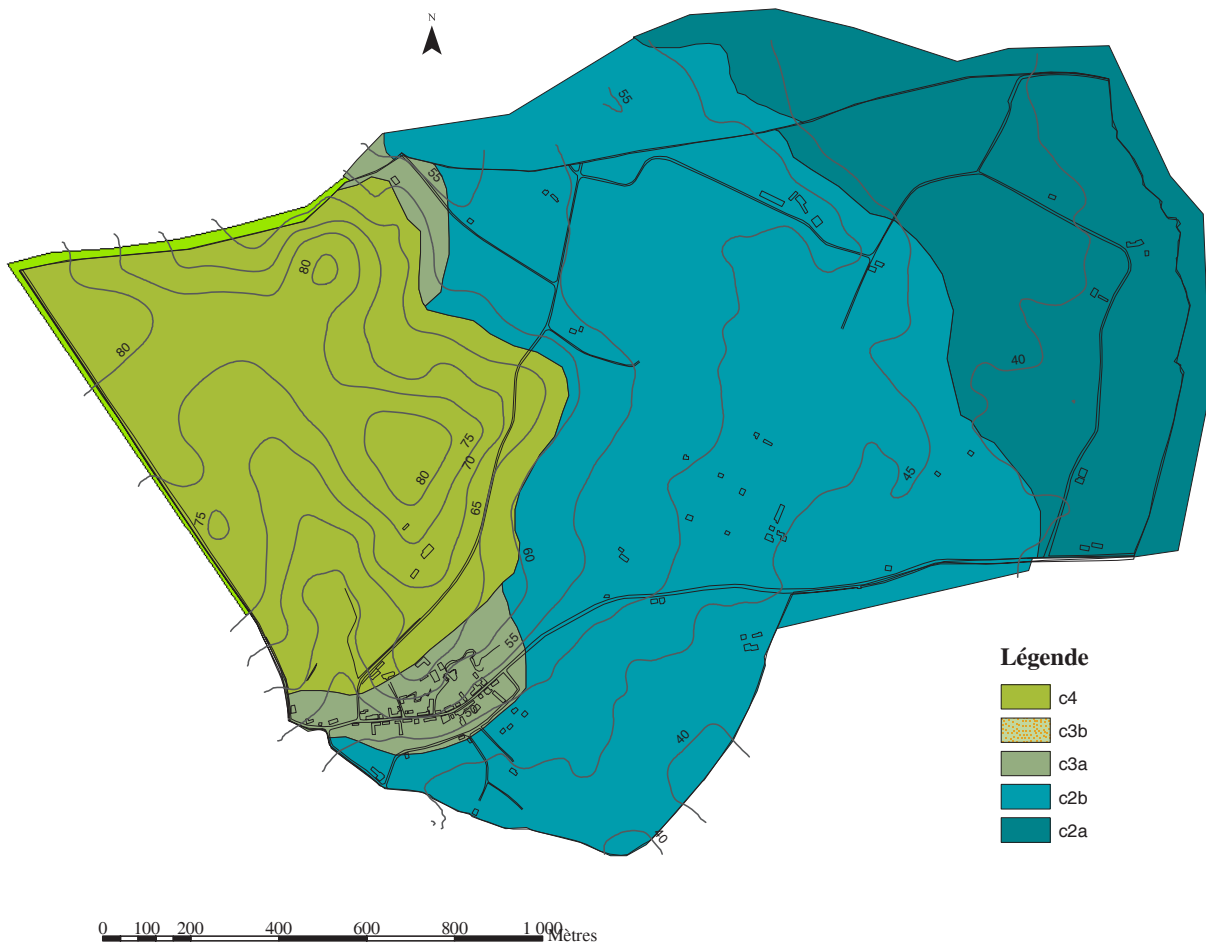
Ce chapitre présente les données issues de l'observation des sols à la tarière lors de la prospection systématique. Nous avons privilégié une représentation sous forme de cartogrammes afin de visualiser directement les données brutes recueillies sur le terrain sans traitements statistiques intermédiaires. Préalablement, nous présentons et discutons la carte géologique afin de disposer d'un document suffisamment fiable pour les interprétations ultérieures.

4.1 La géologie

Dans ce paragraphe, nous comparons les limites géologiques obtenues lors de la prospection aux limites définies par le BRGM. Nous avons en effet deux méthodes de cartographie et des échelles différentes. D'une part, le BRGM observe les formations à l'affleurement et l'échelle de travail est de l'ordre de 1/25000^{ème}. D'autre part, les sondages systématiques ont un maillage d'échantillonnage d'un sondage par hectare, soit une échelle de travail comprise entre le 1/3000^{ème} et le 1/15000^{ème} (Legros, 1996). De plus, ils sont obtenus à l'aide de tarières à main jusqu'à une profondeur de 1,2 m. Ceci permet souvent d'atteindre les matériaux géologiques, et ainsi préciser les limites géologiques.

4.1.1 Le Sénonien (c_4)

La carte du BRGM (figure 4.1) montre une présence du Sénonien (c_4) plus importante, avec une altitude de limite inférieure plus faible que celle sur la carte réalisée à partir des sondages à la tarière à main (figure 4.2). Cette formation sableuse montre une tendance nette à colluvionner, recouvrant ainsi les formations sous-jacentes. De simples observations ne permettent pas de distinguer ces colluvionnements des formations en place.

FIG. 4.1: Extrait de la carte géologique à 1/50000^{ème}

4.1.2 Le Turonien supérieur (c_{3b})

Sur la carte du BRGM, le Turonien supérieur (c_{3b}) n'est pas visible, il est couvert par du c_4 qui s'avère être en fait des colluvions sableuses. D'après la notice de la carte géologique (Brossé et Louail, 1976), cette formation de sables argileux glauconieux est de faible puissance (de l'ordre d'une dizaine de mètres) et, qui plus est, sujette à l'érosion, ce qui en fait une formation difficile à observer sur le terrain à l'affleurement. Il est toutefois possible de la trouver en profondeur, lors de sondages à la tarière à main. Notre carte géologique (fig. 4.2) permet donc de positionner le Turonien supérieur (c_{3b}).

4.1.3 La craie Tuffeau (c_{3a})

Le Turonien inférieur (c_{3a}) est, selon la carte du BRGM, lui aussi affecté par les colluvions des sables du c_4 . En premier lieu, il n'est pas représenté de façon continue, et il se manifeste plutôt en « poches ». Sa limite supérieure, qui le sépare du c_4 et non du c_{3b} comme ce devrait logiquement être le cas, se trouve entre 5 m et 20 m plus basse sur la carte du BRGM que sur celle résultant des observations à la tarière, en raison du colluvionnement. Il n'existe pas non plus de correspondance de la limite inférieure entre les deux cartes. Selon le BRGM, elle est plus basse de 3 à 6 m en altitude et n'apparaît pas continue. Or la notice indique que cette formation est plane, et un très léger pen-

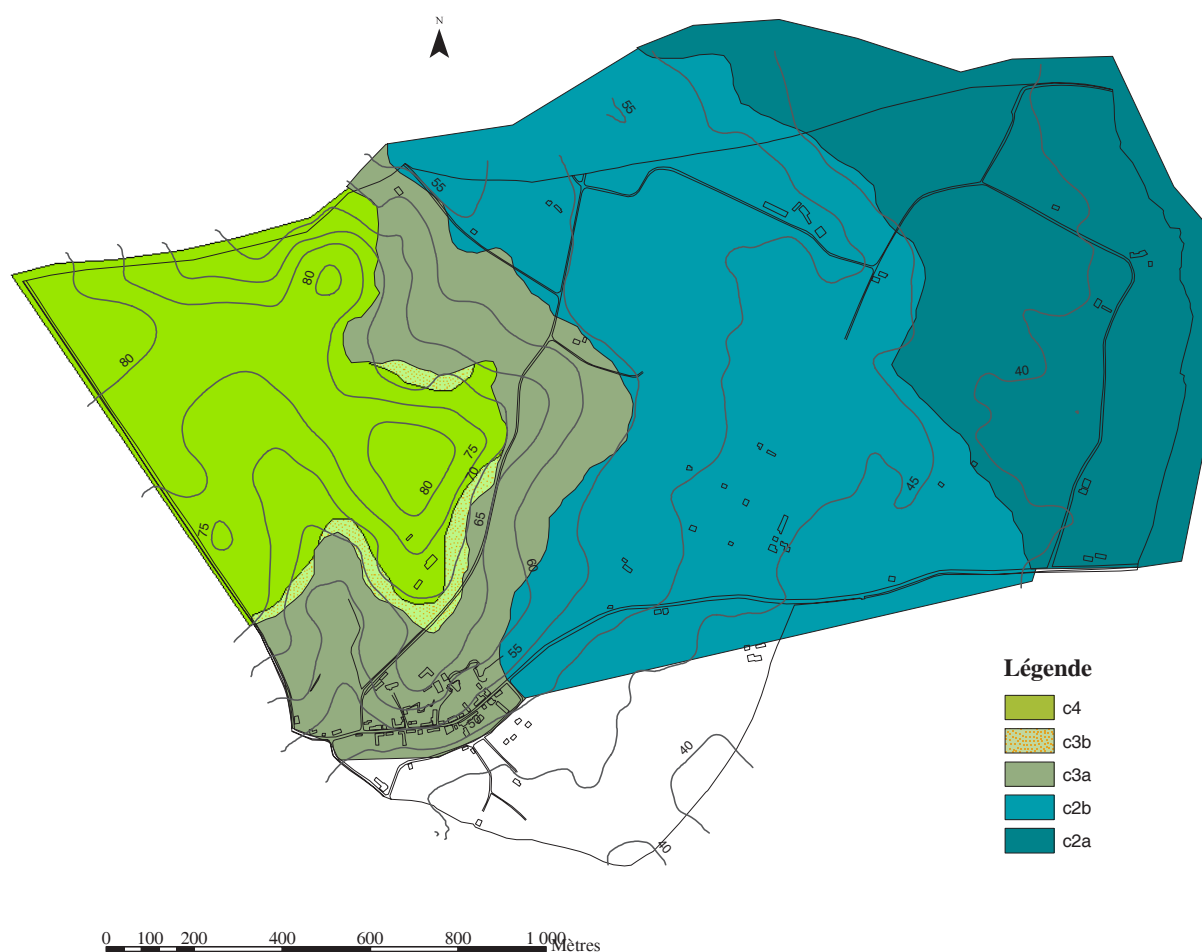


FIG. 4.2: Carte géologique réalisée à partir des sondages à la tarière à main lors de la prospection systématique

dage (0.3% vers le Sud) est remarquable grâce à une coupe géologique (*cf.* annexe 11). De plus, il existe quelques forages, qui permettent d'obtenir les profondeurs d'apparition et de disparition des formations. Ils ne sont certes pas situés précisément sur le lieu de l'étude, mais à quelques kilomètres. Or, si la carte indique bien des plissements légers, ils sont suffisamment éloignés du site observé pour ne pas fausser outre mesure les renseignements obtenus grâce aux carottages. Les couches géologiques sont sub-horizontales ; en tenant compte des variations d'épaisseur induites par la sédimentation et l'érosion, ainsi que des incertitudes, les limites pourraient donc être notées avec une amplitude d'altitudes de l'ordre de 10 m. Les limites obtenues par les géologues ou par les pédologues correspondraient donc, à l'amplitude d'altitudes près.

Complétant les observations de terrain, les photos des figures 4.3 et 4.4 montrent des singularités remarquables au niveau de la profondeur d'apparition de la craie Tuffeau (c_{3a}). Les fosses ont toutes été creusées avec la même orientation Est-Nord-Est, sur un versant d'orientation Est. Les deux fosses présentées sur les photos sont distantes de 50 m environ et se situent dans la même parcelle agricole, à la même altitude. Sur la figure 4.3, le profil présente des irrégularités qui ressemblent à des marques laissées par des dents d'engins agricoles (*e.g.* herse, sous-soleuse ou autre chisel). Cependant, si l'écartement entre les marques peut éventuellement correspondre à l'écartement des dents, la profondeur des empreintes reste un peu trop importante. Cette profondeur pourrait être inférée

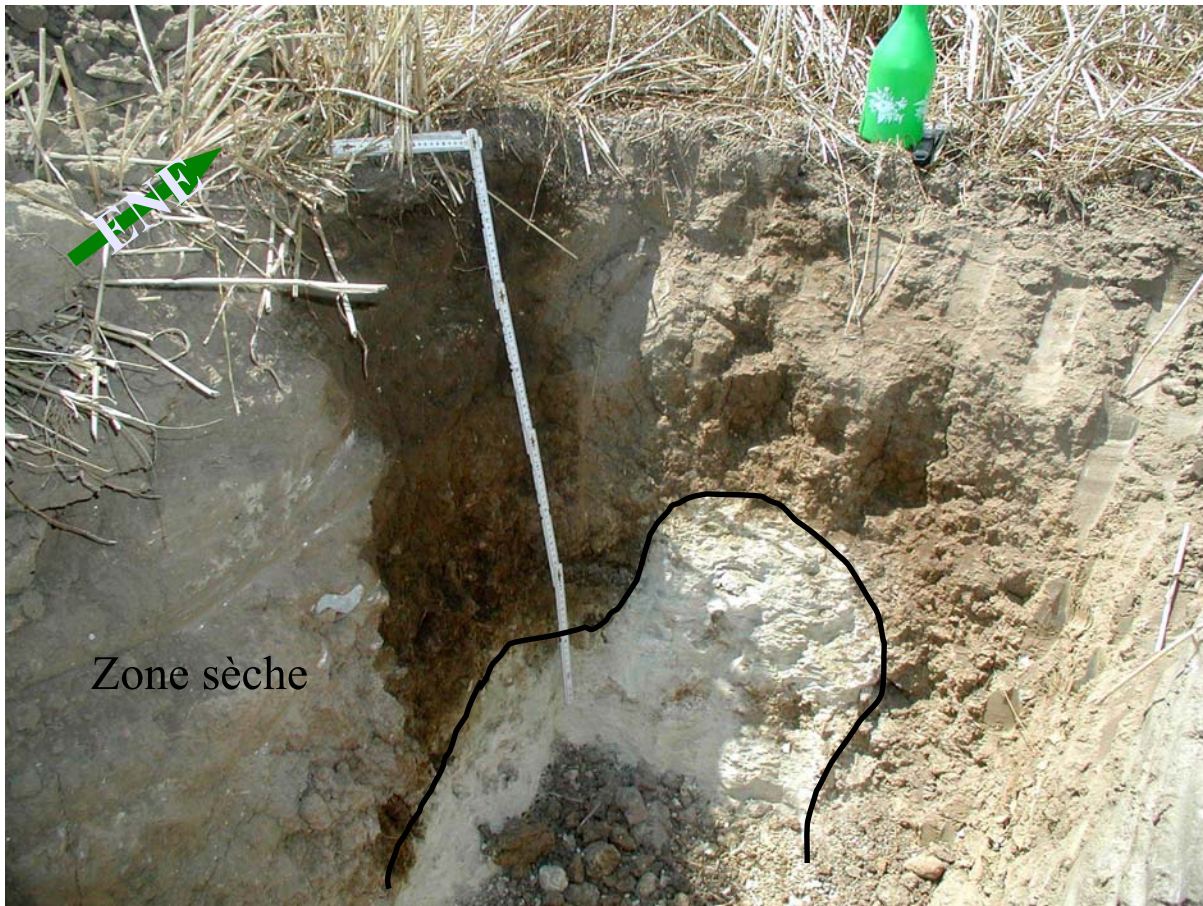


FIG. 4.3: Photographie prise lors de l'ouverture de la fosse pédologique BC

à un recouvrement par colluvionnement du labour en question qui aurait alors été enfoui. Une autre supposition serait une érosion du c_{3a} antérieure au dépôt du c_{3b} , laissant ces marques. En effet, la sédimentation « se caractérise [...] par l'existence de *hard ground* [...] » (Brossé et Louail, 1976). Une autre possibilité serait la cryoturbation qui intervient, sous nos latitudes et altitudes, en période glaciaire et peut affecter les sols par transformations de la géomorphologie. L'altération aurait aussi pu provoquer de telles marques. Le même phénomène d'irrégularités apparaît dans la fosse BCC (figure 4.4), mais il est perpendiculaire au précédent. Si nous acceptons l'hypothèse qu'à si courte distance il y ait des variations de sens de labourage, les trois hypothèses décrites ci-avant restent valables. Si nous extrapolons les hypothèses sans intervention humaine - érosion non plane et/ou cryoturbation -, nous pouvons imaginer que, si une fosse pédologique montre une profondeur d'altération aléatoire, celle-ci peut avoir proportionnellement la même amplitude au sein de la couche entière ; le même phénomène serait visible à deux échelles d'observation, l'échelle de la fosse et l'échelle de la couche géologique. Ceci expliquerait les variations d'altitudes des limites attestées sur la carte du BRGM. En opposition avec les données du BRGM, les sondages pédologiques font apparaître une limite bien plus régulière. Le travail présenté ici étant à échelle plus précise, il est sans doute plus fiable.



FIG. 4.4: Photographie prise lors de l'ouverture de la fosse pédologique BCC

4.1.4 Les formations de la plaine cénomaniennne (c_{2a} et c_{2b})

Les formations de la plaine cénomaniennne (c_{2a} et c_{2b}) ne présentent pas de différences franches dans les limites cartographiques entre les deux cartes.

Conclusion

Les limites de carte géologique du BRGM et celles de la carte géologique réalisée à la tarière diffèrent pour certaines couches géologiques. Ceci reste cohérent avec les différences d'échelle. En effet, la carte géologique du BRGM (*fig. 4.1*) est à 1/50000^{ème}, ce qui implique que 1 mm sur la carte représente 50 m sur le terrain. Or, les sondages systématiques sont espacés de 100 m maximum, soit 2 mm sur la carte BRGM. La précision n'est donc pas la même, ni du point de vue représentation ni du point de vue lever de terrain. Avec un maillage de 100 m, il est beaucoup plus évident de cartographier les différentes couches géologiques, et ainsi augmenter la précision.

4.2 Les volumes d'altération

La cartographie des volumes d'altération dépend de ce qui a été trouvé à l'aide de sondages à la tarière. Ainsi, certains volumes pourraient apparaître au-delà du 1.2 m de

la tarière sans que cela ait été repéré. La description de la carte de la figure 4.5 est faite du plus récent au plus ancien des substrats/étages géologiques.

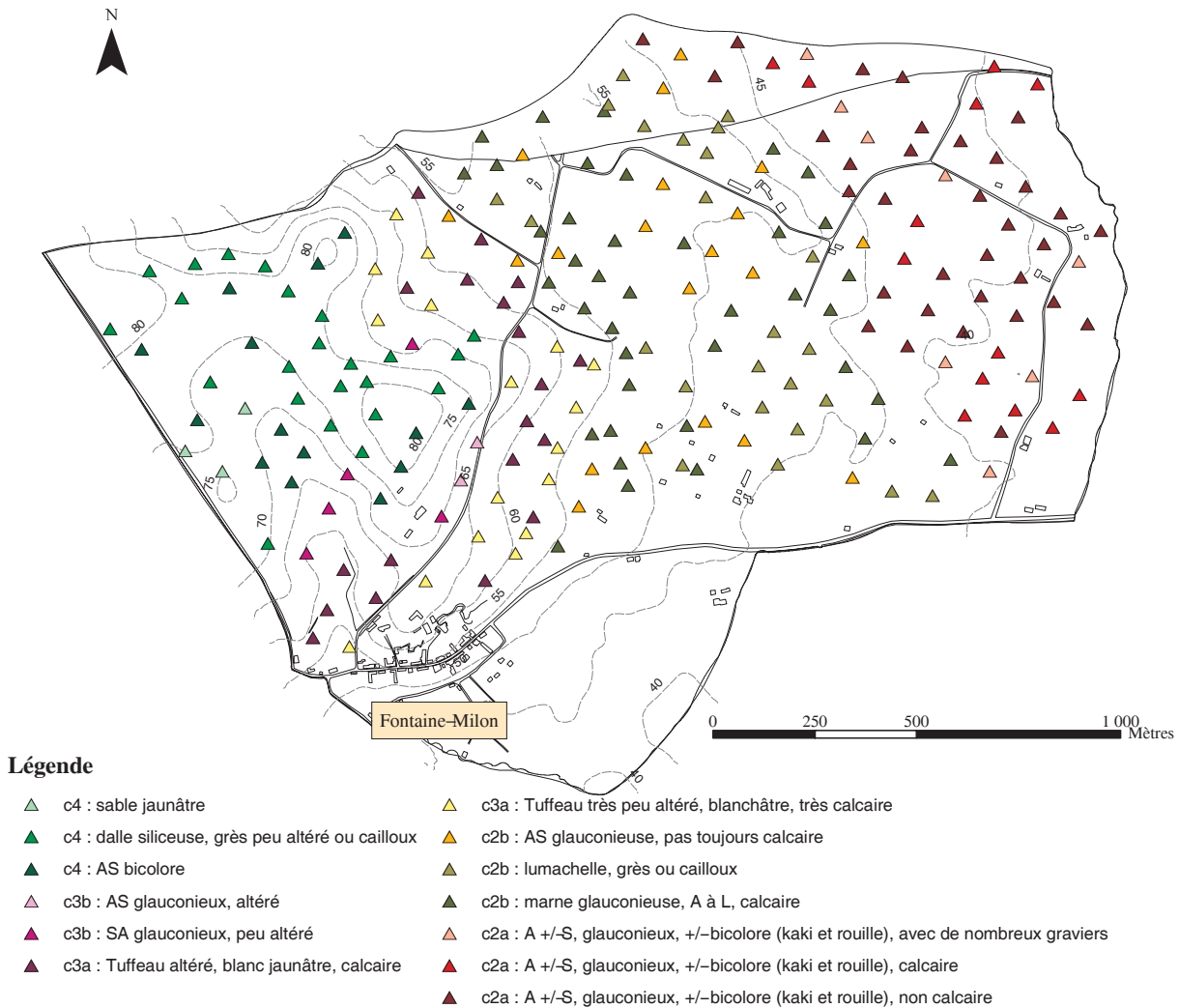


FIG. 4.5: Cartogramme présentant les différents volumes d'altération

4.2.1 Sénonien (c_4)

Dans le Sénonien (c_4), nous observons trois volumes sensiblement différents : une argile sableuse bicolore, une dalle siliceuse ou du grès peu altéré et, enfin, du sable. Le sable n'est présent qu'en trois sondages regroupés à l'Ouest, à l'intérieur du plateau, sur une pente moyenne (autour de 8 %).

Le substrat solide (grès ou dalle siliceuse) se trouve principalement sur la butte, les parties hautes et les parties plus planes du plateau. Il s'agit d'une consolidation localisée du sable très fin, blanc et quartzeux de la partie terminale du c_4 , en grandes dalles de grès blanc ou rouille, très dur (Brossé et Louail, 1976). Cette consolidation est difficilement érodable, ce qui explique sa présence à plus haute altitude et en plateau. Là où ne se trouve pas la dalle siliceuse, l'argile sableuse bicolore (grise et rouge) est présente. Elle se situe dans des zones au relief comprenant plus de talweg.

4.2.2 Turonien supérieur (c_{3b})

Le Turonien supérieur (c_{3b}) comporte deux volumes d'altérations (altérés / très peu altérés) qui se différencient par l'état plus ou moins avancé de l'altération. Le substrat altéré est composée par de l'argile sableuse rouille. Les éléments à notre disposition ne permettent pas d'expliquer la localisation de l'un ou l'autre volume.

4.2.3 Turonien inférieur (c_{3a})

Tout comme le Turonien supérieur (c_{3b}), le Turonien inférieur (c_{3a}) comporte deux volumes d'altérations (altérés / très peu altérés) qui se différencient par l'état plus ou moins avancé de l'altération. La craie altérée est formée par de l'argile limoneuse brune alors que la craie peu altérée se caractérise par sa ressemblance à la craie en place, tout en étant plus meuble et friable. Les éléments à notre disposition ne permettent pas d'expliquer la localisation de l'un ou l'autre volume.

4.2.4 Cénomanién supérieur (c_{2b})

Le Cénomanién supérieur (c_{2b}) comprend trois volumes, dont deux relativement proches. Ces deux volumes sont la marne glauconieuse, calcaire, et l'AS glauconieuse, pas toujours calcaire. *A priori*, l'AS étant issue de l'altération de la marne glauconieuse, il est probable que la marne se trouve en dessous. Le troisième volume est défini par la lumachelle ou tout horizon dur.

S'observent ici trois groupements de l'horizon dur, un premier au Nord, un deuxième au Sud et un troisième composé d'individus aléatoirement répartis. Le volume dur devrait se trouver à la limite avec le c_{2a} en raison de la présence d'un talus probablement causé par la dureté du matériau. Or, si ce fait est avéré dans la partie la plus au Nord du talus, il l'est beaucoup moins au Sud. En effet, au Sud, entre le talus et la lumachelle s'intercale de la marne. La lumachelle se trouve ici regroupée sur une zone plus plate.

La lumachelle se trouve donc en différentes positions au Nord et au Sud, ce qui ne facilite pas la détermination d'un moyen géomorphologique pour repérer la présence de lumachelle dans le paysage. Ceci étant, elle se trouve majoritairement en situation basse par rapport au replat que forme le c_{2b} .

L'AS se trouve principalement dans les zones de replat, plutôt regroupée vers le Nord. Le reste des sondages se retrouve aléatoirement réparti et est constitué de marne glauconieuse.

4.2.5 Cénomanién moyen (c_{2a})

Les variations latérales de faciès du Cénomanién moyen (c_{2a}) (Louail, 1984) sont si nombreuses que les regroupements intra-volumes sont assez larges pour limiter le nombre de volumes. De ce fait, il n'y en a que trois, tous constitués par une argile plus ou moins sableuse, glauconieuse, et plus ou moins bicolore (vert kaki et rouille). Les différences se situent au niveau de la caractéristique, calcaire ou non, et de la présence / absence de graviers. La répartition semble aléatoire avec toutefois une présence un peu plus accentuée des horizons calcaires en limite avec le c_{2b} .

4.3 La texture

Ici sont représentées les textures identifiées sur le terrain (triangle de Jamagne) obtenues pour chaque horizon de chaque sondage systématique. Il s'agit de textures pédologiques mais, pour les situer au mieux, nous nous référons aux géologie et lithologie en place (Brossé et Louail, 1976).

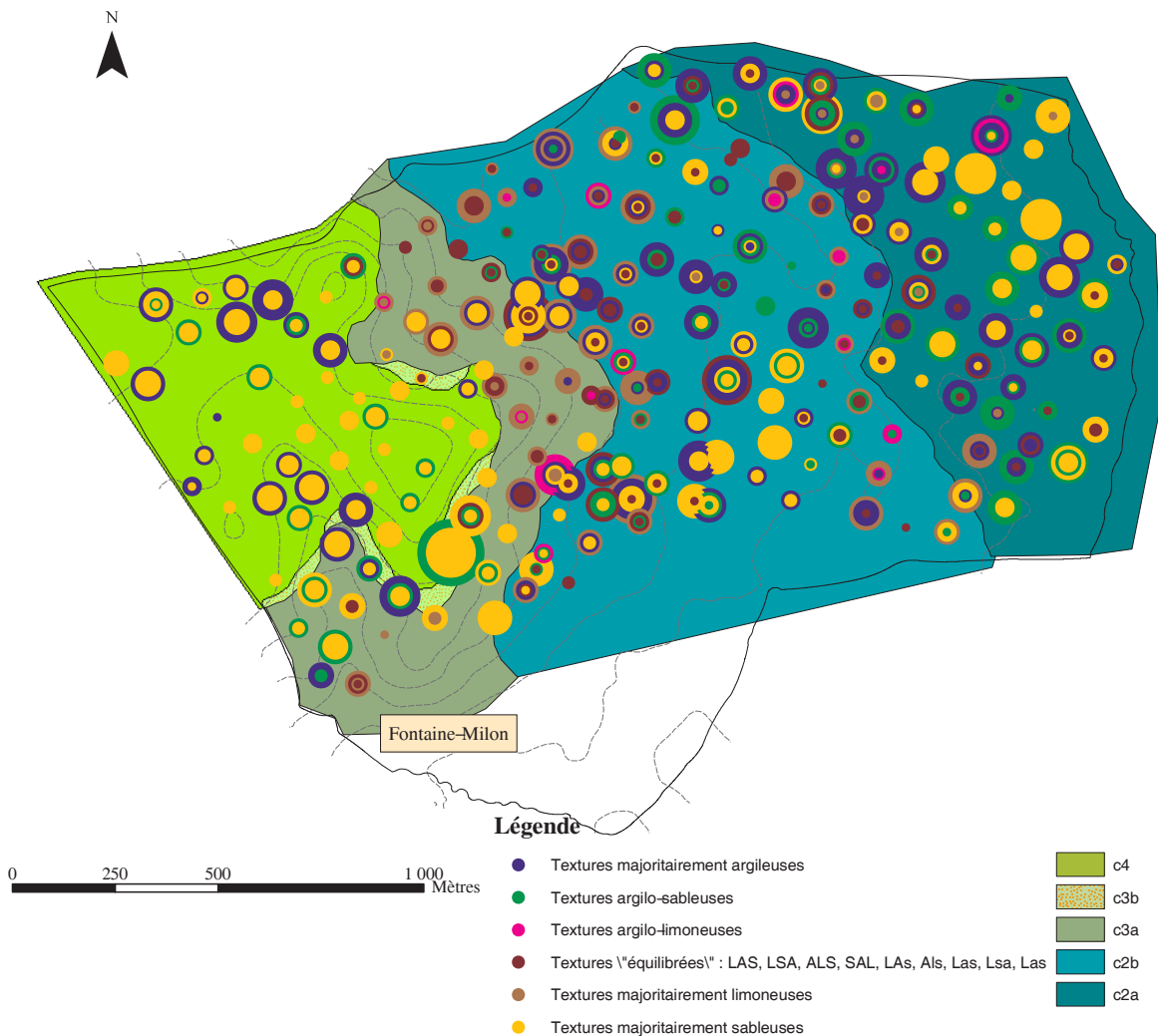


FIG. 4.6: Cartogramme des textures manuelles (triangle de Jamagne) sur fond géologique. Chaque couleur représente une gamme de textures manuelles, chaque taille de cercle un horizon, de la surface - le plus petit - au fond - le plus gros -, proche du substrat.

4.3.1 Le Sénonien inférieur (c_4)

Il « est représenté par des formations sableuses, fines, dont l'épaisseur atteint une vingtaine de mètres. Une couche d'argile, et la présence de rognons siliceux repris du Turonien, soulignent la base de l'étage. [...] A la partie terminale, un sable blanc, quartzueux très fin, est localement consolidé en grandes dalles de grès blanc ou rouille, très dur. » (Brossé et Louail, 1976). Les sols qui se développent sur cette formation, en l'absence d'apports allochtones, devraient donc avoir des textures soit sableuses soit sablo-argileuses. C'est

effectivement ce que montre la carte 4.6 puisque les textures des sols varient de sable sur sable (60 % des échantillons) à sable sur argile plus ou moins sableuse. En la comparant avec la carte 4.5, nous pouvons constater que, dans les cas de sable sur argile, le volume d'altération est principalement constitué d'argile bicolore, gris et brun rougeâtre. Il est ainsi possible, sans pour autant être confirmé, que la texture argileuse ait une origine géologique et non pas pédologique. Cependant cette argile est parfois suivie d'une dalle gréseuse ou d'un banc de gravier non pénétrable à la tarière. Il est probable que cette dalle apparaisse en d'autres endroits, au-delà de la profondeur de prospection, sans que nous ne l'ayons notée.

Lorsque des horizons sableux se succèdent, le volume « final » est souvent la dalle gréseuse pré-citée et parfois une argile sableuse, répartie comme décrit dans le paragraphe concernant les volumes d'altération.

4.3.2 Le Turonien supérieur (c_{3b})

Peu de sondages ont été effectués dans cette formation peu puissante. Toutefois, ces quelques sondages présentent des sols dont la texture est argilo-sableuse, allant du pôle argileux au pôle sableux. Les talwegs, plus ou moins prononcés, sont affectés par un recouvrement sableux, mais ils ne sont pas les seuls. Le sable argileux glauconieux du c_{3b} comporte une importante quantité de sable et le lessivage des argiles peut expliquer en partie la formation de ces horizons sableux en surface, sans pour autant être la seule raison de la présence de ces horizons. Ceux-ci ne pouvant être issus uniquement de l'évolution du c_{3b} , et n'apparaissant pas seulement sur cette zone mais en plusieurs endroits du secteur étudié, un paragraphe leur est attribué (*cf.* paragraphe 4.3.6).

4.3.3 Le Turonien inférieur (c_{3a}), dit « craie Tuffeau de l'Anjou »

L'altération de ce matériau aboutit principalement à des textures limoneuses ou limono-argilo-sableuses. Ceci étant, en plusieurs endroits, des horizons de surface plus sableux apparaissent. Par exemple, les talwegs, plus ou moins prononcés, sont affectés par ce recouvrement sableux. La craie du c_{3a} comporte parfois une importante quantité de sable et le lessivage des argiles (Rousseau *et al.*, 2004) peut expliquer en partie la formation de ces horizons sableux en surface, mais seulement en partie. Ces horizons ne pouvant être issus uniquement de l'évolution du c_{3a} , et ceux-ci n'apparaissant pas seulement sur cette zone mais en plusieurs endroits du secteur étudié, un paragraphe leur est attribué (*cf.* paragraphe 4.3.6).

4.3.4 Le Cénomaniens supérieur - marnes à Ostracées et sables verts supérieurs - (c_{2b})

Il « est constitué par des alternances de marnes grises, glauconieuses, et de bancs de calcaires glauconieux, souvent très riches en huîtres qui forment des horizons de lumachelle. » (Brossé et Louail, 1976). Les textures de sols qui se développent sont variables, d'argileuses à argilo-sableuses, en passant par des textures plus « équilibrées ». La répartition de ces textures semble aléatoire. Existe toutefois une zone plus sableuse au Sud, reposant souvent sur une couche de lumachelle ou sur un horizon caillouteux non pénétrable à la tarière, mais aussi, dans des cas moins fréquents, sur de la marne.

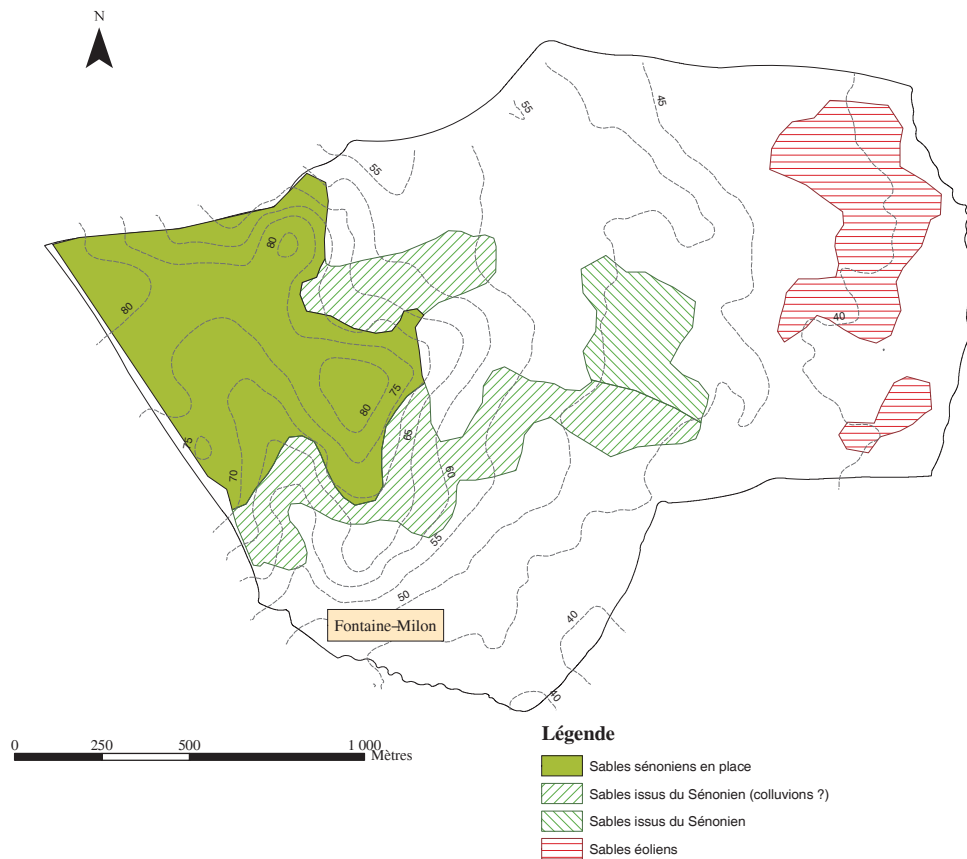


FIG. 4.7: Carte de synthèse des hypothèses des textures sableuses en surface

4.3.5 Le Cénomanien moyen - argiles sableuses glauconieuses - (c_{2a})

Dans ce matériau, les textures des sols varient entre le pôle argileux et le pôle sableux. Ceci n'est, de prime abord, guère surprenant. En effet, le substrat est lui-même argilo-sableux, avec de fortes variations de faciès (Louail, 1984). Des bandes sableuses apparaissent au Nord-Est, sur de légères buttes, visibles sur le M.N.A. et sur le terrain. La présence plus ou moins importante de sables dans les horizons de surface alors que les substrats ne sont pas suffisamment sableux pour donner de tels horizons, nous conduit, ici aussi, à nous interroger sur leur origine sans doute complexe. C'est l'objet de la partie qui suit.

4.3.6 Les sables des horizons de surface

Pour expliquer ces horizons de surface sableux, la première hypothèse est que le c_4 , sableux, a colluvionné sur les étages inférieurs. La pente semble suffisante (entre 3,5 et 10 %, avec une moyenne autour de 7,5 %) pour les c_{3b}/c_{3a} , comme nous pouvons le constater sur la carte 4.7. Ces sables se trouvent ainsi sur les pentes, mais aussi en bas de pentes, en aval du c_4 . De prime abord, ils semblent se remarquer indifféremment sur les interfluvés ou dans les talwegs. Pourtant, en ce qui concerne les sables sur le c_{3a} , la carte ?? montre qu'ils suivent les pentes. De même sur le c_{2b} , les sables se positionnent en partie dans les talwegs, sans descendre directement du plateau sénonien. Leur origine n'est

donc pas si simple. Il est possible qu'à une période antérieure (*e.g.* au Cénozoïque), les pentes aient été différentes et qu'ils soient tout de même issus des colluvions sénoniennes. Cependant, le replat morphologique/plaine que forme le c_{2b} , et surtout le c_{2a} en contre-bas, semble un peu trop éloigné pour recevoir les colluvions dans son ensemble. La possibilité d'un tel mouvement pourrait être vérifiée, par exemple par des datations avec des isotopes radiogéniques (Hawkesworth et van Calsteren, 1984).

