



HAL
open science

**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

► **To cite this version:**

Céline Collin Bellier. 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). domain_other. Université d'Angers, 2006. Français. NNT : . tel-00330560v2

HAL Id: tel-00330560

<https://theses.hal.science/tel-00330560v2>

Submitted on 14 Oct 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



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

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, présente « quelques » difficultés parfois insurmontables pour arriver à terme/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 constructives/acérées, 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'INRA, la DRAF au travers des fonds FEOGA objectif 2 pour le programme IGCS 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 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 CHAMPDAVOINE 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.

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 Voxelles et Voxiens qui m'ont redonné confiance en m'apportant leur envie de travailler avec moi, en réclamant mon rigoureux, sévère et violinstique 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 VANHOYDONCK, 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 DEUG, 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	xvi
Liste des tableaux	xvii
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	6
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
II Analyses préliminaires des données	17
3 Premières analyses issues de l'échantillonnage systématique	19
3.1 Examens des cartogrammes	19
3.1.1 La géologie	19
3.1.2 Les volumes d'altération	23
3.1.3 La texture	25
3.1.3.1 Le Sénonien inférieur (c_4)	25
3.1.3.2 Le Turonien supérieur (c_{3b})	27
3.1.3.3 Le Turonien inférieur (c_{3a}), dit « craie Tuffeau de l'Anjou »	27
3.1.3.4 Le Cénomaniens supérieur - marnes à Ostracées et sables verts supérieurs - (c_{2b})	27
3.1.3.5 Le Cénomaniens moyen - argiles sableuses glauconieuses - (c_{2a})	28
3.1.3.6 Les sables des horizons de surface	28
3.1.4 Les réactions à HCl	29
3.1.5 L'hydromorphie	32
4 Résultats préliminaires issus de l'échantillonnage le long des séquences (LTS et IAS)	35
4.1 Lames minces et morphoscopie des sables	35
4.1.1 Les lames minces	35
4.1.2 La morphoscopie des sables	38

4.2	Description des sols en terme d'homogénéité granulométrique des fosses pédologiques	40
4.2.1	Le long de la lithotoposéquence (LTS)	40
4.2.2	Le long de l'isoaltiséquence (IAS)	48
4.2.3	Conclusion sur l'homogénéité des sols des LTS et IAS	52
4.3	Quelques résultats complémentaires après analyses des échantillons prélevés dans les fosses	52
4.3.1	Singularité de seuil dans les réactions HCl ou comment un seuil peut être trompeur : le cas des réactions à HCl sur les carbonates	52
4.4	Typologie des sols	54
III Facteurs et processus à l'origine de la distribution des sols		59
5	Identification du matériau parental de sols le long d'une lithotoposéquence à partir d'équations de mélanges granulométriques	
	Réflexion sur la Lithotoséquence (LTS)	63
5.1	Résultats et discussion	63
5.1.1	Comparaison granulométrique entre les matériaux géologiques	63
5.1.2	Comparaison granulométrique des horizons le long de chaque solum	65
5.1.3	Estimation des mélanges granulométriques dans les horizons	68
5.2	Conclusion	70
6	Influence de la morphologie du relief et du matériau parental	
	Réflexion sur l'Isoaltiséquence (IAS)	73
6.1	Résultats	73
6.1.1	Comparaison granulométrique des horizons le long de chaque profil	73
6.1.2	Estimation des mélanges granulométriques dans les horizons	75
6.2	Discussion	77
6.3	Conclusion	78
IV Représentation des connaissances sur la distribution des sols		81
7	Modèle de représentation conceptuelle	85
7.1	Une pédogenèse polyphasique	85
7.1.1	Premier scénario	86
7.1.2	Deuxième scénario	86
7.1.3	Premier ou deuxième scénario ?	88
7.2	Visualisation tridimensionnelle des phénomènes	88
8	Explicitation du modèle de représentation choroplète :	
	Détermination des U.C.S.	93
8.1	2 U.C.S. : modèle privilégiant la géomorphologie	94
8.2	3 U.C.S. : modèle privilégiant le calcul de mélanges	96
8.3	Ou 4 U.C.S. : modèle privilégiant des systèmes pédologiques	96
8.4	Conclusion sur le modèle de représentation choisi au final	96

9	Approche quantitative de la localisation et de la caractérisation des U.C.S. et des U.T.S.	101
9.1	Délimitation des U.C.S.	101
9.2	Quantification de l'hétérogénéité des U.C.S.	101
9.3	Localisation d'une U.T.S. au sein des U.C.S. :	
	Exemple de l'U.T.S. Ca3	104
10	Conclusion générale et perspectives	109

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	Extrait de la carte géologique à 1/50000 ^{ème}	20
3.2	Carte géologique réalisée à partir des sondages à la tarière à main lors de la prospection systématique	21
3.3	Photographie prise lors de l'ouverture de la fosse pédologique BC	22
3.4	Photographie prise lors de l'ouverture de la fosse pédologique BCC	23
3.5	Cartogramme présentant les différents volumes d'altération	24
3.6	Cartogramme des textures manuelles (triangle de Jamagne) sur fond géologique	26
3.7	Carte de synthèse des hypothèses des textures sableuses en surface	29
3.8	Carte d'hypothèse des textures sableuses en surface sur fond de pentes	30
3.9	Cartogramme présentant les réactions à HCl 1/3N sur fond géologique	31
3.10	Cartogramme présentant les réactions à HCl 1/3N sur la carte d'hypothèse des textures sableuses (<i>cf.</i> 3.1.3.6)	32
3.11	Cartogramme présentant l'hydromorphie sur fond géologique	33
4.1	Carte de situation des lithotoposéquence et isoaltiséquence	36
4.2	Photographies de Topo20, en lumière analysée et en lumière polarisée	37
4.3	Photographies de Topo21, en lumière analysée et en lumière polarisée	37
4.4	Photographies de Topo23, en lumière analysée et en lumière polarisée	38
4.5	Photographies de Topo58, en lumière analysée et en lumière polarisée	38
4.6	Carte de situation des lithotoposéquence et isoaltiséquence	41
4.7	Histogrammes des C.E.C. _{arg} (mé.kg ⁻¹) des échantillons de la LTS en fonction de la profondeur	42
4.8	Histogrammes des granulométries (%) des échantillons de la LTS en fonction de la profondeur	43
4.9	Histogrammes des granulométries (%) des échantillons de la LTS en fonction de la profondeur	44
4.10	Histogrammes des granulométries (%) des échantillons de l'IAS en fonction de la profondeur	49
4.11	Histogrammes des granulométries (%) des échantillons de l'IAS en fonction de la profondeur	50
4.12	Histogrammes des granulométries (%) des échantillons de l'IAS en fonction de la profondeur	51
4.13	Histogramme des corrélations entre estimations au champ et analyses chimiques	54

4.14	Agrandissement de l'histogramme des corrélations entre estimations au champ et analyses chimiques	56
4.15	Cartogramme de synthèse des typologies de sols	57
5.1	Squelettes cumulés des horizons représentatifs de la granulométrie des matériaux géologiques initiaux	64
5.2	Histogramme de la granulométrie des horizons représentatifs de la granulométrie des matériaux géologiques initiaux	65
5.3	Coupe en long de la lithotoposéquence	69
6.1	Coupe en long de la partie Sud de l'isoaltiséquence	76
7.1	Exemple de CALCOSOL présentant un horizon BT	86
7.2	Etat pseudo-initial précédant la pédogenèse	87
7.3	Scénario 1, étape 1 : colluvionnement du sable sénonien en l'absence de végétation	87
7.4	Scénario 1, étape 2 : décalcarification, puis formation de LUVISOL sous une végétation forestière	87
7.5	Scénario 1, étape 3, sub-actuelle : mise en culture avec recarbonatation de la surface	87
7.6	Etat pseudo-initial précédant la pédogenèse	89
7.7	Scénario 2, étape 1 : formation d'un LUVISOL	89
7.8	Scénario 2, étape 2 : troncature du LUVISOL, le BT apparaît en surface	89
7.9	Scénario 2, étape 3, sub-actuelle : colluvionnement et mise en culture qui entraîne une recarbonatation de la surface	89
7.10	Cartographie en pseudo-3D des formations superficielles définies à partir des séquences	91
8.1	Cartogramme de synthèse des typologies de sols présents	94
8.2	Carte présentant les 2 U.C.S. telles qu'elles ont été préalablement définies	95
8.3	Coupe schématique en long présentant les 2 U.C.S. telles qu'elles ont été préalablement	95
8.4	Carte présentant 3 U.C.S.	97
8.5	Coupe schématique en long présentant 3 U.C.S.	97
8.6	Carte présentant 4 U.C.S.	98
8.7	Coupe schématique en long présentant 4 U.C.S.	98

Liste des tableaux

4.1	Tableau récapitulatif de la morphoscopie des sables (%)	39
4.2	Corrélation entre estimations au champ et analyses chimiques, d'après Baize et Jabiol (1995)	53
4.3	Classes des réactions HCl au champ	53
4.4	Tableau récapitulatif des différentes U.T.S. définies sur le secteur d'étude, et leurs caractéristiques	55
5.1	Tableau récapitulatif des comparaisons granulométriques	66
6.1	Tableau récapitulatif des comparaisons granulométriques	74
9.1	Tableau de contingences des surfaces des U.C.S. et des U.T.S., en ha	102
9.2	Tableau de contingences de présence des U.C.S. et des U.T.S., en %, échantillonnage systématique	102
9.3	Tableau de contingences de présence des U.C.S. et des U.T.S., en %, intégralité des sondages	102

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.. Au sommet de Rio, les États 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 circulaire 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 et 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 Cartographie 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 propre/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 à comprendre l'organisation spatiale du carbone dans les sols (Arrouays (1995), Lecointe *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 (Lorgeoux, 1981; 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) et 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) ont 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, Ibañes *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 Sudom 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 explicitier 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 dix 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 explicitier 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 partie 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



FIG. 2.1: Localisation de l'étude et hypsométrie

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 peut s'expliquer par une volonté des éleveurs de garder de l'ombre pour leurs animaux et/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). 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 Cénomaniens moyen au Sénonien (*cf.* coupe fig.2.2).

Le Cénomaniens moyen c_{2a} est composé d'argiles plus ou moins sableuses et glauconieuses. Elles sont surmontées par des marnes glauconieuses à Ostracées du Cénomaniens supérieur c_{2b} . Par endroit, ces ostracées forment une lumachelle qui arme le paysage. Ces 2 substrats du Cénomaniens forment une unité que nous appelons « plaine cénomaniens ». Louail Louail (1984), dans sa thèse d'état, a montré que le Cénomaniens 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 cénomaniens 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

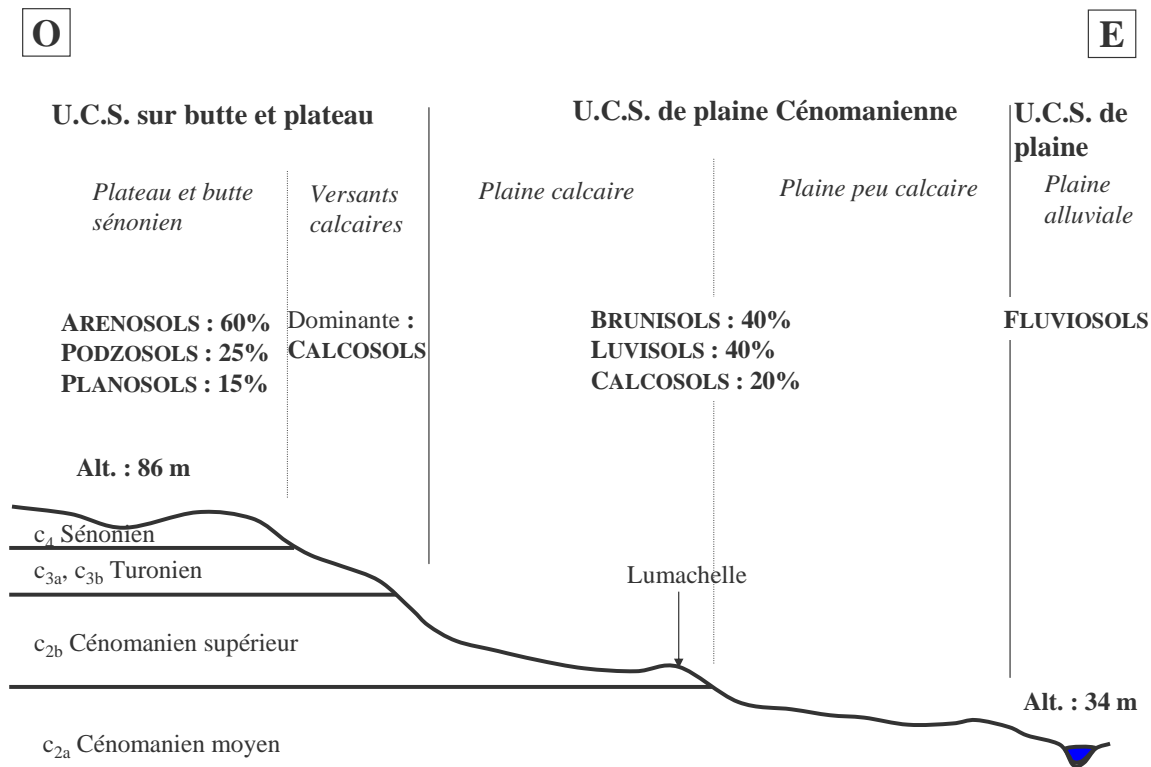


FIG. 2.2: Pédologie synthétique du site issue des descriptions réalisées dans le cadre du travail I.G.C.S.-Pays de la Loire, à paraître

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 Conservation des Sols (I.G.C.S.). La coupe 2.2, ainsi que les fiches synthétiques en annexe 10, 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 cénomanienne

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/dans 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.

Deuxième partie

Analyses préliminaires des données

Chapitre 3

Premières analyses issues de l'échantillonnage systématique

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.

3.1 Examens des cartogrammes

Les sondages systématiques ont permis la réalisation de plusieurs cartogrammes. Ici seront présentés ceux concernant la géologie, avec une comparaison de la carte obtenue à la carte BRGM, les cartogrammes concernant l'hydromorphie, le cartogramme des réactions à HCl, le cartogramme des volumes d'altération, et pour finir les cartogrammes relatifs aux textures avec quelques hypothèses sur la présence de sables en surface.

3.1.1 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 $1/25000^{\text{ème}}$. D'autre part, les sondages systématiques ont un maillage d'échantillonnage d'un sondage par hectare, soit une échelle de travail comprise entre le $1/3000^{\text{ème}}$ et le $1/15000^{\text{ème}}$ (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.

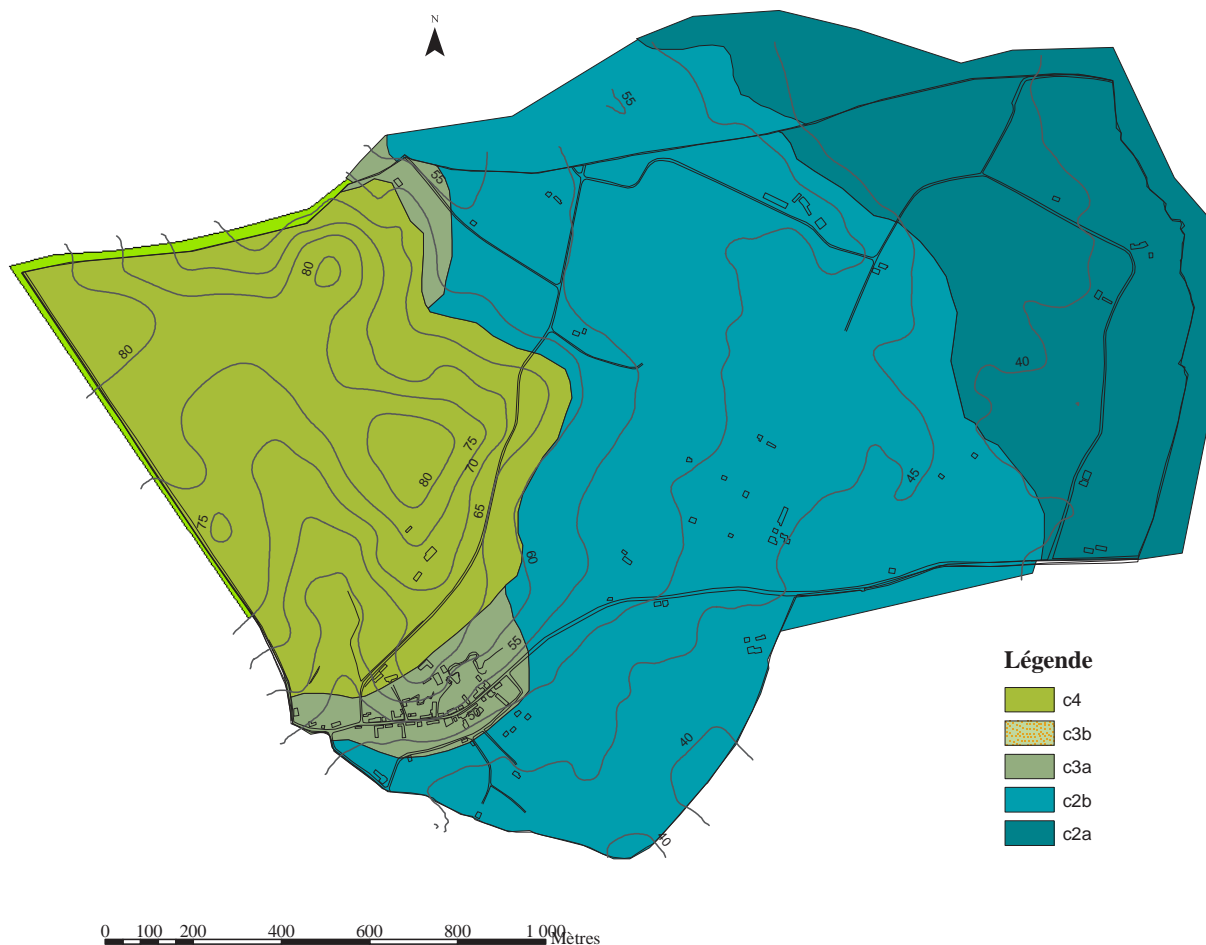


FIG. 3.1: Extrait de la carte géologique à 1/50000^{ème}

Le Sénonien (c_4)

La carte du BRGM (figure 3.1) montre une présence du Sénonien (c_4) plus importante, avec une altitude plus faible de limite inférieure à celle de la carte réalisée à partir des sondages à la tarière à main (figure 3.2). 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.

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. 3.2) permet donc de positionner le Turonien supérieur (c_{3b}).

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

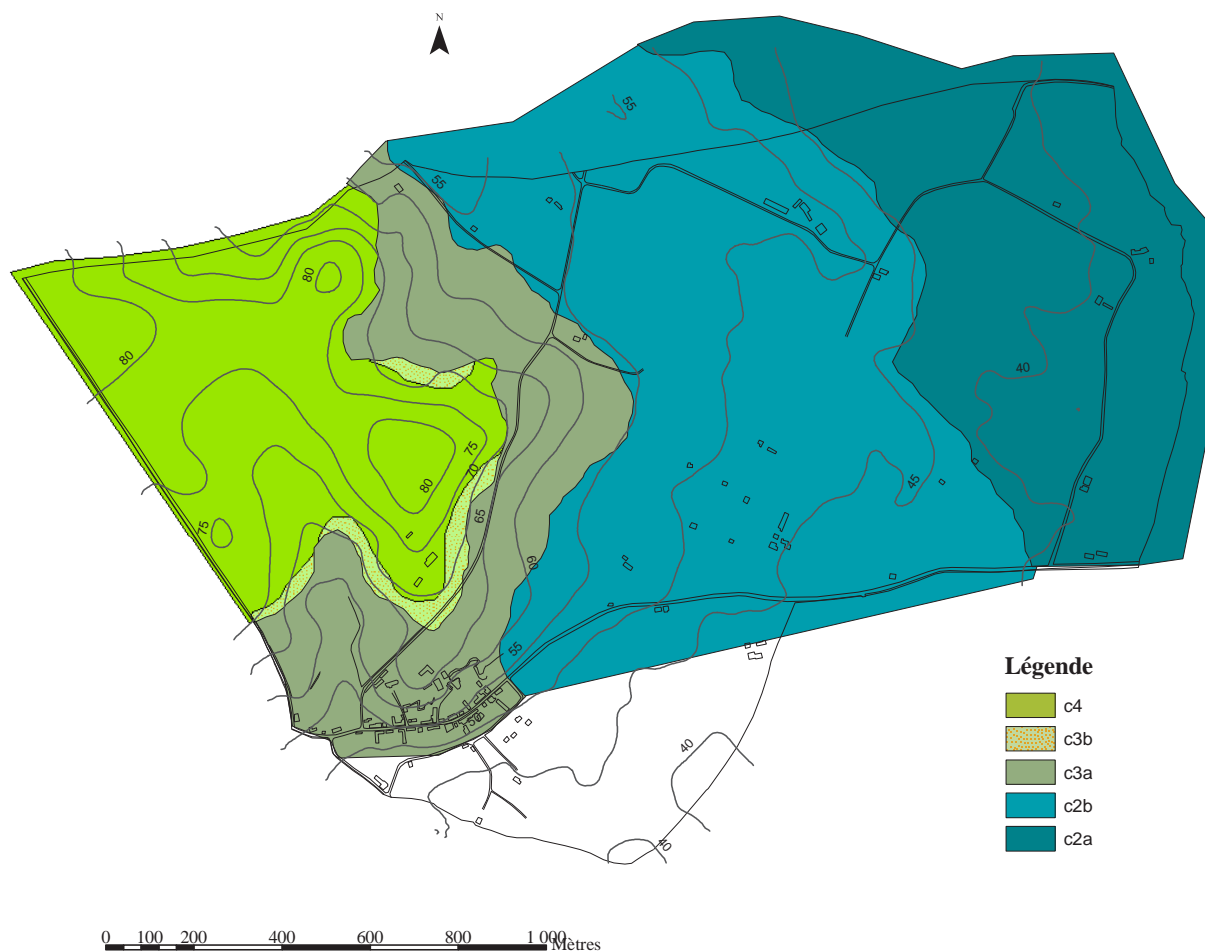


FIG. 3.2: Carte géologique réalisée à partir des sondages à la tarière à main lors de la prospection systématique

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 pendage (0.3% vers le Sud) est remarquable grâce à une coupe géologique (*cf.* annexe 10). 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.

