



Quantification par approche micromorphologique couplée à de l'analyse d'images de l'effet de la mise en culture et de l'apport de matières organiques sur l'intensité et la dynamique des processus de lessivage et de bioturbation à l'échelle pluri décennale

Ophélie Sauzet

► To cite this version:

Ophélie Sauzet. Quantification par approche micromorphologique couplée à de l'analyse d'images de l'effet de la mise en culture et de l'apport de matières organiques sur l'intensité et la dynamique des processus de lessivage et de bioturbation à l'échelle pluri décennale. Science des sols. Université Paris Saclay (COMUE), 2016. Français. [⟨NNT: 2016SACLA024⟩](#). [⟨tel-01588074v2⟩](#)

HAL Id: tel-01588074

<https://pastel.hal.science/tel-01588074v2>

Submitted on 15 Sep 2017

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.



HAL Authorization

NNT : 2016SACLA024

THESE DE DOCTORAT
DE
L'UNIVERSITE PARIS-SACLAY
PREPAREE A
AGROPARISTECH (L'INSTITUT DES SCIENCES ET INDUSTRIES DU
VIVANT ET DE L'ENVIRONNEMENT)

ÉCOLE DOCTORALE N°581
Agriculture, alimentation, biologie, environnement et santé (ABIES)
Spécialité de doctorat : Sciences du sol

Par

Mme Ophélie SAUZET

Quantification par approche micromorphologique couplée à de l'analyse d'images de l'effet de la mise en culture et de l'apport de matières organiques sur l'intensité et la dynamique des processus de lessivage et de bioturbation à l'échelle pluri décennale

Thèse présentée et soutenue à Paris, le 18 novembre 2016

Composition du Jury :

M. P. BAVEYE, Professeur, AgroParisTech, Président du jury
M. P. BOIVIN, Professeur, University of Applied Sciences and Arts of Western Switzerland, Rapporteur
M. J. POULENARD, Professeur, Université Savoie Mont Blanc, Rapporteur
Mme I. COUSIN, Directrice de recherche, INRA, Examineur
Mme G. PERES, Maître de Conférences, AGROCAMPUS OUEST, Examineur
M. Y. COQUET, Professeur, Université Orléans, Directeur
M. D. MONTAGNE, Maître de Conférences, AgroParisTech, Encadrant

REMERCIEMENTS

Cette thèse s'est inscrite dans le cadre du programme ANR 10 Blanc-605 AGRIPED (2010-2014) qui a pour objectif de caractériser, quantifier et modéliser l'impact de l'usage des terres sur le processus de lessivage en passant par des expérimentations en conditions contrôlées sur colonnes de sol au laboratoire ou encore par l'analyse multi-isotopique de la redistribution de matière à partir de prélèvements au champ. Je remercie les participants de ce projet avec qui j'ai eu l'occasion de collaborer à plusieurs reprises.

Je remercie les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail ainsi que mes deux directeurs de thèse Yves COQUET et Philippe CAMBIER qui ont su me faire confiance et m'apporter de précieux conseils. C'est le cas également des membres de mon comité de pilotage que je salue à cette occasion : Sophie CORNU, Vincent HALLAIRE, Céline PELOSI et Pierre CURMI qui a suivi avec intérêt mon parcours depuis l'obtention de mon diplôme d'ingénieur agronome en 2009.

Les compétences, l'expérience et la qualité d'encadrement de David MONTAGNE ont été essentielles pour mener à bien ce projet, et ce depuis mon stage de master 2 en 2011. Chacune de nos discussions et ses retours sur mon travail ont été d'une grande richesse. Je le remercie plus particulièrement pour son aide concrète à l'acquisition des images et son soutien durant la phase de rédaction. Mes encadrants (David MONTAGNE, Cécilia CAMMAS et Jean Marc GILLIOT) ont su en effet faire preuve de disponibilité tout au long de ma thèse, et ce malgré leur charge de travail. Cécilia, merci pour ton aiguillage dans cette discipline passionnante qu'est la micromorphologie et pour l'avoir toujours fait avec ce sourire qui te caractérise. Jean Marc, merci pour ton accompagnement durant le développement méthodologique de cette thèse tout en me faisant partager tes connaissances en analyse d'images et en géomatique.