Ces horizons pédologiques de surface, sableux, apparaissent indépendamment dans les talwegs ou sur les buttes, la raison de leur présence n'est peut-être pas seulement causée par du colluvionnement. Les sables peuvent aussi provenir de l'érosion géologique des étages supérieurs à la couche concernée, *per descendum* (Campy et Macaire, 1989), *i.e.* les particules les plus fines et les plus érodables seraient parties, donnant l'impression d'un apport relatif des éléments les plus grossiers et les plus difficilement érodables, géologiquement parlant. Ces sables seraient donc résiduels et non apportés. Cette deuxième hypothèse s'appuie sur le fait que, à la surface-même des sols, nous trouvons souvent des cailloux arrondis provenant d'étages géologiques supérieurs érodés. Les sables en présence sont majoritairement quartzeux. En conséquence, ils s'érodent difficilement. Ils pourraient donc, au même titre que les cailloux, avoir subi ce processus *per descendum*. De fait, l'ensemble des sédiments des étages représentés ici comprend du sable en proportion plus ou moins importante. Prenons, par exemple, les sables sénoniens. Ils sont quartzeux. Lors de l'érosion du plateau, les fines sont parties, et ils sont restés en place, déposant un recouvrement sableux sur le c_{3b} , Turonien supérieur, qui rappelons-le, se compose « d'un sable fin, vert, glauconieux et micacé, coupé de minces lits argileux » (Brossé et Louail, 1976). Celui-ci, à son tour, s'érode mais le sable quartzeux résiste et reste encore en place, se déposant sur le c_{3a} , et ainsi de suite d'étage en étage.

Une troisième hypothèse est qu'un vent de la dernière domaine péri-glaciaire aurait apporté ce sable. En effet, des bancs sableux assimilables à de légères dunes sont décrits par les géologues (Brossé et Louail, 1976), un peu plus au Sud, vers Longué, sous le terme de N, sables éoliens. Ils ne sont pas notés sur la carte géologique sur le périmètre qui nous concerne. Il est possible que ces zones sableuses aient la même origine, c'est-à-dire éolienne péri-glaciaire, les sables seraient alors issus de la vallée de la Loire.

Une étude morphoscopique a été réalisée afin de différencier les sables mais elle ne permet pas, dans l'état actuel des connaissances, de conclure franchement sur l'origine de ces sables.

La carte 4.7, résume les principales hypothèses concernant la présence de sable dans les horizons de surface. Ce ne sont ici qu'hypothèses et nous verrons dans le chapitre 6 que la seconde campagne de terrain (échantillonnage en séquences) a permis de confirmer ou infirmer certaines de ces hypothèses.

4.4 Les réactions à HCl

Sur la figure 4.8, deux zones non-calcaires ressortent, une dans la plaine cénomaniennne, NC1, et l'autre sur le plateau sénonien, NC2.

Le c_4 étant un substrat acide, les sols développés dessus ne présentent aucune réaction avec HCl. Quant au c_{2a} , c'est un substrat majoritairement non-calcaire, bien qu'il le soit en quelques rares endroits. Ceci induit des sols à faible réaction en moyenne. Cependant, deux zones ressortent sur ce substrat, toutes les deux proches de la limite avec la marne du c_{2b} , l'une au Nord, l'autre au Sud. Ceci peut être dû à des colluvionnements de c_{2b} ,

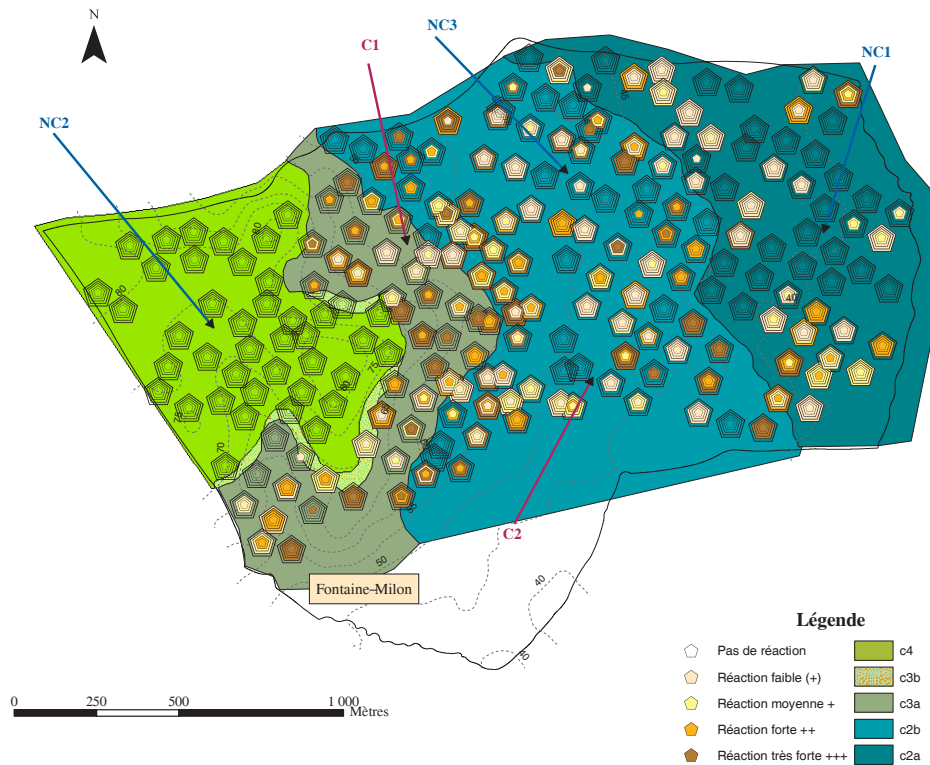


FIG. 4.8: Cartogramme présentant les réactions à HCl 1/3N sur fond géologique
La taille des symboles est fonction du numéro d'horizon, le plus petit symbole en surface, le plus gros en profondeur.

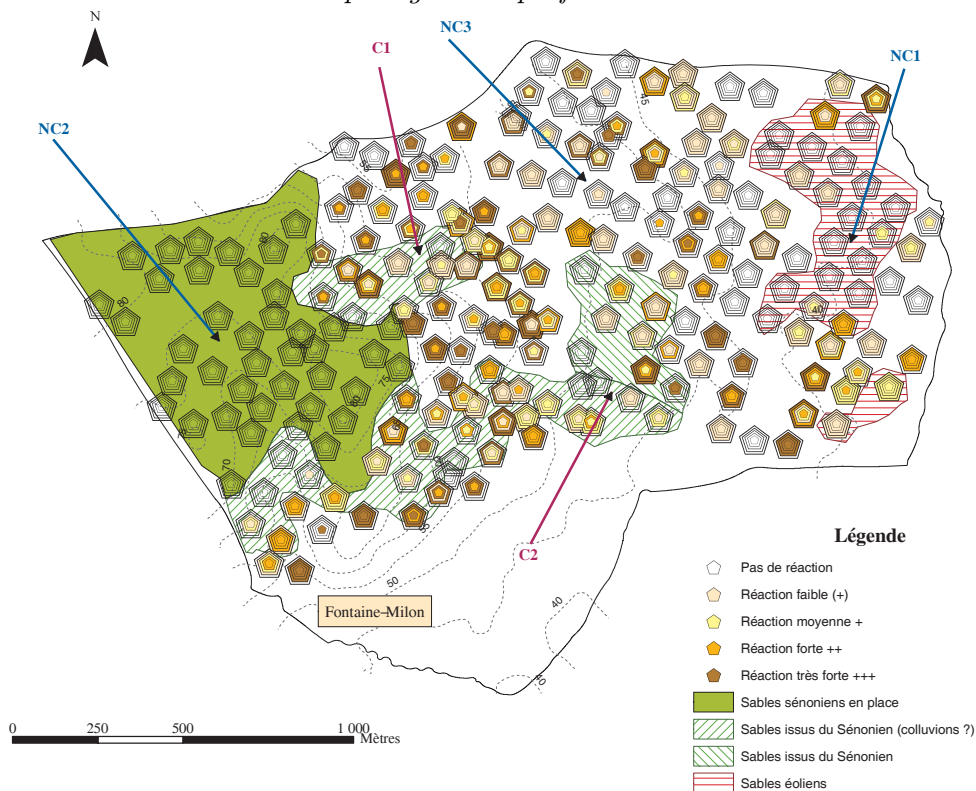


FIG. 4.9: Cartogramme présentant les réactions à HCl 1/3N sur la carte d'hypothèse des textures sableuses (*cf.* 4.3.6)

calcaire. Autre possibilité, le substrat, à une profondeur supérieure à 1,2 m, longueur de la tarière, est plus calcaire. Or, nous sommes dans une zone plane, propice à la lixiviation, ce qui donnerait des sols non-calcaires. En inversant le raisonnement, ce qui consiste à s'interroger sur les situations des zones sans réaction à HCl, il est possible de mettre en corrélation la non-réaction à HCl des sols avec la présence d'horizons sableux en surface, comme le montre la carte de la figure 4.9.

Entre ces deux zones non-calcaires, se trouvent des sols développés sur les substrats calcaires que sont le c_{2b} et le c_{3a} . Il semble donc logique d'y rencontrer des horizons avec une plus ou moins forte réaction à HCl. Toutefois peuvent être observées trois zones : une bande, NC3, dans le c_{2b} , où les réactions à HCl sont faibles à nulles, et deux regroupements, C1 et C2, où les réactions à HCl sont faibles. La bande (NC3) se situe sur un replat, morphologie propice à la lixiviation, le long d'un axe N-S, avec une légère pente vers le Sud. Les deux regroupements à moindre réactions à HCl (C1 et C2) se situent le long de talweg, C1 au Nord, et C2 au Sud. Si nous associons ces réactions à HCl avec la carte d'hypothèses des textures sableuses (fig. 4.9), nous nous apercevons que les deux zones définies comme étant colluvionnées comportent des sols dont les horizons sont peu à pas réactifs à HCl. Par ailleurs, le long de la limite avec le c_{2a} , le calcaire est plus présent. Ceci peut s'expliquer par un contexte avec peu d'horizons, peu épais, sur la lumachelle, calcaire.

Globalement, les sols développés sur le c_{2b} sont peu à pas réactifs à HCl sauf lorsqu'ils sont à proximité du ressaut formé par les lumachelles et à proximité de la craie c_{3a} .

4.5 L'hydromorphie

L'hydromorphie est présente sur quasiment tout le terrain, plus de la moitié des observations du terrain comportant des taches dès la surface (fig. 4.10). Ceci posé, la quantité des taches est faible en surface, et n'augmente qu'à partir du 3^{ème} horizon. Certaines zones sont peu voire pas du tout touchées par l'hydromorphie.

L'argile sableuse glauconieuse du c_{2a} est très touchée, souvent dès la subsurface voire la surface. Ceci peut provenir de la nature très argileuse de ce substrat - donc plus enclin à l'engorgement, temporaire ou non -. Toutefois les zones dont les horizons supérieurs sont sableux (*cf.* réflexion sur les textures, paragraphe 4.3), ne sont pas touchées dès la surface, mais plus en profondeur et en moindre proportion, le sable étant plus drainant.

Les marnes à huîtres du c_{2b} sont un peu moins affectées. Les zones NH1 et NH2 sont peu touchées, quand elles le sont. Elles sont localisées juste en amont du talus formé par les lumachelles, à la limite avec le c_{2a} , au niveau du talus pour la zone NH1 et un peu en retrait pour la zone NH2, sur une zone un peu plus plane où les sols sont peu profonds. La partie la plus affectée par l'hydromorphie semble être à la rupture de pente avec le replat, zone de forte accumulation des colluvions et des eaux de ruissellement. De plus, les textures de cette zone sont plutôt argileuses, facteur favorisant souvent l'engorgement.

Le c_{3a} est visiblement le moins touché. Les sols développés ici sont souvent peu profonds, sur pentes assez fortes (entre 4.5 et 12 %), avec des textures limono-argilo-sableuses. Ils sont moins propices à l'hydromorphie, d'autant que les taches d'oxydation sont certainement dues à l'altération des minéraux présents dans la craie tuffeau. Les zones H1, H2 et H3 présentent toutefois de l'hydromorphie caractérisée par des taches de réduction ou de déferriification. Les zones H1 et H2 se situent dans des petits talwegs, en bas de

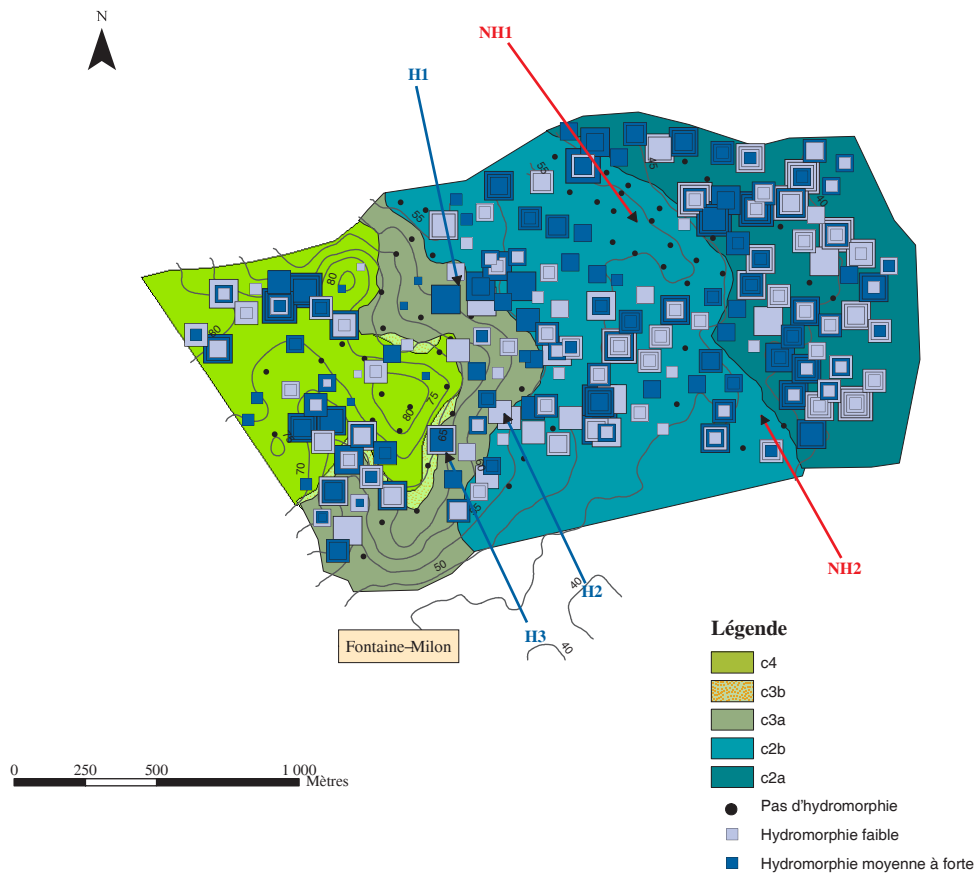


FIG. 4.10: Cartogramme présentant l'hydromorphie sur fond géologique

Les quantités d'hydromorphie de chaque horizon du sondage considéré sont superposées les unes sur les autres. La taille des symboles est fonction du numéro d'horizon, le plus petit symbole en surface, le plus gros en profondeur.

la pente majeure, avec une accumulation des eaux de ruissellement. La zone H3 est au milieu de la pente majeure, plutôt en haut du talweg.

Le c_{3b} est caractérisé par une concentration élevée de glauconie, minéral riche en fer qui s'oxyde rapidement. Il n'est donc pas possible de déterminer nettement la limite entre une tache rouille d'oxydation induite par hydromorphie et la même tache due à l'altération. Il y a toutefois des traces de déferification visibles, ce qui permet de dire que les sols ici développés sont soumis à des problèmes d'hydromorphie.

Les sols développés sur le c_4 sont sableux, au moins jusqu'aux 3^{èmes} horizons, puis majoritairement sableux, donc *a priori* relativement drainants. Il y a cependant de nombreuses taches ferriques, et ce souvent dès la surface. Une explication est que, en profondeur, nous trouvons soit une dalle gréseuse, soit une argile sableuse bicolore (grise et rouge) qui bloquent sensiblement le passage d'eau.

Conclusion sur les analyses issues de l'échantillonnage systématique

Les sondages issus de l'échantillonnage systématique ont permis de préciser certaines limites géologiques, voire de faire apparaître certaine formation sur l'extrait de carte géo-

logique du BRGM. Ils ont aussi montré qu'une proportion non-négligeable des sols de ce site présentent des traces d'hydromorphie et que les réactions HCl sont localisées, elles dépendent principalement du substrat et de la pente.

L'analyse des cartogrammes permet l'identification des volumes tout en montrant la complexité de l'origine des matériaux. L'analyse de la texture met notamment en évidence la présence de sable dans les sols dans des situations non conformes avec les caractéristiques des formations géologiques sous jacentes. Il en est de même avec la réaction à HCl qui confirme de telles disjonctions. Plusieurs hypothèses sont avancées : colluvionnement le long des pentes, résidus issus d'une altération per descendum, ou matériaux déplacés par le vent... Il est difficile à ce stade de trancher entre ces différentes hypothèses compte tenu de la nature qualitative des informations de terrain.

Chapitre 5

Résultats préliminaires issus de l'échantillonnage le long des séquences (LTS et IAS)

Les sols sont issus de différents matériaux géologiques, et le relief joue un rôle prépondérant sur les transferts, dépôts ou départs de ces matériaux. De ce fait, l'organisation spatiale des sols du secteur d'étude est soumise à une différenciation spatiale des facteurs. Nous avons donc choisi les séquences de façon à recouper les principaux facteurs (figure 5.1).

9 fosses ont ainsi été décrites, prélevées et analysées le long d'une lithotoposéquence afin d'examiner (1) les relations entre les sols et les substrats sous-jacents et (2) l'apport éventuel de matériel allochtone en recouvrement ou en mélange dans les sols.

De la même façon, 10 fosses ont été étudiées le long d'une isoaltiséquence (même altitude et *a priori*, même substrat géologique) afin d'analyser la variabilité des sols en chaque point d'observation, variabilité induite par la morphologie du relief. Les travaux se basent principalement sur des analyses granulométriques en 8 fractions, complétées par des analyses morphoscopiques des sables ainsi que l'observation micromorphologique de lames minces pour un horizon particulier. Enfin, nous examinons les résultats des tests HCl pour la détection des carbonates.

5.1 Lames minces et morphoscopie des sables

5.1.1 Les lames minces

Les lames minces faites dans l'horizon argileux de la fosse Topo20 montrent une faible proportion de grains de quartz, plutôt anguleux, ainsi qu'une structure plutôt en nid d'abeille qui traduirait une altération des minéraux assez évoluée. Les argiles se retrouvent principalement dans les pores et semblent très orientées (photo. 5.2). Ceci traduirait donc une illuviation des argiles dans cet horizon, donc un processus de lessivage qui peut toutefois ne plus être actif.

Les lames minces faites dans l'horizon argileux de Topo21 montrent quelques grains de quartz émoussés et de feldspath (peu nombreux), dans une matrice granuleuse. Les argiles se regroupent en paquet et sont plus ou moins orientées ; par endroit, elles forment des cutanes avec une extinction ondulante. Ces cutanes n'ont pas d'orientation propres,

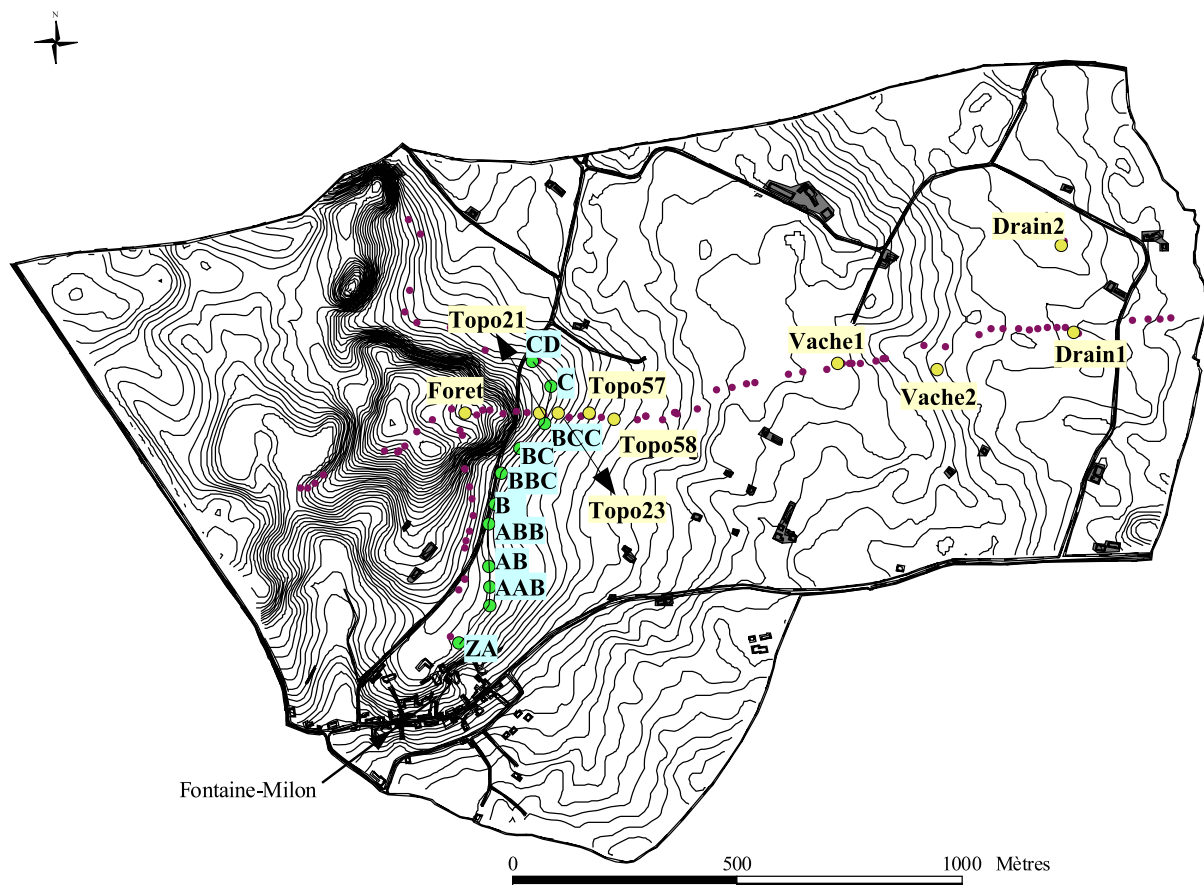


FIG. 5.1: Carte de situation des lithotoposéquence et isoaltiséquence

Les fosses décrites sont repérées pas des points jaunes pour la LTS et verts pour l'IAS.

Les points violets correspondent à des sondages à la tarière

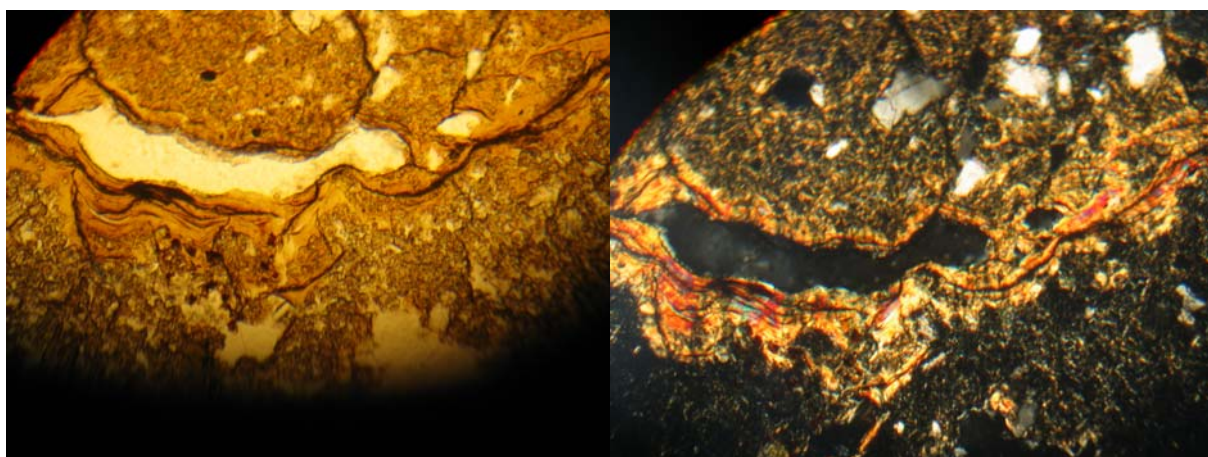


FIG. 5.2: Photographies de Topo20, en lumière analysée et en lumière polarisée, *grossissement* $\times 31.5$

elles sont remaniées et intégrées dans la matrice, preuve d'un processus ancien de lessivage dans un horizon dynamique qui intègre les revêtements au fur et à mesure.

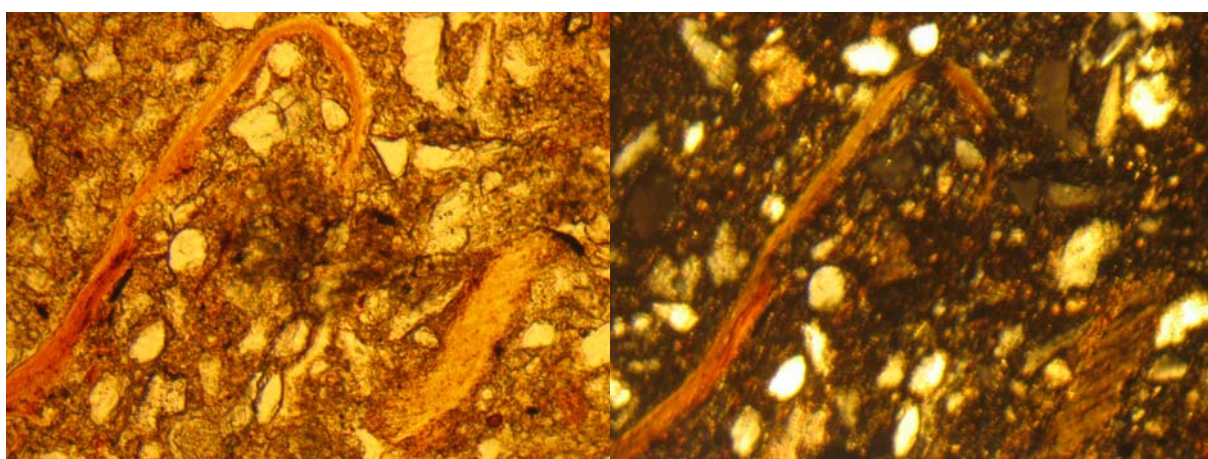


FIG. 5.3: Photographies de Topo21, en lumière analysée et en lumière polarisée, *grossissement* $\times 31.5$

Les lames minces faites dans l'horizon argileux de Topo23 montrent de nombreux grains de quartz, majoritairement anguleux, dans une matrice argileuse jaunâtre très hétérogène. La matrice contient quelques papules intégrées, traces de phénomènes de gonflement/retrait, ainsi que quelques papules (photo. 5.4) non orientées. De plus, il semble exister des axes préférentiels latéraux de circulation de flux potentiellement chargés en argiles, et par endroit, des accumulations de fer. Ces accumulations de fer et d'argiles, ainsi que des circulations préférentielles, couplées à l'absence d'orientation suggèrent un lessivage ancien.

Les lames minces faites dans l'horizon argileux de Topo58 montrent de nombreux grains de quartz, majoritairement anguleux, dans une matrice argileuse jaunâtre. Le plasma est hétérogène avec des paquets et alignements plus biréfringents. De nombreux revêtements se trouvent intégrés. Ici aussi, il semble exister des axes préférentiels latéraux de circulation

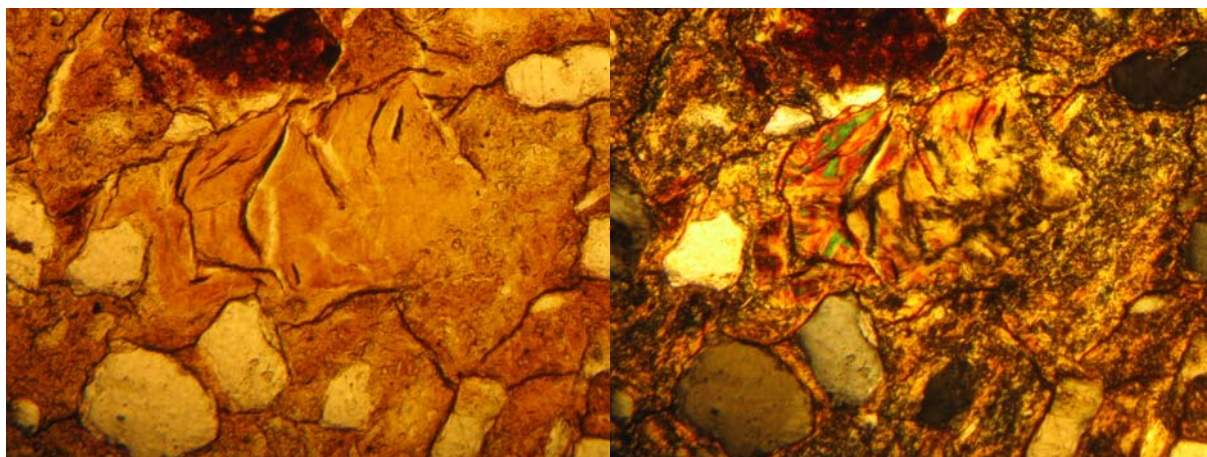


FIG. 5.4: Photographies de Topo23, en lumière analysée et en lumière polarisée, *grossissement* $\times 31.5$

des argiles, et par endroit, des accumulations de fer. Cette lame suggère ici encore un processus ancien de lessivage.

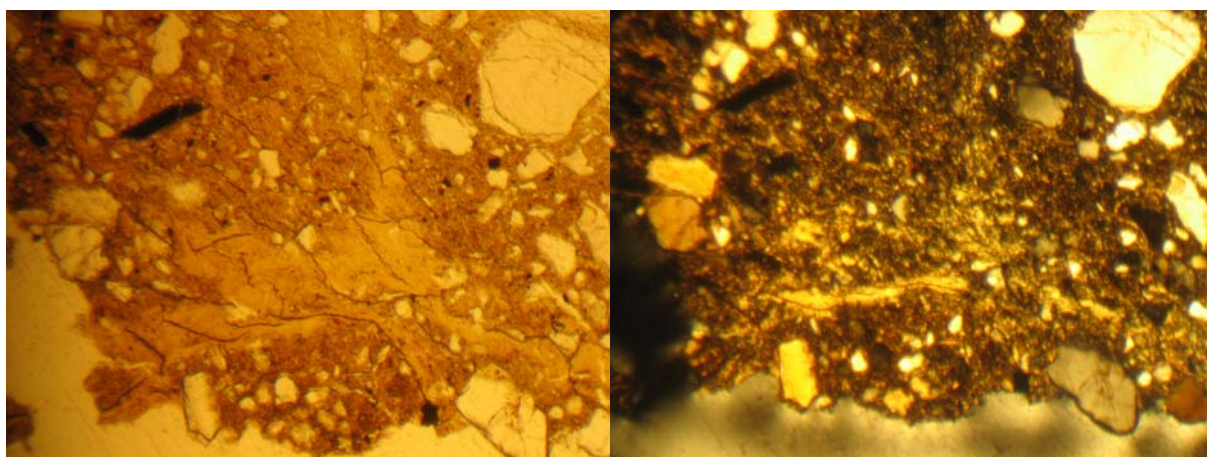


FIG. 5.5: Photographies de Topo58, en lumière analysée et en lumière polarisée, *grossissement* $\times 31.5$

Conclusion sur l'analyse des lames minces

L'ensemble des lames minces semble montrer un lessivage/accumulation ancien des argiles. Il y a des traces d'argilane, ce qui traduit que si l'horizon argileux n'est plus un horizon d'accumulation, il l'a été. Cette constatation d'ancien lessivage couplée aux structures prismatiques visibles *in situ* laisse présumer que nous sommes en présence d'une paléo-pédogenèse avec formation ancienne d'un horizon BT.

5.1.2 La morphoscopie des sables

Des observations morphoscopiques ont été effectuées sur huit échantillons prélevés à la tarière à main lors de la cartographie de la lithotoposéquence. Le tableau 5.1 présente les résultats de ces observations. Pour chaque échantillon sont précisés son nom et son

n° prélèvement	311.H1 (c4)	milieu 317 (c3b)	fond 317 (c3b)	" c3b " (c3b)
	luisants mats	luisants mats	luisants mats	luisants mats
non usés	0	0	0	3,7
émoussés	64,2	91,7	83,3	70,1
ronds	1,8	0	0	1,9

	329.H2 (c2b)	333.H1 (c2b)	338.H1 à H3 (lim c2b/c2a)	près du 339 (c2a)
	luisants mats	luisants mats	luisants mats	luisants mats
non usés	0,8	1,9	0	4,3
émoussés	63,6	77,1	73,3	61,7
ronds	4,2	1,9	0,8	0

TAB. 5.1: Morphoscopie des sables : tableau récapitulatif des effectifs (%)

numéro de prélèvement ; entre parenthèses est noté à titre indicatif le matériau géologique stipulé sur la carte géologique corrigée par nos soins (fig.4.2).

Pour rappel du paragraphe 3.2.2, (1) si le pourcentage des émoussés luisants est supérieur à 30 %, l'usure par la mer est certaine et les sables naturellement détritiques sont d'origine marine ; (2) s'il est inférieur à 20 %, l'origine des sables est majoritairement fluviatile ; (3) les sables éoliens sont, *a priori*, très caractéristiques : les grains de taille proche de 0.5 mm sont très arrondis et mats. Ainsi, nous allons baser nos interprétations sur ces hypothèses. Les résultats en pourcentage d'éléments sont présentés dans le tableau 5.1.

Sables du Sénonien (c_4) (311.H1)

L'observation morphoscopique à la loupe permet de voir que ce sable jaunâtre a une composition très variée et assez hétérogène, avec une forte proportion de grains émoussés-luisants (> 60 %), et presque 4 % de grains ronds-mats. Ces sables seraient donc fortement marins, avec une très faible influence éolienne.

Sables du Turonien supérieur c_{3b} (« c_{3b} », 317.milieu/fond)

Outre la présence notable de grains de glauconie - formés en mer peu profonde et côtière - qui donnent une teinte verdâtre à la majorité des grains, ces échantillons présentent une grande homogénéité avec des teneurs moyennes de 80 % de grains émoussés-luisants et moins de 2 % de grains ronds-mats dans l'échantillon « c_{3b} », voire 0 % pour les deux autres échantillons. L'origine de ces sables seraient donc marine.

Sables du Turonien inférieur c_{3a}

Aucun échantillon n'a été prélevé dans ce niveau, il n'est pas possible de faire une description morphoscopique, et c'est regrettable pour l'unité de la réflexion.

Sables sur Cénomaniens supérieur c_{2b} (333.H1, 329.H2)

La plupart de ces grains ont une couleur claire virant sur le jaune orange, les autres sont beaucoup plus foncés, plutôt brunâtres. Les deux échantillons prélevés présentent une hétérogénéité plus importante des formes des grains de sables. Toutes les formes de grains sont représentées, dans des proportions très variables. Il ressort pourtant deux tendances. (1) La proportion des grains émoussés-luisants reste élevée, autour de 70 %. (2) La proportion des ronds-mats augmente sensiblement et approche les 10 %. L'origine marine de ces sables restent notables. Il faut toutefois noter une augmentation des grains ronds-mats, traduisant une plus importante influence d'Eole.

Sables sur Cénomaniens moyen c_{2a} (338.H1 à H3, « *prox339* »)

Ici aussi, la plupart de ces sables ont une couleur claire virant sur le jaune orange mais certains sont beaucoup plus foncés. Les deux échantillons présentent une hétérogénéité assez proche de celle des échantillons prélevés sur la zone de c_{2b} . La proportion des grains émoussés-luisants, entre 60 % et 80 %, reste majoritaire. Sont présents pour 20 % les émoussés-mats. Les grains ronds-mats, quoique en quantité bien moins importante, restent non-négligeables comparativement aux échantillons des formations géologiques de la butte. Ici comme dans le c_{2b} , l'origine marine est manifeste, avec une influence notable de l'éolisation.

Sables éoliens à proprement parler, N

Ici, comme pour le Tuffeau (c_{3a}), aucun échantillon n'a été observé au microscope. C'est d'autant plus regrettable que les auteurs de la carte affirment qu'ils « sont difficiles à différencier des terrasses » (Brossé et Louail, 1976).

Conclusion sur la morphoscopie des sables

Le tableau 5.1, qui représente les proportions de grains émoussés ou anguleux ou ronds et luisants ou mats, montre que tous les échantillons ont plus de 60 % de grains émoussés et luisants. Or, si cette proportion est supérieure à 30% (Berthois, 1971), l'origine des sables est marine de façon certaine. Ainsi, tous les sables présents sur le site étudié seraient marins. Ceci correspond à une réalité de sédimentation traduite sur la carte géologique (Brossé et Louail, 1976). Ce n'est donc pas sur des valeurs absolues que nous allons poser notre raisonnement mais sur des tendances d'évolution de la morphoscopie des sables. Or, nous pouvons constater que les sables présents sur la butte sénonienne c_4 ne contiennent que très peu de grains ronds-mats (moins de 4 %) alors que les sables de la plaine en comportent plus de 5 %, voire 10 % pour trois échantillons. De plus, si, lors de la dernière glaciation (Würm), il y a eu éolisation des grains de sables, elle s'est effectuée sur les formations présentes dans les environs, donc sur des formations sédimentaires marines identiques à celles qui se trouvent sur le site étudié. Les grains n'auraient donc pas eu le temps d'acquiescer les caractères propres aux sables éoliens. En conséquence, s'il n'est pas possible d'affirmer clairement la présence de sables éoliens sur la zone étudiée, il n'est pas possible non plus d'écarter totalement cette hypothèse. Pour confirmer ou infirmer l'hypothèse de la présence de sables éoliens, une étude granulométrique fine s'avère nécessaire. Celle-ci est présente dans la partie 5.2 à partir des échantillons prélevés dans les fosses.

5.2 Description des sols en terme d'homogénéité granulométrique des fosses pédologiques

La figure 5.6 présente les C.E.C._{arg} de tous les échantillons. Cette C.E.C._{arg} a pour intérêt principal, ici, d'identifier rapidement les argiles minéralogiques présentes et de montrer un éventuel mélange des matériaux.

Les figures 5.7 et 5.8 présentent les 8 fractions granulométriques pour chacune des fosses de la LTS.

les figures 5.9, 5.10, et 5.11 présentent les 8 fractions granulométriques pour chacune des fosses de l'IAS.