Complétant les observations de terrain, les photos des figures 3.3 et 3.4 montrent des singularités 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 3.3, le profil présente des irrégularités qui ressemblent à

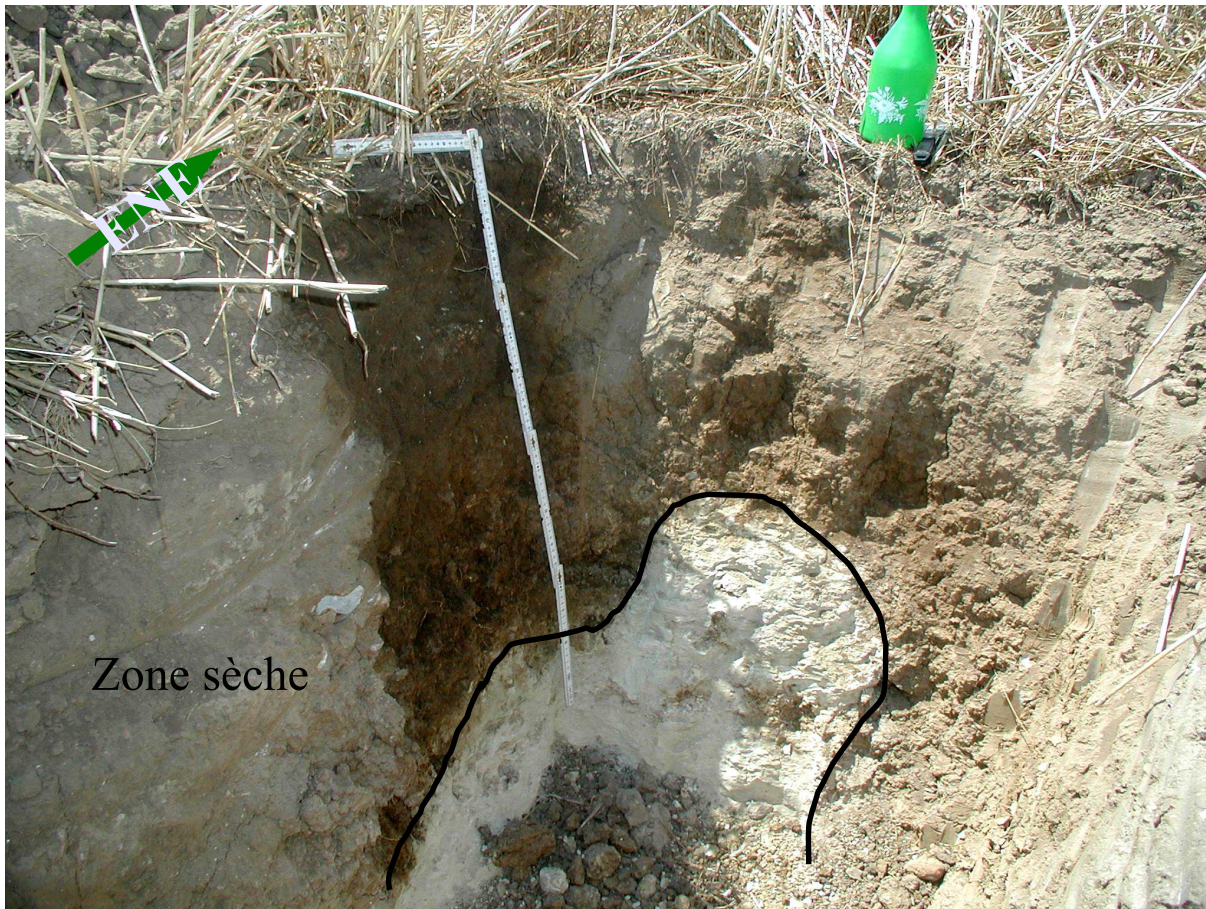


FIG. 3.3: Photographie prise lors de l'ouverture de la fosse pédologique BC

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 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 3.4), 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. 3.4: Photographie prise lors de l'ouverture de la fosse pédologique BCC

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. 3.1)) 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 noter/lever les différentes couches géologiques, et ainsi augmenter la précision.

3.1.2 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 3.5 est faite du plus récent au plus ancien des substrats/étages géologiques.

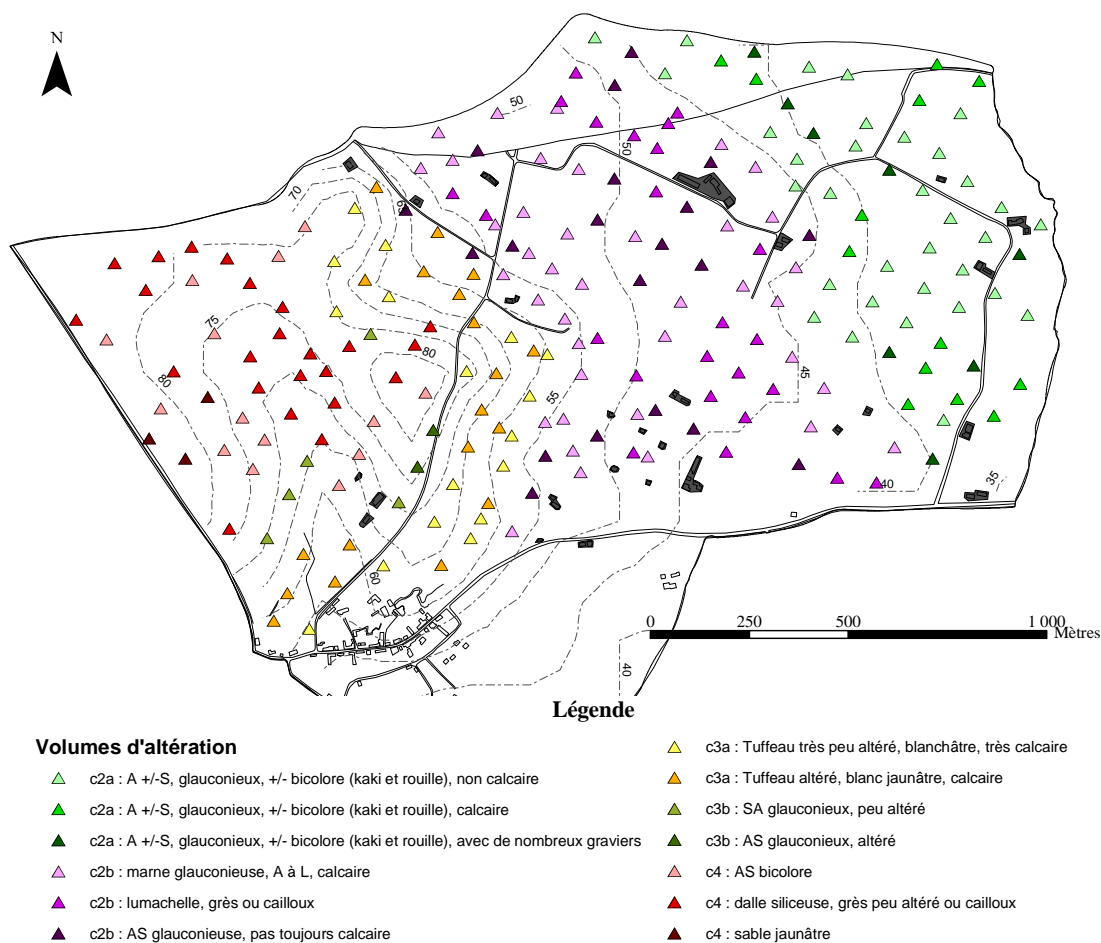


FIG. 3.5: Cartogramme présentant les différents volumes d'altération

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.

Le substrat solide (grès ou dalle siliceuse) se trouve principalement sur la butte, les pentes 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.

Turonien supérieur (c_{3b})

Le Turonien supérieur (c_{3b}) comporte deux volumes (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.

Turonien inférieur (c_{3a})

Tout comme le Turonien supérieur (c_{3b}), le Turonien inférieur (c_{3a}) comporte deux volumes (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.

Cénomannien supérieur (c_{2b})

Le Cénomannien 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.

Cénomannien moyen (c_{2a})

Les variations latérales de faciès du Cénomannien 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} .

3.1.3 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, se réfèrent aux géologie et lithologie en place (Brossé et Louail, 1976).

3.1.3.1 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

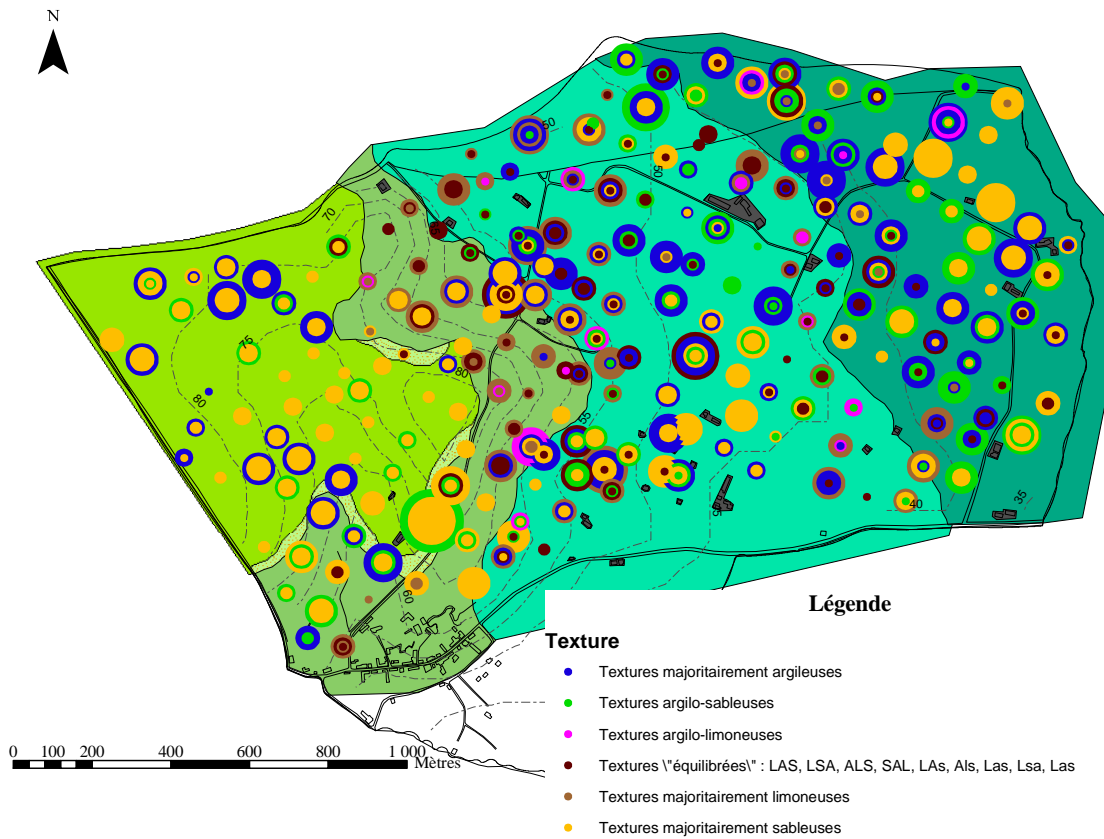


FIG. 3.6: Cartogramme des textures manuelles (triangle de Jamagne) sur fond géologique
Chaque couleur représente une gamme de textures manuelles, chaque taille de cercle un horizon, de la surface - le plus petit - au fond - le plus gros -, proche du substrat.

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 3.6 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 3.5, nous pouvons constater que, dans les cas de sable sur argile, le volume d'altération est principalement constitué d'argile bicolore, argile 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 possible 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.

3.1.3.2 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 3.1.3.6).

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

L'altération de ce matériau donne des textures préférentiellement limoneuses ou limono-argilo-sableuse. Ceci étant, en plusieurs endroits, des horizons de surface plus sableux apparaissent. Les talwegs, plus ou moins prononcés, sont affectés par un recouvrement sableux, mais ils ne sont pas les seuls. 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 3.1.3.6).

3.1.3.4 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.

3.1.3.5 Le Cénomaniens 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 à nous interroger sur leur origine sans doute complexe. C'est l'objet de la partie qui suit.

3.1.3.6 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 3.7. 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 interfluves ou dans les talwegs. Pourtant, en ce qui concerne les sables sur le c_{3a} , la carte 3.8 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/transportés. 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 période 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 3.7, résume les principales hypothèses concernant la présence de sable dans les horizons de surface. Ce ne sont ici qu'hypothèses et nous verrons dans la partie 5 que la seconde campagne de terrain (échantillonnage en séquences) a permis de confirmer ou infirmer certaines de ces hypothèses.

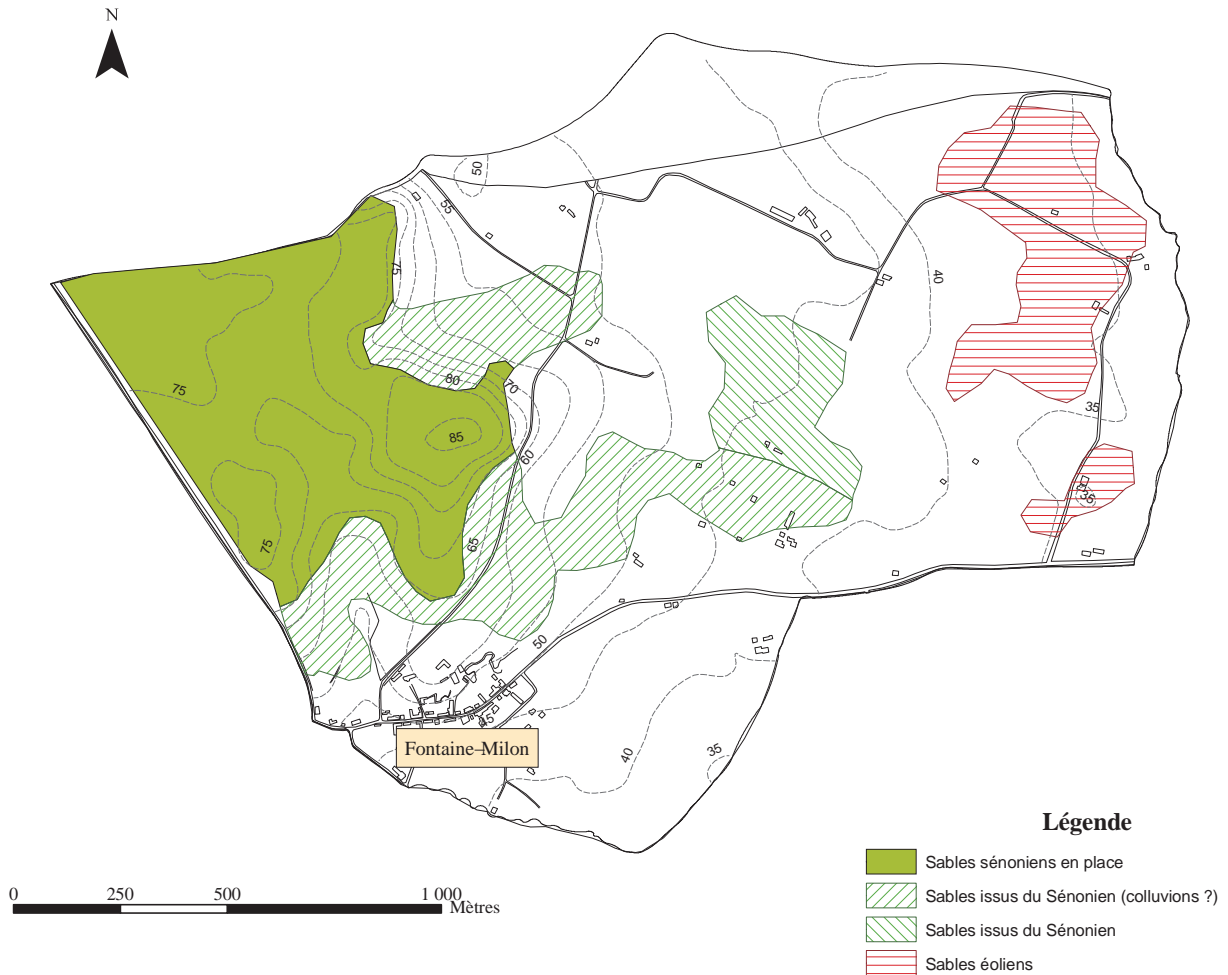


FIG. 3.7: Carte de synthèse des hypothèses des textures sableuses en surface

3.1.4 Les réactions à HCl

Sur la figure 3.9, deux zones non-calcaires ressortent, une dans la plaine cénomaniennne, NC1, et l'autre sur le plateau sénonien, NC2. En effet, 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} , 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

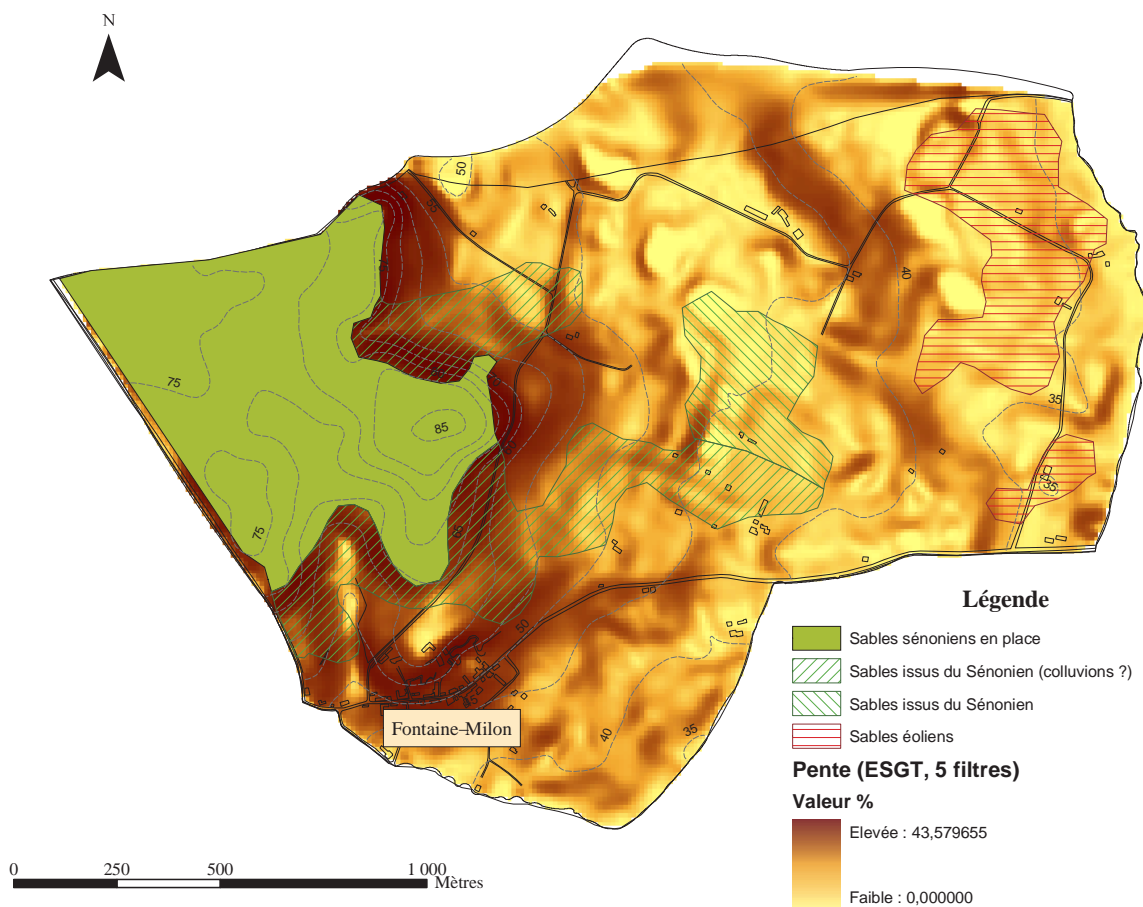


FIG. 3.8: Carte d'hypothèse des textures sableuses en surface sur fond de pentes

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 3.10.

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. 3.10), 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} .