Tout me paraissait bien capillotracté dans le domaine de l'analyse d'images au départ mais la patience et les compétences de Pierre FRISTOT m'ont permis de me réconcilier un peu avec la programmation notamment et je tiens à lui témoigner ma profonde gratitude pour toute l'énergie et tout le temps consacrés à faire avancer cette déterminante partie du travail.

Pour mener à bien ce projet, j'ai intégré l'UMR ECOSYS basée à Grignon et plus particulièrement son pôle Sol. Ses membres aux compétences multiples sont sympathiques ce qui m'a permis de travailler dans un environnement favorable. Je tiens donc à saluer chacun d'entre eux et notamment Philippe BAVEYE, Pierre BENOIT, Sabine HOUOT, Aurélia MICHAUD, Vincent MERCIER, Valérie POT, Jean Noel RAMPON, Sébastien SAINT-JEAN. Plusieurs stagiaires de l'unité ont eu par ailleurs un rôle important dans cette thèse et

je pense tout particulièrement à Manon BAJARD, Laure BENTZE et Clara CARRAYROU et je les remercie pour leur travail.

Je suis reconnaissante à Myriam GERMAIN, Marie-Pierre ETIENNE et Pierre BARBILLON pour leurs apports en statistiques et également à Hervé GAILLARD pour son aide au laboratoire. Merci à nos archéologues grignonnais pour leurs lectures de lames minces et leurs divers conseils (Jeanne BRANCIER, Marilyse ONFRAY, Marie GROUSSET, Carole VISSAC) et également à toute l'équipe d'Agriped pour sa mise à disposition de données relatives au projet et plus particulièrement Sophie CORNU et Marianna JAGERCIKOVA.

Je tiens à saluer mes collègues de la Chambre d'Agriculture de Franche Comté et plus particulièrement Christian BARNEOUD et Jean Michel ANTOINE envers qui j'ai une profonde sympathie et qui ont fait partie de mes meilleurs supporters durant ce projet. Ils ont en effet accepté de participer à cette aventure tout en me laissant une grande liberté d'organisation dans mes missions et je ne les remercierai jamais assez pour tous ces moments passés ensemble.

Je me souviens de tous ces éclats de rire entre collègues de bureau et de ces beaux moments passés ensemble : Paul Emile NOIROT COSSON, Fiona OBRIOT et Karen YEMADJE. Et bien évidemment, quelle joie de partager le quotidien de colocataires aussi épatantes que Anaïs GOULAS, Julie MENEGHEL et Laure VOGEL sans oublier Kitia. Je suis heureuse qu'un lien d'amitié nous réunisse désormais.

Merci à tous ceux avec qui j'ai créé de riches liens et de si beaux souvenirs durant cette thèse: Aurore ANDRIAMALALA, Alix BELL, Damien BELLOUIN, Florian CHABAUTY, Olivier CROUZET, Gaspard DUMOLLARD, Sabrina FEHRI, Anna LUNGSARKSA, Guillaume NATAF, Clémence RAVIER, Marie STAUFFER, Katerina SROMOVA. Et à mes amis qui ont cru en ce projet et ont fait souvent preuve de compréhension : Alexandre, Aurélie, Caroline, Elise, Jérôme, Yara. Merci à Julie et à Gaspard pour avoir été compréhensifs et bienveillants en particulier dans la dernière ligne droite.

Enfin, je suis tout particulièrement reconnaissante à chacun des membres de ma famille pour avoir toujours compris et respecté mes choix et pour m'avoir apporté un soutien constant sur bien des plans, et ce tout au long de mon parcours. Merci à ma mère qui a été aux petits soins dans les moments les plus difficiles. Tu peux maintenant distribuer les cartes du Camelot ;) Je profite de cette occasion particulière pour rendre hommage à mon grand-père, cet homme d'exception.

Pour tous ces moments passés, un grand merci à tous et également à ceux qui ne se trouvent pas dans cette page mais qui ont leur place dans mon esprit!