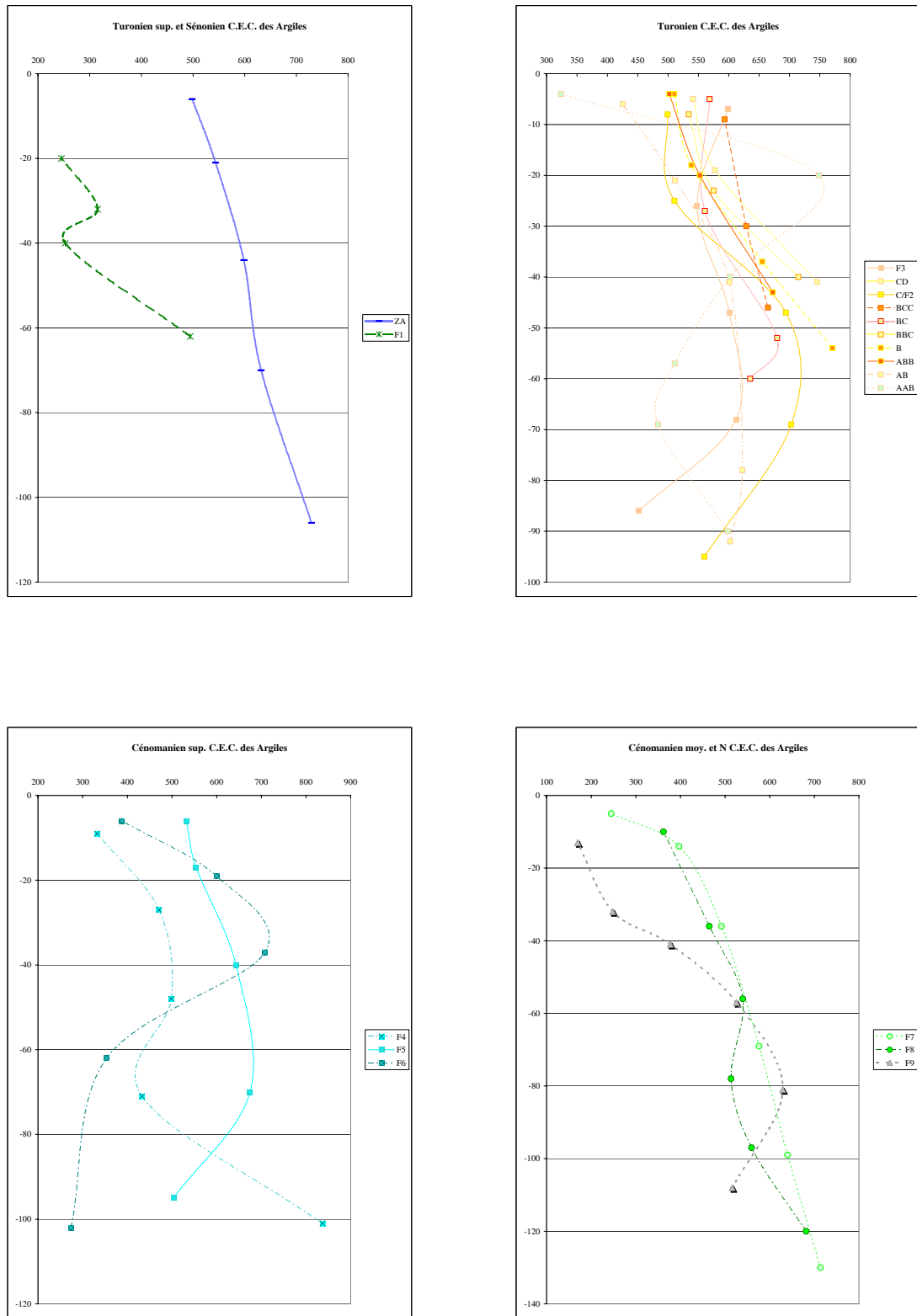


FIG. 5.6: Histogrammes des C.E.C._{arg} (mé.kg⁻¹) des échantillons de la LTS en fonction de la profondeur

5.2.1 Le long de la lithotoposéquence (LTS)

F1

Cette fosse, sous forêt acidophile, a été observée jusqu'à près de 80 cm de profondeur. Développé dans le Sénonien (c_4), le sol est composé de sables sur argiles à 55 cm (*cf.* fig. 5.7). Cette différenciation texturale nette et brutale peut être d'origine géologique - elle est décrite dans la notice géologique (Brossé et Louail, 1976) - ou pédologique plus ou moins ancienne. Au niveau du squelette, les limons ne varient que très peu en fonction de la profondeur. Par contre, les sables sont assez fluctuants : S_m (*cf.* chapitre 3.2.1) montre une augmentation en H2 puis rediminue, S_{ff} et S_{gg} augmentent nettement en H5. Ceci incite à dire qu'il y a une différenciation texturale qui n'apparaît pas seulement au niveau de la présence/absence des argiles. Pourtant, selon les écarts (*cf.* chapitre 3.2.1), le profil est homogène (avec $E_{b_{max}} = 35 < 40$). Quant aux ratio (*cf.* chapitre 3.2.1), ils indiquent qu'il y a autour de 50 % de ressemblance entre les horizons supérieurs et le fond. En complément, la C.E.C._{arg} montre une nette augmentation en profondeur, de 250 mé.kg⁻¹ d'A en moyenne sur les trois premiers horizons à presque 500 mé.kg⁻¹ d'A dans le dernier horizon. Ceci tendrait à prouver que la différenciation texturale est d'origine pédologique et non géologique car une valeur de C.E.C._{arg} élevée traduit la présence de particules très fines sensibles au lessivage (Bortoluzzi *et al.*, 2006). Il faut cependant rester prudent car la quantité d'argile dans les trois premiers horizons est très faible, ce qui augmente sensiblement le risque d'erreur du calcul, et rend donc l'interprétation peu certaine.

F3

C'est une fosse située au centre d'une parcelle agricole, de presque 1 m de profondeur, développée dans la craie du Turonien inférieur (c_{3a}). La granulométrie en fonction de la profondeur (*cf.* fig.5.7) montre un ventre d'argile en H4, tendant à dire qu'il y a lessivage et accumulation. Sur le squelette, L_f augmente sensiblement en H4 et H5. La couche de surface pourrait être allochtone. Cette hypothèse n'est pas nettement corroborée par les écarts (E_b) qui, compris entre 37 et 48 cm, indiquent qu'il existe des doutes. Les ratio ne montrent pas plus d'hétérogénéité. Quant à la C.E.C._{arg}, elle est plutôt élevée (600 mé.kg⁻¹ d'A en moyenne) et homogène sur les quatre premiers horizons puis elle subit encore une augmentation à 825 mé.kg⁻¹ d'A en H5.

F4

C'est également une fosse située dans une parcelle agricole, de plus d'1 m de profondeur, développée dans les marnes à Ostracées du Cénomanien moyen (c_{2b}). La granulométrie en fonction de la profondeur (*cf.* fig.5.7) montre une diminution régulière de l'argile jusque H3-H4 puis une augmentation sensible en H5. Sur le squelette, L_f augmente en H5 et si nous regardons le 2^{ème} squelette (sans L_f), il apparaît une diminution de L_g jusqu'à 40 % entre la surface et la profondeur ($H5 = 0.6H1$ pour le taux de L_g). Les écarts et les ratio indiquent tous deux que le profil est plutôt homogène ($E_{b_{max}} = 25$ et $S_g/S_{m_{min}} = 80$ %). Au niveau de la C.E.C._{arg}, il y a un léger ventre en H3 puis une nette augmentation en H5 avec une C.E.C._{arg} qui augmente de 450 mé.kg⁻¹ d'A à 850 mé.kg⁻¹ d'A. L'ensemble de ces constations tendent à montrer que le sol observé dans cette fosse est homogène, sans apport allochtone, avec des processus d'illuviation.

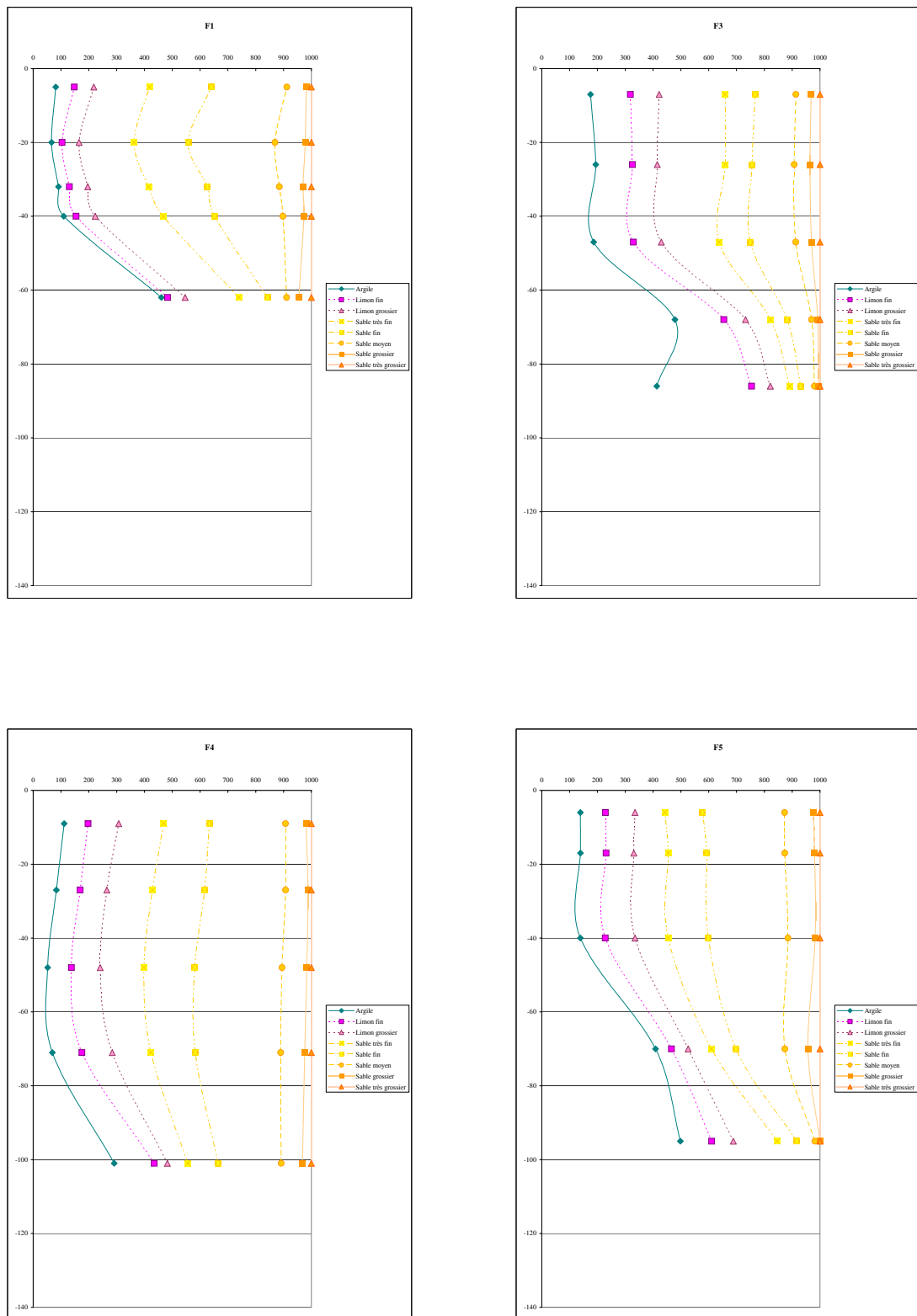


FIG. 5.7: Histogrammes des granulométries (%) des échantillons de la LTS en fonction de la profondeur

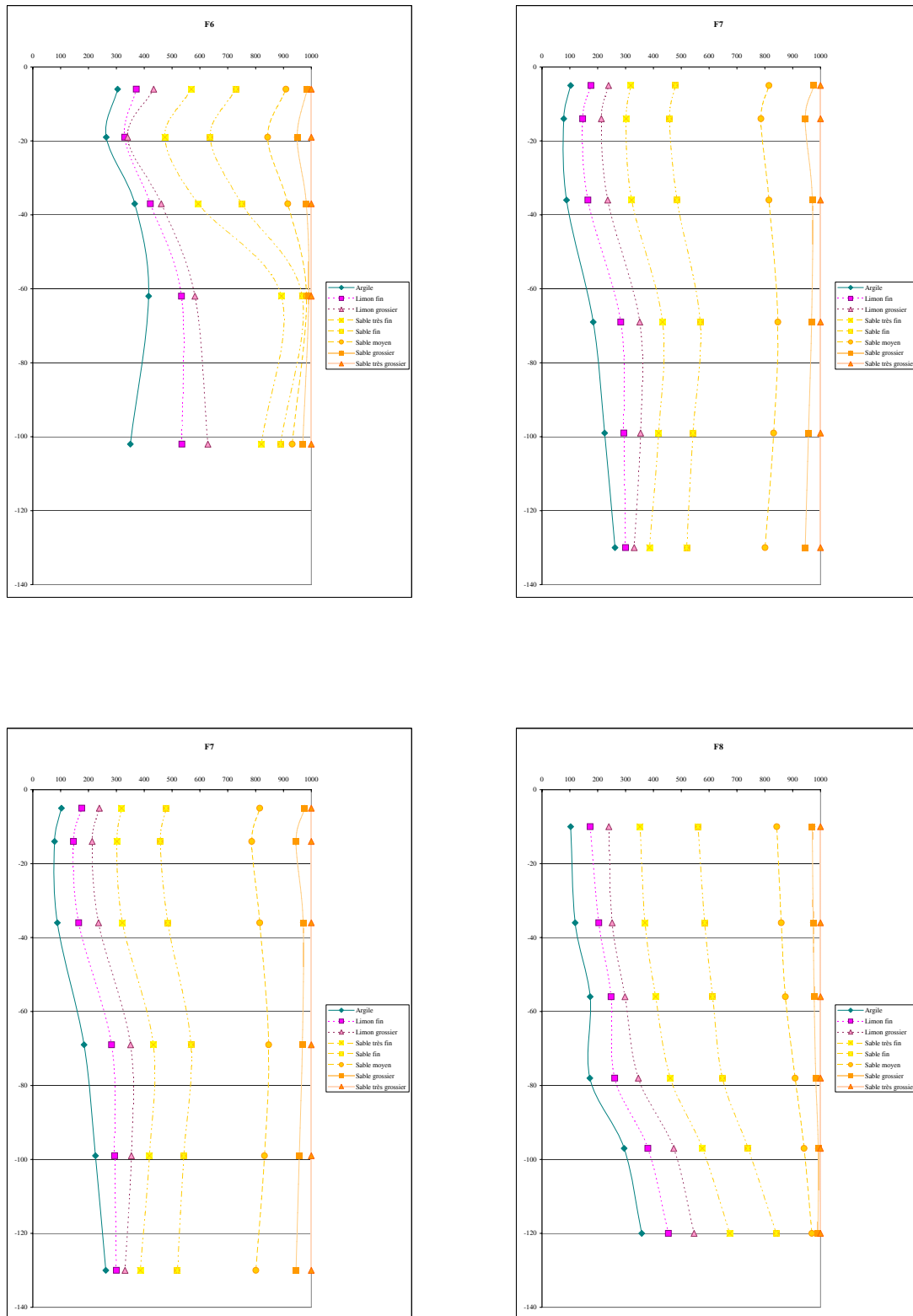


FIG. 5.8: Histogrammes des granulométries (%) des échantillons de la LTS en fonction de la profondeur

F5

Cette fosse dans une parcelle agricole, de presque 1 m, est développée dans les marnes à Ostracées du Cénomaniens moyen. La granulométrie en fonction de la profondeur (fig. 5.7) montre une nette augmentation d'argile en H4, avec une quantité d'argile dans le H4 (IIBT) très proche de celle présente dans le H5 (C_{Ca}). Nous pouvons poser la question de savoir si l'argile présente dans l'horizon BT est identique à celle du substrat représenté par l'horizon C_{Ca} . Le squelette indique une nette augmentation de S_f en H5, ce qui laisserait penser que la surface est allochtone. Cette hypothèse est confirmée par les écarts ainsi que les ratio. En effet, il existe un écart E_b de 71 entre H4 et H5, preuve d'une nette hétérogénéité (Baize, 1983). Les ratio sont de l'ordre de 500 %, ce qui se traduit par une très faible ressemblance entre les horizons superficiels et sub-superficiels vis-à-vis de l'horizon profond, proche du substrat. Étant données l'accumulation nette d'argile en H4 et l'hétérogénéité franche avec H5, il est possible que les 4 premiers horizons se soient développés dans un premier matériau et que le 5ème horizon, un C_{Ca} se soit développé à partir d'un second matériau. La $C.E.C_{arg}$ tendrait à confirmer cette hypothèse puisqu'il y a une augmentation moyenne et régulière de H1 à H4, de 550 mé.kg^{-1} d'A à 650 mé.kg^{-1} d'A, puis un saut en H5 avec une $C.E.C_{arg}$ de l'ordre de 900 mé.kg^{-1} d'A.

F6

Cette fosse, positionnée dans une prairie, fait plus d'un mètre de profondeur. Elle est développée dans les marnes à Ostracées (c_{2b}). Son emplacement a été choisi en estimant que, *a priori*, le sol de cette fosse n'était pas concerné par un quelconque apport allochtone. En effet, (1) il se trouve sur le replat précédant le talus provoqué par la lumachelle, éloigné de presque 700 m des colluvions de sables sénoniens, et (2) les géologues indiquent que les apports éoliens N se sont principalement déposés sur les argiles sableuses du Cénomaniens moyen. La probabilité qu'il y ait eu des apports d'origine colluviale ou éolienne semble donc faible.

La granulométrie en fonction de la profondeur (*cf.* fig.5.8) montre un ventre d'argile en H3 et H4, précédé d'une légère dépression en H2. Plusieurs constations peuvent être faites sur le squelette. En effet, nous voyons un petite ventre, en H2, des sables grossiers S_g et S_{gg} , et en H4, une augmentation des limons fins (L_f), qui perdure en H5, ainsi qu'un ventre de sable fin S_{ff} , et enfin une nette diminution de S_m et S_g . Ceci semblerait dire qu'il y a, contre toute attente, une différenciation lithologique vers H4. Les écarts, ainsi que les ratio, confirment cette hypothèse puisque $E_b = 91$ entre H3 et H4 et $S_g/S_m < 60$ % entre les trois premiers horizons et l'horizon du fond. La $C.E.C_{arg}$ ne semble pas tout à fait en accord avec cette hypothèse. En effet, elle présente un ventre, de H2 à H4, de presque le double de la $C.E.C_{arg}$ de surface ou de fond, ce qui tendrait à faire penser qu'il y a lessivage en surface, accumulation dans les horizons où le ventre apparaît, et « retour à la normale » avec les argiles du substrat. Toutefois, cette $C.E.C_{arg}$ de fond de fosse pose question car sa valeur, 500 mé.kg^{-1} d'A, est nettement inférieure à celles des argiles présentes dans le fond des deux autres fosses, Topo57 et Topo58, dont les valeurs sont comprises entre 800 et 900 mé.kg^{-1} d'A. Ces différences peuvent avoir au moins deux explications : (1) une variation latérale de faciès du substrat, avec des argiles minérales différentes, ou (2) une variation verticale des argiles minérales, Vache1 étant géographiquement plus bas de 7 m environ.

F7

C'est une fosse, dans une prairie, de plus de 1.3 m de profondeur, qui se trouve, du point de vue géologique, à la limite entre les marnes à Ostracées (c_{2b}) et les argiles sableuses du Cénomanién moyen (c_{2a}). Le profil granulométrique (fig. 5.8) est caractérisé par une très faible teneur en argile sur l'ensemble du profil : très proche de celui de Drain1, décrit un peu plus loin, il devrait être le plus représentatif des argiles sableuses du c_{2a} , d'après sa position dans le paysage. La granulométrie en fonction de la profondeur est assez régulière, avec, en H4, horizon défini sur le terrain comme un BTg, une légère augmentation de L_f en même temps qu'une diminution de S_m et, en moindre proportion, de S_g . Une question se pose quant à l'accumulation des particules fines : pourquoi affecterait-elle les limons fins mais pas les argiles ? Le squelette ne montrant rien de plus, il ne permet pas de répondre à cette question. Il n'apparaît donc pas de discontinuité franche, ce qui est confirmé par les écarts, avec des $E_b < 20$, et les ratio, avec des ressemblances $r > 80 \%$ tout le long du profil. La C.E.C._{arg} double presque de H1 à H2 (de 250 à 400 mé.kg⁻¹ d'A), puis continue d'augmenter régulièrement pour aboutir à presque 700 mé.kg⁻¹ d'A. Les argiles sableuses cénomaniennes (c_{2a}) étant principalement composées de smectites, cette augmentation de la C.E.C._{arg} pourrait traduire un lessivage des argiles dans un sol homogène formé à partir du substrat originel (qui devient alors le matériau parental).

F8

Cette fosse, située dans une parcelle agricole, fait plus de 1.4 m de profondeur, développée dans les argiles sableuses du Cénomanién moyen. Le profil granulométrique (fig. 5.8) devrait être le plus représentatif des argiles sableuses, d'après sa position dans le paysage. En effet, il se trouve sur un replat morphologique, dans la plaine cénomaniennne, à l'écart de toute butte éventuellement créée par des dépôts éoliens (N). La granulométrie (cf. 5.8), ainsi que le squelette, fonction de la profondeur, montre une augmentation plus ou moins régulière de l'argile. Les courbes des autres fractions restent parallèles à celle de l'argile, avec toutefois un amortissement par diminution des S_m et S_g . Le profil semble donc plutôt homogène. Ceci est confirmé par les écarts puisque les $E_b < 40$, mais pas par les ratio qui montrent $r > 150 \%$. Ceci pourrait traduire une évolution graduelle le long du profil. En effet, les écarts sont la comparaison d'un horizon avec son prochain, mais les ratio sont la comparaison d'un horizon à l'horizon de profondeur. Or, si la différence peut être sensible entre les horizons de surface et celui du fond, les horizons peuvent être légèrement différents de l'un à l'autre tout en restant relativement proches. D'autre part, il ne faut pas oublier que le c_{2a} est très hétérogène, avec de fortes variations latérales de faciès (Louail, 1984), et une autre hypothèse évoque la possibilité que le sol se soit développé dans une des couches du c_{2a} et repose sur une autre couche. Si nous regardons la C.E.C._{arg}, nous ne pouvons pas décider quelle hypothèse est la plus plausible.

F9

C'est une fosse, dans une parcelle agricole, de plus de 1.2 m de profondeur, développée dans les argiles sableuses du Cénomanién moyen, avec, *a priori*, un recouvrement par des sables éoliens N. En effet, sa position sur une légère butte, comme une dune, ainsi que sa forte proportion de S en surface, nous laisse penser qu'il y a eut un apport éolien (N) qui, s'il est décrit par les géologues (Brossé et Louail, 1976) à quelques 15 kilomètres au S-E, n'est pas représenté ici sur la carte géologique. La granulométrie fonction de la profondeur (cf. fig. 5.8) montre une augmentation brutale des argiles en H4 ainsi qu'un ventre de S_{gg}

en H3 et le squelette un creux de S_f en H3 et un ventre de S_m en H5. Il serait donc plutôt hétérogène. Cette hypothèse n'est franchement confirmée ni par les écarts, $E_b < 30$, ni par les ratio, pour qui $65 < r < 95$. Par contre, la C.E.C._{arg} pourrait confirmer. En effet, en surface, elle est très faible, et plus faible que toutes les C.E.C._{arg} calculées sur le terrain, de l'ordre de 150 mé.kg⁻¹ d'A, ce qui est une C.E.C._{arg} montrant une prédominance de kaolinite, type d'argile très présent dans le c_4 (Mouyoungou, 1990). Or, le profil est à plus de 2 km du plateau sénonien, avec des pentes de 20 % maximum, et ce sur de courtes distances. Il est donc peu probable qu'il y ait eu apport par colluvionnement. D'autre part, il y a une nette augmentation, avec un ventre en H5, et le fond se retrouve avec une C.E.C._{arg} de 500 mé.kg⁻¹ d'A, C.E.C._{arg} plutôt proche de celles qui se trouvent à la même profondeur dans les deux autres fosses ouvertes dans ce substrat.

Conclusion sur les analyses granulométriques de la LTS

Les fosses F4, F7 et F9 ont une majorité de ratio compris entre 80 % et 120 %. Celles-ci seraient donc les seules dont le squelette ressemble sensiblement à l'horizon de fond de fosse et ainsi à avoir un lien génétique direct avec cet horizon. D'autre part, le calcul de distance granulométrique (E_b) des horizons des fosses F2, F4, F7 et F9 est majoritairement inférieur à 40, indiquant que ces quatre fosses seraient donc homogènes. Les fosses F3, F5 et F6 ont des $E_b > 60$, et seraient donc hétérogènes.

Ratio et écarts granulométriques vont dans le même sens pour six fosses : (1) F4, F7 et F9 seraient homogènes et auraient un lien génétique direct avec l'horizon de fond de fosse ; (2) F3, F5 et F6 seraient hétérogènes sans lien génétique direct avec l'horizon de fond de fosse. L'opposition, existant pour les trois dernières fosses de cette séquence, entre ratio et écarts pourraient provenir d'une évolution graduelle le long des profils qui afficherait une homogénéité d'un horizon à l'autre mais une dissemblance des horizons avec l'horizon de profondeur.

Dans certains cas, la C.E.C._{arg} permet de « trancher ». Elle ne reste toutefois ici qu'un élément d'appui sans être une mesure à part entière.

5.2.2 Le long de l'isoaltiséquence (IAS)

Dans cette partie, les fosses ne sont pas décrites avec autant de précision que précédemment sauf pour la fosse ZA car elle est la seule présentant un substrat issu des sables argileux glauconieux du Turonien supérieur (c_{3b}). Avant d'entamer la description des fosses, faisons un petit rappel sur cette séquence. Toutes les fosses de cette séquence ont été ouvertes à la même altitude. L'objectif est de s'abstraire du paramètre « substrat » - ici, la couche est sub-plane, donc à dénivelé nul, substrat inchangeant -, pour savoir si les variations de sols sont fonction de leur positionnement dans le paysage, donc de la morphologie. Ce substrat est le Tuffeau de l'Anjou (c_{3a}), craie calcaire blanchâtre, relativement tendre, qui sert comme pierre de taille pour la construction (cf. de nombreuses maisons et châteaux de la région) et comme support de culture pour le champignon de Paris.

« ZA »

C'est la fosse la plus au Sud de l'IAS. Elle est située dans une parcelle en friche. Elle dépasse 1.1 m de profondeur et devrait, en toute logique, reposer sur de la craie Tuffeau (c_{3a}). En effet, celle-ci a un pendage de l'ordre de 0.3 % vers le Sud, elle est donc sub-horizontale. Pourtant, si au fond de la fosse, nous trouvons effectivement la

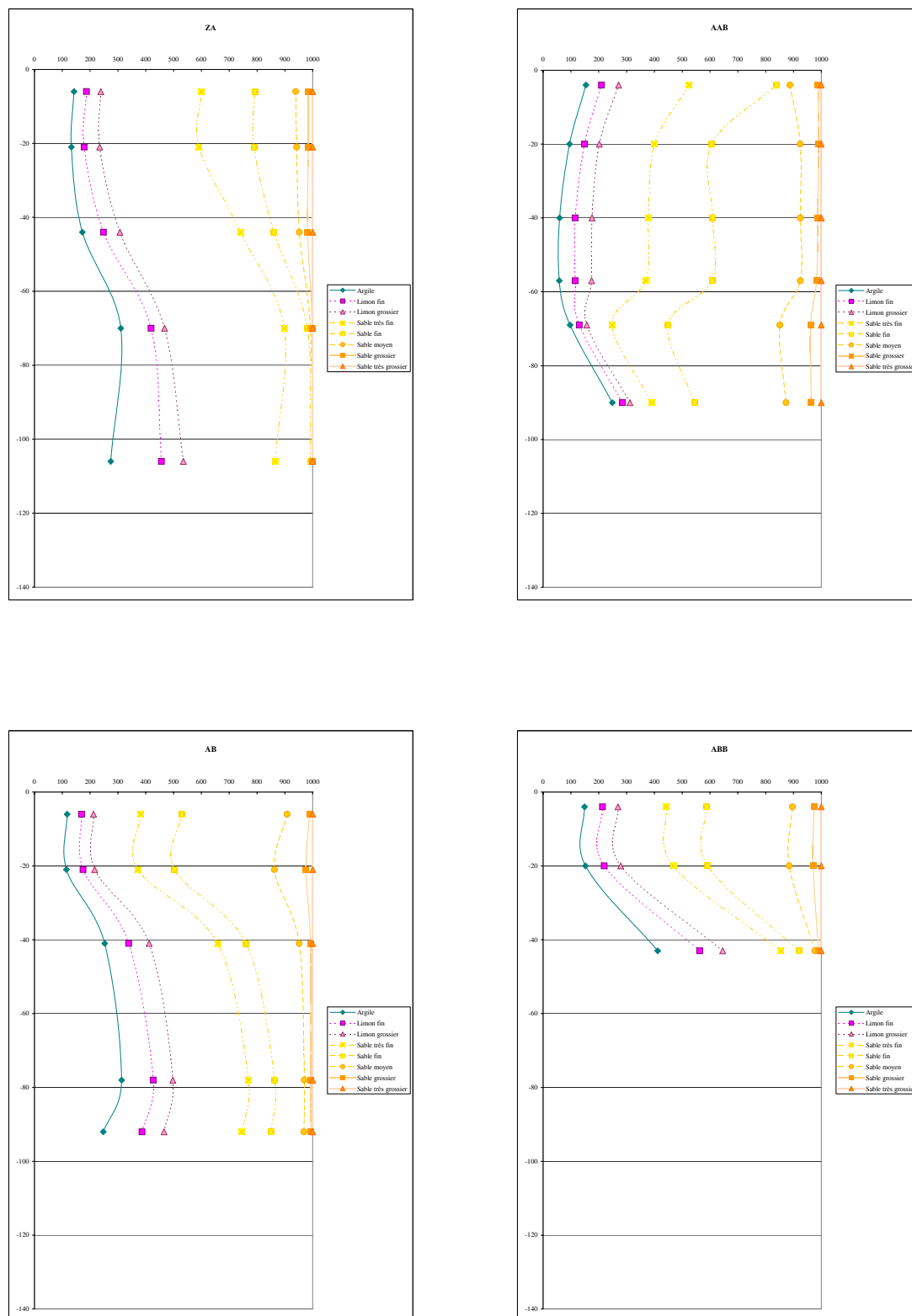


FIG. 5.9: Histogrammes des granulométries (%) des échantillons de l'IAS en fonction de la profondeur

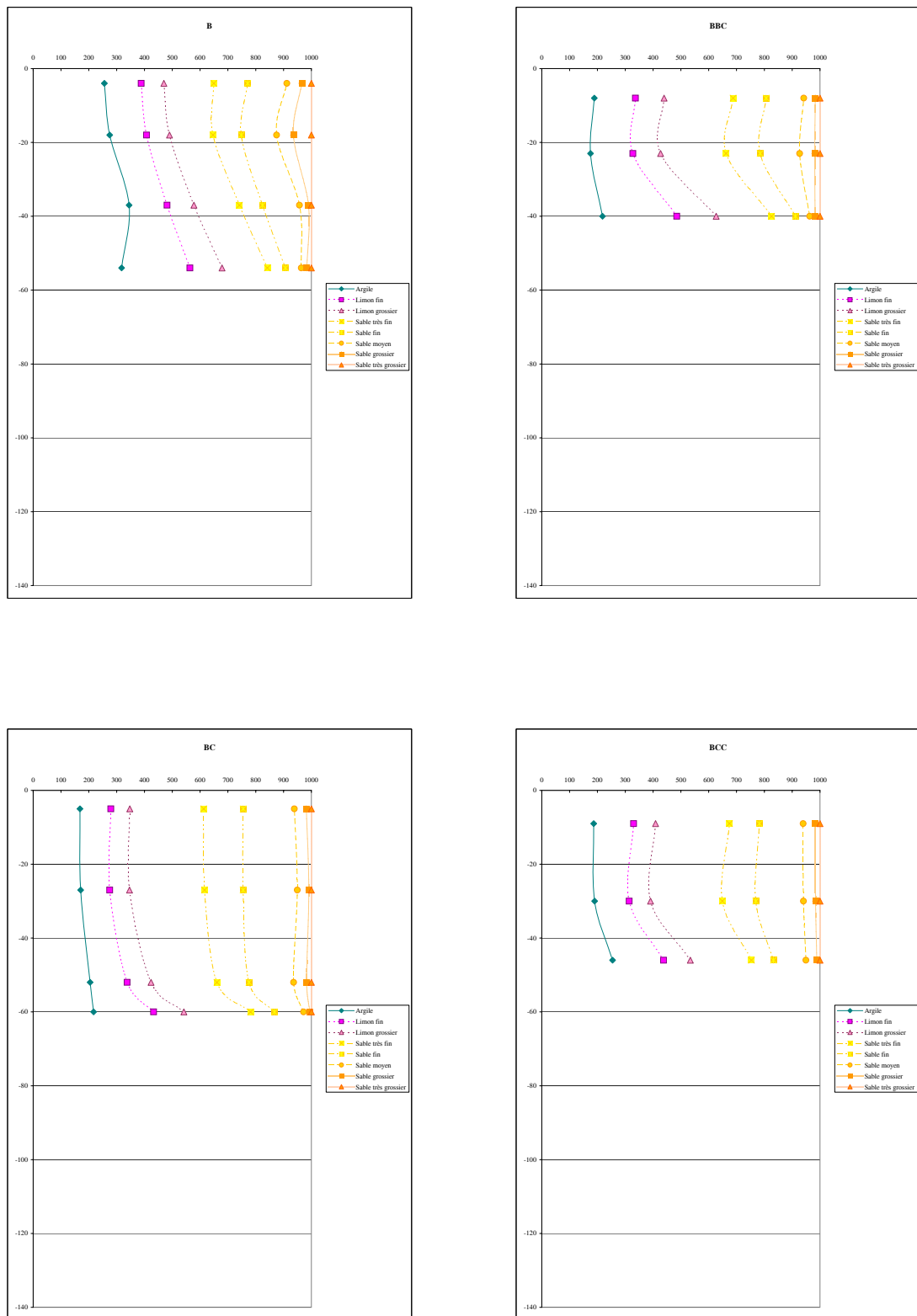


FIG. 5.10: Histogrammes des granulométries (%) des échantillons de l'IAS en fonction de la profondeur

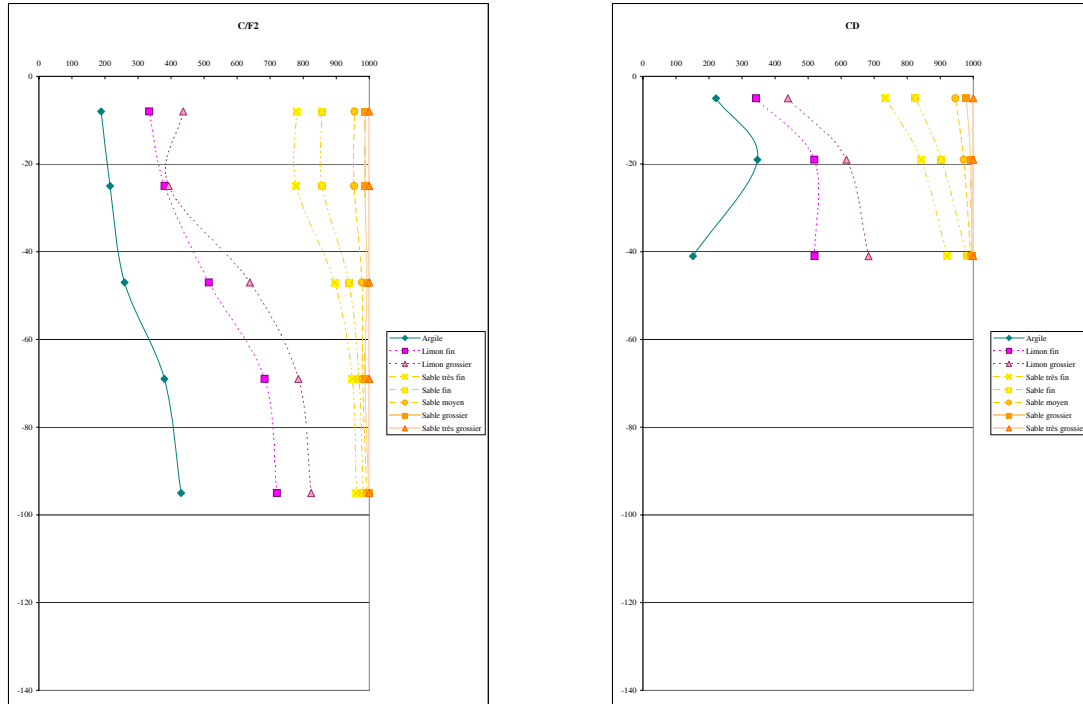


FIG. 5.11: Histogrammes des granulométries (%) des échantillons de l'IAS en fonction de la profondeur

craie Tuffeau (c_{3a}) altérée, les couches supérieures semblent développées dans les sables fins argileux glauconieux du c_{3b} , avec un horizon d'altération de ces sables argileux qui précède l'horizon de craie altérée. La granulométrie en fonction de la profondeur montre un ventre d'argile en H4 avec une forte diminution des sables les plus grossiers (S_m , S_g et S_{gg}), et L_f augmente régulièrement dès H3. Ceci tend à confirmer l'hypothèse de deux substrats. Au niveau du squelette, il y a un ventre de S_{ff} en H3-H4. La différenciation serait au niveau de H4. Les écarts, tous inférieurs à 40, montrent une homogénéité des horizons ; ils ne confirment donc pas cette hypothèse. Par contre, le rapport $S_g/S_m > 300 \%$ entre H4 et H5 est la preuve d'une forte dissemblance. Il semblerait donc qu'il y ait une évolution graduelle le long du profil. La C.E.C._{arg} (cf. fig. 5.6) augmente progressivement de 500 à 700 mé.kg⁻¹ d'A, confirmant l'idée d'une évolution graduelle.

« AAB »

Cette fosse présente une granulométrie et un squelette qui laissent suspecter une variation lithologique au niveau de H4. Les écarts, $39 > E_b > 59$, laissent douter quant à l'homogénéité de ce sol. Du côté des ratio, ils montrent une nette différence de H1, ainsi qu'une dissemblance possible de H2 à H4 avec H5 identique à H6. La C.E.C._{arg} est en « serpent », très hétérogène et différente des C.E.C._{arg} des autres profils développés sur le Tuffeau (c_{3a}). Ce solum serait donc plutôt hétérogène avec une évolution graduelle.

« AB »

La granulométrie et le squelette posent la question d'une variation lithologique et/ou d'un lessivage. Les écarts ainsi que les ratio traduisent plutôt une homogénéité, avec malgré tout quelques doutes. La C.E.C._{arg} va dans ce sens. Le profil est donc plutôt homogène.