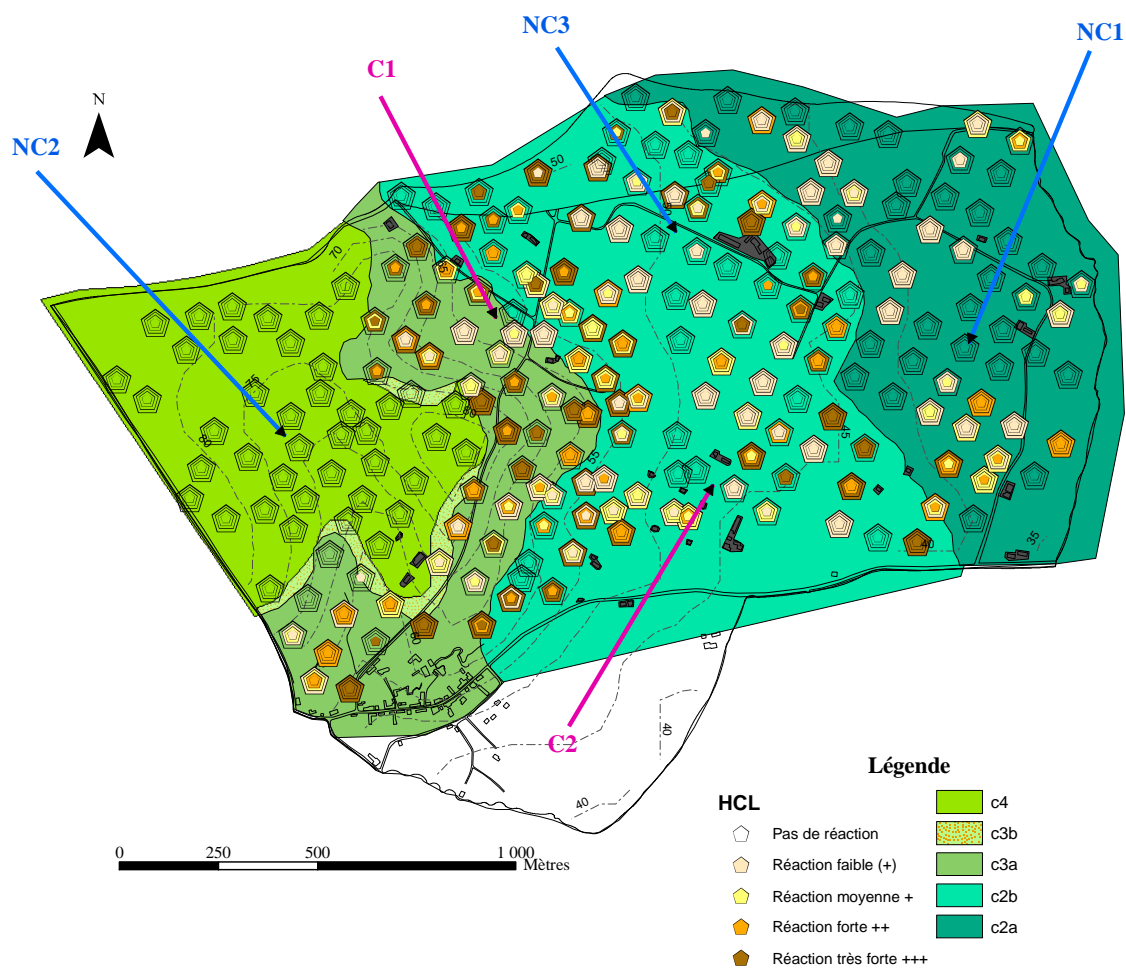


FIG. 3.9: Cartogramme présentant les réactions à HCl 1/3N sur fond géologique
La taille des symboles est fonction du numéro d'horizon, le plus petit symbole en surface, le plus gros en profondeur.

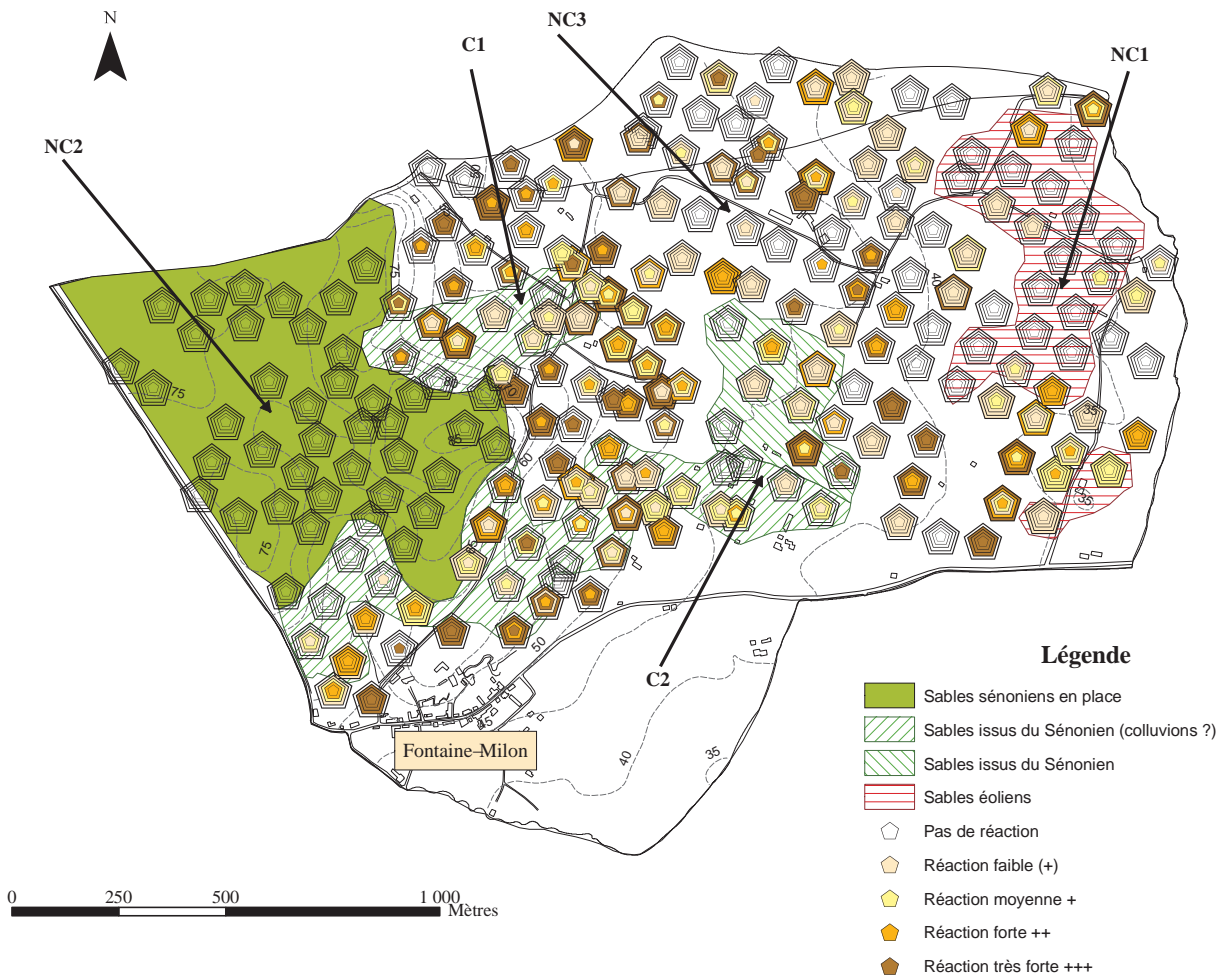


Fig. 3.10: Cartogramme présentant les réactions à HCl 1/3N sur la carte d'hypothèse des textures sableuses (cf. 3.1.3.6)

3.1.5 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. 3.11). Ceci étant, la quantité des taches est faible en surface, et n'augmente qu'à partir du 3^{ème} horizon. Certaines zones sont peu ou 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 3.1.3), 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.

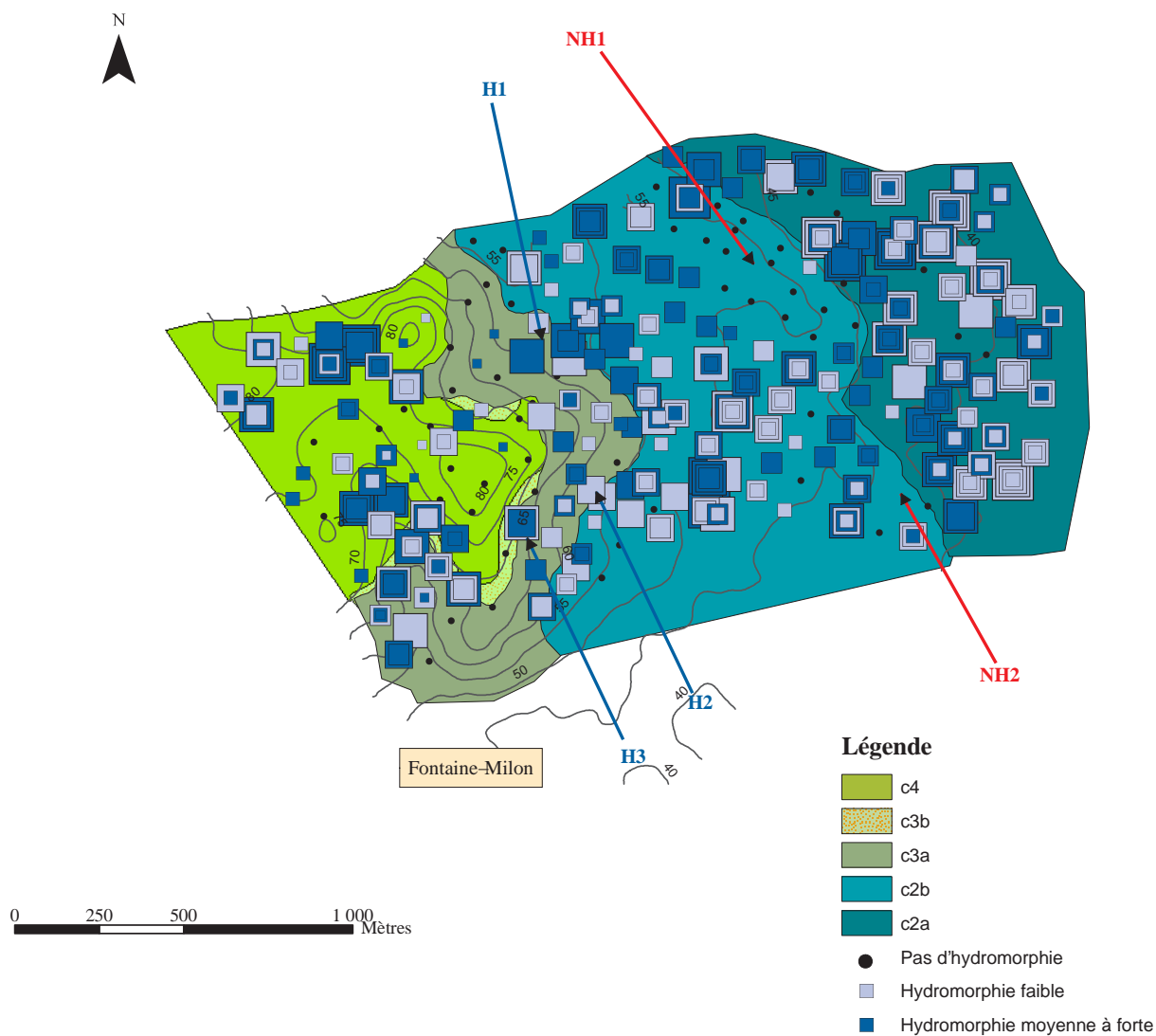


FIG. 3.11: Cartogramme présentant l'hydromorphie sur fond géologique

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.

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 déferrification. Les zones H1 et H2 se situent dans des petits talwegs, en bas de 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 déferrification 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 géologique 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 4

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 4.6).

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.

4.1 Lames minces et morphoscopie des sables

4.1.1 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. 4.2). 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, 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.

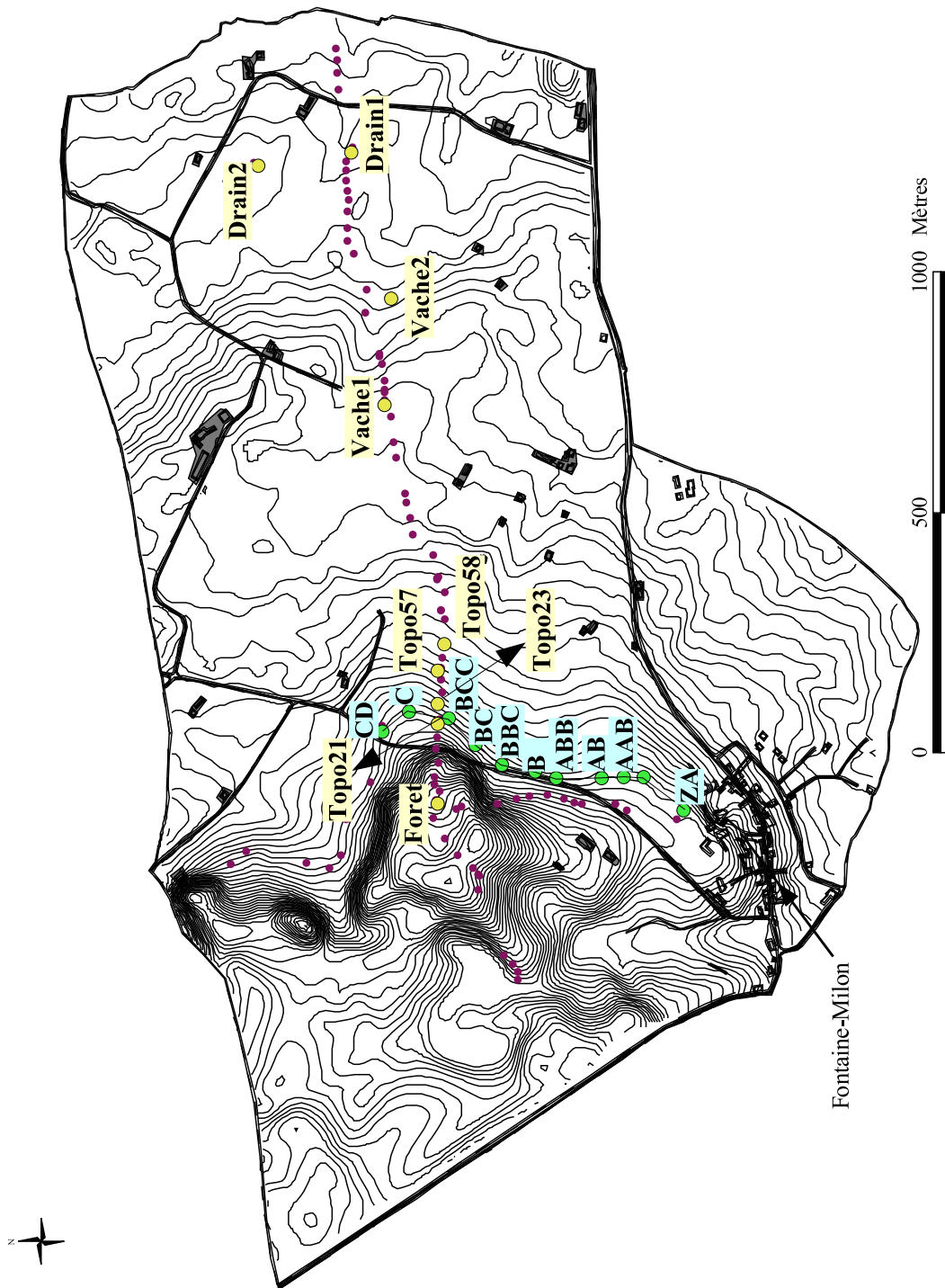


FIG. 4.1: Carte de situation des lithotoposéquence et isoaltiséquence
Les fosses décrites sont repérées pas des points jaunes pour la LTS et verts pour l'IAS. Les points violets correspondent à des sondages à la tarière

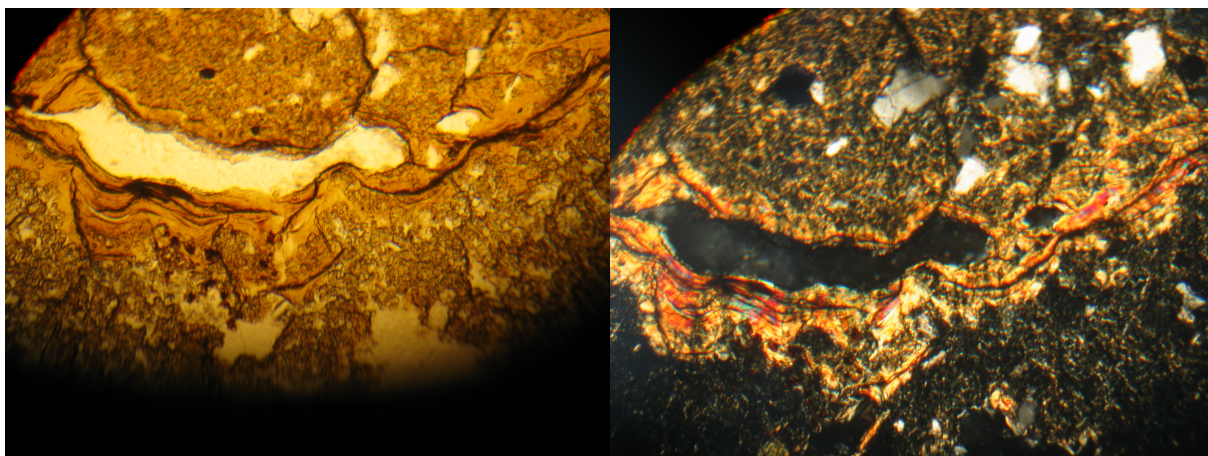


FIG. 4.2: Photographies de Topo20, en lumière analysée et en lumière polarisée

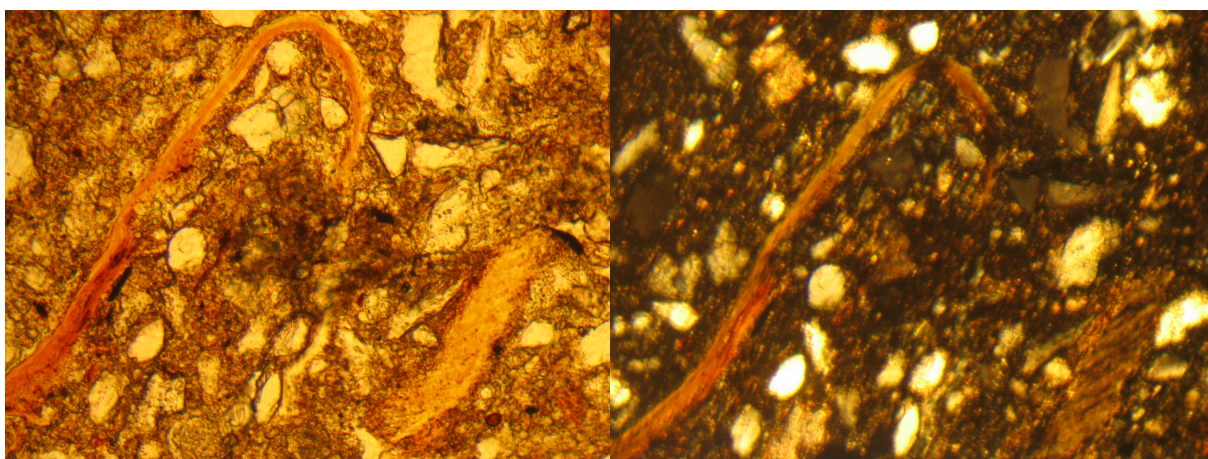


FIG. 4.3: Photographies de Topo21, en lumière analysée et en lumière polarisée

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

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'ac-

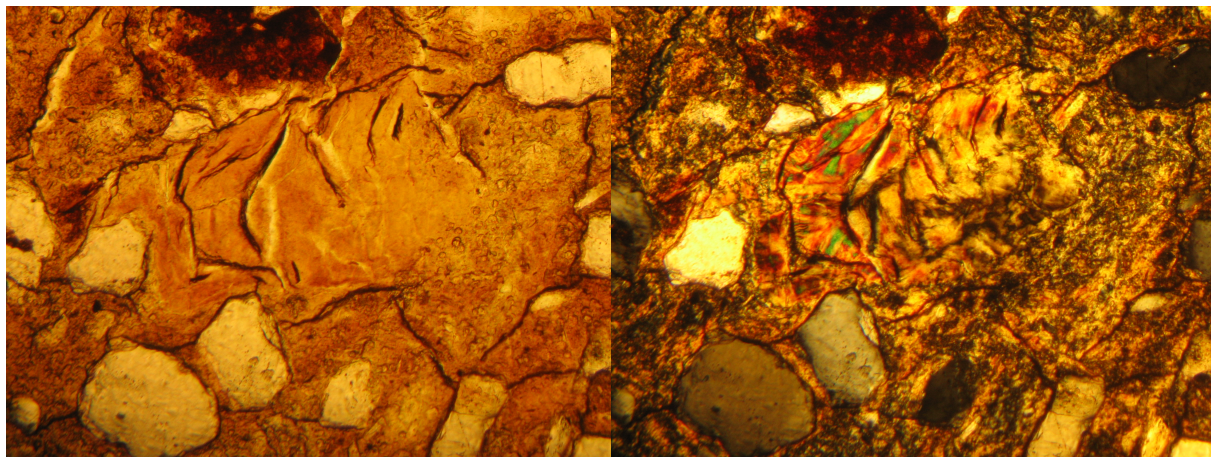


FIG. 4.4: Photographies de Topo23, en lumière analysée et en lumière polarisée

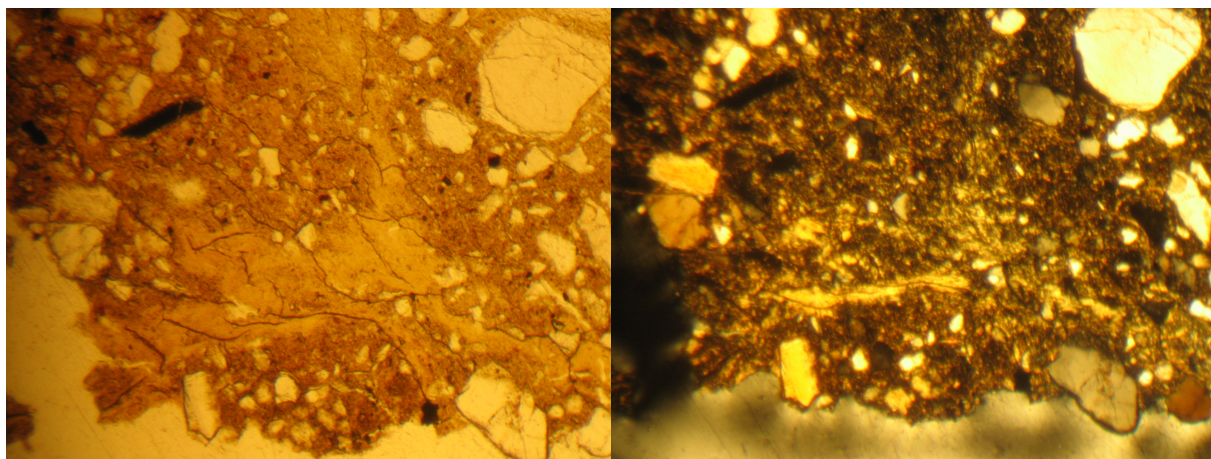


FIG. 4.5: Photographies de Topo58, en lumière analysée et en lumière polarisée

cumulation, 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.