SOMMAIRE

Plan du manuscrit

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
I. Le sol : une ressource dynamique influencée par les activités humaines.....	2
II. Deux processus majeurs de transfert de matière : l'éluviation/illuviation et la bioturbation.....	4
II.1. Les processus de translocation de la fraction fine dans les sols	4
II.2. Transfert de matière par éluviation/illuviation	4
II.3. Transfert de matière par bioturbation	5
III. L'approche morphologique : un moyen de quantifier l'intensité des processus.....	6
III.1. Les modes de quantification usuels de l'intensité des processus.....	6
III.2. Une approche morphologique pour quantifier l'intensité des processus.....	7
IV. L'échelle microscopique pour découpler et caractériser les processus.....	9
V. L'apport de l'analyse d'images à la micromorphologie quantitative	10
VI. Objectifs de la thèse et démarche associée	10
CHAPITRE I - SITE ET SOLS D'ETUDE: ECHANTILLONNAGE, METHODES D'ANALYSE ET DONNEES GENERALES	13
I. Présentation de la zone d'étude.....	14
I.1. Situation géographique.....	14
I.2. Contextes géologique et géomorphologique	15
I.3. Contexte pédoclimatique	15
I.4. Occupation actuelle et passée des sols	16
II. Construction d'une anthrop-chrono-séquence et échantillonnage des sols	18
II.1. Echantillonnage en anthrop-chrono-séquence.....	18
II.2. Echantillonnage des sols	19
III. Données de base	23
III.1. Description macromorphologique et micromorphologique des sols.....	23
III.2. Synthèse des caractéristiques analytiques des profils étudiés	25
III.3. Caractérisation des communautés lombriciennes	27

CHAPITRE II - QUANTIFICATION PAR APPROCHE MICROMORPHOLOGIQUE DE L'INTENSITE DU PROCESSUS D'ILLUVIATION : ETUDE DE FAISABILITE	29
I. Introduction.....	31
II. Materials and Methods.....	33
II.1. Study area	33
II.2. Sampling procedures and associated measurements	34
II.3. Micromorphological approach and quantification	36
II.4. Mass balance calculations	36
II.5. Statistical analysis	37
III. Results and discussion.....	38
III.1. Macromorphological analysis and analytical measurements	38
III.2. Micromorphological analysis	43
III.3. Quantification of illuviation intensity and sensitivity to land use change	47
III.4. Relative contribution of illuviation to the genesis of textural contrast	53
IV. Conclusion	56
CHAPITRE III - L'ANALYSE D'IMAGES POUR LA QUANTIFICATION DES TRAITS DIAGNOSTICS	59
I. Introduction.....	61
II. Materials and Methods.....	63
II.1. Study area, sampling and thin section preparation.....	63
II.2. Image acquisition.....	64
II.3. Image analysis procedure	64
II.4. Accuracy assessment procedure	69
II.5. Description of porosity parameters and associated classification	70
II.6. Description of illuvial clay parameters and associated classification	71
II.7. Representative elementary area estimation	72
III. Results and discussion.....	72
III.1. Assessment of the image analysis procedure	72
III.2. REA report.....	76

III.3. Porosity results	78
III.4. Illuvial clay results	81
III.5. Lateral variability at a metric scale	82
IV. Conclusion	85
CHAPITRE IV - QUANTIFICATION DE L'INTENSITE DES PROCESSUS DE TRANSFERT PAR BIOTURBATION ET ILLUVIATION DANS UN LUVISOL CULTIVE	87
I. Introduction	88
II. Matériel et Méthodes	89
II.1. Identification des pores revêtus et calcul d'un taux de remplissage	89
II.2. Quantification des flux de matière	91
II.3. Analyse statistique	93
III. Résultats	93
III.1. Evolution de la macroporosité avec la profondeur	93
III.2. Evolution de l'argile illuviale avec la profondeur	98
III.3. Porosité et revêtements argileux	101
III.4. Quantification des flux de matière	104
IV. Discussion	107
IV.1. Entre création et disparition : la dynamique du réseau poral	107
IV.2. L'illuviation : un processus actif et sélectif	115
IV.3. Les flux de matière	117
V. Conclusion	123
CHAPITRE V - EFFETS DU MODE D'OCCUPATION SUR LES PROCESSUS DE TRANSFERT ET DYNAMIQUES ASSOCIEES	125
I. Introduction	126
II. Matériel et Méthodes	128
III. Résultats	129
III.1. Distribution et abondance des traits illuviaux	129
III.2. Caractéristiques et dynamique du réseau poral	134
III.3. Quantification des flux de bioturbation et d'illuviation	139