« ABB »

Dans ce profil, la granulométrie et le squelette suggèrent un lessivage ou une différenciation lithologique. Les écarts, avec $E_b = 76$ entre H2 et H3, traduisent une nette hétérogénéité. Mais les ratio ne confirment pas cette hypothèse. La C.E.C._{arg} est plutôt homogène. Il est possible que le profil soit hétérogène mais que les proportions de sables restent relativement identiques suite à des remaniements ou des transferts de faibles distances. Pour vérifier, il faudrait comparer les matériaux en présence avec ceux issus des matériaux potentiellement allochtones.

« B »

La granulométrie et le squelette montrent un lessivage en H3 et une différenciation lithologique en H4. Les écarts nous donnent un profil plutôt homogène, tout comme les ratio et la C.E.C._{arg}. Si, toutefois, nous regardons S_g/S_{ff} , sables représentatifs dans ce profil, une discontinuité peut être notée.

« BBC »

Granulométrie et squelette semblent traduire une différenciation lithologique en H3. Selon les écarts, il existe des doutes. Pour les ratio, le rapport S_m/S_{ff} a exceptionnellement servi de référence car il s'est avéré le plus pertinent du point de vue des valeurs de ces fractions, les incertitudes liées à S_g/S_m étant très grandes. Il traduit une dissemblance nette. La C.E.C._{arg} de H3 est nettement plus élevée. Ce profil serait donc plutôt hétérogène.

« BC »

Dans ce profil, la granulométrie et le squelette suggèrent un lessivage ou une différenciation lithologique. Les écarts, tous $E_b < 40$, semblent indiquer qu'il est plutôt homogène. Les ratio, montrent une certaine dissemblance. La C.E.C._{arg} n'évolue que peu. Ce profil serait donc assez homogène avec toutefois une légère dissemblance.

« BCC »

Granulométrie et squelette traduisent plutôt un lessivage. Les écarts, $E_b < 40$ confirment cette idée, ainsi que les ratio. La C.E.C._{arg} est stable. Ce profil est donc homogène.

» C » (= F2)

Dans ce profil, la granulométrie et le squelette suggèrent un lessivage ou une différenciation lithologique. Les écarts, autour de 60 entre H2 et H3, laissent douter. Les ratio montrent une dissemblance entre H1-H3 et H5. La C.E.C._{arg} n'augmente que très peu. Le profil présenterait donc des doutes autour de H3, avec une différenciation entre surface et profondeur. H3 pose question quant à son appartenance, il serait de transition.

« CD »

La granulométrie et le squelette montrent un lessivage. Les écarts semblent indiquer que ce profil est plutôt homogène avec toutefois quelques doutes. D'après les ratio, la surface n'est pas ressemblante au fond, H3, ce qui est confirmé par la C.E.C._{arg} qui double, de 700 à presque 1500 mé.kg⁻¹ d'A. Ce profil aurait donc une différenciation lithologique en H3, avec malgré tout une évolution graduelle.

5.2.3 Conclusion sur l'homogénéité des sols des LTS et IAS

Les fosses de la LTS sont plutôt hétérogènes, même si les différentes interprétations ne concordent pas toujours. Dans le même temps, les fosses de l'IAS sont plutôt homogènes, tout en laissant des possibilités d'hétérogénéité.

Les différentes interprétations peuvent provenir d'évolution graduelle le long de chaque solum, mais aussi d'éventuel mélange de matériaux. Il sera intéressant (1) de vérifier si les matériaux ont des signatures propres permettant de les reconnaître, (2) de tester des hypothèses de mélange. Ceci sera tenté dans la partie III qui suit à partir des analyses granulométriques.

Les variations inhérentes aux fosses de l'IAS indiquent que la morphologie latérale du paysage est à prendre en compte pour expliquer le développement différencié des sols à partir d'un même matériau identifié à l'origine grâce à la carte géologique.

5.3 Quelques résultats complémentaires après analyses des échantillons prélevés dans les fosses

5.3.1 Singularité de seuil dans les réactions HCl ou comment un seuil peut être trompeur : le cas des réactions à HCl sur les carbonates

Est considéré comme « carbonaté un horizon qui contient au moins 5% de calcite ou dolomite », avec une « effervescence généralisée avec HCl à froid ou à chaud » (Baize et Girard, 1995). De plus, Baize et Jabiol (1995) (chap. 18) mettent en corrélation les six classes issues des estimations de terrain et les résultats d'analyses au laboratoire (tableau 5.2).

Réaction	% de CaCO ₃	Symbole
Décelable	< 2	(+)
Faible	2 à 10	+
Moyenne	10 à 25	++
Vive	25 à 55	+++
Très vive	> 55	++++

TAB. 5.2: Corrélation entre estimations au champ et analyses chimiques, d'après Baize et Jabiol (1995)

Sur le terrain, nous avons aussi utilisé cinq classes, mais elles diffèrent légèrement. Nous avons ainsi défini une classe de réaction nulle et la classe de réaction « très vive » est comprise dans la classe « vive », comme le montre le tableau 5.3.

Réaction	Symbole	Classe
Nulle	0	0
Faible	(+)	1
Moyenne	+	2
Forte	++	3
Très forte	+++	4

TAB. 5.3: Classes des réactions HCl au champ

Sur le terrain, 56 horizons ont des réactions à HCl, de très faibles à très fortes. Leur teneur en carbonate a été analysée. La figure 5.12 montre la corrélation entre l'estimation, qualitative, faite au champ et l'analyse chimique, au laboratoire.

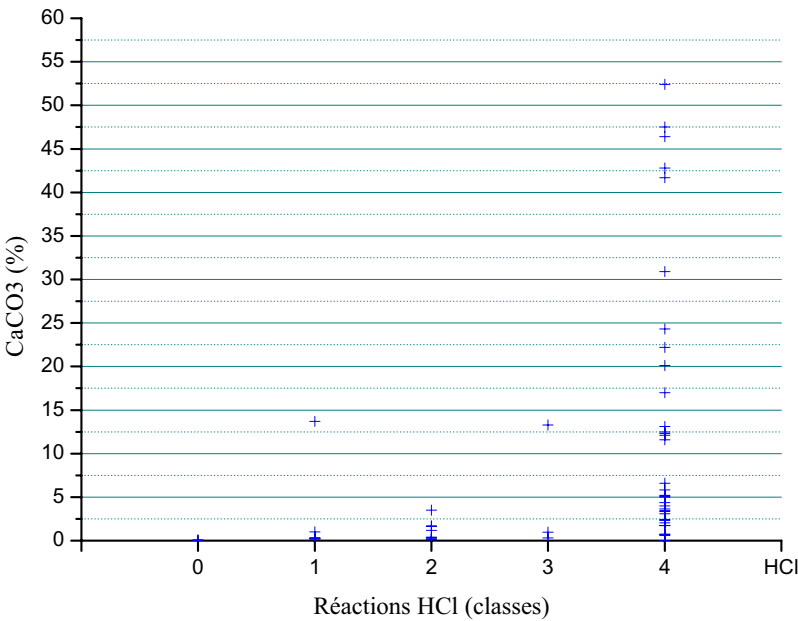


FIG. 5.12: Histogramme des corrélations entre estimations au champ et analyses chimiques

Le graphique 5.12 montre que la classe de réaction à HCl la plus représentée est de loin la classe 4. Les classes 1 et 2 sont beaucoup moins présentes et la classe 3 ne contient que peu d'individus. Nous pouvons constater que sur 56 prélèvements, 34, soit plus de la moitié, ont des teneurs en carbonates inférieures au seuil de 5 % (*cf.* fig. 5.13). Or, sur ce panel de 34, seuls 7 prélèvements ne font que peu réaction à HCl (classes 0 et 1). Les 27 autres montrent une effervescence non-négligeable (classes 2 à 4). D'autre part, ce même graphique 5.13 permet de constater qu'il semble y avoir un seuil autour de 2 %. En dessous de ce seuil, les points se trouvent principalement dans la classe

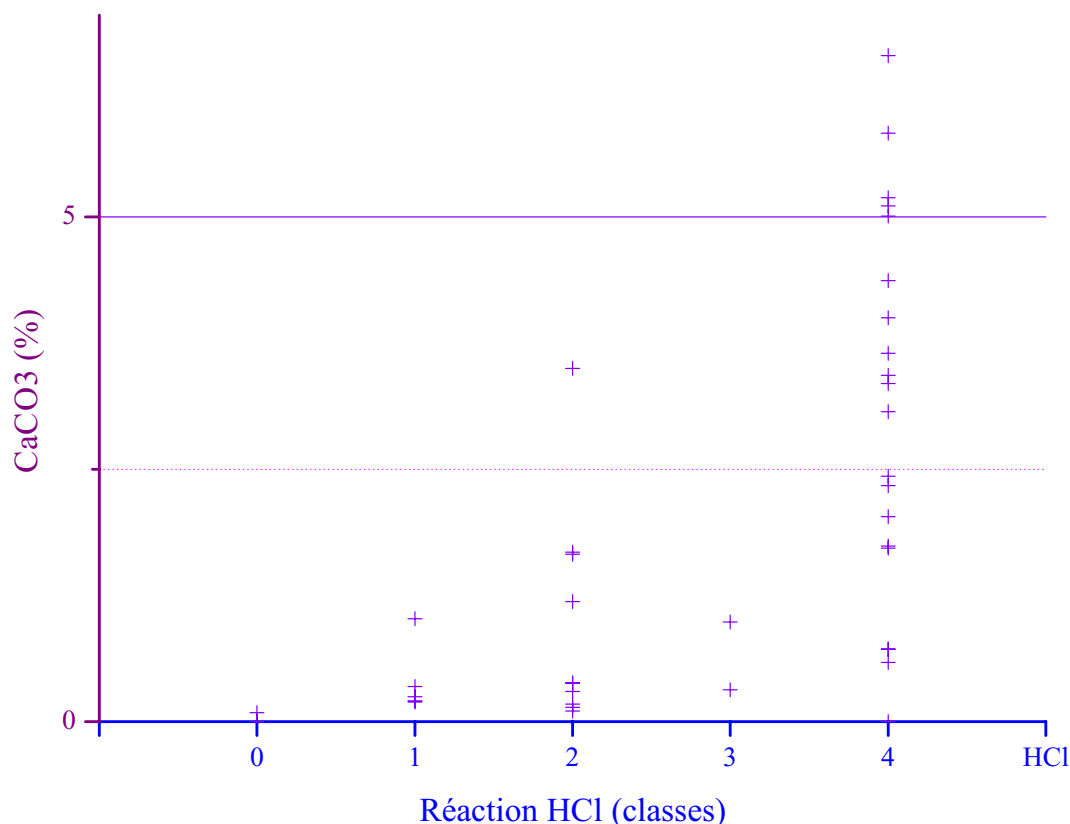


FIG. 5.13: Agrandissement de l'histogramme des corrélations entre estimations au champ et analyses chimiques

2 avec 9 individus, mais aussi dans les classes 4, et 1 avec respectivement 7 et 5 individus. Au-dessus de ce seuil, les individus se trouvent, pour une très large majorité, dans la classe 4.

A l'opposé, un seul prélèvement contient plus de 10 % de carbonates alors que la réaction à HCl est très faible. Cet échantillon a été prélevé en surface et ne contient pas d'éléments grossiers calcaires. Il serait donc constitué par des carbonates moins réactifs à HCl froid.

Il semble donc, ici, exister une contradiction entre estimations de terrain et analyses au laboratoire. Pour l'expliquer, plusieurs hypothèses sont possibles :

- (1) Les carbonates peuvent se trouver dans la fraction fine ($< 2\mu\text{m}$), sous forme très active. Dans ce cas, leur surface spécifique est grande, impliquant une grande réactivité.
- (2) Les estimations de terrain ont pu ne pas être évaluées correctement. Tous les échantillons ont été retestés à HCl par plusieurs personnes, avec approximativement les mêmes réponses. En ce cas, les seuils permettant de définir un horizon comme étant calcaire pourraient ne pas être appropriés, il faudrait alors les réévaluer. Nous pourrions ici proposer un seuil à 2 % et se limiter à trois classes, échantillon pas réactif, réactif et très réactif à HCl.

Comme préconisé dans le Guide des analyses (Baize, 1988), lors de « cas douteux, l'observation de terrain doit primer ».

5.4 Typologie des sols

Travaillant dans le cadre, du programme I.G.C.S., nous avons défini des types de sols regroupés en Unités Typologiques de Sols (U.T.S.). Ces unités ont été établies lors de l'ouverture des sols en s'appuyant sur les critères donnés dans le Référentiel Pédologique (Baize et Girard, 1995). La synthèse de ces U.T.S. se trouve dans le tableau 5.4. L'ensemble des sondages, tarières et fosses, a ainsi été rattaché à 24 U.T.S. regroupées dans 5 références génériques de sols (*cf.* carte 5.14). Le rattachement de chaque sondage s'est effectué par la ressemblance la plus grande aux U.T.S. établies à l'ouverture des fosses. Toutefois, certains sols rencontrés à la tarière n'étaient pas définis par une U.T.S. issues des fosses de ce terrain. Nous en avons alors créé de nouvelles à partir des U.T.S. définies en d'autres lieux de la carte à 1/100000^{ème} d'Angers. Six U.T.S. ont ainsi été définies. Nous pouvons constater que les U.T.S. mises en évidence correspondent pour partie à celles préalablement définies (*cf.* coupe 2.2). Notre étude étant plus précise, de nouveaux sols sont apparus, principalement dans la plaine cénomaniennne, comme les CALCOSOLS bathyluviques colluviaux ou des RENDOSOLS, mais aussi sur la pente, avec des COLLUVIOSOLS. Cet échantillonnage plus serré ne nous a cependant pas permis d'observer de PODZOSOLS typiques sur la butte, ni de BRUNISOLS dans la plaine. Nous pouvons toutefois remarquer que plus la classification est détaillée, plus la pédodiversité augmente (« the higher the detail in the classification, the higher the pedodiversity values », Saldana *et al.* (1998)).

Conclusion sur les premiers résultats des analyses issues des séquences

L'analyse morphoscopique des sables montre une forte influence du substrat géologique d'origine marine sur l'ensemble du secteur. Toutefois, la présence de sables de type éolien apparaît en faible quantité, quoique non-négligeable, dans plusieurs localisations de la plaine cénomaniennne. Cette présence s'exprime de façon plus moins marquée mais nous n'avons pas trouvé d'explications à cette variabilité spatiale.

L'analyse granulométrique confirme que plusieurs fosses de la lithotoposéquence présentent des profils homogènes sans discontinuité entre le sol en surface et le substrat sous-jacent (F4, F7, F9). Par contre, il est noté que d'autres fosses ne présentent pas de lien génétique franc entre les horizons de surface et ceux de fond de fosse (F3, F5, F6). L'hypothèse d'un apport éolien semble ainsi confirmée à l'Est de la zone. Il faut malgré tout considérer la possibilité de mélanges ou de recouvrements par des matériaux issus des formations situées en haut de la butte.

D'une façon générale, les fosses étudiées le long de l'isoaltiséquence sont plus homogènes que celles de la lithotoposéquence. Cependant, sont également constatées des hétérogénéités granulométriques au sein des solum ZA, AAB, B et C.

Enfin, les observations micromorphologiques confirment la présence d'un horizon illuvié qui pourrait encore être actif aujourd'hui malgré la présence de carbonates dans la partie supérieure des profils (Rousseau *et al.*, 2004). L'organisation des sols sur le secteur d'étude est donc le résultat d'une pédogenèse polyphasée complexe avec (1) la présence de traces fossilisées de processus pédologiques anciens et (2) le mélange fréquent des matériaux d'origines. Ce dernier aspect est certainement un des moteurs de la différenciation verticale et latérale des sols selon que nous nous situons dans des zones sources, des zones puits

Référence générique de sol	Type	Nom : UTS	Text / superposition de texture	Hydromorphie	Quantité d'éléments grossiers	Dureté de la roche	Glaucanie	Horizon(s) de réf
PLANOSOL	sur c4 sur c2a	P1 P2	S/A S/A	forte forte	faible faible	0 0	0 possible	Eg/BTg Eg/BTg
LUVISOL – REDOXISOL		L1	S-SL/SA	forte				E/BTg
LUVISOL	rédoxique	L2	S-SA/AS	En profondeur	faible	0		E/BTg
	rédoxique très graveleux	L3	S/SA	En profondeur	forte, généralisée	0	non	E/BTg
CALCOSOL	sur Craie sur Marnes	Ca1 Ca2	L L	non non	faible faible	moyenne faible	rare possible	SCa SCa
	bathyluvique colluvial	Ca3	SlA/A	non	faible	faible à moyenne	possible	SCa/BT
	argilo-sableux sur c3b	Ca5	AS	non	faible	faible	En profondeur	SCa/CCi glaucanieux
CALCOSOL – REDOXISOL		Ca4	AS	Oui	faible	faible	possible	SCag
RENDOSOL	sur Craie sur lumachelle ou grès calcaire	Re1 Re2	Ls SA	non non	faible moyenne	moyenne forte	rare	LCa LCa
	sur Marnes	Re3	AL	non	moyenne	faible	possible	LCa
CALCISOL	sur Marnes	Ci1	AS	non	moyenne à forte	faible	souvent	SCi
	bathyluvique	Ci2	Sa/A	non	faible	faible	possible	SCi
COLLUVIOSOL	sur c3b	C1	S	non	faible	faible	En profondeur	Js
	calcaïque	C2	S	non	faible	faible à moyenne	rare	JsCi
	calcaire	C3	S	non	faible	faible à moyenne	rare	JsCa
REDOXISOL	sur c3b	Rx1	SA-AS	forte	faible	moyenne	En profondeur	g
	sur Marnes	Rx2	SA	forte	moyenne	faible	En profondeur	g
	sur c2a	Rx3	SA	forte	moyenne	faible	En profondeur	g
BRUNISOL	sableux plus ou moins épais sur c4	B1	S	nulle à faible	faible à moyenne	dure	non	S
	sur c2b	B2	AS	nulle	moyenne	faible	En profondeur	S
FLUVIOSOL	calcaire	F	La	non	faible à nulle	faible	non	Jp

TAB. 5.4: Tableau récapitulatif des différentes U.T.S. définies sur le secteur d'étude, et leurs caractéristiques

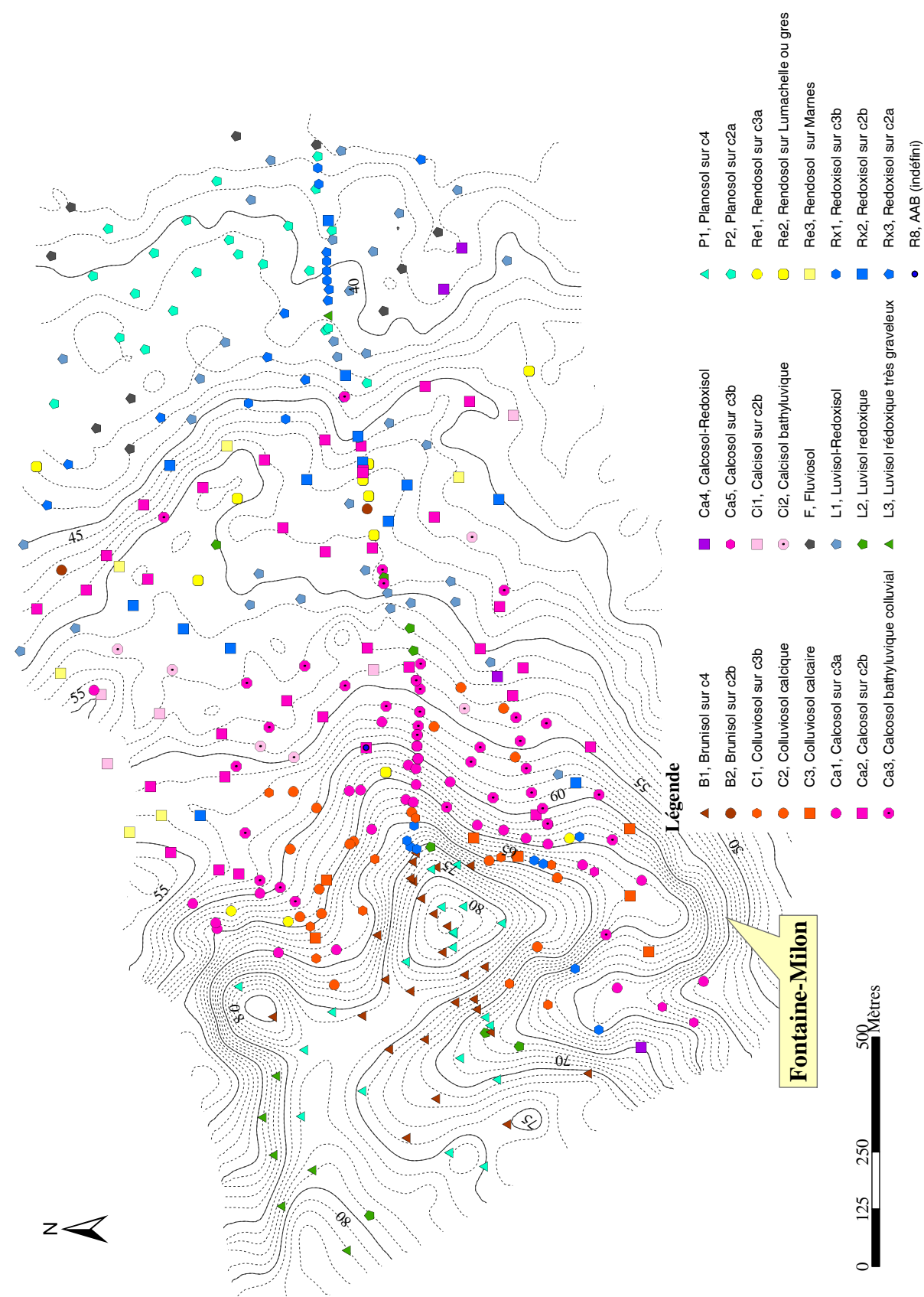


FIG. 5.14: Cartogramme de synthèse des typologies de sols

ou des zones non-concernées par des départs ou arrivées de matériaux allochtones, donc relativement stables.

Troisième partie

Facteurs et processus à l'origine de la distribution des sols

Introduction : les apports des réflexions sur les lithotoposéquence et isoaltiséquence

La partie 5 précédente a mis en évidence le rôle prépondérant des matériaux parentaux dans le développement des profils de sol. Elle a aussi révélé la présence d'hétérogénéités au sein de ces profils dues à la présence de plusieurs matériaux parentaux, soit sous la forme de recouvrements, soit sous la forme de mélanges. L'origine de ces matériaux allochtones se situe à des distances faibles et les apports peuvent être d'origine éolienne ou transférés le long des pentes.

L'objectif de cette troisième partie est de tester cette hypothèse de mélange des matériaux en élaborant un modèle combinant de façon systématique tous les matériaux présents sur la zone d'étude. Il s'agit ainsi de rechercher pour chaque horizon le mélange " virtuel " possédant la signature granulométrique la plus proche de celle observée sur le terrain. La même approche est appliquée aux fosses de la lithotoposéquence (LTS) et de l'isoaltiséquence (IAS) et développée respectivement dans les chapitres 6 et 7. Chacun de ces chapitres fait l'objet d'un article en cours de soumission. Afin d'éviter les répétitions dans le présent ouvrage, la méthode de calcul de mélange, commune à ces deux chapitres, est présentée à la suite de cette introduction.

Méthode pour le calcul de mélanges granulométriques de chaque horizon des fosses

Le mélange à l'origine de certains horizons de sols se base sur deux types de matériaux :

- (1) le matériau en place, qui sera ici caractérisé par le matériau trouvé au plus profond de la fosse considérée ;
- (2) un ou plusieurs matériaux allochtones. Ceux-ci ont pu :
 - (a) être transportés sur quelques dizaines à centaines de mètres, il s'agit des sables sénoniens (c_4) ;
 - (b) être apportés par le vent, comme les sables éoliens (N) ;
 - (c) être issus *per descendum* (Campy et Macaire, 1989), à partir de reliques des couches géologiques supérieures ou par processus pédologiques pénétrants, comme les sables glauconieux (c_{3b}).

Les autres matériaux présents sur le site d'étude - craie Tuffeau (c_{3a}), marnes à ostracées (c_{2b}) et argiles sableuses glauconieuses (c_{2a}) - sont considérés comme ayant une capacité de mouvement réduite. Ils n'interviendront donc pas en tant que matériaux allochtones dans les calculs présentés ci-dessous, mais seulement en tant que matériaux autochtones.

Ainsi, pour chaque horizon, quatre possibilités de matériaux à l'origine de pédogénèse : trois allochtones et une autochtone. Pour chaque fraction, une équation de mélange indique la proportion relative des quatre matériaux géologiques initiaux potentiels. En prenant l'ensemble des sept fractions du squelette, nous nous retrouvons donc en présence d'un système de sept équations à quatre inconnues. Le nombre d'équations peut être réduit en sélectionnant les fractions granulométriques :

- (1) qui présentent des distributions très spécifiques pour les matériaux géologiques initiaux ;
- (2) les plus représentatives.

Seules les fractions granulométriques S_{ff} , S_f , S_m et S_g (*cf.* chapitre 3.2.1) remplissent

ces deux conditions. Nous aboutissons donc à un système de quatre équations à quatre inconnues, comme suit :

$$\begin{cases} (S_{ff})_{Hn} &= \alpha * (S_{ff})_{Fdf} + \beta * (S_{ff})_{c_4} + \gamma * (S_{ff})_{c_{3b}} + \delta * (S_{ff})_N \\ (S_f)_{Hn} &= \alpha * (S_f)_{Fdf} + \beta * (S_f)_{c_4} + \gamma * (S_f)_{c_{3b}} + \delta * (S_f)_N \\ (S_m)_{Hn} &= \alpha * (S_m)_{Fdf} + \beta * (S_m)_{c_4} + \gamma * (S_m)_{c_{3b}} + \delta * (S_m)_N \\ (S_g)_{Hn} &= \alpha * (S_g)_{Fdf} + \beta * (S_g)_{c_4} + \gamma * (S_g)_{c_{3b}} + \delta * (S_g)_N \end{cases} \quad (5.1)$$

où :

- S_{ff} , S_f , S_m et S_g représentent les quatre fractions mesurées des squelettes granulométriques des horizons indiqués en indice ;
- Hn est l'horizon étudié ;
- Fdf est l'horizon du fond de la fosse comprenant l'horizon Hn ;
- c_4 , c_{3b} et N sont les matériaux ayant contribué à des apports allochtones ;
- α , β , γ et δ sont les coefficients des proportions de chacun des matériaux intervenant dans le mélange.

En mathématique, un système de quatre équations à quatre inconnues comporte une solution unique, sauf dans le cas où le système comporte deux équations ou plus identiques mathématiquement. Cette solution unique peut engendrer des coefficients négatifs. Dans notre cas, ceci signifierait un départ d'éléments. Or, nous posons la condition supplémentaire qu'il n'y a que des apports, forçant ainsi les coefficients résultants de ce système à être nuls ou positifs. De plus, nous contraignons le système de telle façon qu'ils soient compris entre 0 et 100 %. La résolution du système d'équations est alors réalisée :

- (1) en incrémentant les proportions de chacun des matériaux de 0 à 100 % avec un pas de 5 % ;
- (2) en retenant les coefficients les plus appropriés à l'aide d'un calcul de distance granulométrique (E_b) entre les quatre fractions sableuses mesurées et les quatre fractions sableuses calculées. Enfin, les valeurs obtenues sont recalculées de façon que leur somme soit égale à 100 %.

Ce modèle ne peut fonctionner que si les matériaux ont une signature caractéristique. C'est ici le cas de la granulométrie.

Chapitre 6

Identification du matériau parental de sols le long d'une lithotoposéquence à partir d'équations de mélanges granulométriques Réflexion sur la Lithotoposéquence (LTS)

Ce chapitre fait l'objet d'un article en cours de soumission. La méthode étant commune au chapitre 7, elle a été présentée en introduction de cette partie III.

6.1 Résultats et discussion

6.1.1 Comparaison granulométrique entre les matériaux géologiques

Les échantillons prélevés en fond de fosse sont considérés comme les matériaux géologiques initiaux potentiels. Le Sénonien (c_4) est défini par des échantillons de sub-surface de la fosse F1 ; le Turonien supérieur c_{3b} provient de la fosse ZA, externe à la séquence présentée ; l'éolien (N) est issu des échantillons de surface de la fosse F9. Afin de confirmer leur caractère éolien, nous avons prélevé des échantillons sur deux sites reconnus clairement par les géologues comme des formations éoliennes. Les signatures granulométriques concordent entre ces matériaux et les matériaux présents à la surface de la fosse F9. Tous ces matériaux géologiques sont représentés selon des histogrammes, d'une part, par fractions cumulées des squelettes et, d'autre part, par fractions non-cumulées de la granulométrie.

La somme des limons fins et grossiers varie entre 4 et 45 % des squelettes. Ce sont donc les sables qui permettent de caractériser le mieux les matériaux géologiques. Les courbes cumulatives du squelette apparaissent différenciées (figure 6.1). Elles forment 4 groupes. Les groupes les plus opposés se composent des sables éoliens (N) et des sables turoniens (c_{3b}). En effet, les sables éoliens contiennent très peu de particules les plus fines du squelette, et présentent deux pics (S_m et S_g) alors que les sables turoniens montrent un pic de sables très fins (S_{ff}). Entre ces deux extrêmes, nous trouvons les intermédiaires. Le Cénomanien moyen c_{2a} et le Sénonien c_4 , bien que géographiquement éloignés, ont un squelette très proche. Le dernier groupe se compose des marnes à ostracées (c_{2b}) et de la craie Tuffeau de l'Anjou (c_{3a}) qui ne présentent pas de pics sensiblement remarquables. Les courbes non-cumulatives des granulométries (figure 6.2) présentent elles aussi des pics caractéristiques, soit dans les argiles, soit dans les S_m . Il en est ainsi pour le c_{3b} , le c_4 et le N (éolien). En effet, le c_{3b} contient presque 45 % de S_{ff} (50-100 μm), ce qui est largement plus que les autres substrats ; le c_4 est le seul à contenir un large spectre de S_{ff} , S_f et S_m , et le N (éolien) présente un pic de S_m (200-500 μm) à presque 45 %, bien supérieur aux autres. Le c_{2a} est argileux et sableux mais ne présente pas de pic de sable très marqué. Toutes les fractions sableuses sont toutefois présentes. Les c_{3a} et c_{2b} sont eux aussi différents des autres, quoique toutefois assez proches entre eux (pics de argile, de S_{ff} et petit pic de S_m).

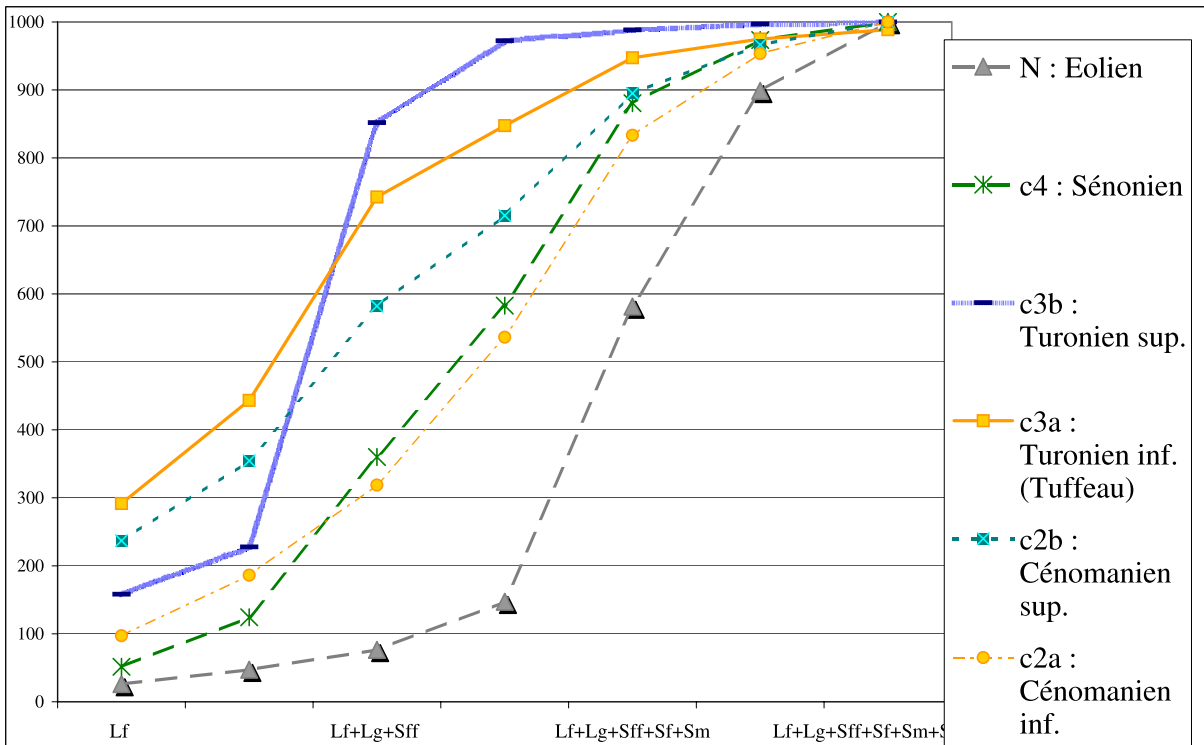


FIG. 6.1: Squelettes cumulés des horizons représentatifs de la granulométrie des matériaux géologiques initiaux

Squelette et granulométrie permettent ainsi de caractériser les substrats et de les différencier entre eux. Trois substrats ont une signature très claire : un pic élevé de sables très fins caractérise le c_{3b} , un pic moyen de sables fins identifie le c_4 , et un large pic de sables moyens et grossiers caractérise le N (éolien). Ce sont ces fractions qui seront utilisées pour le calcul de mélanges.

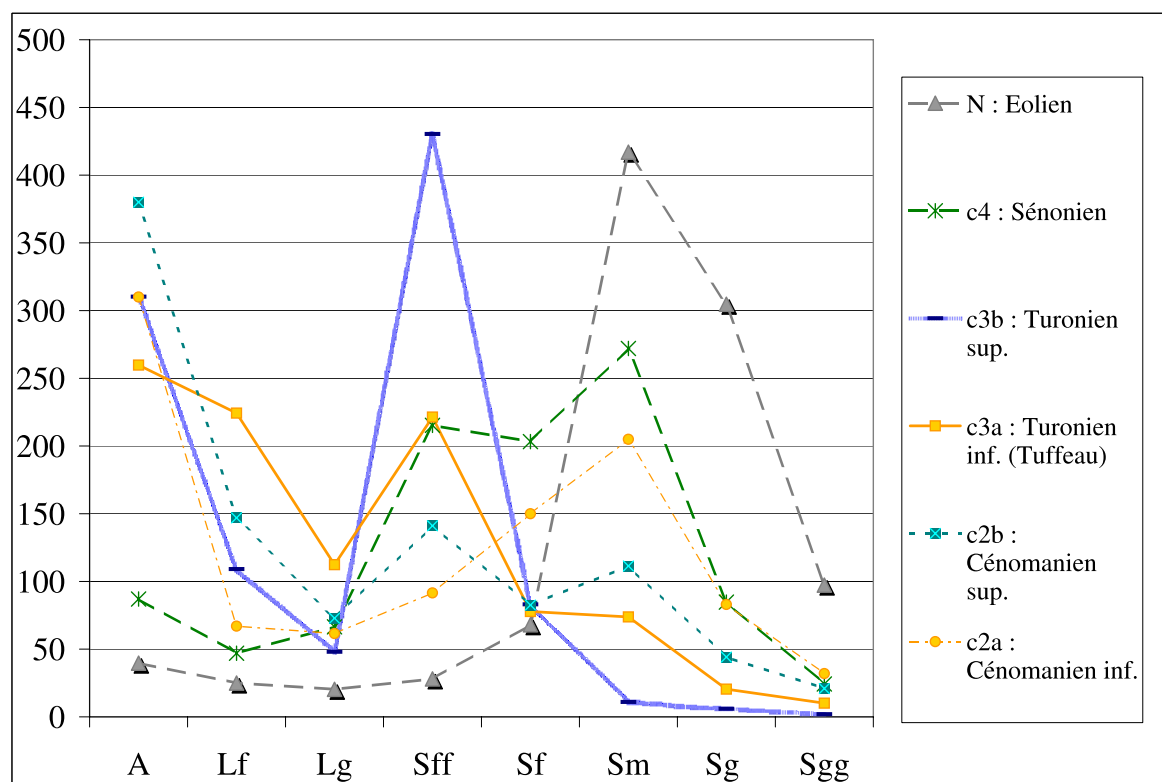


FIG. 6.2: Histogramme de la granulométrie des horizons représentatifs de la granulométrie des matériaux géologiques initiaux

La granulométrie a le mérite d'être une information facile à acquérir. Toutefois, son évolution (fragmentation, dissolution des grains) par altération et par pédogenèse reste inconnue. Il faut donc rester prudent sur la signification que nous pouvons donner aux résultats uniquement basés sur cette variable. Ceci est particulièrement vrai pour le c_{3b} qui contient une forte proportion de glauconie. Or, ce minéral est facilement altérable, et sa granulométrie est principalement composée de sables très fins. Il peut donc y avoir eu une évolution rapide au cours du temps. Nous avons toutefois conservé la signature du c_{3b} dans la réflexion afin d'examiner toutes les hypothèses liées au mélange des matériaux géologiques initiaux.

6.1.2 Comparaison granulométrique des horizons le long de chaque solum

Les résultats issus des comparaisons de squelettes granulométriques sont donnés dans le tableau 6.1. La colonne « Ratio » concerne les ratios, r , la colonne « Ecart », le résultat du calcul de distance granulométrique, E_b . Dans ces deux colonnes sont notés en caractères italiques et gras (1) les ratios montrant des ressemblances entre l'horizon concerné et le fond de fosse, et (2) les écarts montrant une homogénéité de l'horizon concerné avec le suivant. Les dernières colonnes concernent les coefficients des trois matériaux allochtones supposés intervenir dans le mélange, c_4 , N (éolien) et c_{3b} ; Fdf représente l'horizon le plus profond dit « fond de fosse ».