4.1.2 La morphoscopie des sables

Des observations morphoscopiques ont été effectuées sur huit échantillons prélevés à la rière à main lors de la cartographie de la lithoposéquence. Le tableau 4.1 présente les résultats de ces observations. Pour chaque échantillon sont précisés son nom et son numéro de prélèvement ; entre parenthèses est noté à titre indicatif le matériau géologique stipulé sur la carte géologique corrigée par nos soins (fig.3.2).

Pour rappel du paragraphe ??, (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 4.1.

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	0	0	0	3,7	0
émoussés	64,2	30,3	91,7	7,4	83,3	16,7	70,1	23,4
ronds	1,8	3,7	0	0,9	0	0	1,9	0,9

	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	0,8	1,9	3,8	0	0	4,3	0
émoussés	63,6	21,2	77,1	3,8	73,3	20,8	61,7	22,6
ronds	4,2	9,3	1,9	11,4	0,8	5	0	11,3

TAB. 4.1: Tableau récapitulatif de la morphoscopie des sables (%)

Sables du Sénonien (c₄) (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 des 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 4.1, 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'acquérir 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 4.2 à partir des échantillons prélevés dans les fosses.

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

La figure 4.7 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 4.8 et 4.9 présentent les 8 fractions granulométriques pour chacune des fosses de la LTS.

les figures 4.10, 4.11, et 4.12 présentent les 8 fractions granulométriques pour chacune des fosses de l'IAS.

4.2.1 Le long de la lithotoposéquence (LTS)

« Foret » (= 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. 4.8). 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 ??) 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

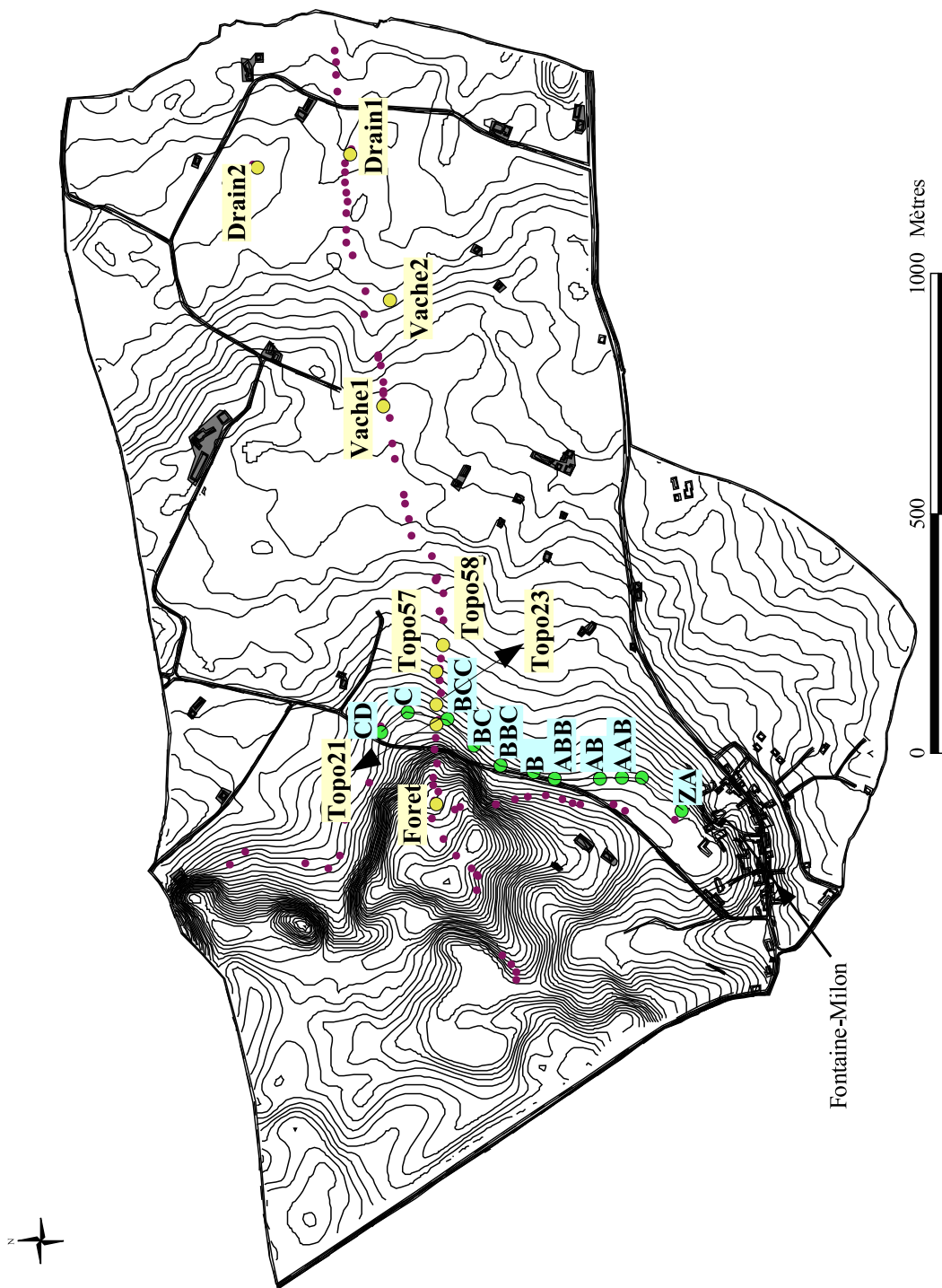


FIG. 4.6: Carte de situation des lithotoposéquence et isoaltiséquence

Les fosses décrites sont repérées par des points jaunes pour la LTS et verts pour l'IAS. Les points violets correspondent à des sondages à la tarière

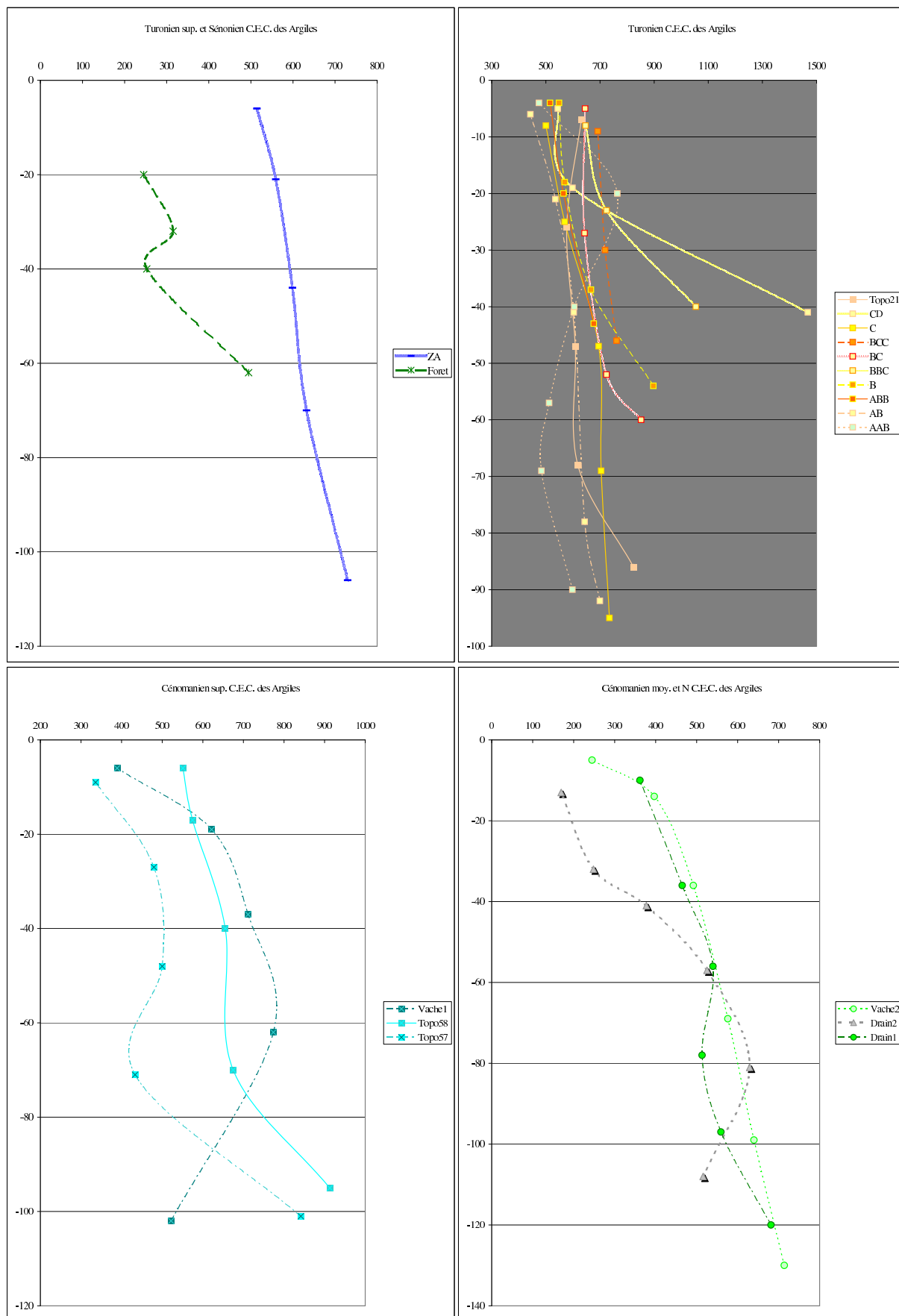


FIG. 4.7: Histogrammes des C.E.C._{arg} (mé.kg⁻¹) des échantillons de la LTS en fonction de la profondeur

4.2. Description des sols en terme d'homogénéité granulométrique des fosses pédologiques 43

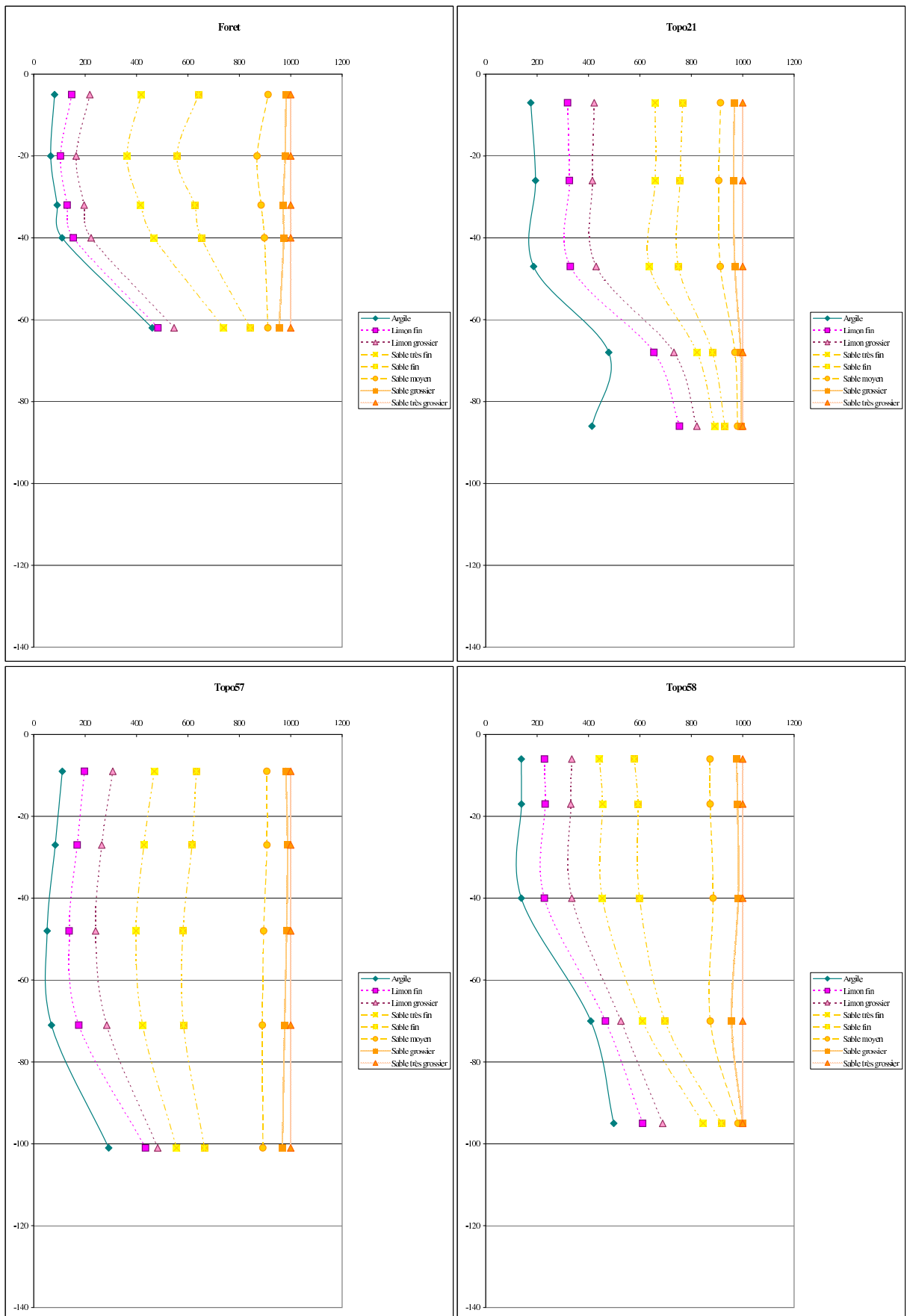


FIG. 4.8: Histogrammes des granulométries (%) des échantillons de la LTS en fonction de la profondeur

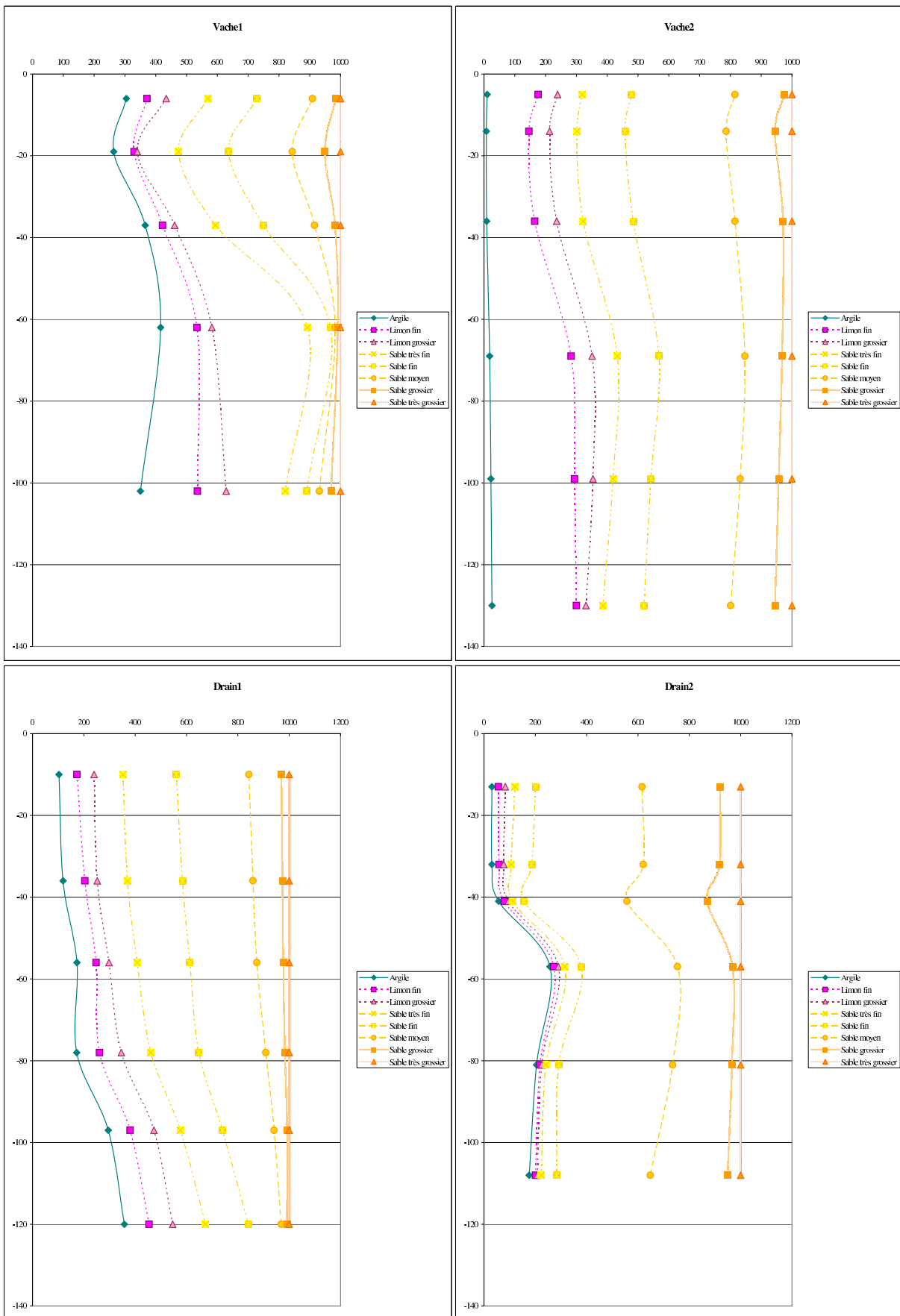


FIG. 4.9: Histogrammes des granulométries (%) des échantillons de la LTS en fonction de la profondeur

texturale qui n'apparaît pas seulement au niveau de la présence/absence des argiles. Pourtant, selon les écarts (*cf.* chapitre ??), le profil est homogène (avec $E_{b_{max}} = 35 < 40$). Quant aux ratio (*cf.* chapitre ??), 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.

« **Topo21** » (= 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.4.8) 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.

« **Topo57** » (= 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 Cénomaniens moyen (c_{2b}). La granulométrie en fonction de la profondeur (*cf.* fig.4.8) 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 constatations tendent à montrer que le sol observé dans cette fosse est homogène, sans apport allochtone, avec des processus d'illuviation.

« **Topo58** » (= 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. 4.8) 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 5^{ème} 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.

« Vache1 » (= 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.4.9) montre un ventre d'argile en H3 et H4, précédé d'une légère dépression en H2. Plusieurs constatations 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.

« Vache2 » (= 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 Cénomaniens moyen (*c*_{2a}). Le profil granulométrique (fig. 4.9) 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).

« Drain1 » (= F8)

Cette fosse, située dans une parcelle agricole, fait plus de 1.4 m de profondeur, développée dans les argiles sableuses du Cénomaniens moyen. Le profil granulométrique (fig. 4.9) 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 cénomaniens, à l'écart de toute butte éventuellement créée par des dépôts éoliens (N). La granulométrie (cf. 4.9), 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.

« Drain2 » (= F9)

C'est une fosse, dans une parcelle agricole, de plus de 1.2 m de profondeur, développée dans les argiles sableuses du Cénomaniens 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. 4.9) 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.

4.2.2 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 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. 4.7) 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 « serpentín », 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.

4.2. Description des sols en terme d'homogénéité granulométrique des fosses pédologiques 49

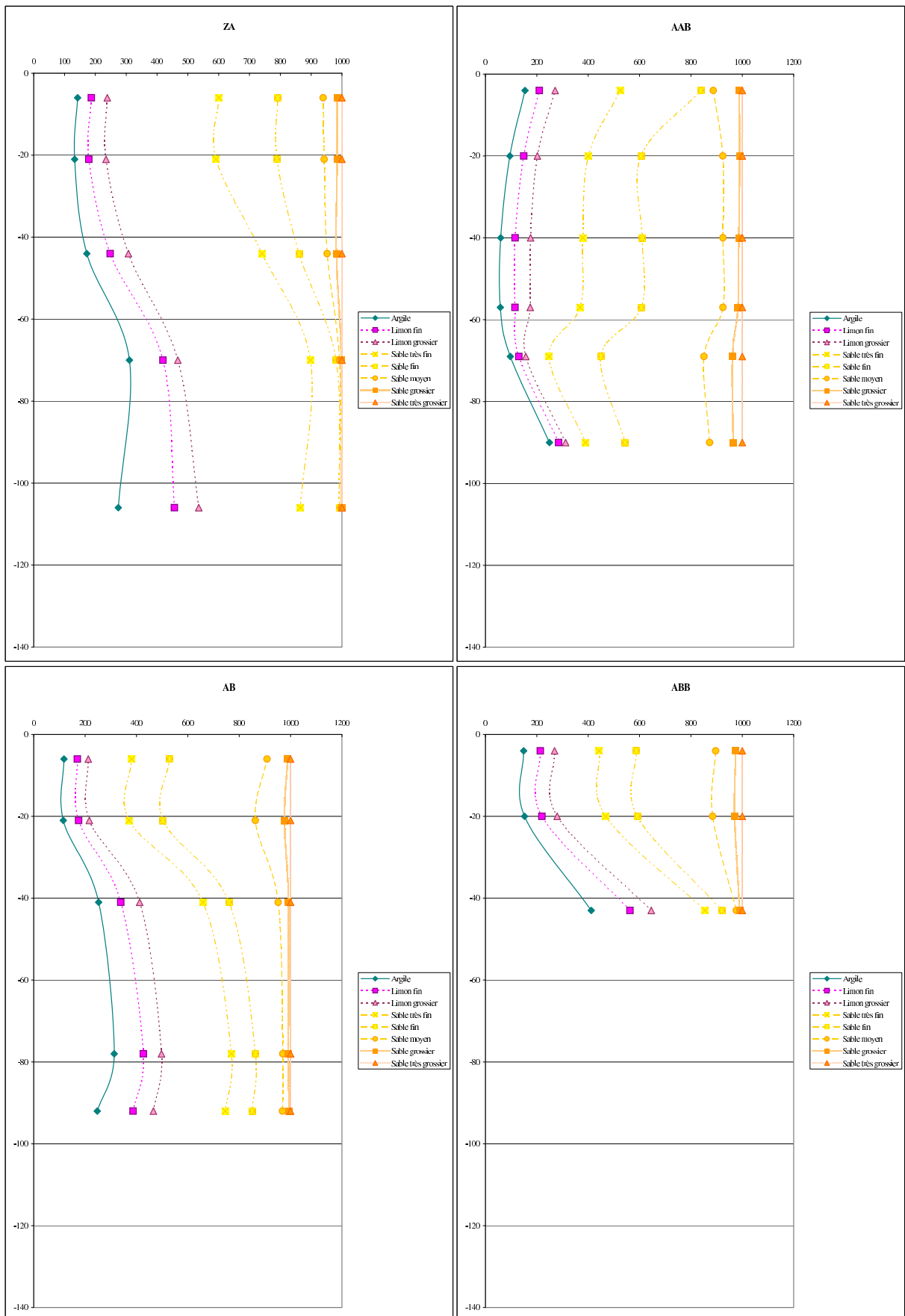


FIG. 4.10: Histogrammes des granulométries (%) des échantillons de l'IAS en fonction de la profondeur

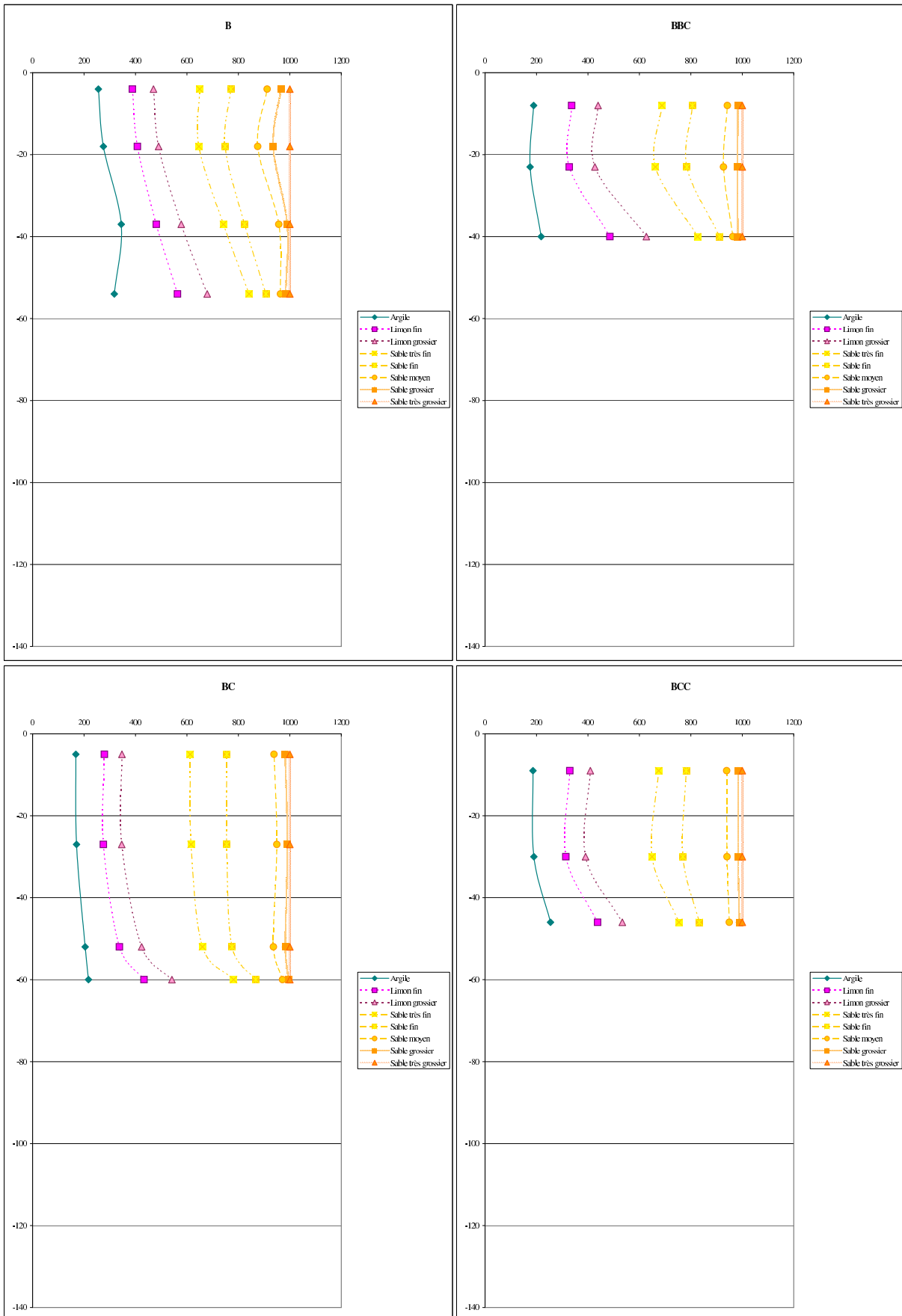


FIG. 4.11: Histogrammes des granulométries (%) des échantillons de l'IAS en fonction de la profondeur

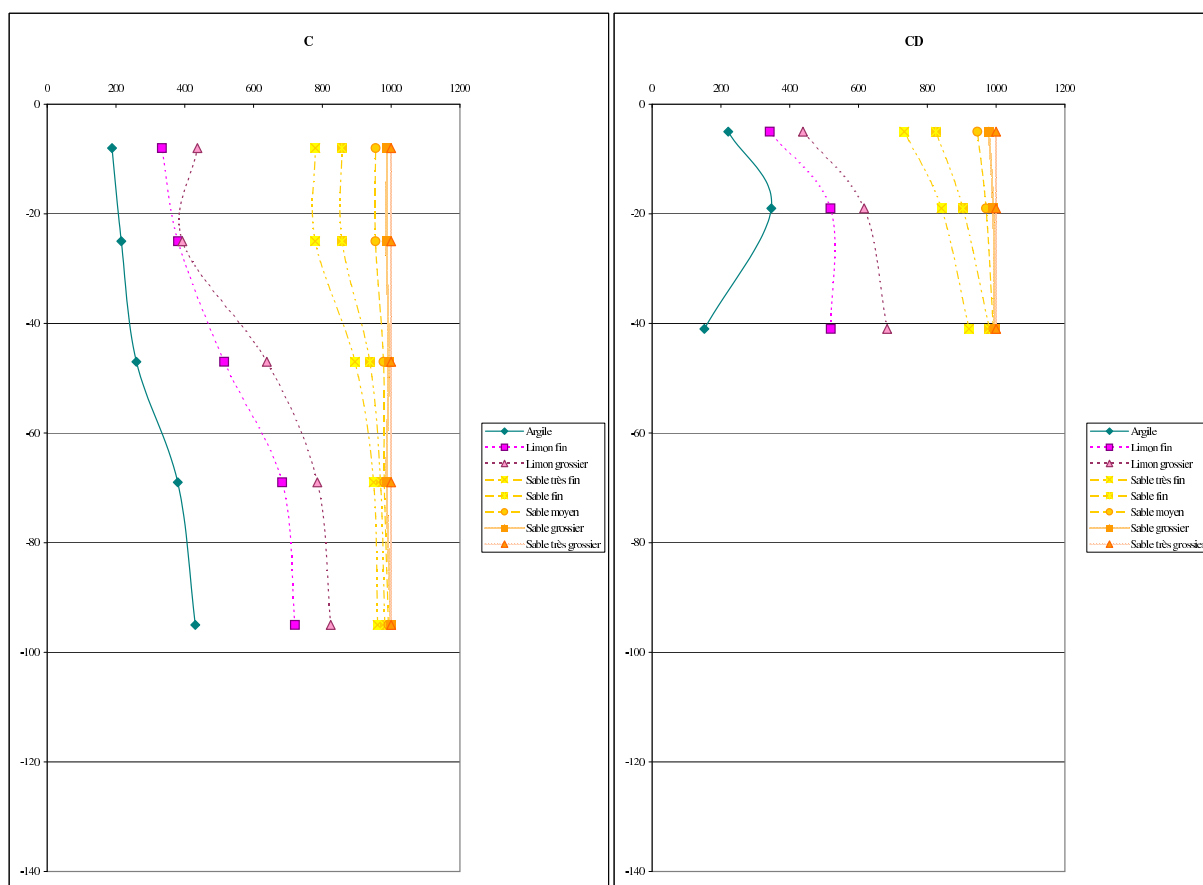


FIG. 4.12: Histogrammes des granulométries (%) des échantillons de l'IAS en fonction de la profondeur

« **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 ratios 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 ratios 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 ratios, 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.

4.2.3 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.

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

4.3.1 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 4.2).

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

TAB. 4.2: 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 4.3.

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

TAB. 4.3: 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 4.13 montre la corrélation entre l'estimation, qualitative, faite au champ et l'analyse chimique, au laboratoire.

Le graphique 4.13 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. 4.14). 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 4.14 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 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 μ 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

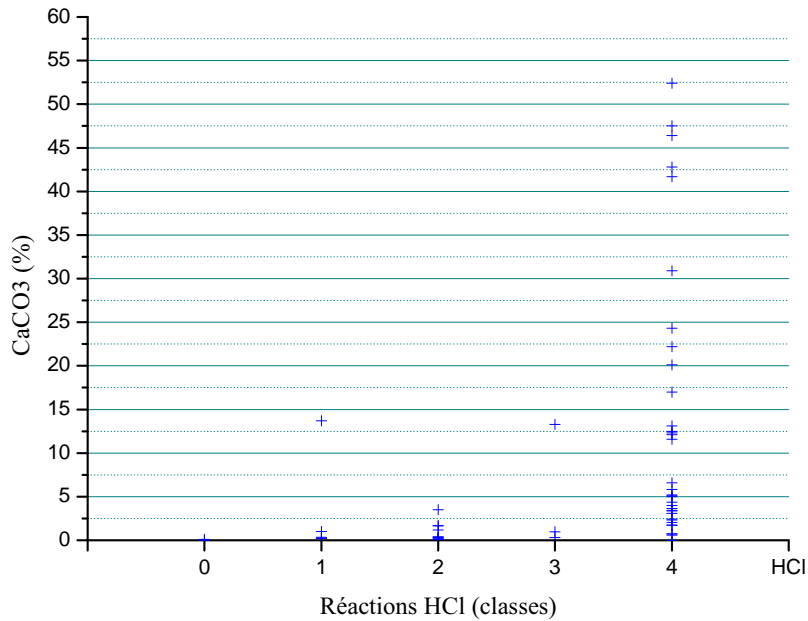


FIG. 4.13: Histogramme des corrélations entre estimations au champ et analyses chimiques

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 ».

4.4 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 4.4. 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 4.15).

Nous pouvons constater que les U.T.S. misent en évidence correspondent pour partie à celles préalablement définies (cf. coupe 2.2). Notre étude étant plus précise, de nouveaux 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 des 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)).

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

TAB. 4.4: Tableau récapitulatif des différentes U.T.S. définies sur le secteur d'étude, et leurs caractéristiques

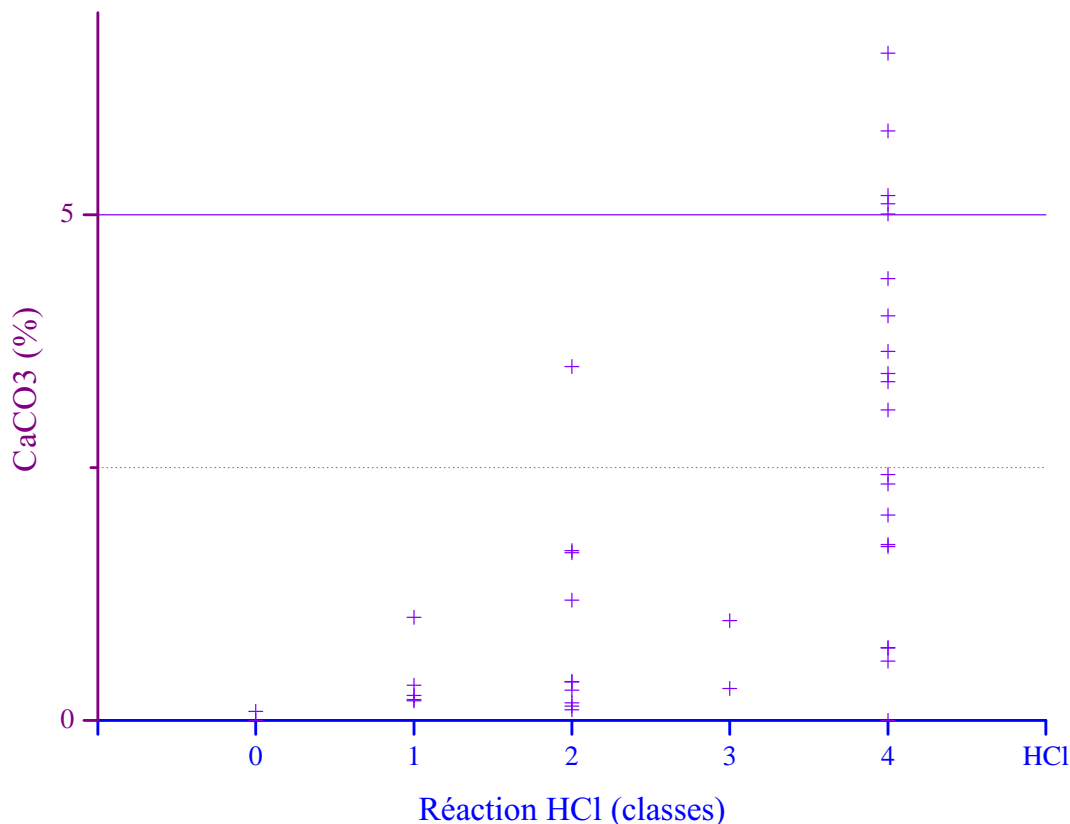


FIG. 4.14: Agrandissement de l'histogramme des corrélations entre estimations au champ et analyses chimiques

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.

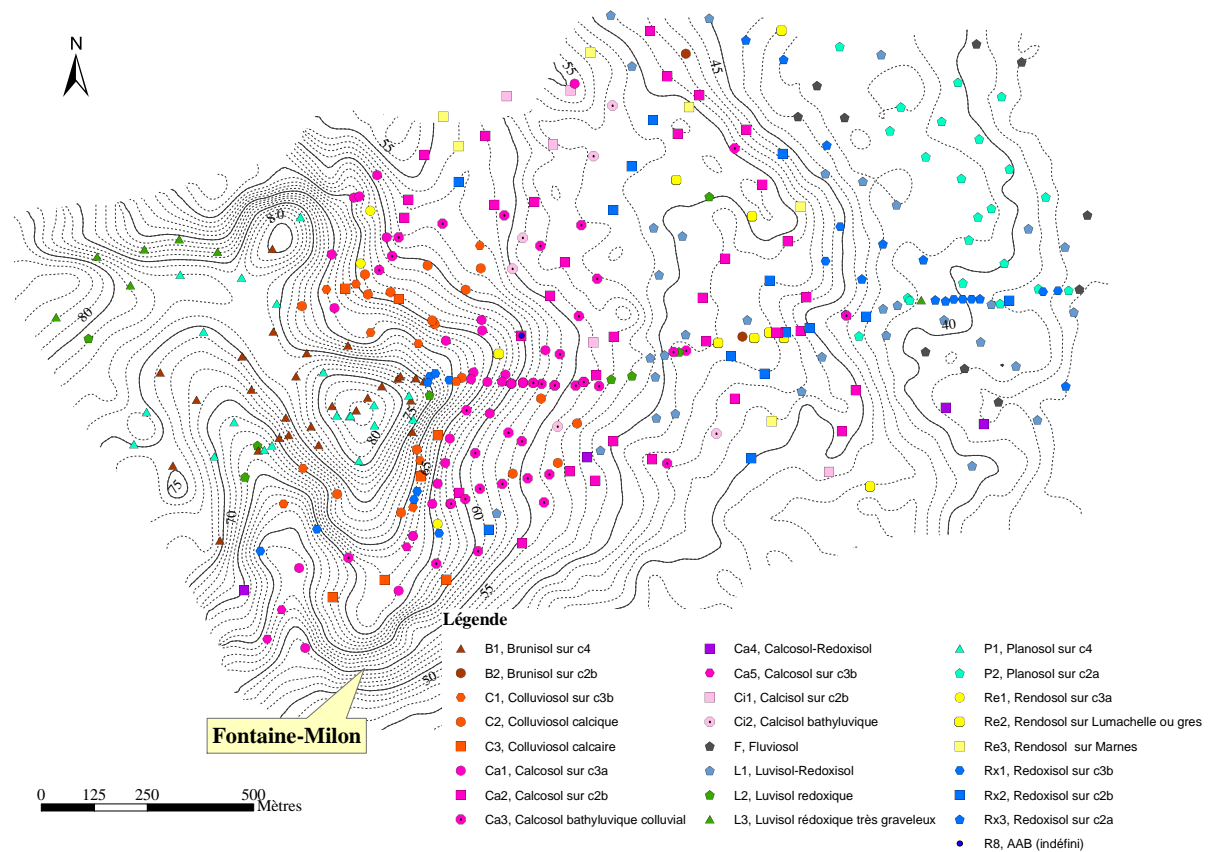


FIG. 4.15: Cartogramme de synthèse des typologies de sols

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 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 4 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 peut 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 5 et 6. 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 pédogenèse : 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 ??) remplissent ces deux conditions. Nous aboutissons donc à un système de quatre équations à quatre inconnues, comme suit :

$$\begin{cases} (S_{ff})_{Hn} &= \alpha * (S_{ff})_{Fdf} + \beta * (S_{ff})_{c_4} + \gamma * (S_{ff})_{c_{3b}} + \delta * (S_{ff})_N \\ (S_f)_{Hn} &= \alpha * (S_f)_{Fdf} + \beta * (S_f)_{c_4} + \gamma * (S_f)_{c_{3b}} + \delta * (S_f)_N \\ (S_m)_{Hn} &= \alpha * (S_m)_{Fdf} + \beta * (S_m)_{c_4} + \gamma * (S_m)_{c_{3b}} + \delta * (S_m)_N \\ (S_g)_{Hn} &= \alpha * (S_g)_{Fdf} + \beta * (S_g)_{c_4} + \gamma * (S_g)_{c_{3b}} + \delta * (S_g)_N \end{cases} \quad (4.1)$$

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 5

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

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.

5.1 Résultats et discussion

5.1.1 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 5.1). 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 Cénomaniens 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 5.2) présentent elles aussi des pics caractéristiques, soit dans les argiles¹, soit dans les S_{ff} , 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).