Horizons	Prof. cm	Ratio (%) H_n/H_{Fdf}	Ecart H_n/H_{n+1}	Calculs de mélange				Ecart Calc/mes
				α (coef Fdf)	β (coef c_4)	γ (coef c_{3b})	δ (coef N)	
F1.H1	-5	41	50	0	100	0	0	9
F1.H2	-20	55	52	0	90	0	10	5
F1.H3	-32	51	42	5	95	0	0	4
F1.H4	-40	48	35	0	88	12	0	5
F1.H5	-62	100		100	0	0	0	
F2.H1	-8	54	22	92	8	0	0	59
F2.H2	-25	53	57	94	6	0	0	79
F2.H3	-47	60	31	80	4	16	0	10
F2.H4	-69	102	8	95	0	5	0	7
F2.H5	-95	100		100	0	0	0	
F3.H1	-7	126	81	65	16	16	3	24
F3.H2	-26	127	84	86	0	9	5	50
F3.H3	-47	117	81	57	27	13	3	35
F3.H4	-68	85	49	91	9	0	0	27
F3.H5	-86	100		100	0	0	0	
F4.H1	-9	80	33	53	45	3	0	14
F4.H2	-27	82	33	54	46	0	0	13
F4.H3	-48	85	31	65	35	0	0	13
F4.H4	-71	83	25	86	9	5	0	11
F4.H5	-101	100		100	0	0	0	
F5.H1	-6	126	68	0	75	0	25	24
F5.H2	-17	137	65	0	75	0	25	25
F5.H3	-40	123	65	0	81	0	19	25
F5.H4	-70	170	71	0	71	0	29	83
F5.H5	-95	100		100	0	0	0	
F6.H1	-6	46	74	0	92	0	8	24
F6.H2	-19	56	88	0	79	0	21	23
F6.H3	-37	44	77	0	95	0	5	94
F6.H4	-62	63	51	44	0	56	0	54
F6.H5	-102	100		100	0	0	0	
F7.H1	-5	94	15	92	8	0	0	11
F7.H2	-14	95	15	80	15	0	5	13
F7.H3	-36	93	18	88	12	0	0	22
F7.H4	-69	85	27	76	20	0	4	16
F7.H5	-99	84	16	79	11	0	11	4
F7.H6	-130	100		100	0	0	0	
F8.H1	-10	261	49	75	0	0	25	16
F8.H3	-36	243	45	78	0	0	22	19
F8.H4	-56	230	44	80	0	0	20	14
F8.H5	-78	165	35	83	0	0	17	13
F8.H6	-97	148	25	88	0	0	13	22
F8.H7	-120	100		100	0	0	0	
F9.H1	-13	89	14	11	6	0	83	5
F9.H2	-32	83	12	0	7	0	93	14
F9.H3	-41	95	17	7	0	0	93	21
F9.H4	-57	69	21	0	6	0	94	26
F9.H5	-81	63	24	0	0	0	100	13
F9.H6	-108	100		100	0	0	0	0

TAB. 6.1: Tableau récapitulatif des comparaisons granulométriques

Sur neuf fosses, trois ont une majorité de ratio compris entre 80 % et 120 % qui sont les seuils de ressemblance définis pour ce calcul. Il s'agit de F4, F7 et F9. Celles-ci seraient donc les seules dont le squelette ressemble sensiblement à l'horizon de fond de fosse et ainsi à avoir un lien génétique direct avec cet horizon. Les six autres apparaissent peu semblables à l'horizon de fond de fosse et ne seraient donc pas directement issues du matériau sous-jacent.

Le calcul de distance granulométrique (E_b) des horizons des fosses F2, F4, F7 et F9 est majoritairement inférieur à 40, indiquant que ces quatre fosses sont donc homogènes. F3, F5 et F6 ont des $E_b > 60$, et seraient donc hétérogènes. Enfin, F1 et F8 sont plus difficiles à interpréter en terme d'homogénéité car il n'est pas possible de définir nettement une différenciation texturale.

Dans le cas des fosses F3, F4, F5, F6 et F7, ratio et écarts abondent dans le même sens qui peut être soit une homogénéité complète, soit une hétérogénéité. Pour les quatre fosses restantes (F1, F2, F8 et F9), il n'en va pas de même.

F1 et F8 sont deux fosses qui comportent des écarts compris entre 40 et 60 ; aucune différenciation texturale ne peut donc être clairement identifiée *via* le calcul de distance. Au contraire, le calcul de ratio indique qu'il y a des différences sensibles avec l'horizon profond. Nous pouvons donc estimer que s'il n'y a pas de lien génétique franc entre l'horizon profond et les horizons supérieurs, les différences ne sont toutefois pas sensibles d'un horizon à son suivant.

La fosse F1, qui se compose de sables sur argiles, présente une différenciation texturale nette. Cette différenciation est connue des géologues (Brossé et Louail, 1976), sans pour autant avoir d'explication.

Considérons maintenant la fosse F8. Les horizons H1 à H4 ne semblent pas nettement homogènes ($40 < E_b < 60$) alors que les suivants le sont, au contraire du calcul de ratio qui montre une nette différence entre les horizons H1 à H6 et l'horizon profond. Ces résultats ne sont cependant pas forcément antinomiques car ceci pourrait traduire une évolution graduelle le long du profil. Il existe effectivement une différence d'un horizon à son suivant qui s'ajoute dans le même sens le long du solum, et masque finalement une différence nette entre les horizons supérieurs et l'horizon profond. Rappelons aussi que les deux calculs ne se font pas de la même manière et peuvent donc traduire deux visions différentes du même phénomène. Le calcul de distance granulométrique prend en compte l'ensemble des fractions du squelette quand les ratios ne se basent que sur deux fractions, évitant ainsi les aléas inhérents aux fractions fines.

Comparons maintenant F8 et F9. Toutes deux sont éloignées du plateau sénonien (c_4) (*cf.* figure 2.2) et ne devraient par conséquent pas être affectées par des apports allochtones issus de cette formation. Par contre, selon les géologues auteurs de la carte à 1/50000^{ème}, nous trouvons de l'éolien (N) en certaines zones de la carte de Longué, à quelques kilomètres au Sud-Est du site d'étude. Ils remarquent que cet éolien se situe sur des « dunes ». Ici, ils n'en notent cependant pas, sans que ceci implique forcément une absence. En effet, la notation de cette formation dépend du géologue. Écarts et ratio indiquent que F8 est hétérogène et F9 homogène. Cette différenciation peut être due aux variations de faciès du c_{2a} (Louail, 1984). Cette variation peut se retrouver dans la texture (granulométrie complète) et la minéralogie mais aussi dans le squelette. Ainsi, F8 serait hétérogène pour des raisons non seulement pédogénétiques mais aussi et surtout géologiques. Concernant F9, une hétérogénéité commence à apparaître en profondeur, mais au-delà de ce que nous estimons être le sol *s.s.* Les dépôts éoliens ne se faisant pas sur des distances très grandes, nous pouvons peut-être considérer qu'ils se composent

d'éléments issus de la surface du c_{2a} . De plus, les particules transportées dans ce contexte - vents péri-glaciaires sur une distance de quelques kilomètres - sont principalement des sables. Au niveau de F9, l'apport éolien serait donc alimenté par un matériau d'origine géologique identique à celui sur lequel il se dépose et donc semblable du point de vue du squelette ; F9 apparaît donc comme homogène.

En conclusion, nous constatons la présence de fosses où la signature du substrat ne se retrouve que partiellement dans les horizons supérieurs. Le calcul de distance permet de cibler en partie où se trouve ce hiatus sans répondre intégralement. Les interrogations restantes devraient être levées à l'aide des estimations granulométriques de mélanges. Ce calcul a aussi été appliqué sur les fosses homogènes et dont la ressemblance avec le matériau sous-jacent a été déterminée afin de vérifier l'absence d'apports.

6.1.3 Estimation des mélanges granulométriques dans les horizons

L'étude de la granulométrie permet de constater la présence de pics caractéristiques de trois substrats dans les fractions sableuses. Rappelons que ces substrats ont une mobilité potentielle et que nous partons de l'hypothèse que certains horizons sont issus de mélanges. Les résultats du calcul de mélange se trouvent dans les quatre dernières colonnes du tableau 6.1. Une coupe schématique et synthétique est aussi présentée à la figure 6.3.

Si nous négligeons les apports inférieurs à 10% du mélange total, nous pouvons regrouper les solums selon trois catégories :

- (1) les solums homogènes dont tous les horizons sont composés d'un seul matériau parental correspondant au matériau de fond de fosse, donc en place, (F2 et F7) ;
- (2) les solums hétérogènes correspondant à la superposition de deux matériaux différents, avec un hiatus très net (F1, F6 et F9) ;
- (3) les solums issus de mélanges de matériaux (F3, F4, F5 et F8). Ce dernier cas correspond soit au mélange d'un ou plusieurs matériaux allochtones avec le matériau en place (F3, F4 et F8), soit au mélange de plusieurs matériaux allochtones superposé au matériau en place (F5).

Les solums hétérogènes apparaissent donc fréquents et les hypothèses d'horizons issus du mélange de plusieurs matériaux semblent vérifiées. Examinons plus en détail chacun des solums.

Les horizons H1-2 de F1 ont permis d'identifier les sables du Sénonien (c_4), et ils servent de référence pour ce matériau. Les horizons H1-2 de F9 ont permis de caractériser les sables éoliens (N). Ce sont les granulométries de ces horizons qui sont utilisées pour les calculs de mélange. Les solums dont ces horizons sont issus n'ont pas été écartés du calcul afin d'en tester la sensibilité/qualité. Ainsi, nous pouvons estimer que le calcul est satisfaisant s'il annonce que les deux premiers horizons de chacune de ces fosses sont très nettement composés (1) de c_4 pour F1 et (2) de N pour F9. Or, ils sont identifiés par le calcul comme composés de 90 % à 100 % de c_4 pour F1 et de N pour F9, soit 95 ± 5 %, ce qui reste cohérent avec l'incrémentation en 5 %. Les autres solum montrent des proportions de chacun des matériaux qui évoluent le long de la pente.

Les horizons de F2 et de F3, dans la moitié supérieure d'une pente de 5 %, sont composés du matériau de fond de fosse à 60 % minimum, le reste étant un mélange de sables du plateau et de matériau *per descendum* (c_{3b}). 100 m en aval, F4 se trouve dans une pente plus faible ; elle est composée de matériau de fond de fosse et de sables du plateau. Les proportions du sable sont de 45 % en surface et diminuent avec la profondeur jusqu'à

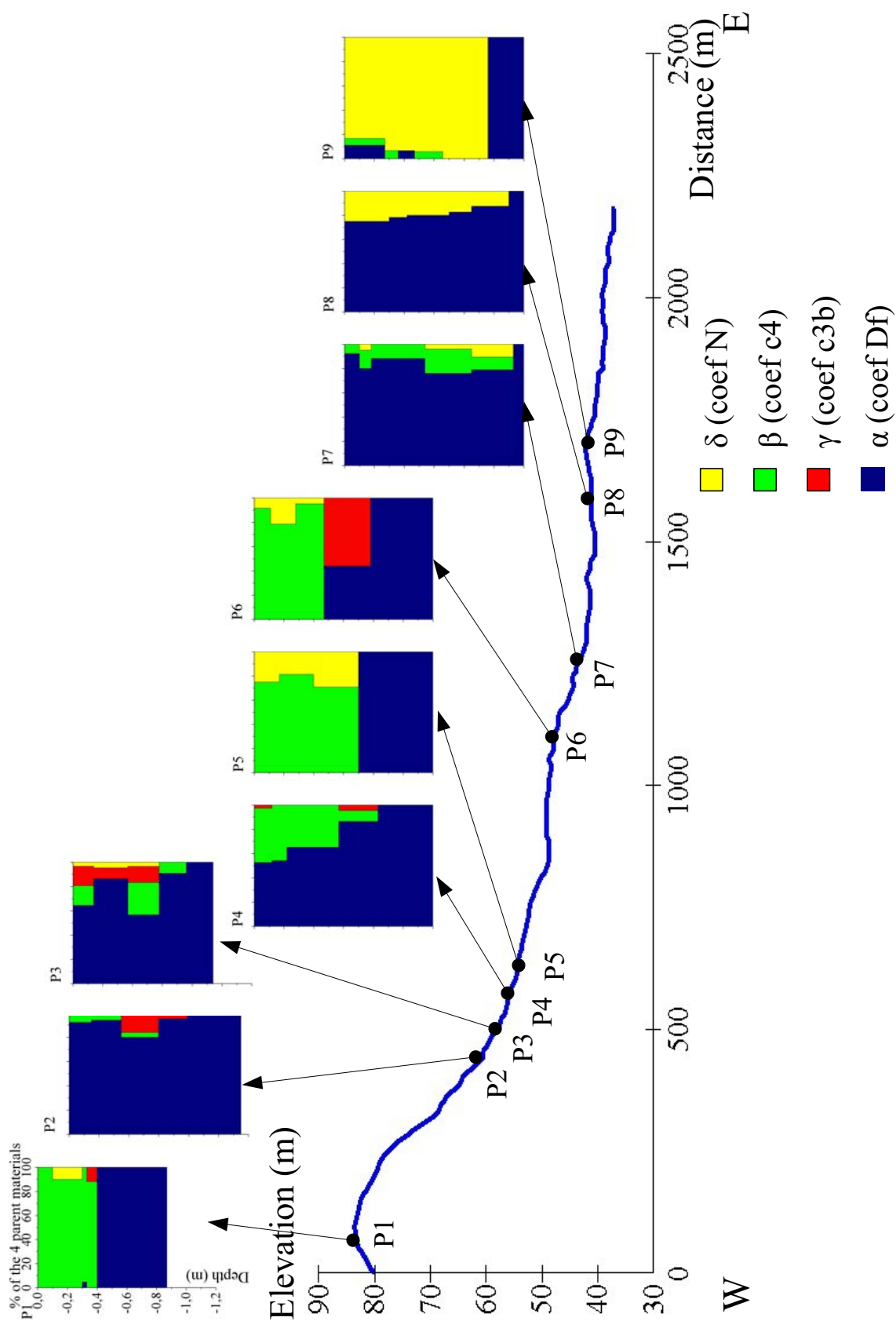


FIG. 6.3: Coupe en long de la lithotoposéquence

10 %. 30 m plus loin, et pour un même gradient de pente, F5 semble uniquement composée de matériaux allochtones, sables du plateau (c_4) et sable éolien (N), avec une forte majorité de sable du plateau, à plus de 70 %. A 450 m, en bord de talus, F6 semble, elle aussi, n'être composée que de matériaux allochtones. En effet, les trois horizons supérieurs sont composés de sables c_4 à plus de 80 % et de N pour le reste ; le 4^e horizon s'apparente aux sables et argiles c_{3b} , importés *per descendum*. Sous ce talus, F7 semble beaucoup moins affectée par l'allochtonie : elle est composée à plus de 80 % du matériau de fond de fosse. Les 20 % restants sont issus du plateau sableux. Placée en plein c_{2a} , F8 est composée de 25 % de sables éoliens en surface ; cette proportion diminue jusqu'à 10 % dans le pénultième horizon. Enfin, F9, comme dit plus haut, a servi en partie de référence pour les sables éoliens N, et en est composée à plus de 90 % sur les cinq premiers horizons.

Après cette description solum par solum des calculs de mélange, examinons s'il existe une logique dans les transferts et les mélanges prédits par ce modèle. Le c_4 se trouve en place, au sommet de la butte. Nous le retrouvons dans F2 et F3, les deux fosses de la pente, en quantité inférieure à 20 % puis sa quantité augmente progressivement dans les trois fosses qui suivent, F4, F5 et F6. Les fosses F2 et F3 se situent dans une pente suffisamment importante pour qu'il y ait érosion régulière, les sables issus du c_4 ne se déposent donc pas, ou peu, et sont transférés vers l'aval. Au contraire, F4, F5 et F6 sont sur des replats morphologiques, et se trouvent dans des zones où les sables du c_4 peuvent se déposer, et ce de façon croissante avec la diminution du gradient de la pente. La présence de c_4 s'arrête brusquement au niveau du talus lumachelique, avec une présence en très faible quantité dans la fosse F7. Le c_4 sableux se retrouve donc jusqu'à presque 1 km de sa zone de dépôt initial. Sa présence semble être fonction de la pente : en faible quantité dans les pentes et en quantité plus importante sur les replats.

Le c_{3b} se retrouve principalement dans deux fosses et en très faible quantité. Ces fosses sont géographiquement proches l'une de l'autre et proches de la couche géologique d'où est issu l'échantillon. Le c_{3b} n'aurait donc qu'un impact très limité dans l'espace. Ceci pourrait s'expliquer par une faible épaisseur de la couche géologique c_{3b} qui, dans les pentes plus fortes, recoupe la topographie. La surface d'affleurement est donc réduite, voire négligeable en regard des surfaces d'affleurement du Sénonien (c_4) sus-jacent et de la craie turonniennne (c_{3a}) sous-jacente. Constatons un cas particulier constitué par l'horizon H4 de la fosse F4 qui semble avoir le même squelette que ce c_{3b} . Si la présence de glauconie apporte la caractéristique granulométrique du c_{3b} , alors, ces deux échantillons étant tous deux très glauconieux, elle pourrait entraîner cette apparente ressemblance entre l'horizon H4 de F4 et le c_{3b} .

Enfin, les sables éoliens (N) se retrouvent principalement dans la partie Est de la lithotoposéquence, dans les fosses F5, F6, F8 et F9. Sur la carte géologique de Longué (Brossé et Louail, 1976), les géologues notent que ces sables se positionnent principalement sur la plaine cénomaniennne (c_{2a} et c_{2b}) ; ils sont « issus des grèves de Loire [et ont été] poussés par des vents [péri-glaciaires] du Sud-Ouest, [en remontant] les pentes de rive droite pour s'étaler vers le Nord jusqu'à 10 km du fleuve » (Calvet, 1976). Ceci conforte donc nos résultats. En effet, toutes les fosses affectées se trouvent dans cette plaine. Les sables éoliens dominent dans le centre de cette plaine et sont en plus faibles proportions dans les mélanges en allant vers l'Ouest. Le talus lumachelique en contient très peu, la pente de ce talus ayant peut-être limité le dépôt.

Le calcul de mélanges montre que toutes les fosses sont concernées, dans des proportions variables, par le mélange de différents matériaux allochtones et autochtones. Les

résultats sont en accord avec les hypothèses hypsométriques, à savoir décapage dans les pentes assez fortes et accumulation dans des zones sensiblement moins pentues.

6.2 Conclusion

Nous avons analysé l'organisation spatiale des sols dans un paysage sédimentaire, en privilégiant les mesures granulométriques détaillées pour identifier la nature et l'origine des horizons pédologiques le long d'une lithotoposéquence. Dans un premier temps, les mesures granulométriques ont permis d'identifier et de caractériser les matériaux parentaux présents sur le site. Dans un second temps, elles ont permis la reconstitution de l'organisation spatiale des sols. Pour ce faire, nous avons utilisé deux indicateurs, basés sur le squelette granulométrique, de ressemblance entre deux horizons, soit le ratio r (rapport S_g/S_m), soit la distance granulométrique de toutes les fractions du squelette (E_b). Nous mettons ainsi en évidence l'homogénéité/hétérogénéité des sols ainsi que leurs caractères autochtones ou allochtones. Ces deux indicateurs sont complémentaires, avec des méthodes mathématiques et des significations propres à l'un et à l'autre. Dans les cas où ces deux indicateurs semblaient donner des résultats contradictoires/paradoxaux, nous avons réussi à les expliquer en émettant des hypothèses de mélange. Ce mélange se fait par un calcul de pourcentage massique par incrémentation et semble cohérent avec les hypothèses de redistribution le long de la pente de la lithotoposéquence.

Nous montrons ainsi que lorsque les matériaux parentaux présentent des granulométries contrastées, il est possible d'émettre des hypothèses d'origine et de mélanges en ce qui concerne les horizons d'une lithotoposéquence.

D'une façon plus générale, et malgré une pente relativement faible, nous montrons que les redistributions latérales sont susceptibles d'influencer très fortement les compositions des sols dans notre milieu d'étude.

Les solum homogènes, comme F2, se trouvent sur les pentes les plus fortes, ou dans les zones planes et éloignées des sources potentielles d'apport provenant des zones voisines, comme c'est le cas pour F7. Les solum hétérogènes se localisent en bas de pente à l'emplacement de la réception des colluvions soit sous forme de mélanges avec le matériau autochtone lorsque la pente est forte (F3, F4), soit sous forme d'un recouvrement (F5, F6). Les apports éoliens se retrouvent à l'Est de la zone avec une différenciation des solum soit sous la forme de recouvrement (F9), soit en mélange ailleurs (F8).

Chapitre 7

Influence de la morphologie du relief et du matériau parental Réflexion sur l'Isoaltiséquence (IAS)

Nous avons positionné l'IAS dans le c_{3a} de façon (1) à être sur un substrat peu mobile et à moindres variations latérales de faciès, et (2) à prendre au mieux en compte l'influence de la morphologie du relief sur l'organisation des sols.

Ce chapitre fait l'objet d'un article en cours de soumission. La méthode étant commune au chapitre 6, elle a été présentée en introduction de cette partie III.

7.1 Résultats

7.1.1 Comparaison granulométrique des horizons le long de chaque profil

Les résultats issus des comparaisons de squelettes granulométriques sont donnés dans le tableau 7.1. Comme précédemment, la colonne « Ecart » concerne le résultat du calcul de distance granulométrique, E_b , la colonne « Ratio », les ratio, r . Dans ces deux colonnes sont notés en caractères *italiques et gras* :

- (1) les ratios montrant des ressemblances entre l'horizon concerné et le fond de fosse ;
- (2) les écarts montrant une homogénéité de l'horizon concerné avec le suivant.

Les dernières colonnes concernent les coefficients des 3 matériaux allochtones supposés intervenir dans le mélange, c_4 (sables du Sénonien), N (sables éoliens) et c_{3b} (sables argileux du Turonien supérieur) ; Fdf représente l'horizon le plus profond de chaque fosse.

Sur dix fosses, la moitié a une majorité des ratio comprise entre 80 % et 120 % qui sont les seuils de ressemblance définis pour ce calcul. Il s'agit de AB, BBC, BC, BCC et CD. Celles-ci seraient donc les seules dont le squelette ressemble sensiblement à l'horizon profond, et donc les seules à avoir un lien génétique direct avec cet horizon. Les cinq autres apparaissent peu semblables à l'horizon profond et ne seraient donc pas directement issues du matériau sous-jacent.

Horizons	Pfd _r (en cm)	Ratio (%)	Ecarts	Calculs de mélange			
		H_n/H_{Fdf}	H_n/H_{n+1}	α (coef Fdf)	β (coef c_4)	γ (coef c_{3b})	δ (coef N)
ZA.H1	-6	185	3	50	42	8	0
ZA.H2	-21	165	32	58	42	0	0
ZA.H3	-44	198	33	0	24	76	0
ZA.H4	-70	327	37	5	0	95	0
ZA.H5	-106	100		100	0	0	0
AAB.H1	-4	756	59	0	81	19	0
AAB.H2	-20	74	5	65	17	17	0
AAB.H3	-40	72	3	39	55	6	0
AAB.H4	-57	66	39	38	58	4	0
AAB.H5	-69	100	5	100	0	0	0
AAB.H6	-90	100		100	0	0	0
AB.H1	-6	98	12	14	54	0	31
AB.H2	-21	146	51	20	41	0	39
AB.H3	-41	97	25	0	35	65	0
AB.H4	-78	95	6	94	0	6	0
AB.H5	-92	100		100	0	0	0
ABB.H1	-4	109	8	18	59	0	23
ABB.H2	-20	126	76	43	30	0	26
ABB.H3	-43	100		100	0	0	0
B.H1	-4	110	13	58	42	0	0
B.H2	-18	137	24	67	27	0	7
B.H3	-37	70	36	0	50	38	13
B.H4	-54	100		100	0	0	0
BBC.H1	-8	82	5	0	58	42	0
BBC.H2	-23	102	43	17	50	30	3
BBC.H3	-40	100		100	0	0	0
BC.H1	-5	108	5	74	26	0	0
BC.H2	-27	97	17	74	26	0	0
BC.H3	-52	134	30	71	21	4	4
BC.H4	-60	100		100	0	0	0
BCC.H1	-9	84	7	94	6	0	0
BCC.H2	-30	76	25	74	21	5	0
BCC.H3	-46	100		100	0	0	0
C.H1	-8	54	22	92	8	0	0
C.H2	-25	53	57	94	6	0	0
C.H3	-47	60	31	80	4	16	0
C.H4	-69	102	8	95	0	5	0
C.H5	-95	100		100	0	0	0
CD.H1	-5	83	27	3	23	63	10
CD.H2	-19	92	43	0	17	74	9
CD.H3	-41	100		100	0	0	0

TAB. 7.1: Tableau récapitulatif des comparaisons granulométriques

Le calcul de distance, ou « Ecart », indique que seul un horizon de ABB a un $E_b > 60$ (seuil inférieur d'hétérogénéité), il est donc nettement hétérogène dans le profil. Les autres fosses de l'IAS sont donc plutôt homogènes, même si certains horizons supérieurs, comme AAB.H1, AB.H2, BBC.H2 ou C.H2, ont des écarts pour lesquelles cette homogénéité n'est pas franche.

L'ensemble des fosses présente donc globalement une homogénéité le long des profils, tout en montrant une certaine dissemblance entre les horizons de surface et le c_{3a} . Comme dans le cas des fosses de la lithotoposéquence, nous sommes en présence de fosses où la signature du substrat ne se retrouve que partiellement dans les horizons supérieurs. Le calcul de distance permet de cibler en partie où se trouve ce hiatus sans répondre intégralement. Les interrogations restantes devraient être levées à l'aide des estimations granulométriques de mélanges. Ce calcul a aussi été appliqué sur les fosses homogènes et dont la ressemblance avec le matériau sous-jacent a été déterminée afin de vérifier l'absence d'apports.

7.1.2 Estimation des mélanges granulométriques dans les horizons

L'étude de la granulométrie faite au chapitre 6 a permis de constater la présence de pics caractéristiques de 3 substrats. Rappelons que ces substrats ont une mobilité potentielle et que nous partons de l'hypothèse que certains horizons sont issus de mélanges. Les résultats du calcul de mélange se trouvent dans les quatre dernières colonnes du tableau 7.1. Une coupe schématique et synthétique est aussi présentée à la figure 7.1. Sur dix solum, deux, CD et BBC, comportent des horizons de surfaces pour lesquels la craie c_{3a} n'intervient pas dans le mélange ; AB n'en contient que peu et les sept autres en ont dans des proportions variables. Les solum BCC et C sont composés à plus de 90 % du matériau de fond de fosse. C, sur la crête, est profond alors que BCC, en bord de convexité, est peu profond. Les horizons superficiels de l'ensemble des autres solums sont tous issus de mélange ; l'épaisseur, la profondeur et la composition du mélange sont variables.

Les fosses les plus extrêmes géographiquement, CD et ZA, comportent plus de 70 % de matériau du c_{3a} , dès la surface et sur 30 cm pour CD, et vers 30 cm et sur 50 cm pour ZA. A l'opposé, ABB, BC, BCC et C ne contiennent pas ou peu de c_{3a} . Entre ces deux pôles, AAB en est constitué pour moins de 20 %, avec une diminution en fonction de la profondeur jusqu'à ne plus en contenir après 60 cm. Les horizons des trois derniers solum, BBC, B et AB, en contiennent 35 %, et ce, dès la surface et sur 30 cm pour BBC, mais seulement à partir de 30 cm pour B et AB.

Les sables du c_4 sont présents dans tous les autres solum dans des proportions diverses, avec une croissance du bas vers le haut des profils. CD et BC, qui encadrent BCC et C, en ont 25 % ; la craie c_{3a} plus ou moins altérée est atteinte dès 40 cm dans CD et vers 60 cm dans BCC.

En descendant plus au Sud et sur les flancs d'un talweg ouvert, BBC et AB contiennent 55 % de sables du c_4 ; la craie apparaît vers 40 cm dans BBC, le plus au Nord, et vers 90 cm dans AB.

Entre ces deux solums, nous trouvons B et ABB. B contient 40 % de sables c_4 et la craie est atteinte vers 50 cm. ABB est le solum dont les horizons superficiels semblent contenir le plus de sables c_4 avec 60 %, tout étant le moins épais avec une craie à moins de 40 cm. Plus au Sud et remontant sur le second flan du talweg, les horizons superficiels de AAB sont constitués de 15 % en subsurface à 50 % de sables c_4 vers 50 cm. La craie est atteinte

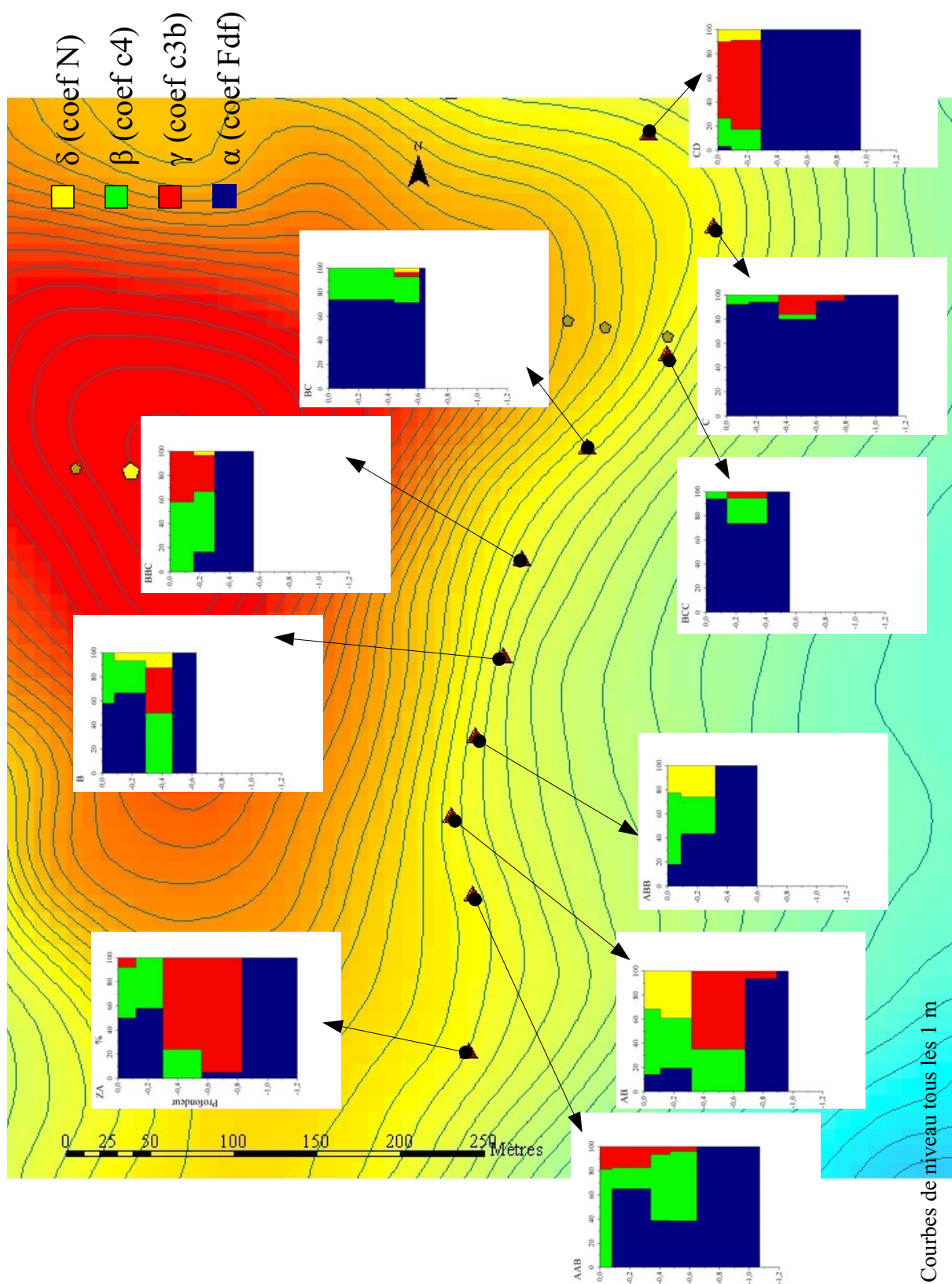


FIG. 7.1: Coupe en long de la partie Sud de l'isoaltiséquence

0 70 cm.

Enfin, le plus au Sud, sur un léger replat morphologique, ZA contient autour de 40 % de sables, avec une craie vers 90 cm.

Comme en nappage, les sables éoliens (N) viennent s'ajouter au mélange de certains horizons. Ainsi, CD et B en contiennent entre 10 % et 15 % , dès la surface ou subsurface, ABB et AB plus de 20 % dès la surface.

7.2 Discussion

Les trois faces des solum ont été examinées dans le but d'observer d'éventuels litages ou traces de construction de mise en place. Or, rien de ceci n'apparaît, les horizons paraissent homogènes à l'échelle de la structure. L'hypothèse de mélange de différents matériaux est donc possible.

(1) les sables du c_4 semblent être colluvionnés presque partout, dans des proportions qui peuvent être importantes (jusqu'à 80 % dans certains solum), et ce, jusqu'à la profondeur du dernier horizon de sol *s.s.*, quelle que soit la profondeur d'apparition de cet horizon C/R.

(2) les solum BCC et C ne sont quasiment pas affectés par le mélange. Ils se trouvent en position convexe, tout en étant relativement profonds (> 50 cm). Il n'est pas possible de dire si l'absence d'apport est due à une absence de dépôt ou à une érosion postérieure à un premier dépôt. La convexité horizontale pourrait suffire à exclure les apports depuis l'amont.

(3) si dans la LTS, le c_{3b} n'expliquait pas la granulométrie présente, il semblerait qu'ici ce matériau soit nécessaire à la compréhension de la granulométrie. La profondeur des fosses ne semble pas importante, pas plus que la profondeur d'apparition du c_{3b} .

(4) il semblait peu probable de trouver du N si haut. Or, il y en a vraisemblablement. La morphoscopie des sables (*cf.* paragraphe 5.1.2) ne permet pas de confirmer cette hypothèse, elle permet seulement d'indiquer une tendance à l'éolisation des grains (*cf.* chapitre 5.1.2), la distance parcourue entre le point de départ et le site d'arrivée n'étant pas suffisante à l'érosion éolienne pour donner une forme caractéristique. De surcroît, le N n'apparaît pas partout mais seulement dans trois solum, AB, ABB et CD, situés soit au milieu soit en bord de talweg, mais toujours sur des pentes orientées vers le N-E. Il est à noter que les vents dominants sont orientés Sud-Ouest.

(5) les solum ABB à BC (du Sud au Nord) sont dans un talweg ouvert. Celui-ci agit en érosion puisque les sols ne sont pas très épais, mais il agit aussi en accumulation puisqu'il y a mélange de matériaux au sein des horizons superficiels. Dans la mesure où ils se trouvent sur des pentes fortes, il peut n'y avoir qu'un simple transit des matériaux dans ces horizons superficiels.

(6) le solum ZA semble anecdotique, mais il reste intéressant à observer. En effet, sur le terrain, il apparaît comme un solum « anormal » : presque artificiel jusqu'à 40 cm, profondeur à laquelle apparaît un alignement de cailloux gréseux qui semble marquer une délimitation, avec des horizons paraissant issus des sables argileux et glauconieux du c_{3b} , il montre un horizon d'altération de la craie Tuffeau (c_{3a}) en fond de fosse. Or, s'il semble présenter des apports anthropiques manifestes, ceux-ci sont montrés quasiment à l'identique par le calcul de mélange. Ce solum anecdotique permet donc de valider la méthode de calcul des mélanges puisque des faits théoriques convergent vers ceux observés sur le terrain.

(7) les matériaux du c_{3b} sont présents dans de nombreux solum de l'isoaltiséquence, alors que qu'ils ne se retrouvent pas vraiment dans la lithotoposéquence. L'IAS est située à la limite des deux couches. Comme l'altération de la craie n'est pas homogène et peut créer des irrégularités, la limite avec le c_{3b} est proche et plutôt ondulé. Il est donc possible que les éléments du c_{3b} aient simplement une origine sédimentaire de dépôt, qu'ils n'aient donc pas été apportés *per descendum* mais soient en place.

7.3 Conclusion

L'étude de la LTS, chapitre 6 a permis de mettre en évidence l'influence des matériaux géologiques et la possibilité de mélange de ces matériaux. Cette LTS ne représente toutefois qu'une vision 2D du paysage. Pour passer du 2D au 3D, en restant dans la continuité de cette analyse de l'organisation spatiale des sols, nous avons appliqué les mêmes méthodes le long d'une isoaltiséquence, choisie pour sa position dans le système de versants.

Les matériaux parentaux présentant des granulométries contrastées (*cf.* chapitre 6), il est possible d'émettre des hypothèses d'origine et de mélanges en ce qui concerne les horizons de cette isoaltiséquence :

- (1) les sables du c_4 semblent être colluvionnés en de nombreux endroits sur des profondeurs notables de sol ;
- (2) le matériau c_{3b} , difficile à déceler sur le terrain, se retrouve de façon inattendue dans les mélanges des horizons supérieurs et parfois en fond de fosse. Ceci montre soit le caractère ondulatoire de cette couche géologique, soit un apport par transfert le long de la pente, comme pour les sables c_4 , ou *per descendum* ;
- (3) le talweg fonctionne et en érosion et en apport puisque se retrouvent des recouvrements de c_4 sur les matériaux identifiés en fond de fosse ;
- (4) la croupe, à pente régulière et relativement plus faible, donc *a priori* plus stable, ne fonctionne ni en apport ni en érosion, laissant la possibilité aux sols de se développer.
- (5) des apports éoliens apparaissent en mélange dans des proportions assez faibles, mais plutôt situés sur les faces Est-Nord-Est.

Cette isoaltiséquence permet de visualiser l'effet de l'orientation de la pente sur une organisation des sols. Ainsi, la séquence de sols, définie lors de l'étude de la lithotoposéquence, peut avoir des variantes par troncatures ou ajout de nouveaux types de sols. Ces variations dépendent de l'orientation de la pente, mais aussi de son intensité, ainsi que de la forme concave ou convexe de la pente au point d'observation et de mesure.

Conclusion : les apports des réflexions sur les lithotoposéquence et isoaltiséquence

Lors de l'étude qui privilégiait les mesures granulométriques détaillées, le long d'une lithotoposéquence en contexte géologique sédimentaire, nous avons, d'une part, mis en évidence l'homogénéité/hétérogénéité des sols ainsi que leurs caractères autochtones ou allochtones. Pour ce faire, nous avons utilisé deux indicateurs, basés sur le squelette granulométrique, de ressemblance entre deux horizons, soit le ratio r (rapport S_g/S_m), soit la distance granulométrique de toutes les fractions du squelette (E_b). Ces deux indicateurs sont complémentaires, avec des méthodes mathématiques et des significations propres à l'un et à l'autre. D'autre part, ces mêmes mesures granulométriques ont permis d'identifier et de caractériser les matériaux parentaux présents sur le site, ceux-ci présentant des granulométries contrastées.

Ces signatures granulométriques, couplées aux indicateurs granulométriques, ont permis d'émettre des hypothèses quant à l'origine et au mélange des matériaux parentaux dont sont issus les horizons des différents sols. Le modèle de mélange fait sortir des conclusions cohérentes avec celles de la bibliographie. En l'occurrence, il montre et quantifie :

- (1) que les pentes fortes ne sont pas sujettes à l'accumulation de matériaux allochtones ;
- (2) que des sols relativement profonds peuvent se développer sur ces mêmes pentes si le matériau est suffisamment poreux et infiltrant ;
- (3) que les ruptures de pentes reçoivent les colluvions, mais peuvent aussi être le réceptacle d'autres matériaux (type éolien) ;
- (4) que la plaine, si elle n'est pas soumise aux effets des colluvions, peut être le produit d'autres apports allochtones, type apports d'origine éolienne.