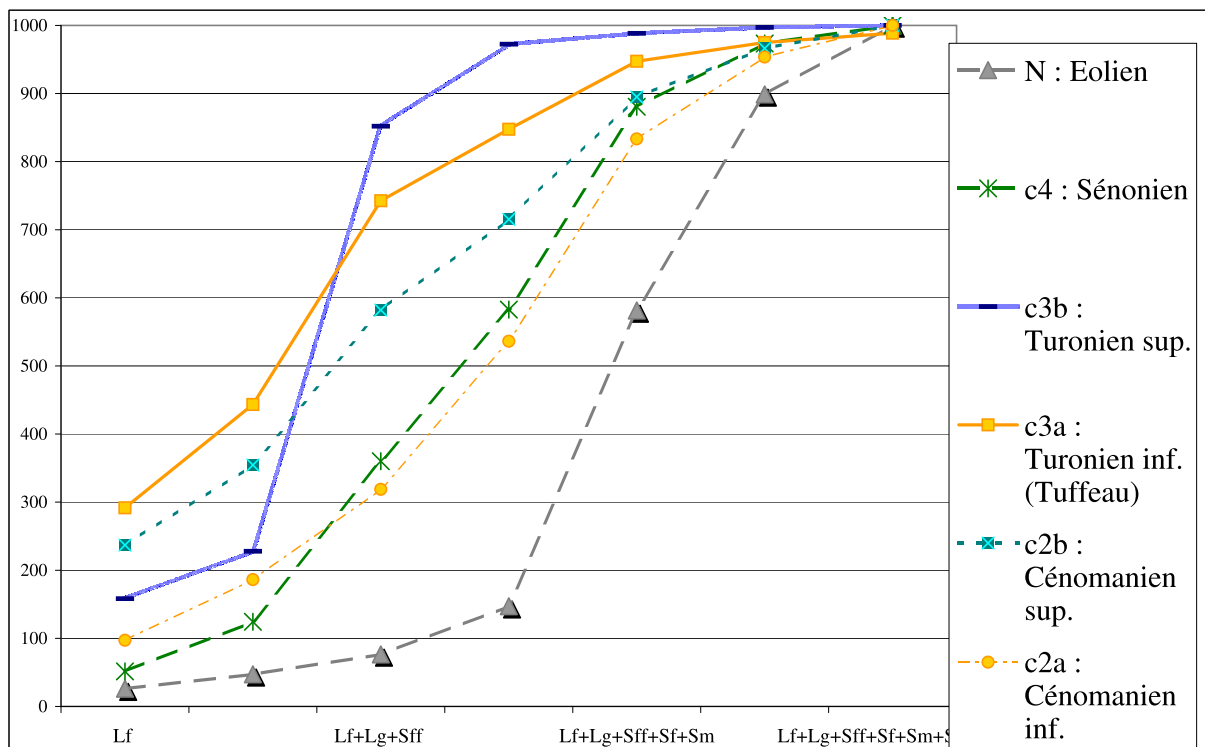


FIG. 5.1: Squelettes cumulés des horizons représentatifs de la granulométrie des matériaux géologiques initiaux

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.

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.

¹Le argile prend ici la place de la fraction inférieure à 2 μm , couramment appelée « argiles granulométriques ».

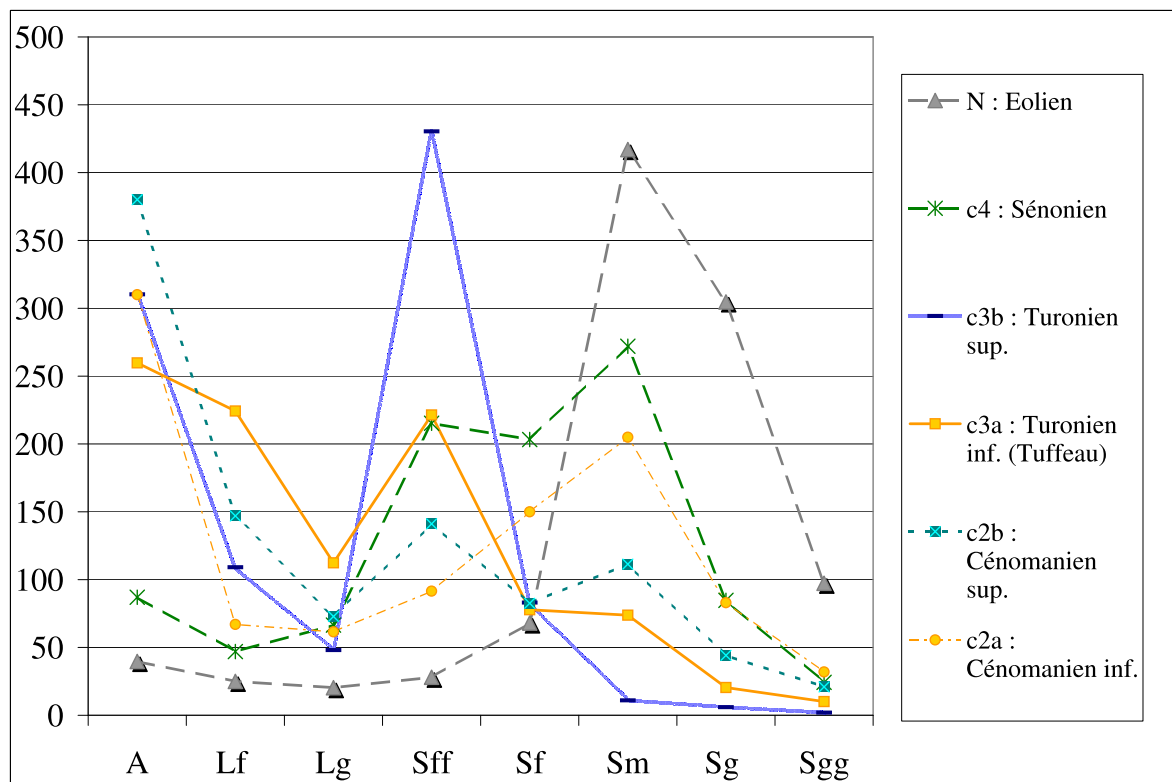


FIG. 5.2: Histogramme de la granulométrie des horizons représentatifs de la granulométrie des matériaux géologiques initiaux

5.1.2 Comparaison granulométrique des horizons le long de chaque solum

Les résultats issus des comparaisons de squelettes granulométriques sont donnés dans le tableau 5.1. 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 ».

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.

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_{3p})	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	

TAB. 5.1: Tableau récapitulatif des comparaisons granulométriques

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.

5.1.3 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 5.1. Une coupe schématique et synthétique est aussi présentée à la figure 5.3.

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 $95 \pm 5 \%$, ce qui reste cohérent avec l'incrémentaire 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 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,

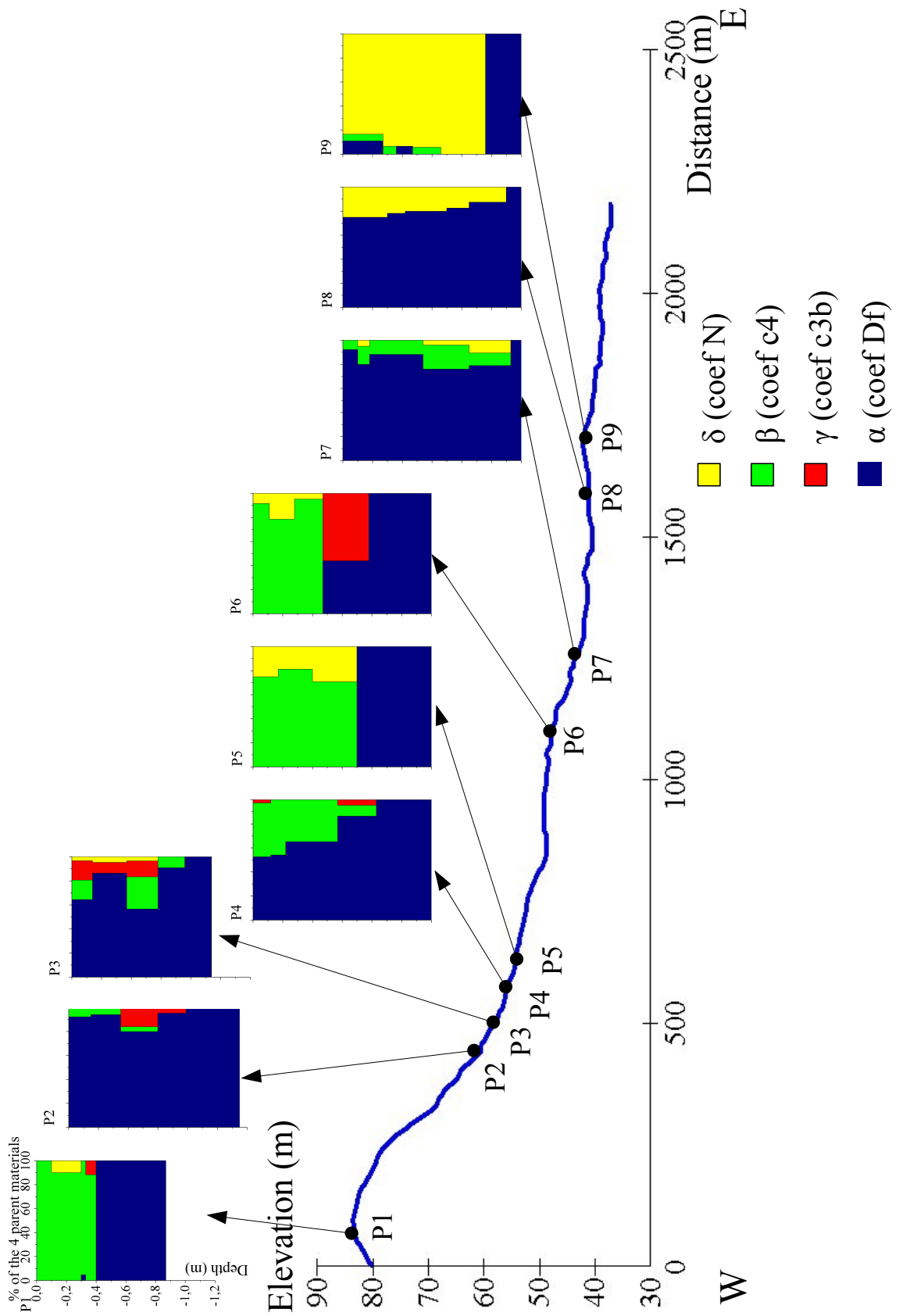


FIG. 5.3: Coupe en long de la lithotoposéquence

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 lumachellique, 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 turonienne (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 lumachellique 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.

5.2 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 6

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 5, elle a été présentée en introduction de cette partie III.

6.1 Résultats

6.1.1 Comparaison granulométrique des horizons le long de chaque profil

Les résultats issus des comparaisons de squelettes granulométriques sont donnés dans le tableau 6.1. 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.

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

Horizons	Pfdr (en cm)	Ratio (%) H_n/H_{Fdf}	Ecart H_n/H_{n+1}	Calculs de mélange			
				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. 6.1: Tableau récapitulatif des comparaisons granulométriques

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.

6.1.2 Estimation des mélanges granulométriques dans les horizons

L'étude de la granulométrie faite au chapitre 5 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 6.1. Une coupe schématique et synthétique est aussi présentée à la figure 6.1. 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 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.

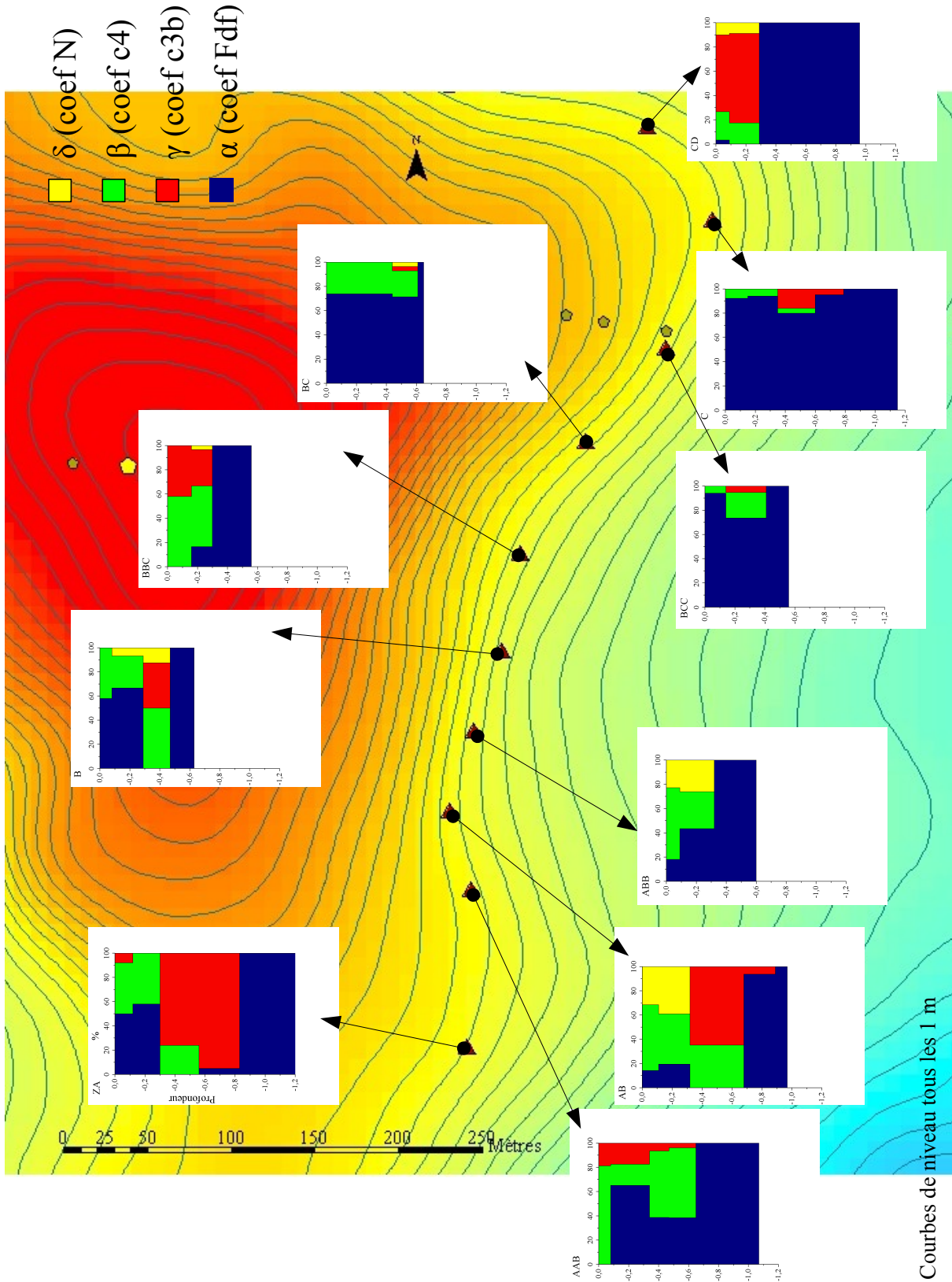


FIG. 6.1: Coupe en long de la partie Sud de l'isoaltiséquence

6.2 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 4.1.2) ne permet pas de confirmer cette hypothèse, elle permet seulement d'indiquer une tendance à l'éolisation des grains (*cf.* chapitre 4.1.2), 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.

6.3 Conclusion

L'étude de la LTS, chapitre 5 a permis de mettre en évidence l'influence des matériaux géologiques et la possibilité de mélange de ces matériaux. Cette LTS ne représente toutefois q'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 5), 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 tronçatures 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.) 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 mémoriser 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..

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 7

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.

7.1 Une pédogenèse polyphasique

L'ouverture de fosses a permis de découvrir une succession de couches peu commune. La figure 7.1 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.* 4.1.1). 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-réactifs (particules très fines et facilement altérables chimiquement). Ce phénomène peut alors être à l'origine d'une recalcarification 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.

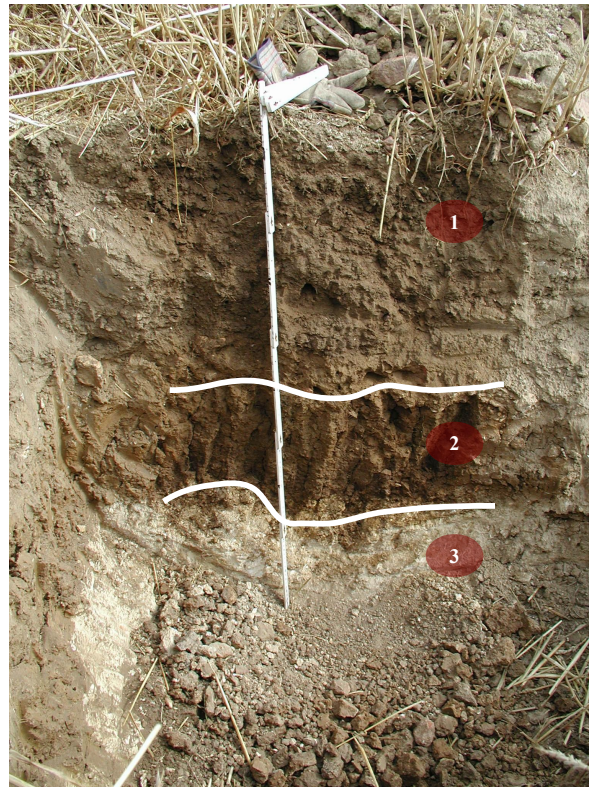


FIG. 7.1: Exemple de CALCOSOL présentant un horizon BT

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.

7.1.1 Premier scénario

Dans ce premier scénario, le matériau, c_4 très sableux, présent sur le plateau, colluvionne en période péri-glaciaire, période où la végétation était peu présente et peu limitante du colluvionnement (fig. 7.3). Suit une période post-glaciaire, période propice au développement d'une végétation de type forestière (chênaie, hêtraie) avec décarbonatation, brunification puis lessivage en raison de précipitations et températures plus élevées. Il se forme alors un LUVISOL (fig. 7.4) 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. 7.5).

7.1.2 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.7.7). 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.7.8),

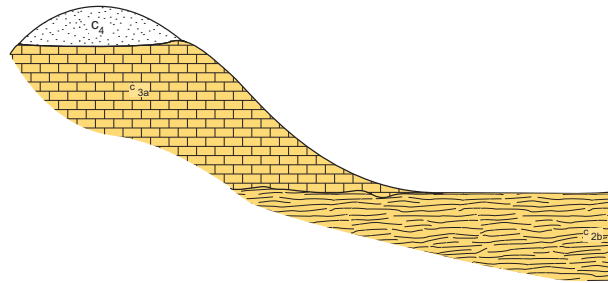


FIG. 7.2: Etat pseudo-initial précédant la pédogenèse

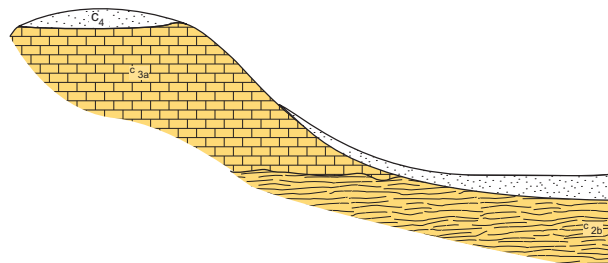


FIG. 7.3: Scénario 1, étape 1 : colluvionnement du sable sénonien en l'absence de végétation

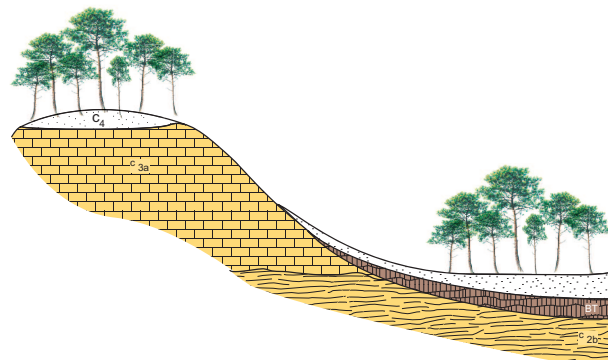


FIG. 7.4: Scénario 1, étape 2 : décalcarification, puis formation de LUVISOL sous une végétation forestière

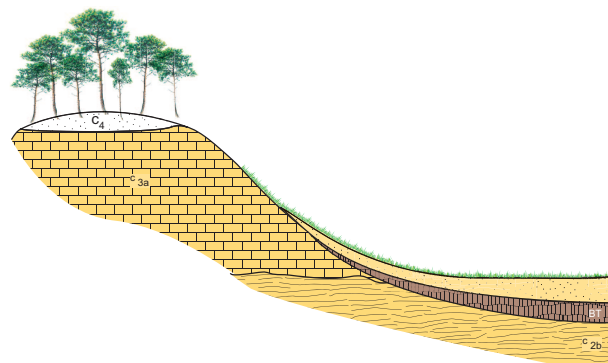


FIG. 7.5: Scénario 1, étape 3, sub-actuelle : mise en culture avec recarbonatation de la surface

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. 7.9), l'aménagement du territoire, avec gestion des forêts et mise en culture des champs, entraîne le colluvionnement et une recarbonatation de la surface.

7.1.3 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 (7.1.1), 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 (7.1.2), 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 5) 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}C 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).

7.2 Visualisation tridimensionnelle des phénomènes

La figure 7.10 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.6.1). 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 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. 5.3). 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.

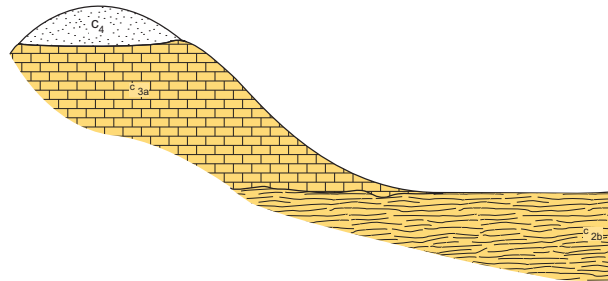


FIG. 7.6: Etat pseudo-initial précédant la pédogenèse

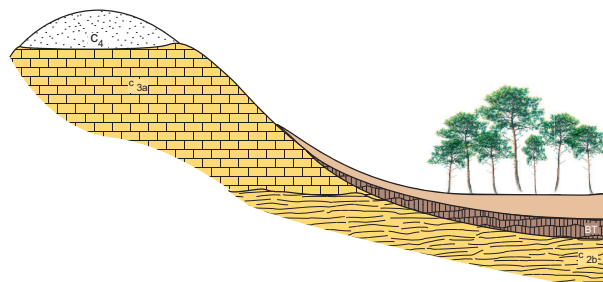


FIG. 7.7: Scénario 2, étape 1 : formation d'un LUVISOL

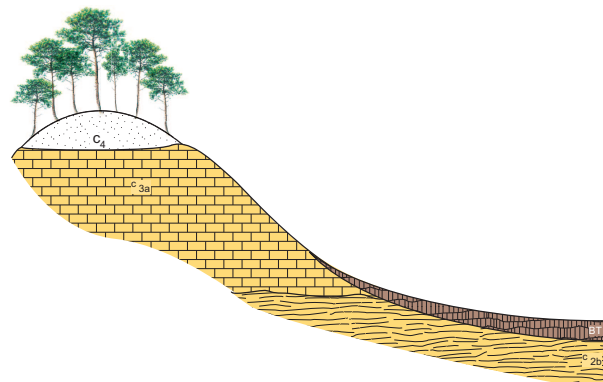


FIG. 7.8: Scénario 2, étape 2 : troncature du LUVISOL, le BT apparaît en surface

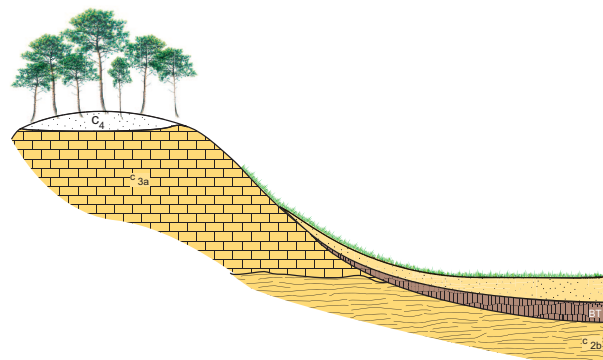
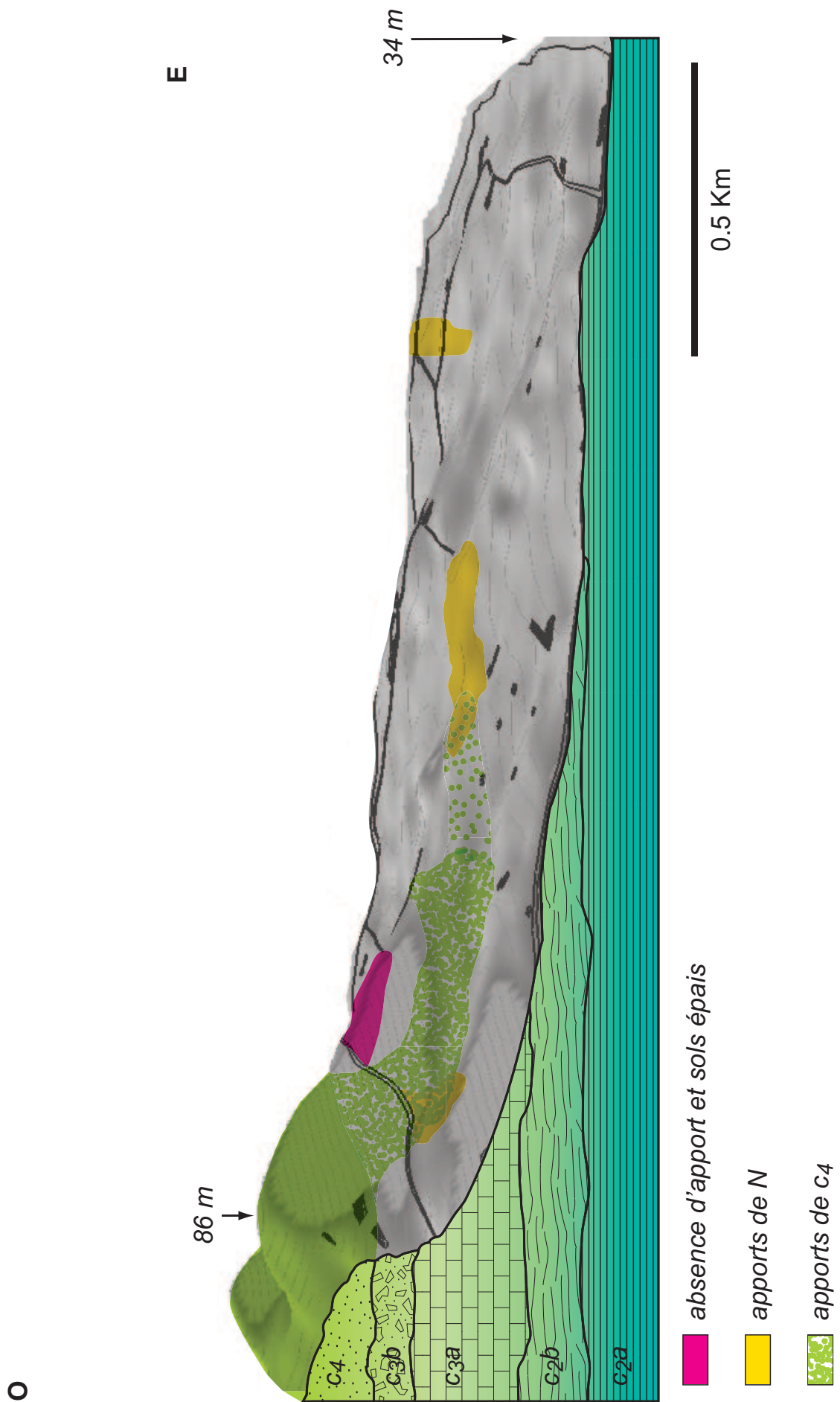


FIG. 7.9: Scénario 2, étape 3, sub-actuelle : colluvionnement et mise en culture qui entraîne une recarbonatation de la surface

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 8

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* serait d'arriver à délimiter des unités cartographiques de sols (U.C.S.) « pures », *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, comme dans le cas des plateaux calcaires bourguignons (Chrétien *et al.*, 1993). Les deux contraintes majeures sont :

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

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 unique, ce qui n'est pas le cas dans la région qui nous concerne.

La typologie de sols se base sur le Référentiel Pédologique (Baize et Girard, 1995). Elle a abouti à différentes Unités Typologiques de Sols (U.T.S.) composant des Unités Cartographiques de Sols (U.C.S.). Ces dernières sont ici toutes complexes.

Bien que notée sur les schémas pour signaler sa présence, n'est pas ici prise en compte l'unité formée par les FLUVIOSOLS car elle n'est pas spécifique à la zone et se retrouve en de nombreuses parties de la carte à 1/100000^{ème} de la feuille d'Angers. De plus, le ruisseau est de petite taille, les alluvions sont alors, pour des raisons d'impossibilité de représentation, intégrées dans l'U.C.S. de plaine cénomaniennne comprenant le c_{2a} .

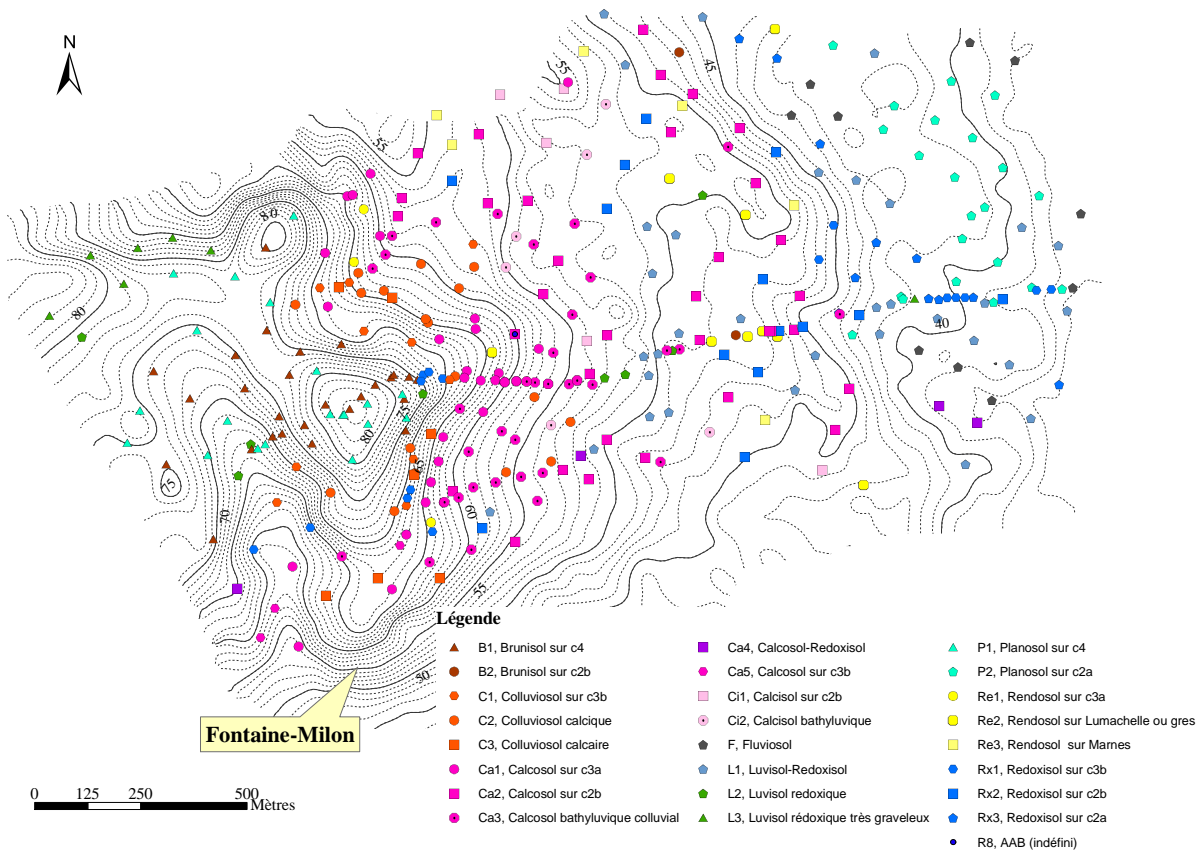


FIG. 8.1: Cartogramme de synthèse des typologies de sols présents

8.1 2 U.C.S. : modèle privilégiant la géomorphologie

Dans cette étape, l'hypothèse la plus forte est que le sol est directement issu de la géologie. De plus, la délimitation se simplifie en recoupant la carte géologie et géomorphologie.

Lors de la cartographie pour le 1/250000^{ème} (cf. fiches descriptives en annexe 10), deux U.C.S. ont été établies (fig. 8.3). Définies principalement à partir de la morphologie du relief et de la lithologie, avec d'une part une unité dite « de buttes et plateaux » et d'autre part une unité « de plaines », ces U.C.S. correspondent à des ensembles litho-géomorpho-pédologiques avec un paysage remarquable qui se retrouve six ou sept fois 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 n'étaient pas vraiment possible.

L'unité de plaine cénomaniennes 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 et aux différences d'échelle entre la carte géologique et la carte pédologique.

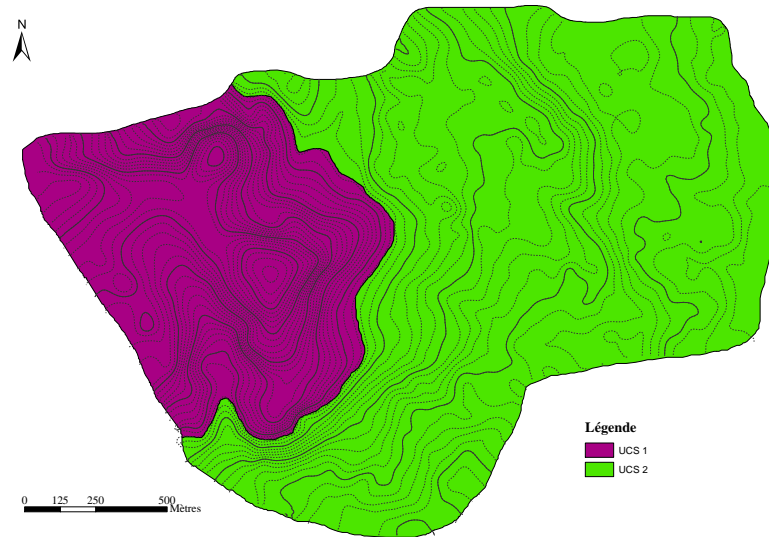


FIG. 8.2: Carte présentant les 2 U.C.S. telles qu'elles ont été préalablement définies

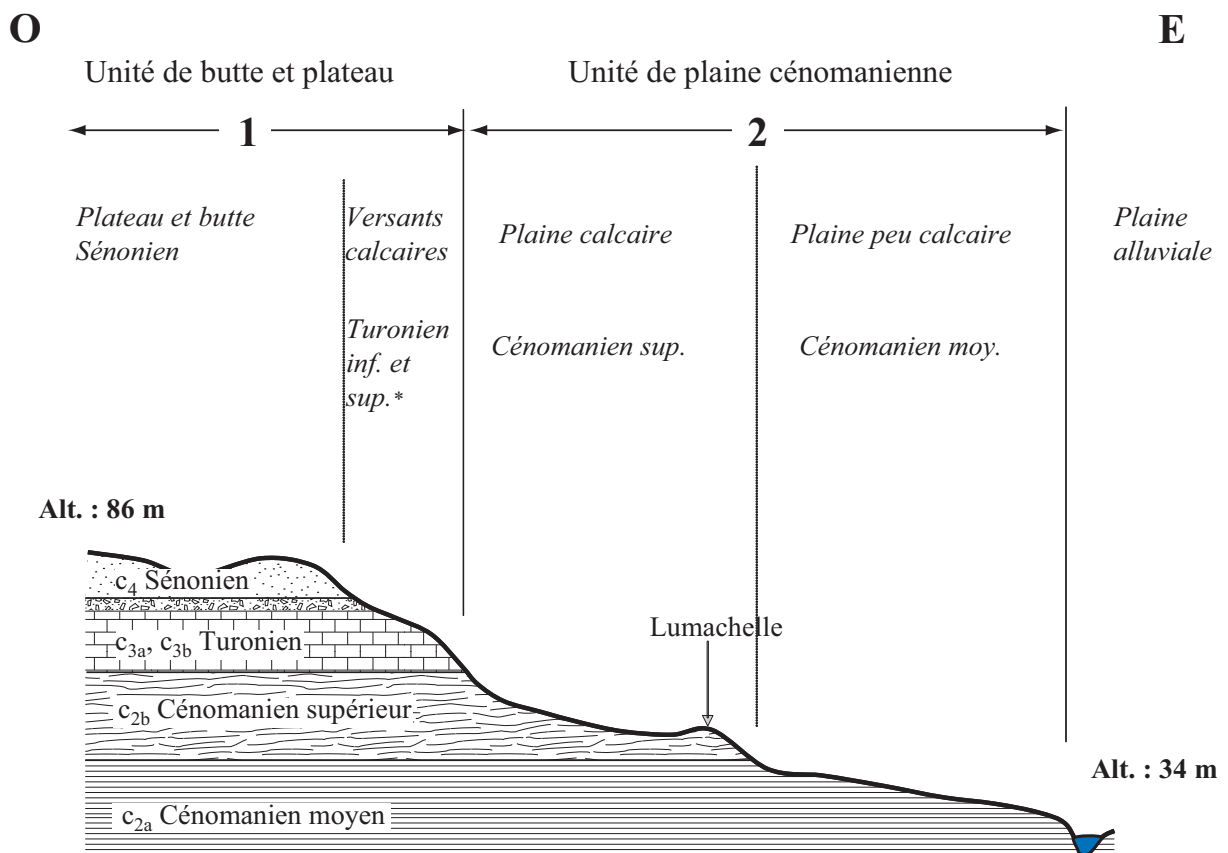


FIG. 8.3: Coupe schématique en long présentant les 2 U.C.S. telles qu'elles ont été préalablement établies

8.2 3 U.C.S. : modèle privilégiant le calcul de mélanges

L'étude de la LTS (*cf.* chapitre 5) a permis la construction d'un modèle de mélange établi avec les analyses granulométriques. Celui-ci invite à séparer la zone en 3 U.C.S. (fig. 8.5). L'unité de plateau ne comprend plus les sols calcaires de pente. Ceux-ci se retrouvent associés aux sols calcaires de bas de pente, dont certains dans la partie Ouest de la plaine c_{2b} ; la partie moins calcaire du c_{2b} est associée à la plaine c_{2a} , car comportant des sols peu à pas calcaires. La limite séparant l'unité de pentes de l'unité de plaine est une limite floue. À ce stade de l'étude, il n'est en effet pas possible de positionner avec précision cette limite.

8.3 Ou 4 U.C.S. : modèle privilégiant des systèmes pédologiques

La compréhension de l'organisation au travers de la LTS ainsi qu'un retour aux sondages systématiques référencés par les 24 types de sols suggère de séparer le site en 4 U.C.S. (fig. 8.7). Leur définition s'appuie sur le modèle de mélange mais aussi sur les regroupements de types de sols (fig.8.1) qui semblent apparaître en fonction des altitudes et, consécutivement, des substrats non-pentés. La différence notable avec le modèle en trois U.C.S. se situe dans le redécoupage de l'unité de sols calcaires en une unité de haut de pente où il ne semble pas y avoir d'apport, et une unité de bas de pente où se trouvent des sols issus de mélange, dont les CALCOSOLS bathyluviques.

8.4 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 fixées 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 les 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.. Les statistiques pourraient permettre de quantifier cette hétérogénéité.

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 7.2.

Enfin, si la représentation des quatre U.C.S. n'est pas suffisamment lisible à 1/250000^{ème}, il est

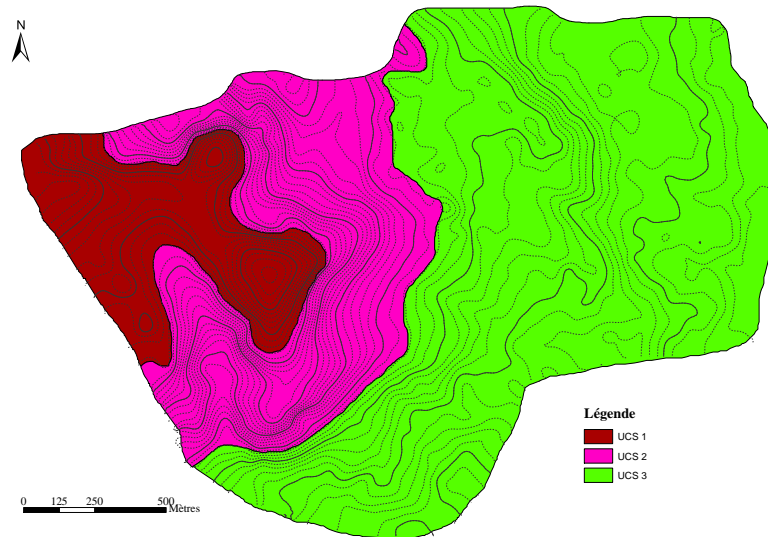


FIG. 8.4: Carte présentant 3 U.C.S.

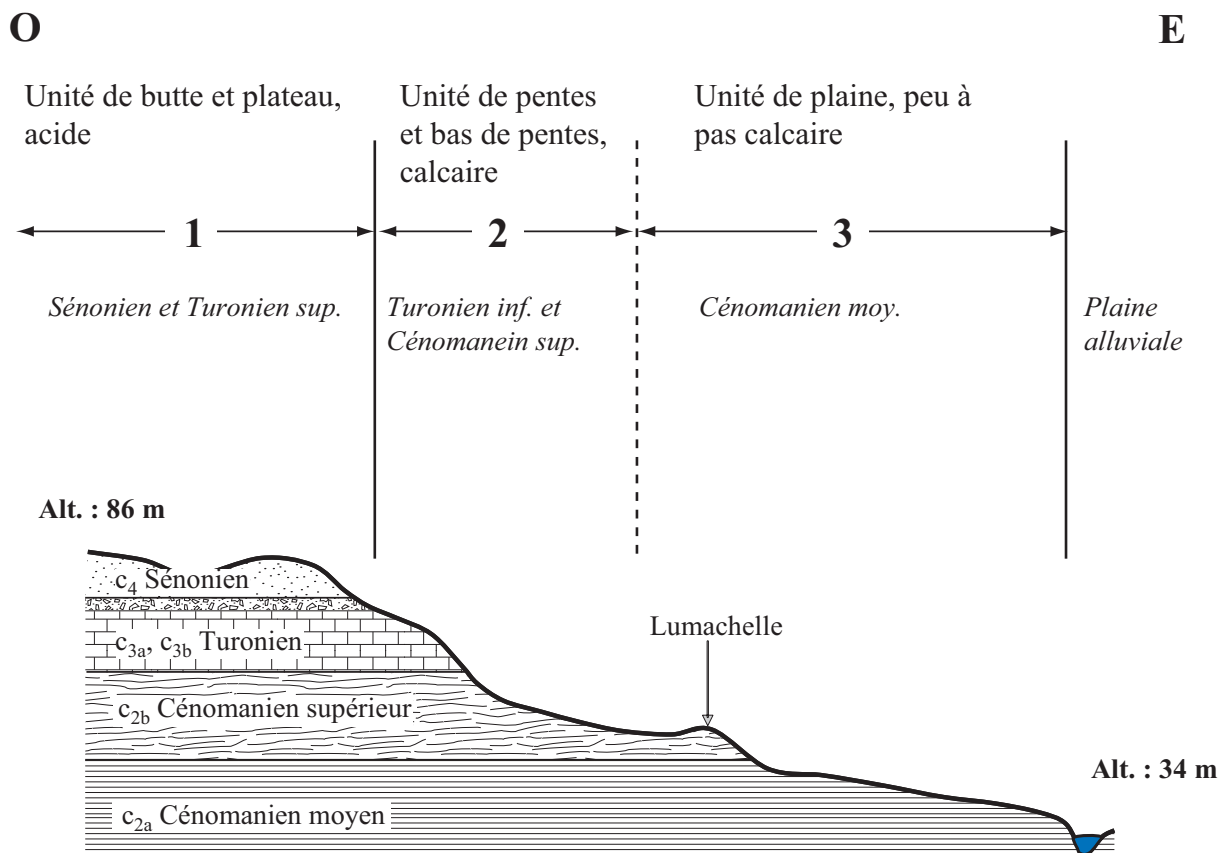


FIG. 8.5: Coupe schématique en long présentant 3 U.C.S.