D'une façon plus générale, et malgré la pente relativement faible, nous montrons que les redistributions latérales sont susceptibles d'influencer très fortement la composition des sols.

Dans la continuité de cette analyse de l'organisation spatiale des sols, nous avons, le long d'une isoaltiséquence, appliqué les mêmes méthodes, soit de caractérisation en terme d'homogénéité, soit de mélange. Les résultats permettent de visualiser et d'estimer l'effet de l'orientation de la pente sur l'organisation des sols. En outre, le modèle de mélange, appliqué à l'IAS, permet de montrer :

- (1) que les sables du c_4 semblent colluvionner en de nombreux endroits sur des profondeurs notables de sol ;
- (2) que le talweg fonctionne et en érosion et en apport ;
- (3) que la crête ne fonctionne ni en apport ni en érosion, laissant la possibilité aux sols de se développer.

Ainsi, la séquence de sols, définie lors de l'étude de la lithotoposéquence, peut avoir des variantes par troncatures ou ajout de nouveaux types de sols. Ces variations dépendent de l'orientation de la pente, mais aussi de son intensité, ainsi que de la forme concave ou convexe de la pente au point d'observation et de mesure.

Il apparaît donc souhaitable, dans le cadre d'étude d'organisation des sols, de travailler autant dans le sens des pentes qu'à la perpendiculaire pour obtenir une vue tridimensionnelle de la zone d'étude.

Quatrième partie

Représentation des connaissances sur la distribution des sols

Introduction

Il y a parfois confusion entre les deux activités qui constituent un travail de cartographie des sols. Ces deux activités sont :

- (1) l'analyse de la distribution des sols dans l'espace ;
- (2) leur représentation sur un document cartographique (Girard *et al.*, 1989). L'informatique, au travers des S.I.G., apporte des moyens à ces deux activités.

Une carte pédologique est un « modèle » de représentation de la réalité (King, 1984). De façon traditionnelle, elle est conçue selon le modèle choroplète constituant un découpage de l'espace en Unités Cartographiques de Sols (U.C.S.) juxtaposées. Ces U.C.S. incluent une ou plusieurs Unités Typologiques de Sols (U.T.S.) selon la complexité et le degré de compréhension du milieu, et les limites imposées par l'échelle de représentation. Une telle carte jouait en pratique deux rôles complémentaires : un rôle de mémorisation de l'information et un rôle de transmission vers un lecteur potentiel. Mais il était difficile de vouloir à la fois tout conserver et tout transmettre.

C'est pourquoi le message graphique que constituait la « carte papier » était classiquement complété dans les notices explicatives par de nombreuses autres informations telles que la succession et l'épaisseur des horizons, les données analytiques relatives à ces horizons, les illustrations qui explicitaient ce qui ne pouvait figurer sur la carte elle-même : l'organisation des sols et des horizons le long d'un versant (toposéquences), ou bien la répartition selon trois dimensions au sein des paysages (blocs-diagrammes). Des schémas montraient comment des phénomènes continus et progressifs sont artificiellement tronçonnés par le modèle cartographique en éléments discrets, par exemple un versant découpé en unités cartographiques.

La carte papier ainsi construite et publiée demeurait un schéma statique de la nature et de la répartition des différents types de sols. En outre, les diverses options prises pour construire cette carte se trouvaient méconnues du lecteur et définitivement figées.

De nombreux problèmes relatifs aux couvertures pédologiques nécessitent de prendre en compte des aspects dynamiques et fonctionnels (ruissellement superficiel, écoulements des eaux vers les aquifères, pollution par les nitrates). Aussi commence à se faire jour la notion d'unité de fonctionnement, fragments de paysage dont on connaît la structure en termes d'organisation et de fonctionnement et qui peuvent regrouper plusieurs unités typologiques et même plusieurs unités cartographiques.

Ainsi, la structure logique emboîtée – horizon / unité typologique / unité cartographique / unité de fonctionnement – est la base de l'analyse spatiale morphologique et fonctionnelle des couvertures pédologiques. Les bases de données pédologiques informatisées et les systèmes d'information géographique (S.I.G.) sont adaptés à cette structure.

Depuis quelques années, en effet, les techniques informatiques ont bouleversé non seulement nos possibilités d'expression cartographiques, mais aussi notre conception même de la gestion des données pédologiques. Les très nombreuses informations recueillies sur le terrain pour la « cartographie des sols » n'ont plus besoin d'être publiées sous la forme d'une carte pédologique. Il suffit d'établir, puis de mettre à jour régulièrement, une base de données dont on peut tirer, à chaque fois que nécessaire, les informations présentées sous une forme graphique à n'importe quelle échelle. Il est ainsi proposé d'établir non plus une carte mais un Modèle d'Organisation Spatiale des Sols (M.O.S.S. (King *et al.*, 1994)) qui reprend la représentation choroplète de la carte pédologique classique tout en étendant les possibilités de mémorisation et de visualisation des informations (King, 1984).

Les S.I.G. présentent en effet des avantages précieux, car ils sont capables à la fois de mé-

moriser la totalité de l'information disponible et de faciliter l'accès aux informations utiles : ils contiennent non seulement une base de données, mais aussi une base de connaissances ; les possibilités de description des organisations spatiales sont beaucoup plus larges ; les Modèles d'Organisation Spatiale des sols peuvent évoluer avec les progrès des connaissances générales et les données être régulièrement et aisément mises à jour ; il n'y a plus de contrainte graphique lors de l'élaboration d'un M.O.S.S. ; les changements d'échelle sont aisés, même si le problème de la densité et de la fiabilité des données de base reste posé ; des restitutions sur des thèmes appliqués (« cartes thématiques ») sont réalisables rapidement.

Jusqu'alors, les documents cartographiques élaborés présentaient certes un grand nombre d'informations, mais étaient difficiles à croiser avec d'autres données spatialisées. Grâce aux S.I.G., il est désormais possible de croiser des données pédologiques avec d'autres données spatialisées (géomorphologie, télédétection spatiale, climat, socio-économie). Enfin, à l'aide de modèles de fonctionnement (hydrologiques, croissance de telle plante), il est possible de procéder à des simulations selon divers scénarios.

En même temps, Boulaine (1980) a justement insisté sur la distinction claire qu'il convenait de faire entre le domaine du réel, le domaine des images que nous nous forgions de ce réel et le domaine des concepts.

Bui (2004) montre l'écart qui existe entre le modèle que le pédologue se fait du terrain et la carte, qui reste un modèle simplifié, couplée à une indispensable légende.

D'où la disjonction nécessaire entre le domaine de la taxonomie (domaine typologique) et celui de la cartographie (domaine spatial). De ces réflexions résultèrent des attitudes nouvelles vis-à-vis des problèmes de taxonomie pédologique, et un rôle majeur fut désormais dévolu aux horizons, considérés à la fois comme des volumes réels et des unités élémentaires d'échantillonnage et de modélisation.

A partir de 1990, le système DONESOL s'imposait en France comme modèle pour la description des observations ponctuelles (sondages ou fosses pédologiques) et des entités spatiales que sont les unités typologiques ou cartographiques de sols. Ce système a été repris en 1993 par le Bureau Européen des Sols dans son manuel de référence pour l'élaboration d'une base multi-échelles au niveau européen.

Malgré les progrès accomplis par l'utilisation des S.I.G. et la formalisation de la description de la couverture pédologique à l'aide d'un M.O.S.S., il reste des domaines insuffisamment approfondis pour pouvoir transmettre les connaissances pédologiques expliquant les lois de distribution des sols sur un territoire. En effet, le M.O.S.S., comme la carte pédologique, fournit des informations géographiques sans expliciter les raisons ayant conduit à l'identification des U.T.S. et à leur regroupement en U.C.S.. De plus, les travaux relatifs à la description quantitative des U.T.S. au sein des U.C.S. et à leur localisation, même imprécise, restent peu nombreux.

L'objectif de cette dernière partie IV est de proposer des compléments au modèle DONESOL utilisé pour le programme I.G.C.S. et, plus généralement, à toute formalisation de l'organisation spatiale des sols sous la forme d'un M.O.S.S. (King *et al.*, 1994).

Il s'agit d'un objectif finalisé comprenant trois points :

- (1) formalisation du modèle conceptuel en amont du modèle choroplète ;
- (2) explicitation du modèle choroplète à partir des hypothèses pédogénétiques formulées ;
- (3) modélisation de la localisation des unités sols à l'aide d'indicateurs aisément accessibles.

Chapitre 8

Modèle de représentation conceptuelle

Introduction

Dans le cadre d'une cartographie la plus complète possible, la première étape qui suit les levés de terrain est la formalisation des différentes hypothèses au travers de l'établissement de modèles conceptuels. Ici sont présentés deux types de modèles basés sur les processus pédogénétiques mis en évidence dans la compréhension de la différenciation spatiale des sols et ses potentielles origines. Nous présentons tout d'abord l'hypothèse d'une pédogenèse polyphasique issue des résultats de l'analyse de la lithotoposéquence. Nous complétons ensuite cette analyse par les travaux issus de l'isoaltiséquence et la visualisation tridimensionnelle des phénomènes.

Pour des raisons de temps, nous avons concentré notre analyse sur une sous-zone correspondant aux bas de pentes délimitant la butte sénonienne.

8.1 Une pédogenèse polyphasique

L'ouverture de fosses a permis de découvrir une succession de couches peu commune. La figure 8.1 montre un exemple de fosse dans laquelle se trouve cette succession. Ainsi, la surface (1) est limono-sableuse et calcaire. Elle repose sur un horizon (2) non calcaire, argileux, structuré et comportant des revêtements argileux. C'est un horizon BT/Béta qui a été identifié *in situ* puis par l'analyse de lames minces (*cf.* 5.1.1). Enfin, le tout recouvre la craie Tuffeau c_{3a} localement altérée (3).

Selon J.-P. Legros et P. Curmi (communications personnelles), les sols calcaires ne devraient pas exister sous nos latitudes (françaises). Il a fallu l'anthropisation des sols, avec la mise en culture, pour assurer la recarbonatation de ces sols. En effet, si la culture se fait sur des sols peu épais, le passage d'engins tel que des charrues ou chisels pour le travail de la terre, peut toucher le substrat, et ainsi le faire remonter en surface. Ce substrat, fragilisé par l'altération mécanique, est alors plus facile à dissoudre par les eaux de surface ou de subsurface. Celles-ci le transportent un peu plus bas sous forme micro-particulaire voire ionique, d'où des carbonates en faible quantité (au niveau des analyses) mais hyper-

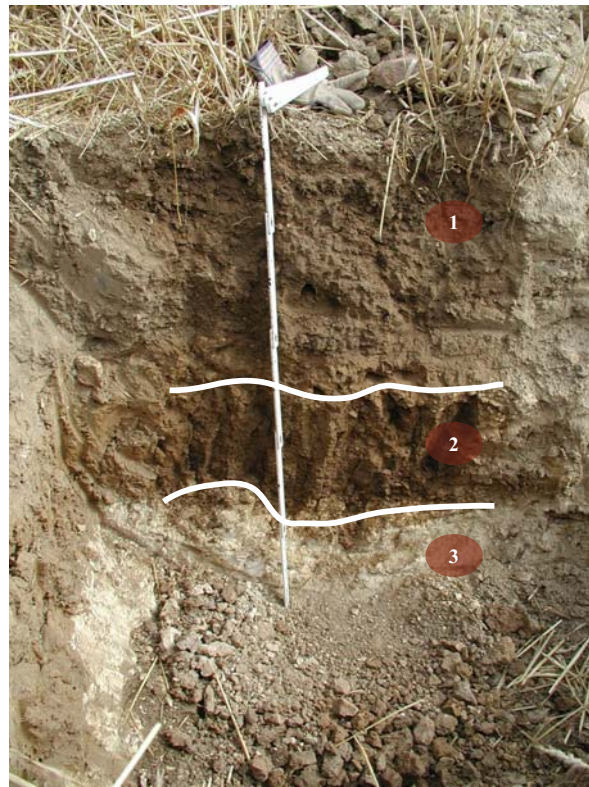


FIG. 8.1: Exemple de CALCOSOL présentant un horizon BT

réactifs (particules très fines et facilement altérables chimiquement). Ce phénomène peut alors être à l'origine d'une recarification des sols. Dans le cas qui nous concerne, ceci expliquerait la présence simultanée d'horizons superficiels calcaires et limono-sableux reposant sur un horizon BT en profondeur.

Nous avons donc une couverture limono-sableuse calcaire sur un horizon BT développé sur le Tuffeau, soit un CALCOSOL avec un horizon BT. Ceci pourrait s'expliquer par une évolution/pédogenèse en trois étapes. Nous en avons imaginé deux scénarios pour lesquels les divergences se situent principalement dans l'ordre des étapes.

8.1.1 Premier scénario

Dans ce premier scénario, le matériau, c_4 très sableux, présent sur le plateau, colluvionne en domaine péri-glaciaire, lieu où la végétation était peu présente et peu limitante du colluvionnement (fig. 8.3). Suit une période post-glaciaire, période propice au développement d'une végétation de type forestière (chênaie, hêtraie) avec décarbonatation, brumification puis lessivage en raison de précipitations et températures plus élevées. Il se forme alors un LUVISOL (fig. 8.4) à dominance sableuse en surface. Enfin, l'humain arrive, déforeste et met en culture les sols, faisant remonter le substrat calcaire qui se redistribue en aval proche (fig. 8.5).

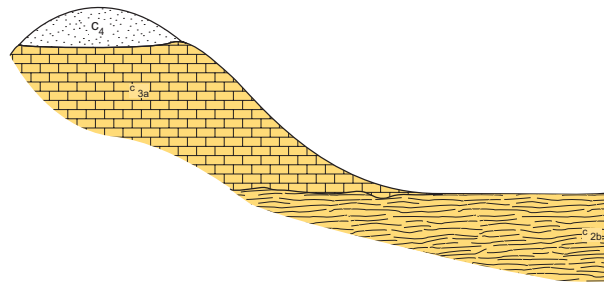


FIG. 8.2: Etat pseudo-initial précédant la pédogenèse

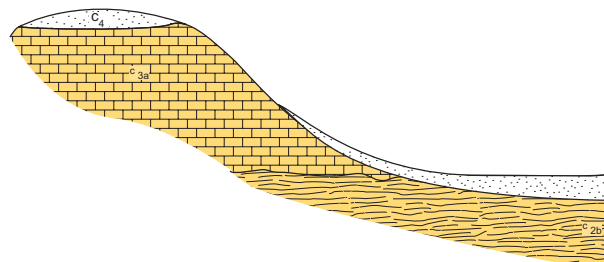


FIG. 8.3: Scénario 1, étape 1 : colluvionnement du sable sénonien en l'absence de végétation

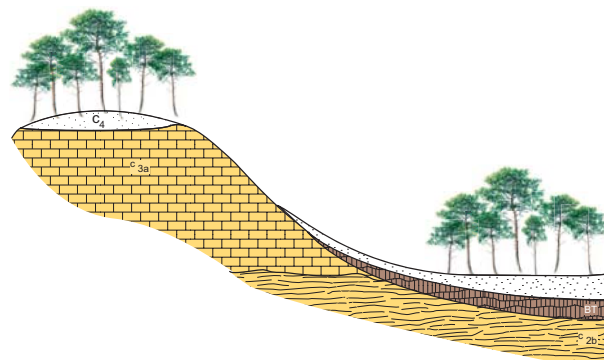


FIG. 8.4: Scénario 1, étape 2 : décalcarification, puis formation de LUVISOL sous une végétation forestière

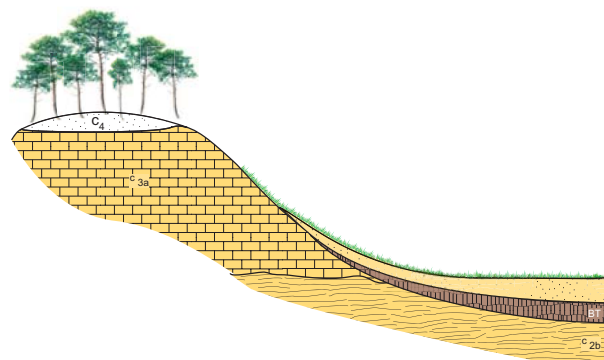


FIG. 8.5: Scénario 1, étape 3, sub-actuelle : mise en culture avec recarbonatation de la surface

8.1.2 Deuxième scénario

Il est toutefois possible d'imaginer les différentes étapes dans un ordre quelque peu différent.

Dans ce deuxième scénario, le sol commence à se former à une période post-glaciaire, sous une végétation de type forestière (chênaie, hêtraie) propice à la décarbonatation (*cf.* fig.8.7). Dans la continuité, brunification puis lessivage ont pu avoir lieu en raison de pluviométrie et température plus élevées. Il se forme alors un LUVISOL. Lors de la deuxième étape (*cf.* fig.8.8), la végétation forestière migre vers le plateau, par exemple lors d'un réchauffement climatique en période glaciaire. Sans végétation le protégeant, le LUVISOL est alors tronqué et le BT apparaît près de la surface. Enfin, en période post-glaciaire sub-actuelle (troisième étape, fig. 8.9), l'aménagement du territoire, avec gestion des forêts et mise en culture des champs, entraîne le colluvionnement et une recarbonatation de la surface.

8.1.3 Premier ou deuxième scénario ?

Les deux scénarios ainsi présentés, il faut définir lequel semble le plus vraisemblable. Dans l'hypothèse où la pédogenèse s'est effectuée selon le scénario 1 (8.1.1), il devrait exister un lien génétique entre la surface plus sableuse et l'horizon BT.

Dans l'hypothèse où la pédogenèse s'est effectuée selon le scénario 2 (8.1.2), le BT et le C/R seraient pédogénétiquement proches, et différents de la surface.

Toutefois, l'horizon argileux peut aussi être à l'intersection entre accumulation des argiles de l'amont et altération de la craie sous-jacente. En effet, les analyses granulométriques effectuées avec décarbonatation sur les échantillons prélevés dans la craie montrent autour de 40 % d'argiles, les impuretés de la craie c_{3a} semblent être principalement de l'argile.

Le modèle de mélange (*cf.* chapitre 6) indique, pour les fosses de la LTS (principalement F4 et F5) qu'il existe un lien génétique entre le BT et le substrat calcaire sous-jacent (craie c_{3a} ou marnes c_{2b}), avec toutefois une possibilité de léger mélange. Le scénario le plus probable reste donc le deuxième. Pour confirmer, il pourrait être intéressant de compléter par l'étude de métaux lourds () ou par l'étude de chronoséquences (Egli *et al.*, 2001). Certains utilisent le ^{14}C pour dater le carbone des plantes du sol (Guillet *et al.*, 1988), pourquoi ne pas utiliser cette méthode pour dater les différents horizons de ces sols, ceux-ci contenant *a priori* suffisamment de C pour cette méthode ? Markewich *et al.* (1998) utilisent aussi des éléments comme TL, ^{10}Be ou le ^{14}C comme traceurs temporels. Même si l'échelle de temps qui les concerne reste ante-Würm, ces traceurs pourraient éventuellement s'appliquer sur la zone d'étude. Une autre possibilité est la datation par les minéraux magnétiques (Rankey et Fan, 1997).

8.2 Visualisation tridimensionnelle des phénomènes

La figure 8.10 synthétise graphiquement certaines des conclusions obtenues après l'étude de la LTS et de l'IAS. Ce bloc diagramme représente les zones de mélange où de dépôts de matériaux par colluvionnement et/ou par apport éolien.

Sur la croupe (rose), il est apparu que les sols étaient des CALCOSOLS de près d'un mètre de profondeur, sans apport de quelque sorte que ce soit (*cf.* fig.7.1). C'est le seul endroit où apparaissent ces sols.

Dans le talweg, les sols ont reçu et reçoivent des apports de sables c_4 . Ces sables recouvrent

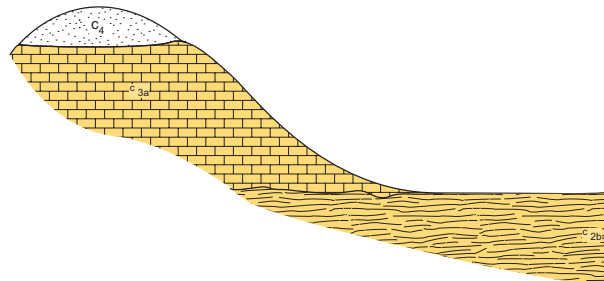


FIG. 8.6: Etat pseudo-initial précédant la pédogenèse

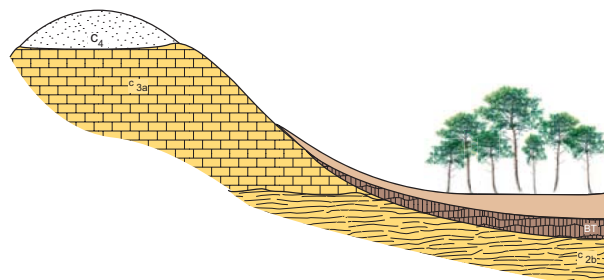


FIG. 8.7: Scénario 2, étape 1 : formation d'un LUVISOL

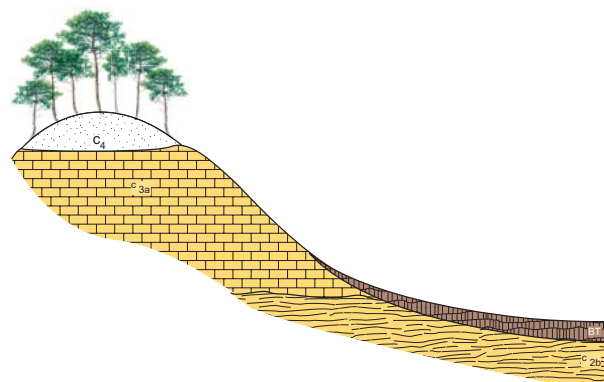


FIG. 8.8: Scénario 2, étape 2 : troncature du LUVISOL, le BT apparaît en surface

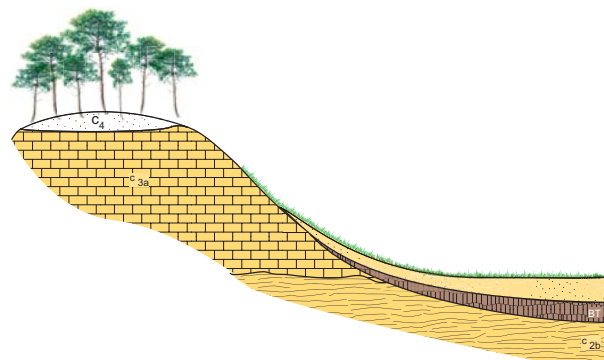
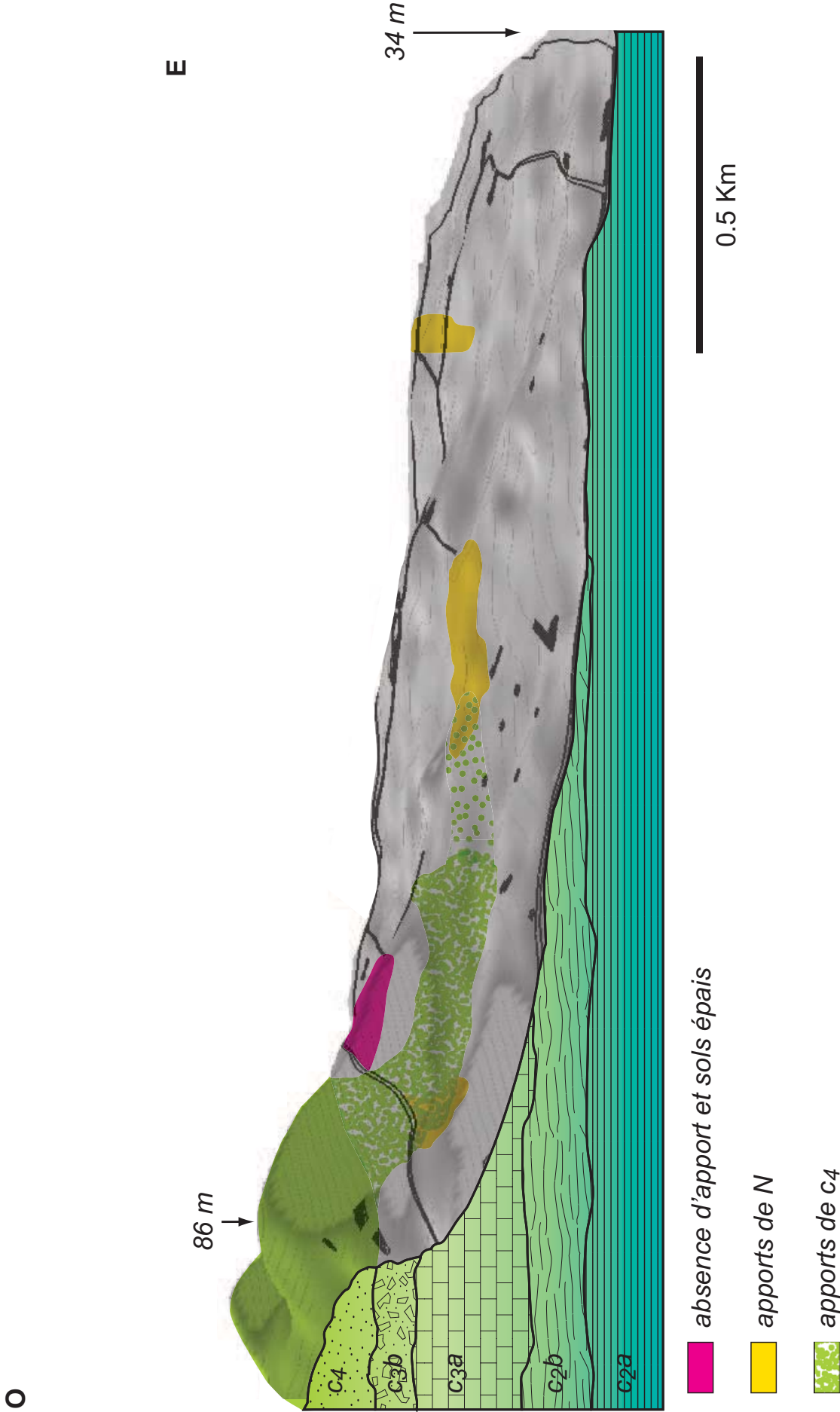


FIG. 8.9: Scénario 2, étape 3, sub-actuelle : colluvionnement et mise en culture qui entraîne une recarbonatation de la surface

une grande partie du talweg ainsi qu'une partie de la plaine cénomaniennne c_{2b} , en aval. Cette plaine semble être le lieu de rencontre entre ces sables c_4 et les sables N ; c'est ce qu'il ressort du modèle de mélange. Les horizons supérieurs des fosses de cette zone - F5 et F6 - sont composés du mélange de c_4 et de N (*cf.* fig. 6.3). Les sables N semblent se situer dans le prolongement des apports de sables c_4 . Ils sont toutefois plus discontinus et ne se retrouvent qu'un peu plus loin, dans la plaine c_{2a} . Une troisième tache se voit en amont, sur le flanc Nord-Est du talweg précédent. Ici, les sables c_4 se mélangent aux sables N.

Les sables c_4 ont coulé dans le talweg et couvrent une bande de quelques dizaines de mètres de larges sur une longueur d'un tiers du terrain. L'orientation de cette bande est Ouest/Est. D'orientation Sud-Ouest/Nord-Est, le vent dominant a créé une bande discontinue de sables N. La croupe, face au Sud-Est, n'est concernée par aucun apport allochtone, et supporte des sols profonds issus du matériau sous-jacent en place.

Nous constatons ainsi que les différents phénomènes d'apports n'influencent pas de façon homogène les compositions des sols de cette zone d'étude. Il est donc important de procéder à un examen tridimensionnel des secteurs de travail.



Chapitre 9

Explicitation du modèle de représentation choroplète : Détermination des U.C.S.

Dans un modèle choroplète, le cartographe tente de présenter la répartition spatiale de chaque unité typologique sur un fond topographique de carte. Le *nec plus ultra* est de délimiter des unités cartographiques de sols (U.C.S.) simples, *i.e.* correspondant chacune à une seule unité typologique de sols (U.T.S.). Malheureusement, le cartographe est souvent contraint de présenter sur sa carte des U.C.S. complexes rassemblant plusieurs U.T.S. différentes. Elle est alors le résultat d'associations ou de juxtapositions d'unités, de séquences, de chaînes ou de combinaisons de sols (Boulaine, 1980), comme, par exemple, dans le cas des plateaux calcaires bourguignons (Chrétien *et al.*, 1993). Les deux contraintes majeures sont :

- (1) d'ordre graphique. Une trop petite échelle de publication de la carte ne permet pas de représenter séparément des unités spatiales trop petites ;
- (2) d'ordre conceptuel. La densité d'informations fournies par les observations ainsi que l'état des connaissances du moment ne permettent pas de comprendre la complexité du milieu étudié.

L'objectif est alors de regrouper les U.T.S. en U.C.S. de telle sorte que la représentation cartographique, d'une part, reflète la compréhension des processus pédogénétiques mis en évidence, et, d'autre part, soit compatible avec l'échelle de compréhension, *i.e.* en cohérence avec la précision des informations disponibles pour délimiter et caractériser ces U.C.S..

Selon Rossignol (1981), l'étude de photographies aériennes, couplées à des missions de terrain, permet de définir des « unités de paysages ». Ces unités sont principalement basées sur des critères de proportions de sols profonds, d'associations de sols, de morphologie du paysage, de gradient de pentes et d'affleurements rocheux ou de pierrosité. Ceci est simplifié dans les régions à roche et végétation uniques, ce qui n'est pas le cas dans la région qui nous concerne.

Le choix de la détermination des U.C.S. est multiple. Il dépend entièrement des critères retenus par le cartographe pédologue. Nous illustrons ici trois choix possibles en insistant sur les raisons, souvent non-formulées, qui explicitent ces choix respectifs.

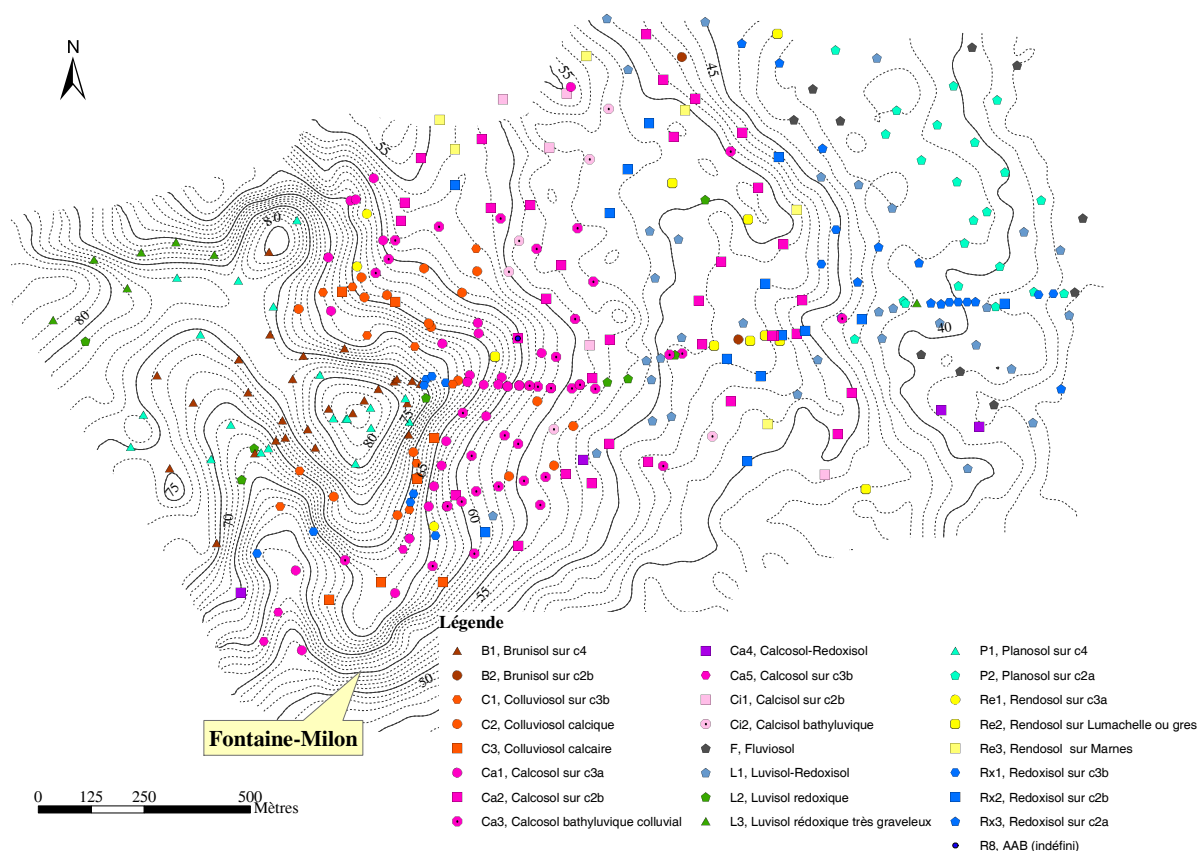


FIG. 9.1: Cartogramme de synthèse des typologies de sols présents

9.1 2 U.C.S. : modèle privilégiant la géomorphologie

Lors de la cartographie pour le 1/250000^{ème} (cf. fiches descriptives en annexe 11), deux U.C.S. ont été établies (fig. 9.2 et 9.3). Les traits géomorphologiques principaux ont été privilégiés. Ce choix présente l'avantage d'être aisément accessible grâce (1) aux cartes topographiques et/ou M.N.A. disponibles, et (2) à la logique sous-jacente existant entre le relief et les couches géologiques sub-horizontales de la petite région d'étude. En contre-partie, ce choix contient une difficulté de caractérisation des

Il est distingué, d'une part, une unité dite de « buttes et plateaux » et d'autre part une unité de « plaines ». Ces deux U.C.S. correspondent à des ensembles litho-géomorpho-pédologiques avec un paysage remarquable qui se reproduit de façon récurrente sur la feuille d'Angers.

L'unité de « plateau et butte » comprend, sur la partie sommitale, des sols acides majoritairement sableux (BRUNISOLS sableux et PODZOSOLS) et quelques PLANOSOLS. La pente est occupée par des sols calcaires plus ou moins profonds. Une localisation plus précise des différents types de sols est indiquée de façon qualitative dans la notice en cours de rédaction (Rossignol, à paraître).

L'unité de plaine cénomaniennne comprend des BRUNISOLS, des LUVISOLS, des REDOXISOLS et des sols calcaires plus ou moins épais. Leur répartition dans le paysage ne semblait pas suivre une logique décelable à cette échelle de travail.

L'établissement d'une carte des sols qui se base sur la carte géologique est soumise aux incertitudes des limites cartographiques inhérentes aux cartes géologiques référentes, à la

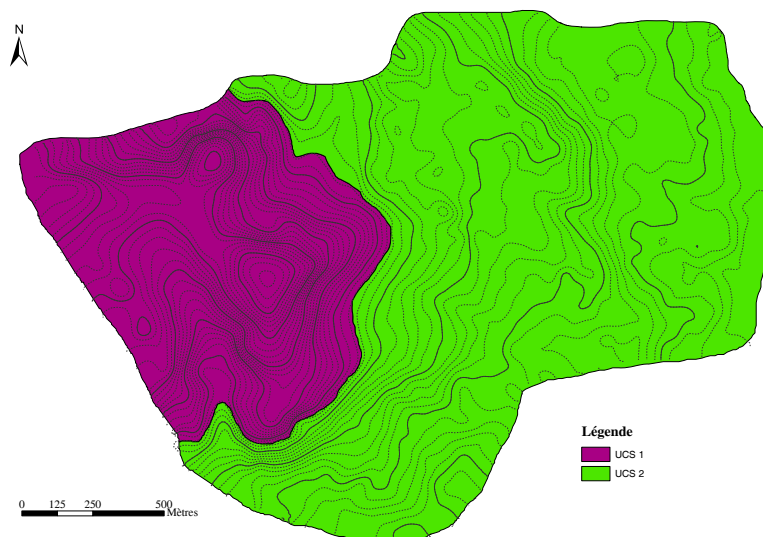


FIG. 9.2: Carte présentant les 2 U.C.S. telles qu'elles ont été préalablement définies

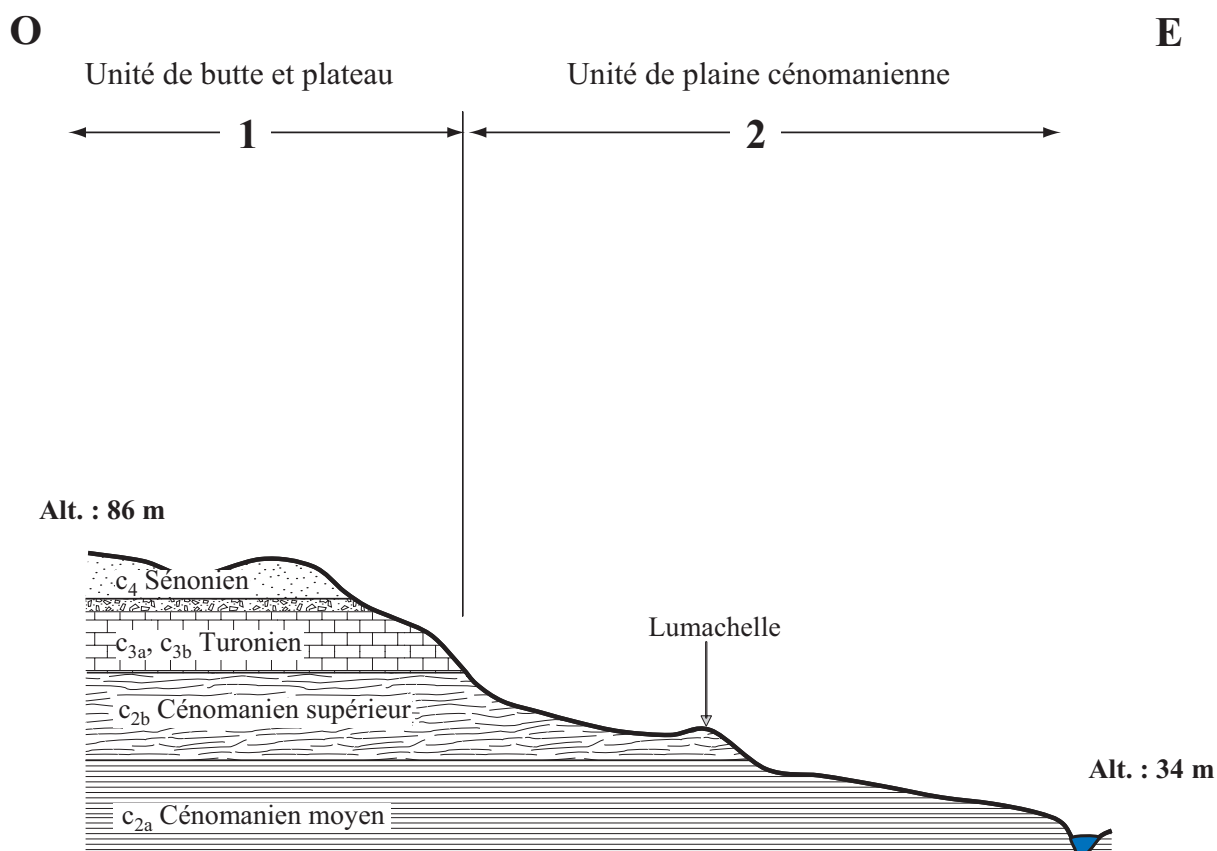


FIG. 9.3: Coupe schématique en long présentant les 2 U.C.S. telles qu'elles ont été préalablement établies

* Le Turonien supérieur étant une formation peu puissante et facilement érodable, il est peu fréquent de la rencontrer

variabilité des faciès et à la complexité de la mise en place des formations superficielles (apports allochtones, mélanges...).

9.2 3 U.C.S. : modèle privilégiant la lithologie comme indicateur

Dans ce modèle, les limites pédologiques s'appuient sur la morphologie du paysage mais aussi sur la lithologie, et principalement le caractère calcaire ou acide des sols. Ainsi, d'Ouest en Est (fig. 9.4 et 9.5), l'U.C.S. des sables sénoniens sur plateau se compose de sols à tendance neutres à acides - BRUNISOLS sableux, PODZOSOLS et PLANOSOLS -. Elle domine topographiquement une U.C.S. sur pentes et bas de pentes de sols majoritairement calcaires ou calciques sur craie du c_{3a} et marnes du c_{2b} . Enfin, l'U.C.S. de sols plus ou moins hydromorphes sur argiles sableuses dans la plaine du c_{2a} comprend des sols non-calcaires tels des LUVISOLS, des REDOXISOLS ou des PLANOSOLS.

Dans les chapitres précédents, nous avons montré que les sols restent fortement marqués par les substrats géologiques. Les limites des unités sont donc liées à la lithologie. Ainsi, la limite entre l'unité de plateau et l'unité de pentes se situe au niveau de la limite géologique située à la limite supérieure de la craie c_{3a} . Or, les couches géologiques sont sub-horizontales, cette limite est donc aussi une limite altitudinale.

La limite entre l'unité de sols calcaires et l'unité de sols hydromorphes de la plaine c_{2a} correspond à une limite géologique marquée par la lumachelle. Comme précédemment, les couches géologiques sont sub-horizontales, cette limite est donc aussi une limite altitudinale. Toutefois, il arrive que la lumachelle ne marque pas la limite entre le c_{2b} et le c_{2a} .

Ces limites sont fortement influencées par la géologie. Nous nous trouvons donc dans l'obligation de faire confiance à la carte géologique si nous souhaitons limiter les campagnes de terrain. Or, nous avons montré, dans le chapitre 4, que : (1) cette carte avait des incertitudes et (2) l'échelle et les méthodes de travail différaient de celles de la cartographie pédologique. Dans le cas qui nous concerne, les limites sont aussi des limites altitudinales, mais dans des cas de couches géologiques non-horizontales, il serait plus difficile de situer les limites des U.C.S.. Dans tous les cas, des vérifications de terrain s'imposent afin de préciser les limites lithologiques et leurs concordances avec l'altitude.

9.3 4 U.C.S. : modèle privilégiant des systèmes pédologiques

L'étude de la LTS (cf. chapitre 6) a permis la construction d'un modèle de mélange établi à partir d'analyses granulométriques. Celui-ci montre qu'il existe des transferts de matière qui jouent un rôle important sur l'évolution des sols et leur différenciations latérales, recouvrements et/ou mélanges qui sont des freins à la pédogenèse ou la réorientent. Ce constat invite à séparer la zone en 4 U.C.S. (fig. 9.7).

L'unité de plateau reste inchangée, elle est une zone de dépôts de matériaux.

La limite de l'unité de plaine reste inchangée. Ce n'est pourtant pas seulement sa morphologie qui la caractérise mais aussi la présence de recouvrements partiels par les sables éoliens (N).

Enfin, l'unité des sols calcaires est divisée en 2 unités. Une unité concernée par des apports

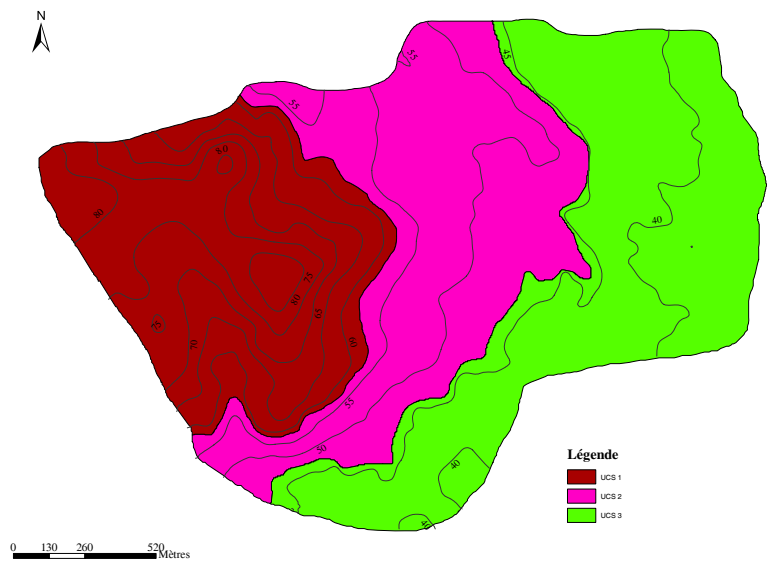


FIG. 9.4: Carte présentant 3 U.C.S.

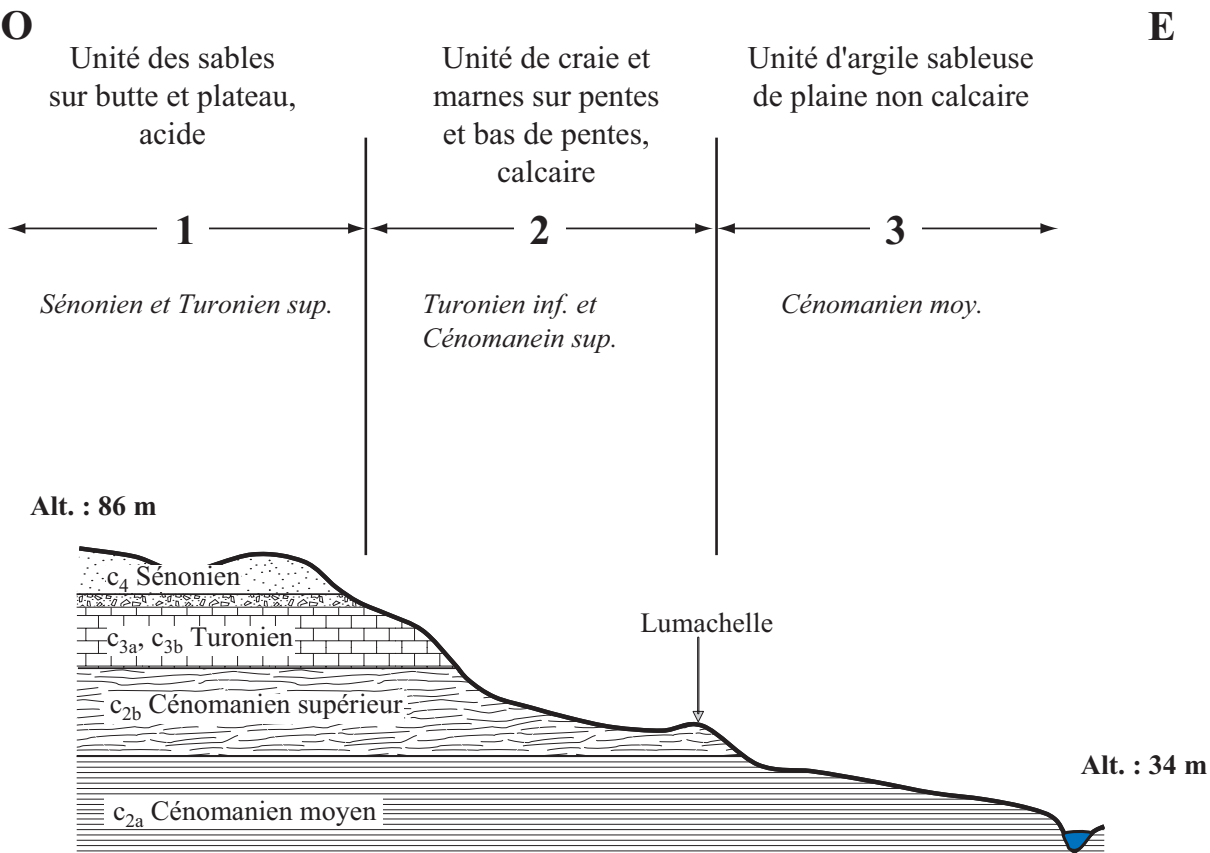


FIG. 9.5: Coupe schématique en long présentant 3 U.C.S.

en recouvrement ou en mélange de sables c_4 et une unité dans laquelle les sols reçoivent des sables c_4 et des sables N. Deux remarques sont à noter. D'une part, la limite entre ces deux unités se situe à quelques dizaines de mètres à l'Est de la rupture de pente. Il n'est toutefois pas possible de la positionner avec une précision reproductible sur un autre lieu. D'autre part, l'unité dont les sols ne sont concernés que par des apports de sables c_4 comporte des sols développés sans aucun apport. Toutefois, l'étude de l'IAS a permis d'établir que la plupart des sols recevaient des apports. L'organisation en 4 U.C.S. de ce troisième modèle vise ainsi à identifier des zones « fonctionnelles » du point de vue de la différenciation pédologique des sols, même si, parfois, les critères de délimitation de ces zones ne semblent pas aisément accessibles sur le terrain.

9.4 Conclusion sur le modèle de représentation choisi au final

Ces trois modèles ne sont pas antinomiques. Ils sont fonctions de la compréhension de l'organisation, mais aussi de l'échantillonnage. Nous nous situons ici aux limites de la précision cartographique que nous nous sommes fixés en relation avec l'échelle de travail. Nous devons tenir compte de la compréhension acquise par cette étude à grande échelle, mais aussi du fait que cette étude s'inscrit dans le programme I.G.C.S.-Pays de la Loire et que d'autres études moins précises sont contiguës. Il faut donc rester homogène dans la définition des U.C.S..

Le programme I.G.C.S. ayant pour échelle de représentation le 1/250000^{ème}, il semble opportun de garder cette séparation en quatre zones. De plus, cette zonation se rapproche de celle effectuée dans la Sarthe. En effet, en Sarthe, si la morphologie en buttes témoins ne se retrouve pas, les matériaux sont quasiment les mêmes et les unités correspondent à un découpage en fonction de la nature chimique des matériaux :

- (1) plateau sableux acides ;
- (2) versant en pente plus ou moins fortes sur craie c_{3a} , colluvions et partie de marnes c_{2b} en bas de pente ;
- (3) plaine calcaire ;
- (4) plaine non calcaire sableuse et argileuse.

Dans ce découpage, les U.C.S. sont hétérogènes en terme de quantité et de répartition des U.T.S..

D'autre part, le modèle cartographique reste un modèle avec un raisonnement en 2D qui peut être complété par des modèles conceptuels comme celui développé dans le paragraphe 8.2.

Enfin, si la représentation des 4 U.C.S. n'est pas suffisamment lisible à l'échelle de 1/250000^{ème}, il est toujours possible de se cantonner à 3 U.C.S. en donnant les précisions nécessaires dans la notice.

Quel que soit le modèle retenu, il nous paraît essentiel d'indiquer les raisons conduisant au regroupement des U.T.S. en U.C.S.. Le modèle conceptuel, décrit précédemment, formalise ces raisons qui sont ici d'ordre pédogénétique. Le choix d'indicateurs, aisément accessibles, pour la délimitation des unités est également privilégié puisque les limites s'appuient principalement sur des limites altitudinales, qui correspondent ici aux couches géologiques. Toutefois, ceci n'est pas le cas pour la limite entre l'U.C.S.2 et 3 qui, à nouveau, exprime une limite « fonctionnelle » entre des unités atteintes par des apports allochtones et celles qui ne le sont pas.

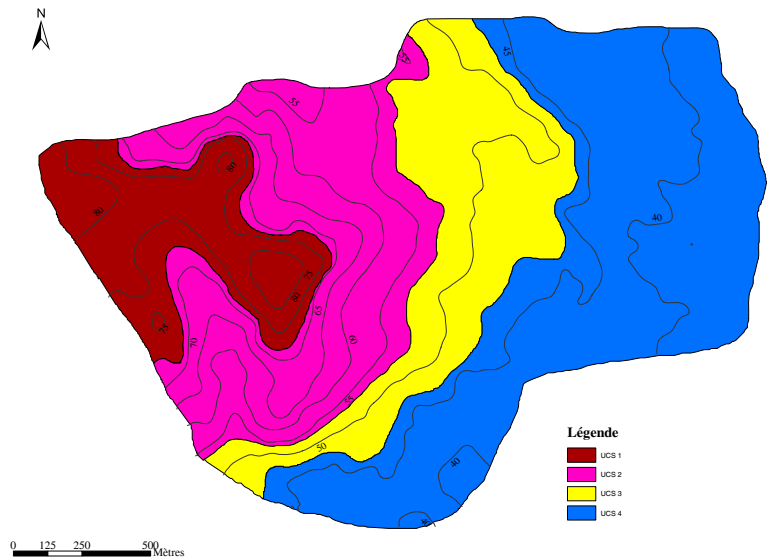


FIG. 9.6: Carte présentant 4 U.C.S.

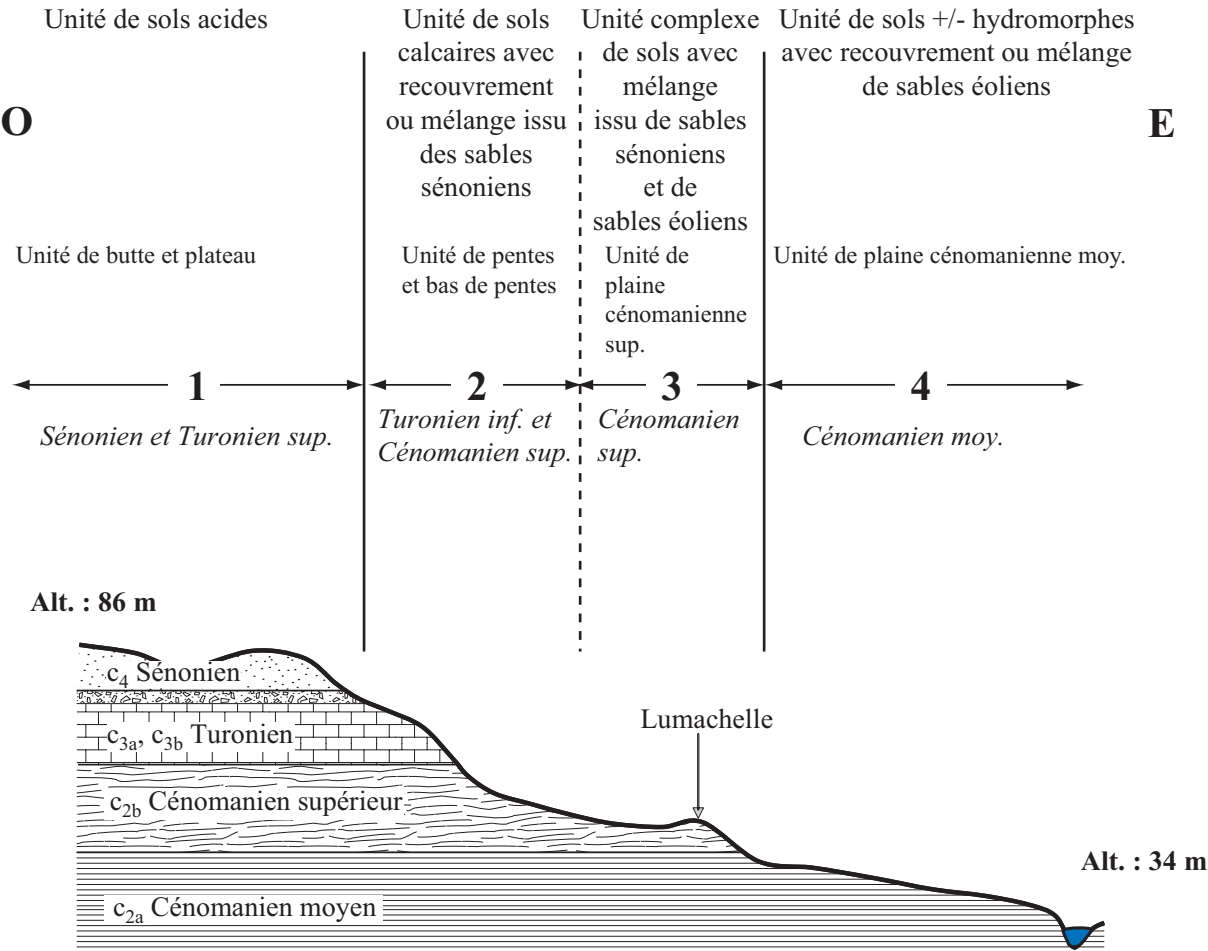


FIG. 9.7: Coupe schématique en long présentant 4 U.C.S.

Chapitre 10

Approche quantitative de la localisation et de la caractérisation des U.C.S. et des U.T.S.

Dans ce chapitre, nous tentons de quantifier la localisation géographique des unités cartographiques et typologiques de sols du modèle choroplète à 4 U.C.S. (fig. 9.7 et carte 10.1).

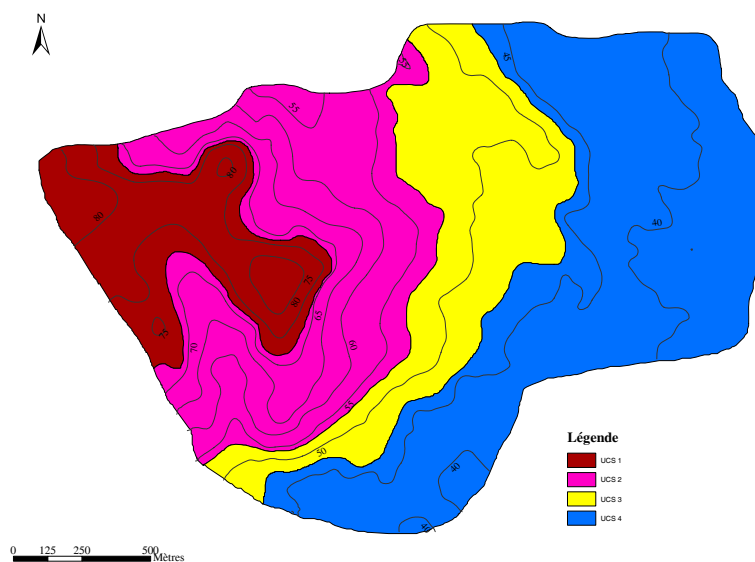


FIG. 10.1: Carte présentant 4 U.C.S.

10.1 Délimitation des U.C.S.

Pour simplifier la représentation, les limites dessinées des unités du modèle à 4 U.C.S. (carte 10.1) s'appuient sur les altitudes ; l'altitude-limite est choisie en fonction du maxi-

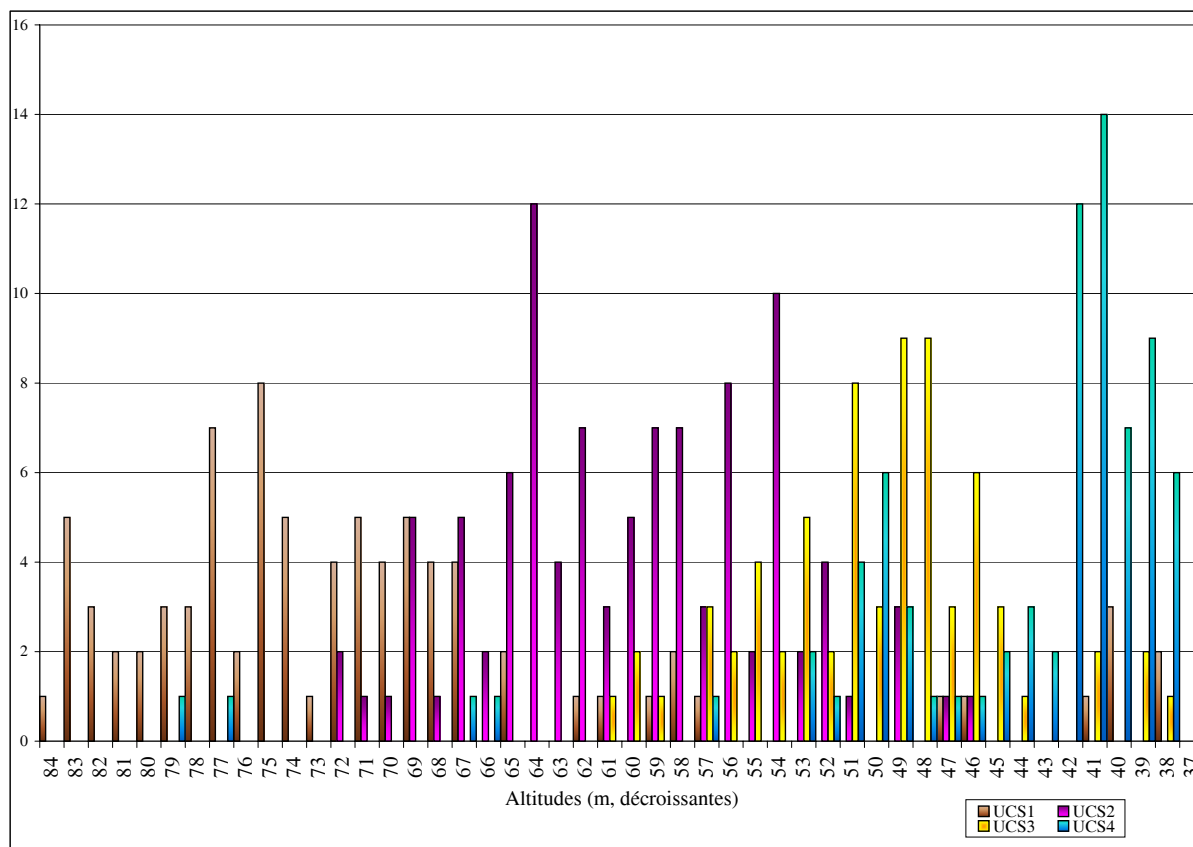


FIG. 10.2: Histogramme des rattachements sémantiques des sondages en fonction des altitudes, regroupés dans les 4 U.C.S. définies

L'axe des abscisses est décroissant de façon à être cohérent avec l'orientation Ouest-Est de la LTS

mun d'U.T.S. pouvant appartenir sémantiquement à l'une ou l'autre U.C.S.. Ainsi, la limite entre les U.C.S.1 et 2 a été choisie empiriquement à 72 m, entre les U.C.S.2 et 3 à 53 m, et entre les U.C.S.3 et 4 à 46 m.

Cependant, chaque U.C.S. ainsi déterminée peut ne pas contenir l'intégralité des sondages rattachés à une U.T.S.. Chaque U.T.S. peut être rattachée à une U.C.S. théorique pour laquelle l'affiliation serait sémantique. C'est ainsi que certaines U.T.S. peuvent appartenir à plusieurs U.C.S.. Nous allons tâcher ici de comparer ces U.C.S. sémantiques aux U.C.S. représentées.

L'histogramme des altitudes de chaque sondage rattaché à une U.T.S. (fig. 10.2) montre que les limites ne sont pas aussi nettes qu'il y paraît sur la carte.

Les U.T.S. qui appartiennent sémantiquement à l'U.C.S.1 sont principalement situées au-dessus de 67 m d'altitudes. Quelques rares individus se retrouvent jusqu'à 40 m.

Les U.T.S. qui appartiennent sémantiquement à l'U.C.S.2 sont comprises entre 72 m et 49 m d'altitudes. Deux individus se retrouvent vers 46-47 m.

Les U.T.S. qui appartiennent sémantiquement à l'U.C.S.3 sont comprises entre 57 m et 44 m d'altitudes. Quelques rares individus se retrouvent quelques mètres au-dessous, vers 60 m, ou en-dessous, autour de 39 m.

Enfin, les U.T.S. qui appartiennent sémantiquement à l'U.C.S.4 forment deux groupes d'individus, (1) entre 52 et 48 m et (2) entre 46 et 36 m. Quelques individus se retrouvent

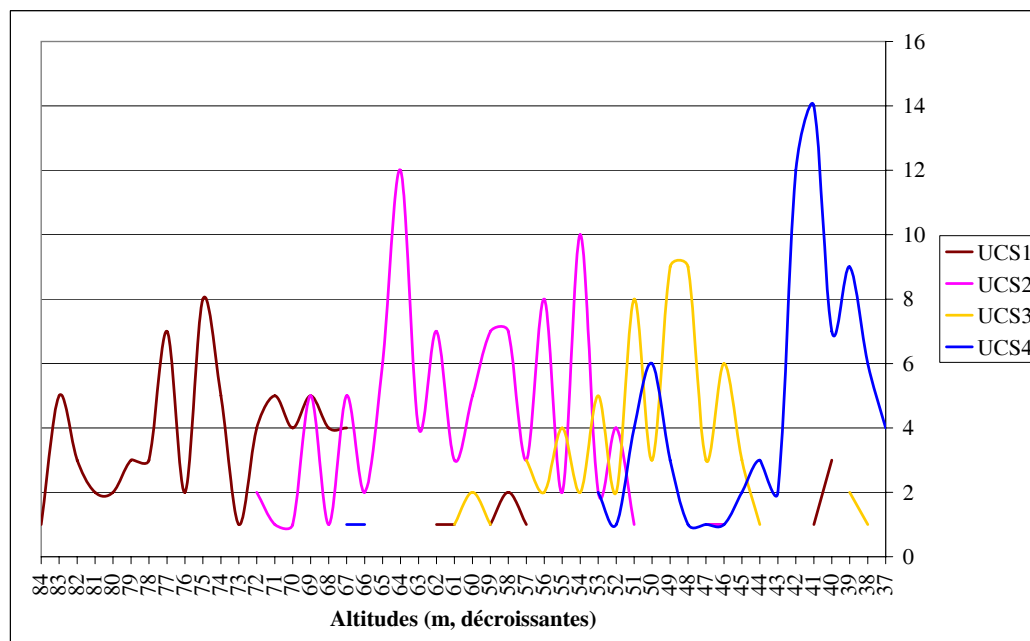


FIG. 10.3: Courbes des rattachements sémantiques des sondages en fonction des altitudes, regroupés dans les 4 U.C.S. définies

plus haut, jusqu'à 80 m. Le groupe autour de 50 m est constitué de sols typologiquement et pédogénétiquement identiques au groupe situé autour de 40 m. La différence sensible se situe au niveau du matériau parental. Nous n'avons toutefois pas opéré de différenciation typologique car nous avons estimé que le matériau parental était, pour ce cas, moins important que les processus mis en jeu.

La présence de certains individus à des altitudes où il semble peu logique de les rencontrer peut s'expliquer par : (1) la ressemblance pédogénétique de plusieurs types de sols qui a conduit à les regrouper, indépendamment du matériau parental et de l'altitude ; (2) des erreurs de rattachement des sondages par le pédologue, ce qui nécessiterait un retour au terrain.

En nous appuyant sur les données altitudinales synthétisées par les courbes de la figure 10.3, nous pouvons déterminer les altitudes des limites. Ainsi, la limite U.C.S.1/U.C.S.2 se situent entre 63 et 73 m, soit à $68 \text{ m} \pm 5 \text{ m}$, la limite U.C.S.2/U.C.S.3 entre 45 et 59 m, soit à $52 \text{ m} \pm 7 \text{ m}$, et la limite U.C.S.3/U.C.S.4 à $45 \text{ m} \pm 1 \text{ m}$.

L'incertitude associée à la limite U.C.S.1/U.C.S.2 reste satisfaisante eu égard aux incertitude de mesures induites (1) sur le terrain par le G.P.S. et (2) par le M.N.A..

La limite U.C.S.2/U.C.S.3 semblait, de prime abord, être la plus difficile à définir, car la plus soumise aux incertitudes de compréhension des processus pédogénétiques. De fait, elle montre, une incertitude supérieure aux autres limites, avec un entrecroisement de sondages rattachés à différentes U.C.S..

De cette approche quantitative, il résulte une nouvelle carte (fig. 10.4), différente de la carte réalisée empiriquement. Les limites sont déplacées, et la limite U.C.S.2/U.C.S.3 est notée en pointillé afin de signaler que l'imprécision qui la concerne est supérieure aux autres. La quantification permet ainsi d'augmenter la probabilité de rencontrer une U.C.S. donnée tout en évaluant l'imprécision de ses limites géométriques.

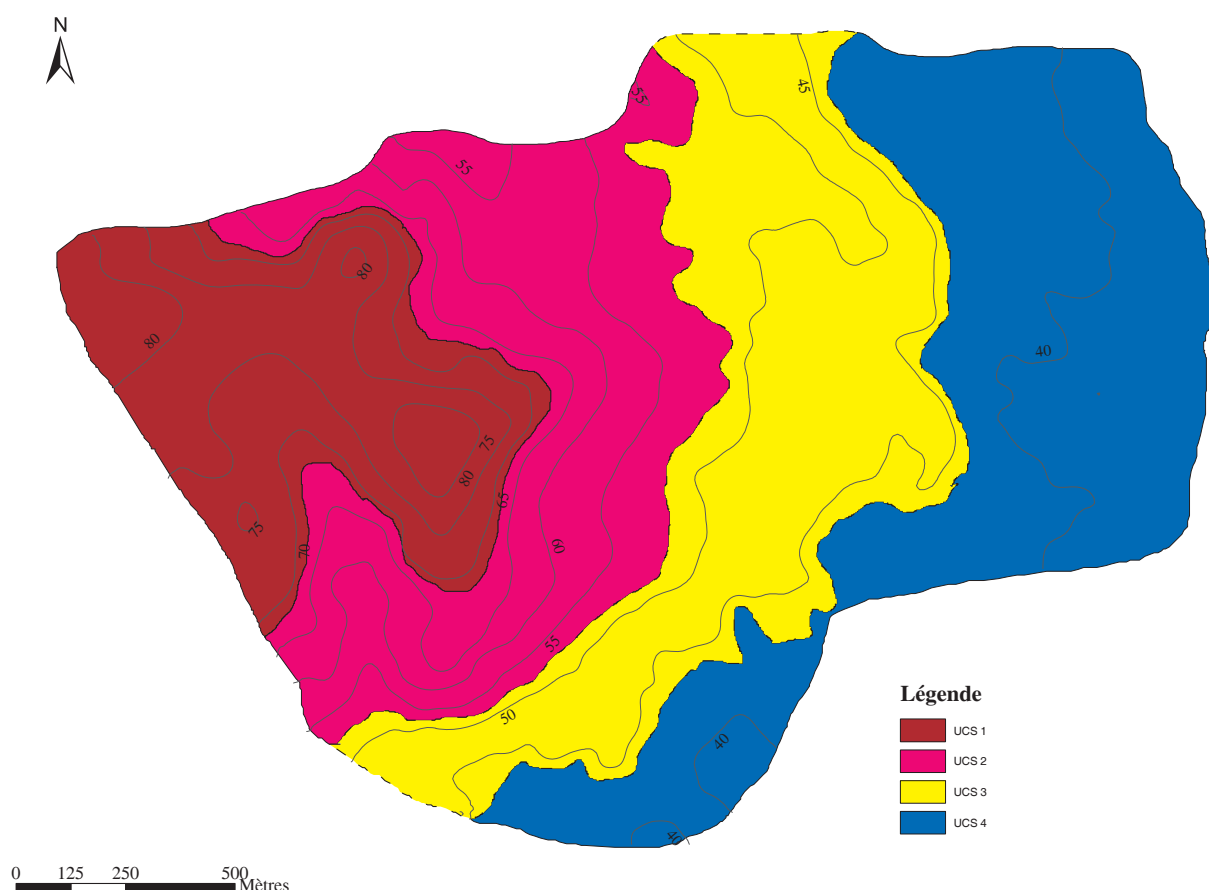


FIG. 10.4: Carte présentant les 4 U.C.S. après quantification

10.2 Quantification de l'hétérogénéité des U.C.S.

Comme l'échantillonnage systématique a été effectué à raison d'un sondage environ par hectare, il est possible de donner une approximation des superficies des U.T.S. au sein des U.C.S. (*cf.* tableau 10.1).

L'U.C.S. 1, avec 31 ha, représente 15 % de la superficie étudiée. Elle couvre la plus petite surface. Elle est suivie par la plus grande U.C.S., l'U.C.S. 2, qui couvre 80 ha, soit 38 % de la zone. Les deux autres unités se partagent équitablement les 50 % restants, avec respectivement 23 et 25 % de couverture pour l'U.C.S. 3 et 4.

Le tableau 10.2 permet de visualiser l'hétérogénéité au sein des U.C.S. telle qu'elle peut être constatée au cours d'un échantillonnage systématique.

L'U.C.S. 1 est définie à 90 % par trois U.T.S., des BRUNISOLS, des LUVISOLS et des PLANOSOLS. Leurs différences *in situ* sont nettes, nous ne ferons pas d'autres regroupements. Cette U.C.S. complexe ne présente pas une grande hétérogénéité d'U.T.S..

UCS/UTS	B1	B2	C1	C2	C3	Ca1	Ca2	Ca3	Ca4	Ca5	Ci1	Ci2	F	L1	L2	L3	P1	P2	Re2	Re3	Rx1	Rx2	Rx3	Total	
1	I3				1											2	5	10							3
2	2			5	I2	4	I3	11	I2	1	2	2	3		1	2	1	2			2	3	2		80
3		1						I5	3	1			3			11	1			3	2	1	7		48
4								1		2		1		8	I3				I7	1	1	1	1	7	53
Total	I5	1	5	I3	4	I3	27	I5	4	2	3	6	8	25	5	6	12	I7	4	5	5	10	7	212	

TAB. 10.1: Tableau de contingences des surfaces des U.C.S. et des U.T.S., en ha

UCS/UTS	B1	B2	C1	C2	C3	Ca1	Ca2	Ca3	Ca4	Ca5	Ci1	Ci2	F	L1	L2	L3	P1	P2	Re2	Re3	Rx1	Rx2	Rx3	Total
1	<u>42</u>	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	<u>16</u>	<u>32</u>	0	0	0	0	0	0	15
2	3	0	6	<u>15</u>	5	<u>16</u>	<u>14</u>	<u>15</u>	1	3	3	4	0	1	3	1	3	0	0	3	4	3	0	38
3	0	2	0	0	0	0	<u>31</u>	6	2	0	0	6	0	<u>23</u>	2	0	0	0	6	4	2	<u>15</u>	0	23
4	0	0	0	0	0	0	2	0	4	0	2	0	<u>15</u>	<u>25</u>	0	0	0	<u>32</u>	2	2	2	2	<u>13</u>	25
Total	7	0	2	6	2	6	13	7	2	1	1	3	4	12	2	3	6	8	2	2	2	5	3	100

TAB. 10.2: Tableau de contingences de présence des U.C.S. et des U.T.S., en %, échantillonnage systématique

UCS/UTS	B1	B2	C1	C2	C3	Ca1	Ca2	Ca3	Ca4	Ca5	Ci1	Ci2	F	L1	L2	L3	P1	P2	R8	Re1	Re2	Re3	Rx1	Rx2	Rx3	Non déf.	Total
1	45	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	10	31	0	0	0	0	0	6	0	0	0	15
2	3	0	7	11	5	19	9	23	1	2	1	2	0	1	2	1	3	0	1	3	1	1	5	1	0	0	44
3	0	3	0	0	0	0	31	6	2	0	0	5	0	21	5	0	0	0	0	0	10	3	2	13	0	0	18
4	0	0	0	0	0	0	1	0	3	0	1	0	12	22	0	1	0	27	0	0	1	1	8	5	13	4	23
Total	8	1	3	5	2	8	10	12	1	1	1	2	3	9	2	2	6	6	0	1	2	1	5	4	3	1	100

< 2%
 n > 15%

TAB. 10.3: Tableau de contingences de présence des U.C.S. et des U.T.S., en %, intégralité des sondages

Quatre U.T.S. définissent 60 % de l'U.C.S. 2, trois unités de CALCOSOLS et une unité de COLLUVIOSOLS. Sur les trois unités CALCOSOLS, deux - Ca1 et Ca2 - sont assez ressemblantes sur le terrain. En effet, ces CALCOSOLS sont différenciables principalement par une couleur un peu plus verte pour le Ca2. Leur dissemblance provient du matériau parental, la craie Tuffeau c_{3a} pour le Ca1, et les marnes cénomaniennes c_{2b} pour le Ca2. Les 40 % manquant se retrouvent dispersés dans quatorze U.T.S. différentes. Cette U.C.S. présente une très forte hétérogénéité.

Près de 70 % de l'U.C.S. 3 est représentée par trois U.T.S. très dissemblables, des LUVISOLS, des REDOXISOLS et des CALCOSOLS. Huit autres U.T.S. complètent l'U.C.S., dont cinq sont très peu présentes. Cette U.C.S. présente une assez forte hétérogénéité.

L'U.C.S. 4 est définie à 85 % par quatre U.T.S. dissemblables, des LUVISOLS, REDOXISOLS et FLUVIOSOLS. Elle est complétée par sept autres U.T.S. mineures en proportion. Cette U.C.S. présente une assez forte hétérogénéité.

En conclusion, les quatre U.C.S. sont composées de douze U.T.S. majeures, dont deux peuvent se retrouver dans deux U.C.S. différentes (Ca2 dans l'U.C.S. 2 et 3, L1 dans les U.C.S. 3 et 4). Ces douze U.T.S. les plus fréquentes représentent près de 75 % des sols des U.C.S..

Intégrons maintenant les séquences et comparons ce tableau de contingences des sondages systématiques (tab. 10.2) au tableau réunissant la totalité des sondages (tab. 10.3). Plusieurs constations apparaissent alors :

- (1) l'U.T.S. Re1 a été ajoutée. Elle ne représente qu'une très petite proportion et apparaît uniquement dans l'U.C.S. 2 ;
- (2) l'U.C.S. 1 est proportionnellement autant représentée ; quel que soit l'ensemble de

sondages considéré, totalité ou systématique, elle représente 15 % des sondages ;
(3) l'U.C.S. 2 voit ses effectifs augmenter de 15 %. Ceci peut être expliqué par les différentes séquences faites spécifiquement dans cette U.C.S. ;
(4) l'augmentation de l'U.C.S. 2 se fait au détriment des U.C.S. 3 et 4 qui perdent respectivement 17 et 12 % de leurs effectifs ;
(5) dans le cas des sondages systématiques, les U.C.S. sont représentées par douze U.C.S. majoritairement fréquentes. Si l'ensemble des sondages - systématiques et séquences - est considéré, ces mêmes U.T.S. permettent de définir les U.C.S., et dans des proportions équivalentes.