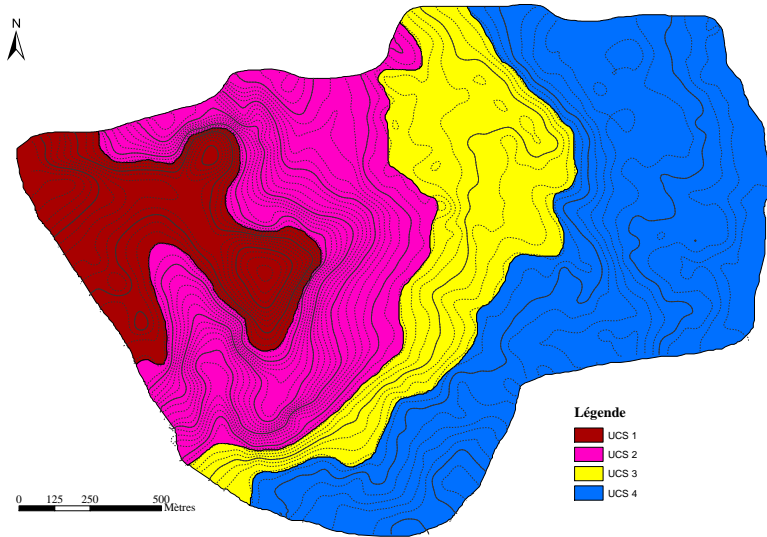


FIG. 8.6: Carte présentant 4 U.C.S.

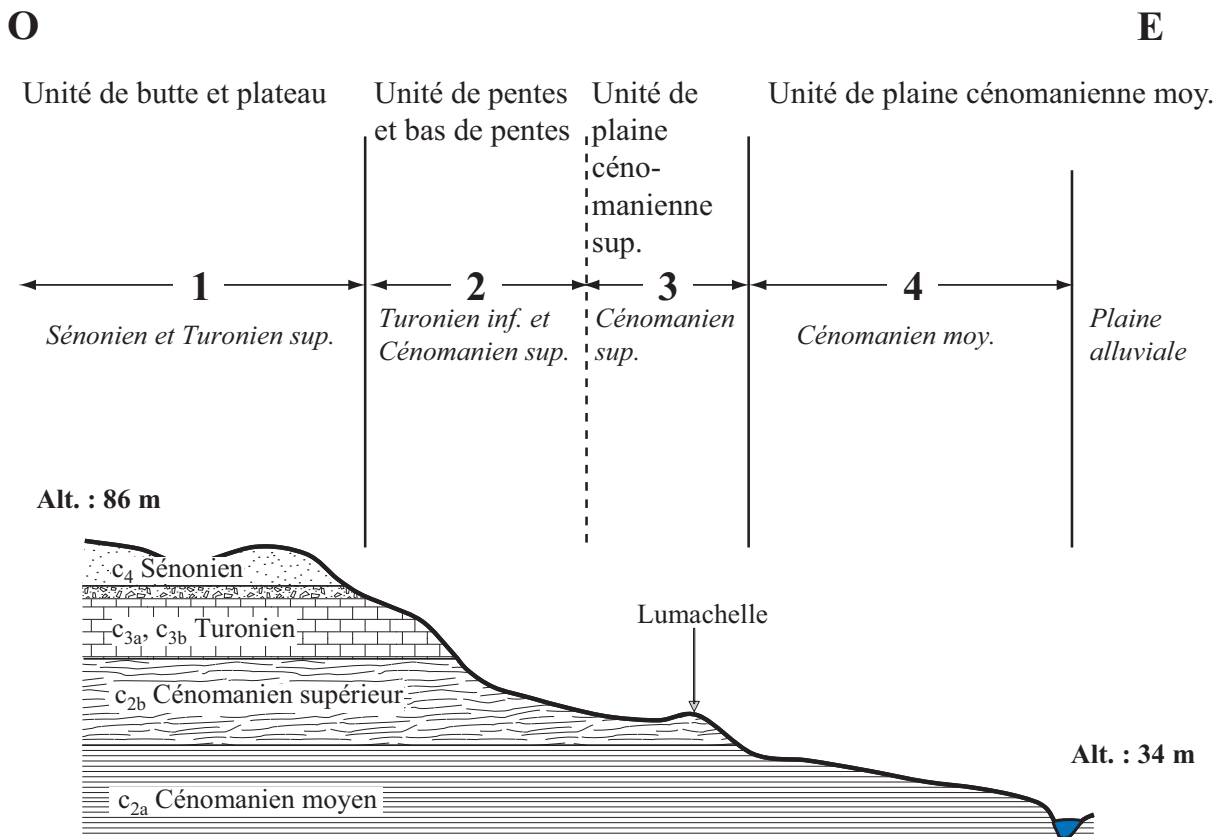


FIG. 8.7: Coupe schématique en long présentant 4 U.C.S.

toujours possible de se cantonner à trois U.C.S. en donnant les précisions nécessaires dans la notice.

Chapitre 9

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

9.1 Délimitation des U.C.S.

Les limites des U.C.S. reposent principalement sur les altitudes. Les couches géologiques étant sub-horizontales et les sols fortement influencés par les matériaux géologiques, les limites pédologiques peuvent être très ressemblantes des limites géologiques.

9.2 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 assez proche de la réalité des superficies en jeu (*cf.* tableau 9.1).

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 9.2 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 regroupement. Cette U.C.S. complexe ne présente pas une grande hétérogénéité d'U.T.S..

Quatre U.T.S. définissent 60 % de l'U.C.S. 2, trois unités de CALCOSOLS et une unité de COL-LUVIOSOLS. 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

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	13				1											2	5	10							31
2	2		5	12	4	13	11	12	1	2	2	3		1	2	1	2			2	3	2			80
3		1					15	3	1			3			11	1			3	2	1	7			48
4							1	2	4	2	3	1		8	13				17	1	1	1	1	7	53
Total	15	1	5	13	4	13	27	15	4	2	3	6	8	25	5	6	12	17	4	5	5	10	7	212	

TAB. 9.1: 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	42	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	16	32	0	0	0	0	0	0	0	15
2	3	0	6	15	5	16	14	15	1	3	3	4	0	1	3	1	3	0	0	3	4	3	0	0	38
3	0	2	0	0	0	0	31	6	2	0	0	6	0	23	2	0	0	0	6	4	2	15	0	0	23
4	0	0	0	0	0	0	2	0	4	0	2	0	15	25	0	0	0	32	2	2	2	2	13	0	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	0	100

TAB. 9.2: 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	4	10	31	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	15
2	3	0	7	11	5	19	9	23	1	2	1	2	0	1	3	0	1	3	1	1	5	1	0	0	0	0	44	
3	0	3	0	0	0	0	31	6	2	0	0	5	0	21	5	0	0	0	0	10	3	2	13	0	0	18		
4	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	6	6	0	1	2	1	5	4	3	1	100		

<2%
n >15%

TAB. 9.3: Tableau de contingences de présence des U.C.S. et des U.T.S., en %, intégralité des sondages

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. 9.2) au tableau réunissant la totalité des sondages (tab. 9.3).

Plusieurs constatations 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 ; quelque 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.

Les sondages de l'U.C.S. 1, dite de butte, représentent 15 % de l'ensemble des sondages. Cette U.C.S. comprend pour moitié des BRUNISOLS sableux (B1), pour un tiers des PLANOSOLS (P1), quelques 14 % LUVISOLS rédoxiques (L2 et L3), plus ou moins graveleux. Les BRUNISOLS et PLANOSOLS se retrouvent à près de 80 % sur cette zone, les 20 % se positionnent dans la zone 2 limitrophe. Les LUVISOLS rédoxiques se positionnent principalement dans l'intérieur du plateau, relativement éloigné des bordures. Au contraire, les PLANOSOLS et BRUNISOLS se rencontrent principalement en bord de plateau.

Les sondages de l'U.C.S. 2, dite de pente et bas de pente calcaire, représentent 44 % de l'ensemble des sondages. Visuellement, cette U.C.S. semble couverte par des CALCOSOLS et des COLLUVIOSOLS. Ceci se traduit en chiffre. En effet, cette zone est particulièrement prolifique en terme de sols calciques voire calcaires puisque près de 75 % des sondages sont composés par des CALCOSOLS (Ca) ou CALCISOLS (Ci), ou des COLLUVIOSOLS calcaires ou calciques. Sur l'ensemble de ces sols, les CALCOSOLS bathyluviques (Ca3) représentent 30 %. Ceux-ci se retrouvent en moindre proportion dans la zone 3, il reste très majoritairement cantonnés à la zone 2.

Les sondages de l'U.C.S. 3, dite de plaine peu calcaire, représentent 19 % de l'ensemble des sondages. Visuellement, cette U.C.S. semble couverte par des LUVISOLS, des CALCOSOLS et quelques RENDOSOLS. De fait, les sols sont pour plus de la moitié calcaires, avec 30 % de CALCOSOLS bathyluviques (Ca3), 20 % de LUVISOLS (L1), presque 15 % de REDOXISOLS (Rx2). Les RENDOSOLS représentent 15 % des sondages de cette zone. Ils se localisent principalement en amont du talus formé par la lumachelle, qu'ils soient sur marnes ou substrat plus dur. Les CALCOSOLS bathyluviques (Ca3) se retrouvant dans deux zones, concentrons notre attention dessus. À 87 %, nous les trouvons dans la zone 2 et à 13 % dans la zone 3. Il n'en existe pas en d'autres lieux de la zone. Nous les trouvons entre les altitudes 51 et 65 m, le plus haut est au Sud-Ouest, le plus bas au Nord-Est. Ils semblent aussi souvent positionnés sur les chemins hydrologiques. En effet, deux séquences faites à la tarière ont été spécialement situées le long du réseau hydrographique tel que défini par le M.N.A., et les sols s'y trouvant sont, pour 25 % des cas, ces CALCOSOLS bathyluviques.

Les sondages de l'U.C.S. 4, dite de plaine non-calcaire, représentent 22 % de l'ensemble des sondages. Visuellement, cette U.C.S. semble couverte par des sols marqués par l'hydromorphie, PLANOSOLS, REDOXISOLS et autres LUVISOLS plus ou moins REDOXISOLS. De fait, ceux-ci totalisent presque 80 % des sondages de cette zone. Les PLANOSOLS ressortent largement et semblent tous grouper vers le Nord de la zone 4.

Si nous inversons le raisonnement, nous pouvons dire, que si nous nous situons à une altitude supérieur à 71 m, le substrat est *a priori* constitué de sables sénoniens ainsi que, par endroit d'argile. Si le relief est une simple butte, nous trouverons conjointement des BRUNISOLS plus ou moins podzoliques et des PLANOSOLS. Si la butte se prolonge par un plateau, il sera couvert par des LUVISOLS rédoxiques plus ou moins graveleux.

Entre 52 et 71 m, les sols sont très majoritairement calcaires, avec des colluvions en haut de la pente, principalement positionné sur les faces Nord-Est des talwegs. Toutefois, sur la partie relativement plane, sur les marnes, des sols à problème d'hydromorphie, LUVISOLS rédoxiques et REDOXISOLS. À la limite inférieure, en amont du talus, les sols redeviennent calcaires, avec près de 15 % de RENDOSOLS.

Sous les 52 m, les sols montrent tous des traces d'hydromorphie, avec sur les zones de flux quasi-nuls des PLANOSOLS. Si nous inversons le raisonnement, nous pouvons dire, que si nous nous situons à une altitude supérieur à 71 m, le substrat est *a priori* constitué de sables sénoniens ainsi que, par endroit d'argile. Si le relief est une simple butte, nous trouverons conjointement des BRUNISOLS plus ou moins podzoliques et des PLANOSOLS. Si la butte se prolonge par un plateau, il sera couvert par des LUVISOLS rédoxiques plus ou moins graveleux.

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

L'U.T.S. Ca3 est limitée à une zone d'altitudes de 44 à 66 m. Elle comprend trente neuf individus en tout, un dans l'U.C.S.4, cinq dans l'U.C.S.3 et les trente trois autres dans l'U.C.S.2. 85 % des CALCOSOLS bathyluviques se retrouvent donc dans l'U.C.S.2.

Cent quarante six individus se retrouvent dans l'U.C.S.2 ; l'ensemble de ces individus représente vingt U.T.S.. Sur ces vingt U.T.S., certaines ne comprennent que peu d'individus. Si nous ne considérons que les U.T.S. comprenant au moins quatre individus, il reste cent vingt six individus réunis dans dix U.T.S., dont Ca3. L'U.T.S. Ca3 est la plus représentée avec 23 % des individus de cette U.C.S..

Ca3 est comprise entre 44 et 66 m d'altitudes, et l'U.C.S.2 entre 52 et 71 m. L'intersection de ces deux groupes d'altitude est une zone comprise entre 52 et 66 m. Restreignons-nous à cette zone. Il ne reste alors plus que cent dix sept individus, dont trente quatre dans l'U.T.S. Ca3, soit 30 % des individus de l'U.C.S.2 restreinte aux altitudes 44–66 m.

La figure associant la présence des U.T.S. à une valeur donnée d'accumulation des flux, Ca3 montre deux pics de forte occurrence : un pour une accumulation de flux hydrologiques nulle et un pour une accumulation égale à 1. Le premier pic représente la plus forte occurrence, toutes U.T.S. confondues. Nous pourrions donc créer une nouvelle classe de restriction avec $Accu=0$. Mais, ceci exclut de nombreux individus de l'U.T.S..

Le second pic d'occurrence de Ca3 est le plus élevé de tous pour les classes d'accumulation supérieure à 0. Nous contraignons donc la zone de Ca3 à être comprise entre les altitudes 52–66 m et à avoir une accumulation au plus égale à 1, donc très faible. Dans cette nouvelle classe, la probabilité de trouver Ca3 s'élève à 34 %, et le nombre d'individus ainsi défini est de 60 % du nombre total de sondages déterminés comme appartenant à l'U.T.S. Ca3 dans l'U.C.S.2. ***Ce paramètre, accumulation de flux très faible ou nulle dans la tranche d'altitudes 44–66 m, paraît essentiel pour expliquer la présence de Ca3. vérifier si je le laisse là!!!***

La pente est souvent un facteur important de pédogenèse. Sur la figure ??, Ca3 représente les deux plus fortes occurrences : une pour la classe de pentes de 2 % et une pour la classe de pentes de 5 %. En restreignant les individus dans un groupe de pentes au plus égales à 5 %, Ca3 se rencontre dans 37 % des cas et cette classe explique 79 % des individus de Ca3.

Accumulation de flux et pentes étant parfois liées, nous les avons associées dans un groupe où l'accumulation est au plus égale à 1 et les pentes au plus égales à 5 %. Ceci a pour effet de diminuer sensiblement le nombre total d'individus sans augmenter la présence relative des Ca3. Par contre, pour une classe de pentes de 5 %, avec une accumulation au plus de 1, l'occurrence est forte. Dans ce cas - $accu \leq 1$ et $pent = 5$ -, Ca3 représente 50 % des sondages, mais le nombre d'individus concernés par cette U.T.S. devient très faible puisqu'il ne reste plus que 20 % des Ca3 de l'U.C.S.2.

La figure, les deux occurrences les plus fortes concernent Ca3 pour un indice de MrRTF au moins égal à 3. Cet indice représente la platitude des sommets de croupe. Il est ici compris entre 0 et 4. Pour le groupe où cet indice est au moins égal à 3, Ca3 représente 40 % des individus du groupe et il permet d'expliquer 71 % des Ca3 de l'U.C.S.2. Les Ca3 restent toutefois fortement représentés pour un indice de platitude nul. Le seul cas où les Ca3 ne sont pas représentés est lorsque l'indice MrRTF est égal à 1.

Les concavités/convexités du relief, verticales et/ou horizontales interviennent aussi dans le positionnement géomorphologique des sols. Ainsi, lorsque les deux convexités sont égales (-1 ou 1), Ca3 présente des occurrences élevées. Créer un groupe pour ces deux valeurs de

convexités permet que Ca3 représente 41 % des individus mais ceci implique d'exclure 70 % des individus de l'U.T.S.. Par contre, si nous associons convexités et pentes telles que : $\text{curvV} = \text{curvH} = 1$ ou -1 et $\text{pent} \leq 5\%$ - la figure montre que les trois plus fortes occurrences concernent Ca3, avec des pentes de 2, 4 et 5 % -, alors, Ca3 représente 44 % de l'ensemble des individus de ce groupe, et le nombre de Ca3 est la moitié de l'effectif total de Ca3 dans l'U.C.S.2.

Conclusion

Les CALCOSOLS bathyluviques se trouveraient donc plutôt entre les altitudes 52 et 66 m, dans des zones de faibles pentes ($\leq 5\%$), de très faibles accumulations des flux (≤ 1 pixel), où les convexités verticales et horizontales sont identiques et où l'indice de platitude des sommets de croupe MrRTF (Gallant et Dowling, 2003) est d'au moins 3. 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 ou associé 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 et lorsque la précision augmente, le nombre d'individus de cette U.T.S. diminue sensiblement. Il est donc nécessaire de trouver un équilibre entre une précision/représentation moins élevée, quoique restant significative, et un nombre d'individus suffisamment important pour être représentatif. Ainsi, l'association d'une accumulation des flux au plus égale à 1 avec des pentes de 5 % ne permet pas d'expliquer plus de 30 % des CALCOSOLS bathyluviques rencontrés sur le terrain alors que les Ca3 représentent 50 % des individus de cette classe, soit une probabilité de 50 % de trouver un CALCOSOL bathyluvique dans ces conditions-là. A l'opposé, restreindre « simplement » la zone à une classe d'altitudes 52–66 m donne la certitude de rencontrer ces CALCOSOLS mais avec une probabilité de 30 %. Entre ces deux extrêmes, une classe de pentes de 5 % au plus ou un indice MrRTF d'au moins 3 semblent les classes de dérivées les plus appropriées : elles n'expliquent pas tout, mais n'excluent pas trop d'individus et offrent une probabilité de l'ordre de 40 % de trouver des CALCOSOLS bathyluviques Ca3 sur le terrain.

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 concerné par un amont et un aval, des concavités et des convexités horizontales et verticales. Il est donc situé dans une zone où la stabilité actuelle des matériaux n'est pas avérée. De plus, 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 puisse se former. Peut-être la déprise agricole, l'enfrichement et la croissance de la forêt permettront-elles de répondre plus sûr

Conclusion générale

Chapitre 10

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/ou 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 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. 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 6) 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.

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. D'une part, 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. D'autre part, 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 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 si située 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>.
- 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 a 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.
- 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 sos d'une région. application aux plateaux calcaires bourguignons. *Science du sol*, 31(3):171–191.
- 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 pedo-transfert functions for a profile cone penetrometer. *Geoderma*, 100(1-2):25–47.

- UILLET, B., FAIVRE, P., MARIOTTI, A. et KHOBZI, J. (1988). The ^{14}C dates and $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 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.
- UILLET, B., ROUILLER, J. et SOUCHIER, B. (1975). Podzolization and clay migration in spodosols of eastern france. *Geoderma*, 14(3):223–245.
- 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). $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 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 soilscapes 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 automatisation 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.
- 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. (1996). *Cartographie des sols : de l'analyse spatiale à la gestion des territoires*. Lausanne.
- LEGROS, J.-P. (2006). *Mapping of the soil*. I.n.r.a. édition.

- LÉLONG, 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.
- LÉLONG, F., ROOSE, E., AUBERT, G., FAUCK, R. et PEDRO, G. (1984). Géodynamique actuelle de différents sols à végétation naturelle ou cultivés d'Afrique de l'ouest. *Catena*, 11(4):343–376.
- LORGEUX, J. (1981). Cartographie détaillée des sols du domaine expérimental du C.T.I.F.L. de St Epain. Mémoire de D.E.A., E.N.S.A. Rennes.
- LOUAIL, J. (1984). *La transgression crétacée au Sud du Massif Armoricaïn ; Cénomaniën 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. MILLARD, 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 intraparcéllaire*. 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.
- 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.
- 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.

Annexe

**Description des sols issue de la carte à
1/250000^{ème} de la feuille d'Angers**

Coupes géologiques

Description des sols issue de DONESOL

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 Bugeois.

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 Bugeois. 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.

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 Bugeois. 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 pedo-

logical 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.