10.3 Localisation d'une U.T.S. au sein des U.C.S. : Exemple de l'U.T.S. Ca3

Les histogrammes d'altitudes montrent que les Ca3 se retrouvent principalement entre 50 et 64 m d'altitudes (fig. 10.5), avec une moyenne à 56 m. Nous restreindrons donc l'étude des Ca3 à une zone comprise entre 52 et 66 m, zone incluse dans l'U.C.S.2. Cette zone comporte des pentes plutôt faibles ($\leq 7\%$) (fig. 10.6) avec des accumulations des flux faibles à nulles (fig. 10.7). Dans ce contexte, Ca3 tend à se trouver sur des pentes un peu plus faibles que les autres U.T.S..

L'indice MrRTF (Gallant et Dowling, 2003) (fig. 10.8) indique que les Ca3 se rencontrent plus que les autres U.T.S. lorsqu'il est différent de 0, soit sur une zone plate de plateau relatif.

Enfin, les Ca3 tendent à se trouver plutôt en position de concavité horizontale (fig. 10.9).

Il n'est pas possible de dégager des critères précis de localisation de l'U.T.S. des CALCOSOLS bathyluviques colluviaux Ca3, seulement des tendances. Ils se rencontrent à des altitudes comprises entre 50 et 64 m, plutôt sur des faibles pentes, en sommet d'interfluve (accumulation de flux quasi-nulle), sur des plateaux relatifs (MrRTF, indice de platitude relativement au paysage environnant), sur des positions un peu plus concaves que les autres U.T.S.. Ceci concorde :

- avec le fait que les processus de lessivage se font plutôt dans des zones planes ;
- avec les hypothèses de mélange qui montrent que les horizons supérieurs sont le résultat de mélange sub-actuels.

Quelques paramètres externes, dérivés du M.N.A. de maillage 10 m, ont été considérés un à un pour tenter de comprendre leur rôle dans les processus de formation et d'organisation spatiale des CALCOSOLS bathyluviques qui constituent l'U.T.S. Ca3. Aucun ne permet de donner une explication unique.

Ce type d'approche pourrait être répétée pour d'autres U.T.S., *e.g.* P1 et L3 sur la butte ou P2 dans la plaine, mais faute de temps, ce ne sera pas fait ici.

Nous nous sommes penchés sur le cas de Ca3, mais il représente l'un des cas les plus compliqués car il est situé dans une zone où la stabilité actuelle des matériaux n'est pas avérée. De plus, il est lié à plusieurs phases pédogénétiques non nécessairement en cohérence avec le relief actuel. En effet, 8 à 10000 ans sont nécessaires pour le développement d'une pédogenèse lixivante. Avec les grands défrichements qui se sont opérés au Moyen-Age, nous sommes en droit de nous demander si les conditions sont encore réunies pour qu'un CALCOSOL bathyluvique colluvial puisse se former.

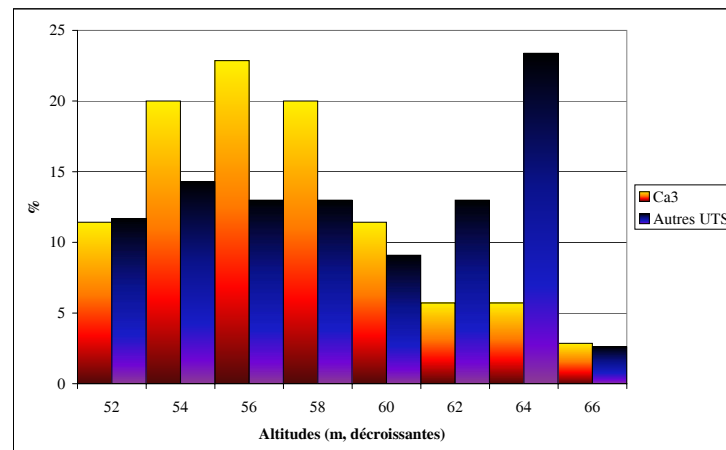


FIG. 10.5: Histogramme des effectifs (%) en fonction des classes d'altitudes de la classe d'altitudes 52–66 m

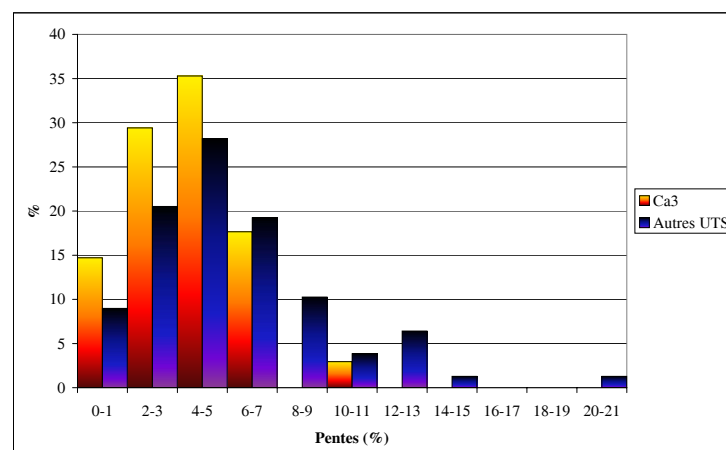


FIG. 10.6: Histogramme des effectifs (%) en fonction des pentes des U.T.S. incluses dans la classe d'altitudes 52–66 m

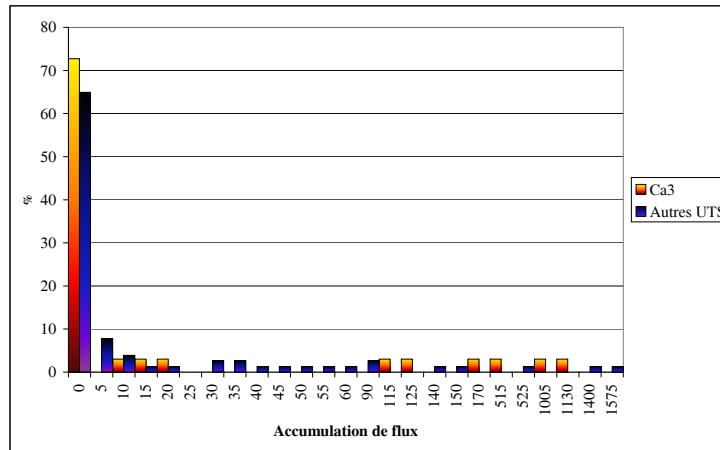


FIG. 10.7: Histogramme des effectifs (%) en fonction des accumulations de flux des U.T.S. incluses dans la classe d'altitudes 52–66 m

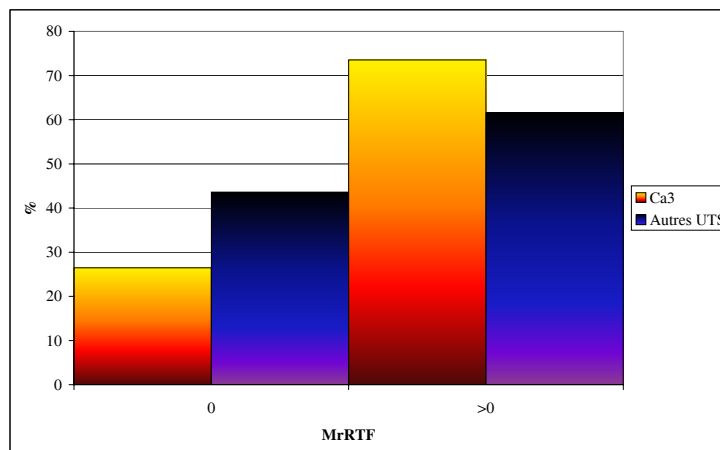


FIG. 10.8: Histogramme des effectifs (%) en fonction de l'indice de platitude MrRTF des U.T.S. incluses dans la classe d'altitudes 52–66 m

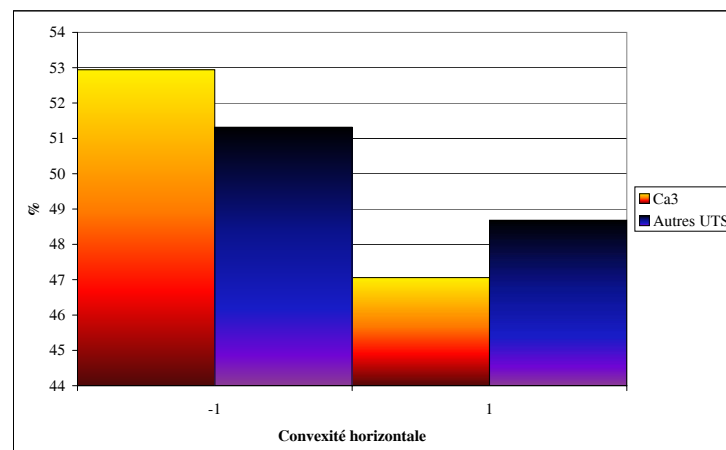


FIG. 10.9: Histogramme des effectifs (%) en fonction des convexités horizontales et verticales des U.T.S. incluses dans la classe d'altitudes 52–66 m

Conclusion générale

Chapitre 11

Conclusion générale et perspectives

Le sol est un capital mince et fragile. L'intérêt mondial qui lui est porté (sommet de Kyoto, par exemple, directive européenne) en est une preuve. Il y a donc nécessité de connaître le sol ainsi que son environnement. Pour ce faire, la cartographie et les inventaires sont des approches qui permettent au pédologue de sortir sa double-casquette de scientifique pédagogue.

En tant que scientifique, le pédologue tâche de comprendre les processus de formation et d'organisation des sols au travers de travaux cartographiques comme l'« Analyse structurale » (Boulet *et al.*, 1982a,b,c), ou de travaux sur la différenciation des matériaux. Nous pouvons ici citer, entre autres, des études en géochimie (Hawkesworth et van Calsteren, 1984), des études basées sur la granulométrie Baize (1983) ou sur les bilans de masse isoquartz (Lelong, 1969).

En tant que pédagogue, le pédologue a pour objectif de transmettre l'information recueillie et comprise au mieux. Il a recourt à différentes méthodes de représentations comme les cartes « classiques » ou leur informatisation avec éventuellement une représentation tridimensionnelle (Grunwald et Barak, 2003).

Dans ce contexte, l'étude ici présentée se proposait de comprendre l'organisation des sols à grande échelle sur un terrain sédimentaire du Baugeois, quelle logique sous-tend la formation des unités de sols, et quelles représentations sont les plus appropriées. Enfin, garder à l'esprit l'état tridimensionnel de la couverture pédologique est-il vraiment important ? Quelle représentation est possible d'établir de ce volume de sols ?

Dans un premier temps, ce travail a permis :

- (1) de préciser les limites géologiques, comme c'est souvent le cas lors d'études pédologiques, les géologues et les pédologues n'ayant pas les mêmes méthodes ni les mêmes échelles de cartographie ;
- (2) de constater que de nombreuses zones montrent des traces d'hydromorphie ;
- (3) de situer les sols calcaires préférentiellement sur les pentes ;
- (4) de mettre en évidence le déplacement de matériaux sableux le long des pentes.

Enfin, l'échantillonnage systématique, s'il permet une première approche du terrain, se heurte à la difficulté de considérer l'horizon comme un volume. Ceci induit une quasi-impossibilité de créer des classes typologiques d'horizon, et donc un retour forcé aux unités

typologiques de sols, ainsi qu'une difficulté de vision tridimensionnelle de la couverture pédologique.

Dans un deuxième temps, l'ouverture de fosses pédologiques a mis en évidence l'hétérogénéité des sols. Nous avons utilisé deux indices, une distance mathématique définie par Baize (1983), et un rapport de sables grossiers sur sables plus fins spécialement élaboré à la suite des résultats d'analyses granulométriques. Nous avons ainsi confirmé que les processus mis en jeu sont complexes et peuvent parfois être relativement anciens quoiqu'encore fonctionnels.

Ces processus complexes se retrouvent par exemple dans des CALCOSOLS bathyluviques sur lesquels nous avons en partie focalisés le travail. Ces sols, qui forment l'U.T.S. Ca3, sont constitués d'horizons de surface calcaires, selon le pédologue de terrain, et saturés, à texture équilibrée, suivis d'un horizon argileux, traduisant une phase d'illuviation.

Dans un troisième temps, nous avons développé un modèle de mélange de matériaux. Il fonctionne si, et seulement si, les matériaux en jeu ont une signature granulométrique nette. Dans le cas qui nous concerne, cette signature repose sur une donnée relativement facile d'accès, les fractions sableuses issues de granulométries huit fractions, mais le modèle pourrait fonctionner avec d'autres informations. Ce modèle a permis de reconstituer l'organisation des sols avec des mélanges en de nombreuses zones mais toujours en accord avec les connaissances actuelles des processus de transfert de matériaux (*cf.* chapitre 6). Il montre toutefois que les redistributions latérales le long de la lithotoposéquence sont susceptibles d'influencer très fortement les compositions des horizons de sol.

L'étude peu commune selon une isoaltiséquence (*cf.* chapitre 7) montre que les sables c_4 du plateau sont colluvionnés presque partout et sur une profondeur assez importante, soit en recouvrement, soit en mélange au sein du solum. Contrairement aux attentes, il apparaît aussi que le talweg agit et en érosion et en accumulation - faible épaisseur des sols mais apports de matériaux signalés par le modèle. A l'opposé, la croupe ne reçoit pas d'apport et n'agit pas en érosion. Une pédogenèse peut alors s'installer sur le matériau en place et donner des sols relativement profonds. Elle montre que la LTS est à géométrie variable.

Le modèle n'ayant été utilisé que sur la zone d'étude, il faudrait le valider en le testant soit sur d'autres sites avec des granulométries huit fractions, soit sur le même site avec d'autres analyses.

Sur le site, des analyses totales ont été effectuées. Elles semblent montrer des signatures identifiables des matériaux. Il faudrait (1) confirmer la différenciation franche des matériaux, (2) définir quatre éléments chimiques qui montrent des concentrations caractéristiques et (3) intégrer ces quatre éléments chimiques dans le système d'équations, à la place des fractions granulométriques. Comme l'incertitude inhérente à ces mesures est, semble-t-il, moins grande que celle liée aux analyses granulométriques, nous gagnerions certainement en précision.

Dans un rayon de quelques kilomètres, les buttes de Fontaine-Guérin, de Jarzé ou d'autres présentent des morphologies de relief et des substrats comparables. Il serait donc possible de prolonger les travaux de cette thèse en appliquant les mêmes méthodes et ainsi tester la validité du modèle avec des fractions granulométriques. Ceci permettrait de valider le modèle d'organisation spatiale des sols (M.O.S.S. (King *et al.*, 1994)) qui ressort de cette étude.

Dans le cadre des objectifs du programme I.G.C.S., nous avons proposé de compléter le modèle choroplète décrit par le système DONESOL. Ces propositions sont de trois ordres :

(1) Il s'agit de développer une représentation conceptuelle. Nous avons ainsi proposé des modèles d'évolution pédogénétiques en 2D, avec deux scénarii, et un modèle de représentation en 3D. La différence entre les deux scénarii se situe dans les stades et l'ordre d'évolution des sols, nous pourrions donc utiliser les datations isotopiques pour infléchir l'interprétation temporelle dans un sens ou l'autre. Le modèle 3D n'étant qu'une approche succincte, elle pourrait être approfondie par d'autres méthodes de représentation, comme par exemple l'utilisation du logiciel développé par Grunwald *et al.* (2000). Ils s'appuient sur des données obtenues par pénétrométrie, mais nous pourrions aussi utiliser la géophysique, et notamment la résistivité électrique sur les deux premiers mètres de la surface du sol (Michot, 2003).

(2) Si le modèle choroplète semble satisfaisant pour le programme I.G.C.S., il nécessite d'être complété par une explicitation de la détermination des U.C.S.. Nous avons montré, au travers de plusieurs exemples, que les choix pouvaient résulter (i) du degré de compréhension de l'auteur au moment du lever et du dessin de la carte, (ii) de l'objectif défini et (iii) de l'échelle finale de représentation. Dans le cas qui nous concerne, nous aboutissons à trois modèles au moins qui gagnent en précision mais risqueraient de perdre en clarté de compréhension sans l'utilisation des bases de données et des S.I.G..

(3) Enfin, le modèle choroplète gagnerait à être enrichi par des approches quantitatives à la fois dans la délimitation des U.C.S., la caractérisation des hétérogénéités (*i.e.* les proportions respectives des U.T.S. au sein des U.C.S.) et la localisation des U.T.S., même si aucune délimitation précise ne peut être fournie.

Sur ce dernier point, le couplage des approches pédogénétiques, telles qu'utilisées dans ce mémoire, avec des méthodes numériques relevant de la géostatistique ou, plus généralement, des méthodes dites de cartographie numérique des sols (« Digital Soil Mapping ») permettrait d'enrichir les informations cartographiques auprès des utilisateurs finaux.

Bibliographie

- AMESKAMP, M. (1997). *Three-dimensional rule-based continuous soil modelling*. Thèse de doctorat, Christian-Albrechts-Universität Kiel Institut für Informatik und Praktische Mathematik D-24098 Kiel.
- ARROUAYS, D. (1995). *Analyse et modélisation spatiales de l'évolution des stocks de carbone organique des sols à l'échelle d'un paysage pédologique ; application à l'étude des sols de "touyas" du Piedmont pyrénéen*. Thèse de doctorat, E.N.S.A.M.
- BAIZE, D. (1974). Les sols à forte différenciation texturale de la région d'auxerre et le problème de leur pédogenèse. *Science du Sol*, 1:5–21.
- BAIZE, D. (1983). *Les planosols de Champagne humide Pédogenèse et fonctionnement*. Thèse de doctorat, Université de Nancy.
- BAIZE, D. (1988). *Guide des analyses courantes en pédologie*. INRA Editions.
- BAIZE, D. et GIRARD, M.-C. (1995). *Référentiel Pédologique*. Techniques et Pratiques.
- BAIZE, D. et JABIOL, B. (1995). *Guide pour la description des sols*. INRA.
- BERTHOIS, L. (1971). *Les roches sédimentaires*, volume 1- Etude sédimentologique des roches meubles. Préface de Lucas G.
- BIGORRE, F. (2000). *Influence de la pédogénèse et de l'usage des sols sur leurs propriétés physiques. mécanismes d'évolution et éléments de prévision*. Thèse de doctorat, Université de Nancy I, [http ://francois.bigorre.free.fr/resu-these.htm](http://francois.bigorre.free.fr/resu-these.htm).
- BORTOLUZZI, E., TESSIER, D. et JULIEN, D. R. J. (2006). The cation exchange capacity of a sandy soil in southern brazil : an estimation of permanent and ph-dependent charges. *European Journal of Soil Science*, 57:356—364.
- BOULAIN, J. (1975). *Géographie Des Sols*. P.U.F.
- BOULAIN, J. (1980). *Pédologie appliquée*. Collections sciences agronomiques édition.
- BOULET, R., BELLIER, G. et HUMBEL, F. X. (1987). Différenciation toposéquentielle et transformations morphologiques d'un sol brun de Bretagne. *Cahiers de l'O.R.S.T.O.M., série Pédologique*, XXIII(3):187–196.
- BOULET, R., CHAUVEL, A., HUMBEL, F.-X. et LUCAS, Y. (1982a). Analyse structurale et cartographie en pédologie 1 - prise en compte de l'organisation bidimensionnelle de la couverture pédologique : les études de toposéquences et leurs principaux apports à la connaissance des sols. *Cahiers de l'O.R.S.T.O.M., série Pédologie*, XIX(4):309–321.

- BOULET, R., HUMBEL, F.-X. et LUCAS, Y. (1982b). Analyse structurale et cartographie en pédologie ii - une méthode d'analyse prenant en compte l'organisation tridimensionnelle des couvertures pédologiques. *Cahiers de l'O.R.S.T.O.M., série Pédologie*, XIX(4):323–339.
- BOULET, R., HUMBEL, F.-X. et LUCAS, Y. (1982c). Analyse structurale et cartographie en pédologie iii - passage de la phase analytique à une cartographie générale synthétique. *Cahiers de l'O.R.S.T.O.M., série Pédologie*, XIX(4):341–351.
- BOURENNANE, H., SALVADOR-BLANES, S., CORNU, S. et KING, D. (2003). Scale of spatial dependence between chemical properties of topsoil and subsoil over a geologically contrasted area (massif central, france). *Geoderma*, 112(3-4):235–251.
- BRAUCHER, R., BOURLES, D. L., COLIN, F., BROWN, E. T. et BOULANGE, B. (1998a). Brazilian laterite dynamics using in situ-produced be-10. *Earth and Planetary Science Letters*, 163(1-4):197–205.
- BRAUCHER, R., COLIN, F., BROWN, E. T., BOURLES, D. L., BAMBA, O., RAISBECK, G. M., YIOU, F. et KOUD, J. M. (1998b). African laterite dynamics using in situ-produced be-10. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(9):1501–1507.
- BROSSÉ, R. et LOUAIL, J. (1976). *Carte géologique à 1/50000ème n°455, feuille XVI-22, Longué*. BRGM, Orléans. et sa notice géologique.
- BRUNET, J. (1980). Etude d'une séquence de sols en Baugeois ; applications à la cartographie (1/100000ème) et au drainage. Mémoire de D.E.A., I.N.A. P.-G.
- BUI, E. N. (2004). Soil survey as a knowledge system. *Geoderma*, 120(1-2):17–26.
- BUSACCA, A. J. et SINGER, M. J. (1989). Pedogenesis of a chronosequence in the sacramento valley, california, u.s.a., ii. elemental chemistry of silt fractions. *Geoderma*, 44(1):43–75.
- CAILLEUX, A. (1937). Méthode d'étude de la morphologie des grains de sable. *C.R. Som. Soc. Géol.*, 16:224–226.
- CAILLEUX, A. et TRICART, J. (1959). *Initiation à l'étude des Sables et Galets*, volume 1, 2, 3. Paris.
- CALVET, P. (1976). *Notice de la carte géologique à 1/50000ème n°454, feuille XV-22, Angers*. BRGM, Orléans. et carte à 1/50000ème.
- CAMPY, M. et MACAIRE, J.-J. (1989). *Géologie des formations superficielles Géodynamique - faciès utilisation*. Masson.
- CARRE, F. (2002). *Cartogénèse des sols et changements d'échelle : application dans la région de La Rochelle sur une base de données pédologiques de plusieurs milliers d'observations*. Thèse de doctorat, Institut National d'Agronomie Paris-Grignon.
- CARRÉ, F. et MCBRATNEY, A. B. (2005). Digital terrain mapping. *Geoderma*, 128(3–4):340–353.

- CHAPLOT, V. (1998). *Organisation des sols hydromorphes de fonds de vallée. Modélisation prédictive de leur distribution*. Thèse de doctorat, E.N.S.A. de Rennes.
- CHAPLOT, V., WALTER, C. et CURMI, P. (2000). Improving soil hydromorphy prediction according to D.E.M. resolution and available pedological data. *Geoderma*, 97(3–4):405–422.
- CHERY, P. (1995). *Variabilité de l'épaisseur de la couverture de sol. Conséquences pour le bilan hydrique hivernal d'un secteur de Petite Beauce*. Thèse de doctorat, Université Nancy I.
- CHITTLEBOROUGH, D. J., WALKER, P. H. et OADES, J. M. (1984). Textural differentiation in chronosequences from eastern australia, ii. evidence from particle-size distributions. *Geoderma*, 32(3):203–226.
- CHRÉTIEN, J., KING, D., HARDY, R. et MEUNIER, D. (1993). Essai de modélisation de l'organisation spatiale des sols d'une région. application aux plateaux calcaires bourguignons. *Science du sol*, 31(3):171–191.
- COMMISSION DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES (2002). Communication de la commission au conseil, au parlement européen, au comité Économique et social et au comité des régions vers une stratégie thématique pour la protection des sols. Rapport technique.
- EGLI, M., FITZE, P. et MIRABELLA, A. (2001). Weathering and evolution of soils formed on granitic, glacial deposits : results from chronosequences of swiss alpine environments. *Catena*, 45(1):19–47.
- EL ARABY, M. et OKEIL, A. Y. (2004). Utilizing a V.R. model for adding visual qualities to the downtown of Al Ain City, U.A.E. *Cities*, 21(2):149–158.
- EZZAIM, A., TURPAULT, M. P. et RANGER, J. (1999). Quantification of weathering processes in an acid brown soil developed from tuff (Beaujolais, France) : Part ii. soil formation. *Geoderma*, 87(3-4):155–177.
- FILIPPI, N. (2004). la réalisation de la base de données géographique des sols d'italie à l'échelle de 1/250000. *Etude et Gestion des Sols*, 11(3):335–346.
- GADDAS, F. (2001). *Proposition d'une méthode de cartographie des pédopaysages ; application à la "Moyenne Vallée du Rhône"*. Thèse de doctorat, I.N.A.P.-G.
- GALLANT, J. C. et DOWLING, T. I. (2003). A multiresolution index of valley bottom flatness for mapping depositional areas. *Water Resources Research*, 39(12):1–14.
- GERMS, R., van MAREN, G., VERBREE, E. et JANSEN, F. W. (1999). A multi-view V.R. interface for 3D G.I.S. *Computers & Graphics*, 23(4):497–506.
- GIRARD, M.-C. (1983). Recherche d'une modélisation en vue d'une représentation spatiale de la couverture pédologique. application à une région des plateaux jurassiques de bourgogne. *Sols*, 12:430.

- GIRARD, M.-C., AUROUSSEAU, P., KING, D. et LEGROS, J.-P. (1989). Apport de l'informatique à l'analyse spatiale de la couverture pédologique et à l'exploitation des cartes. *Science du Sol*, 27(4):335–350.
- GRUNWALD, S. et BARAK, P. (2003). 3d geographic reconstruction and visualization techniques applied to land resource management. *Transactions in GIS*, 7(2):231–241.
- GRUNWALD, S., BARAK, P., MCSWEENEY, K. et LOWERY, B. (2000). Soil landscape models at different scales portrayed in virtual reality modeling language (vrml). *Soil Science*, 165(8):598–615.
- GRUNWALD, S., MCSWEENEY, K., ROONEY, D. J. et LOWERY, B. (2001a). Soil layer models created with profile cone penetrometer data. *Geoderma*, 103(1-2):181–201.
- GRUNWALD, S., ROONEY, D. J., MCSWEENEY, K. et LOWERY, B. (2001b). Development of pedotransfert functions for a profile cone penetrometer. *Geoderma*, 100(1-2):25–47.
- GUILLET, B., FAIVRE, P., MARIOTTI, A. et KHOBZI, J. (1988). The 14c dates and 13c/12c ratios of soil organic matter as a means of studying the past vegetation in intertropical regions : Examples from colombia (south america). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 65(1-2):51–58.
- GUILLET, B., ROUILLER, J. et SOUCHIER, B. (1975). Podzolization and clay migration in spodosols of eastern france. *Geoderma*, 14(3):223–245.
- GUILLORÉ, P. (1980). Méthode de fabrication mécanique et en série des lames minces de sol. Rapport technique, I.N.A. P.-G.
- HAWKESWORTH, C. J. et van CALSTEREN, P. W. C. (1984). *Radiogenic Isotopes - Some Geological Application, in Developments in Geochemistry 2 Rare Earth Element Geochemistry*, chapitre 11, pages 375–114. Elsevier.
- HÉNOCQUE, O., RUFFET, G., COLIN, F. et FÉRAUD, G. (1998). 40ar/39ar dating of west african lateritic cryptomelanes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(16):2739–2756.
- IBAÑES, J. J., de ALBA, S., BERMUDEZ, F. F. et GARCIA-ALVAREZ, A. (1995). Pedodiversity : concepts and measures. *Catena*, 24(3):215–232.
- JAMAGNE, M. (1973). *Contribution à l'étude pédologique des formations loessiques du Nord de la France*. Thèse de doctorat, Faculté des sciences agronomiques de l'Etat, Gembloux (Belgique).
- JAMAGNE, M. et KING, D. (2003). The current french approach to a soilscales typology. *Soil classification : a global desk reference*, pages 155–176.
- JENNY, H. (1941). *Factors of soil Formation. A system of quantitative pedology*. Mc Graw Hill, New York.
- KING, D. (1984). Analyse de quelques concepts en cartographie des sols basée sur une automatisé des cartes thématiques dérivées. *Agronomie*, 4(5):461–472.
- KING, D. (1986). *Modélisation cartographique du comportement des sols basée sur l'étude de la mise en valeur du "Marais de Rochefort"*. Thèse de doctorat, I.N.A. P.-G.

- KING, D., BOURENNANE, H., ISAMBERT, M. et MACAIRE, J.-J. (1999). Relationship of the presence of a non-calcareous clay-loam horizon to dem attributes in a gently sloping area. *Geoderma*, 89(1-2):95-111.
- KING, D., DAROUSSIN, J. et JAMAGNE, M. (1994). Proposal for a model of a spatial organization in soil science. example of the european community soil map. *Journal of the American Society for Information Science*, 45(9):705-717.
- LAGACHERIE, P. (2002). *Cartographies des sols et de leurs propriétés à un niveau sub-régional*. Habilitation à diriger des recherches.
- LE CALVEZ, L. (1979). *Genèse des formations limoneuses de Bretagne centrale : essai de modélisation*. Thèse de doctorat, Université de Rennes.
- LECOINTE, S., NYS, C., WALTER, C., FORGEARD, F., HUET, S., RECENA, P. et FOLLAIN, S. (2006). Estimation of carbon stocks in a beech forest (fougères forest - w. france) : extrapolation from the plots to the whole forest. *Annals of Forest Science*, 139(2):139-148.
- LEGROS, J.-P. (1982). *L'évolution granulométrique au cours de la pédogenèse Approche par simulation sur ordinateur Application aux sols acides sur matériaux cristallins en zone tempérée*. Thèse de doctorat, E.N.S.A. Montpellier.
- LEGROS, J.-P. (1996). *Cartographie des sols : de l'analyse spatiale à la gestion des territoires*. Lausanne.
- LEGROS, J.-P. (2006). *Mapping of the soil*. Science Publishers, i.n.r.a. édition.
- LELONG, F. (1969). Nature et genèse des produits d'altération de roches cristallines sous climat tropical humide (guyane française). *Mémoire des Sciences de la Terre*, 14:187.
- LELONG, F., ROOSE, E., AUBERT, G., FAUCK, R. et PEDRO, G. (1984). Geodynamique actuelle de différents sols à végétation naturelle ou cultivés d'Afrique de l'ouest. *Catena*, 11(4):343-376.
- LOUAIL, J. (1984). *La transgression crétacée au Sud du Massif Armoricaïn ; Cénomanién de l'Anjou et du Poitou, Crétacé supérieur de Vendée ; étude stratigraphique, sédimentologique et minéralogique*. Thèse de doctorat, Université d'Angers.
- MARKEWICH, H. W., WYSOCKI, D. A., PAVICH, M. J., RUTLEDGE, E. M., H. T. MIL-LARD, J., F. J. RICHE, P. B. M., RUBIN, M. et MCGEEHIN, J. P. (1998). Paleopedology plus tl, 10be, and 14c dating as tools in stratigraphic and paleoclimatic investigations, mississippi river valley, u.s.a. *Quaternary International*, 51-52:143-167.
- MCBRATNEY, A. B., MENDÇA-SANTOS, M. L. et MINASNY, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, 117(1-2):3-52.
- MICHOT, D. (2003). *Intérêt de la géophysique de subsurface et de la télédétection multispectrale pour la cartographie des sols et le suivi de leur fonctionnement hydrique à l'échelle intraparcellaire*. Thèse de doctorat, Université de Paris 6.

- MOUYOUNGOU, J. (1990). *Les silicifications mésozoïques et cénozoïques de la bordure occidentale du bassin de Paris et de la région de Brazzaville au Congo*. Thèse de doctorat, Université d'Angers.
- MUNSELL (1992). *Munsell Soil Color Charts*.
- MURPHY, C.-P. (1986). *Thin section preparation of soils and sediments*. A. B. Academic Publishers.
- PEIRERA, V. et FITZPATRICK, E. A. (1998). Three-dimensional representation of tabular horizons in sandy soil. *Geoderma*, 81(3-4):295–303.
- RANKEY, E. C. et FAN, M. R. (1997). Preserved pedogenic mineral magnetic signature, pedogenesis, and paleoclimate change : Pennsylvanian roca shale (virgilian, asselian), central kansas, usa. *Sedimentary Geology*, 114(1-4):11–32.
- ROSSIGNOL, J.-P. (1981). *Etude de quelques sols développés sur Basalte dans le Nord de l'Uruguay, Essai de caractérisation du lessivage en milieu vertique*. Thèse de doctorat, E.N.S.A./Université de Rennes.
- ROUSSEAU, M., PIETRO, L. D., ANGULO-JARAMILLO, R., TESSIER, D. et CABIBEL, B. (2004). Preferential transport of soil colloidal particles : Physicochemical effects on particle mobilization. *Vadose Zone Journal*, 3:247–261.
- RUELLAN, A. (1985). Les sols dans le paysage. *Cahiers O.R.S.T.O.M., Série Pédologique*, XXI(2/3):133–217.
- SALDANA, A., STEIN, A. et ZINCK, J. A. (1998). Spatial variability of soil properties at different scales within three terraces of the henares river (spain). *Catena*, 33(3-4):139–153.
- SIDDIK, M. A. A. (1983). *La couverture pédologique en forêt de Rennes : Analyses morphologique de séquences et cartographie en courbes d'isodifférenciation à grande et petite échelle*. Thèse de doctorat, E.N.S.A.–Rennes, Université de Rennes 1.
- SOIL SURVEY DIVISION STAFF (1993). *Soil survey manual*.
- SUDOM, M. et ARNAUD, R. (1971). Use of quartz, zirconium and titanium as indices in pedological studies. *Canadian Journal of Soil Science*, 51:385–396.
- THOMAS, A.-L. (1998). *Analyse spatiale de la sensibilité des écosystèmes gréseux vosgiens à l'acidification*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts.
- WALTER, C. (2002). *Analyse spatiale des sols en vue de leur gestion précise et de leur surveillance*. Habilitation à diriger des recherches.

ANALYSIS AND REPRESENTATION OF THE SOIL MANTLE

Application to the characterization of soils map units, I.G.C.S. program, France.

In a context of world interest for the grounds, this work propose to understand the organization of the grounds on a large scale on a sedimentary ground of Baugeois. Which logic underlies formation of the units of grounds, and which representations are them more suitable? Lastly, how to preserve the three-dimensional state pedological cover?

The comprehension of the space organization of the grounds rests on identification of the factors and process in the beginning of variation of the grounds. It is thus about a cartographic approach based on the analysis of the pedogenic processes in question.

The techniques of acquisition of the data are based on two complementary mapping methods : (1) a sampling systematic of a survey by hectare ; (2) a sampling length of sequences inspired by the “ structural analysis ”. This methods allowed sampling and analyzes materials on pedological profiles. In order to integrate these data in the environment, they were supplemented by acquisition of a D.E.M. of mesh 10 m.

Granulometry, as a principal data used for comprehension of pedogenesis, allowed the characterization of materials and horizons. It is at the base of a system of unmixing equations of geological materials.

Two perpendicular sequences were particularly studied, a lithotoposequence of West to East, and an isoaltisequence, according to a level line chosen in the most sloping zone. The unmixing model was developed on the lithotoposéquence and applied to the isoaltiséquence. It permits : (1) to note that the grounds is often the result from the mixture of materials autochtones and immigrants, (2) to highlight that croup and thalweg have opposed operations, croup without immigrant contribution nor erosion, thalweg with immigrant contributions and erosion.

Three models of representation are suggested : (1) the conceptual model emphasizes the assumption of a polyphasic pedogenesis and importance to regard the pedological cover as a volume, (2) the chorologic mapping model underlines various interpretations and possible choices for the number and delimitation of the mapping units (3) finally, a model statistics makes it possible to clarify and quantify the chorologic model.

Keywords

Soil mapping, pedogenesis, particle-size distribution, mixing equation model, structural analysis, isoaltisequence.

ANALYSE ET REPRÉSENTATION DE LA COUVERTURE PÉDOLOGIQUE

Application à la caractérisation des unités cartographiques de sols pour le programme I.G.C.S. d'un secteur du Baugeois.

Dans un contexte d'intérêt mondial pour les sols, ce travail se propose de comprendre l'organisation des sols à grande échelle sur un terrain sédimentaire du Baugeois. Quelle logique sous-tend la formation des unités de sols, et quelles représentations sont les plus appropriées ? Enfin, comment conserver l'état tridimensionnel de la couverture pédologique ?

La compréhension de l'organisation spatiale des sols s'appuie sur l'identification des facteurs et processus à l'origine de la variation des sols. Il s'agit donc d'une approche cartographique fondée sur l'analyse des processus pédogénétiques en cause.

Les techniques d'acquisition des données se basent sur deux méthodes de cartographies complémentaires : (1) un échantillonnage systématique d'un sondage par hectare ; (2) un échantillonnage le long de séquences inspirées de l'« Analyse structurale ». Cet échantillonnage-ci a permis le prélèvement et l'analyse des matériaux sur profils pédologiques. Afin d'intégrer ces données dans l'environnement, elles ont été complétées par l'acquisition d'un M.N.A. de maille 10 m.

La granulométrie, en tant que principale donnée utilisée pour la compréhension de la pédogenèse, a permis la caractérisation des matériaux et horizons. Elle est à la base d'un système d'équations de mélanges de matériaux géologiques.

Deux séquences perpendiculaires ont été particulièrement étudiées, une lithotoposéquence d'Ouest en Est, et une isoaltiséquence, selon une courbe de niveau choisie dans la zone la plus pentue. Le modèle de mélange a été développé sur la lithotoposéquence et appliqué à l'isoaltiséquence. Il permet : (1) de constater que les sols sont souvent issus du mélange de matériaux autochtones et allochtones, (2) de mettre en évidence que croupe et talweg ont des fonctionnements opposés, croupe sans apport allochtone ni érosion, talweg avec apports allochtones et érosion.

Trois modèles de représentation sont proposés : (1) le modèle conceptuel met en valeur l'hypothèse d'une pédogenèse polyphasique et l'importance de considérer la couverture pédologique comme un volume, (2) le modèle cartographique choroplète souligne les différentes interprétations et les choix possibles pour le nombre et la délimitation des unités cartographiques (3) enfin, un modèle statistique permet d'explicitier et de quantifier le modèle choroplète.

Mots-clefs

Cartographie des sols, pédogenèse, analyse structurale, granulométrie, modèle de mélange, isoaltiséquence.