IV. Discussion.....	143
IV.1. Stabilité et sensibilité des indicateurs micromorphométriques	143
IV.2. Effets de la mise en culture et des apports de fumier sur la structuration biologique des sols et l'intensité des processus de transfert de matière	144
IV.3. Dynamique des processus de structuration, de bioturbation et d'éluviation/illuviation.....	153
V. Conclusion.....	157
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	161
I. La micromorphologie couplée à l'analyse d'images pour une approche quantitative de la pédogenèse	162
II. Les sols: des systèmes (très) dynamiques.....	163
II.1. Des processus actifs et sensibles aux forçages anthropiques.....	163
II.2. Des sols inscrits dans le temps court	165
III. S'intéresser à la pédogenèse...dans quel but ?	166
IV. Perspectives.....	167
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	171
ANNEXES.....	185
ANNEXE I : Interventions culturales sur les parcelles de QualiAgro.....	186
ANNEXE II : Données de recomptage	188
ANNEXE III : Tableaux récapitulatifs des données brutes et résultats des tests statistiques par profil de sol (abondance surfacique, densité, taille, forme des pores et traits illuviaux)	189

Liste des figures

Figure 0-1 : Les processus pédologiques à l'origine des services rendus par les sols (adapté de Targulian and Krasilnikov, 2007).	2
Figure I-1 : Localisation de la zone d'étude à l'échelle de la France, du bassin parisien et du plateau des Alluets (issu de Geoportail®).....	14
Figure I-2 : Schéma simplifié des contextes géologique et géomorphologique des sites étudiés (In Bajard, 2013).	15

Figure I-3 : Occupation passée et actuelle des sites étudiés : a) occupation actuelle des sols (SCAN25 IGN, 2016) ; b) vue aérienne (IGN 2014) ; c) carte d'état-major (1820-1866) ; d) carte de Cassini (XVIII ^{ème} siècle). Données issues de Geoportail®.	16
Figure I-4 : Plan du dispositif QualiAgro incluant 4 blocs de 10 parcelles ; la parcelle 303 correspond à notre modalité CULT et la parcelle 203 correspond à notre modalité FUM.	17
Figure I-5 : Construction d'une anthropo-chrono-séquence et impact sur l'horizonation et quelques propriétés des sols.	19
Figure I-6 : Horizonation et localisation des prélèvements de bloc à structure conservée dans les trois profils de sol étudiés.	21
Figure I-7 : Caractéristiques des communautés lombriciennes des trois modalités étudiées (avril 2014).	27
Figure II-1 : Photographs of the Luvisols under study.	34
Figure II-2 : Sampling procedure in FOR and CULT profiles.	35
Figure II-3 : Distribution with depth in FOR and CULT profiles of a/ granulometric clay size fraction (g.kg ⁻¹) b/ organic carbon content (g.kg ⁻¹) c/ pH.	41
Figure II-4 : Microlaminated limpid clay coating (FOR 70-80 cm) (left PPL; right XPL).	45
Figure II-5 : Some dusty (red arrow) and limpid (white arrow) clay coatings and intercalations (FOR 80-90 cm) (left PPL; right XPL).	45
Figure II-6 : Papules corresponding to fragments of clay coatings in faunal infillings (FOR 90-100 cm) (left PPL; right XPL).	46
Figure II-7 : Layered silty clay intercalation: agricutan-like feature (CULT 30-40 cm) (left PPL; right XPL).	47
Figure II-8 : Correlation between illuvial clay from point counting results (areal percentage) and granulometric clay size fraction (g.kg ⁻¹) for all studied thin sections.	48
Figure II-9 : Statistical modelling of illuvial clay distribution with depth in CULT and FOR profiles.	52
Figure III-1 : Flowchart of the protocol of porosity and illuvial clay extraction by image analysis in thin sections (rectangles: functions used; ovals: associated results).	65
Figure III-2 : Main stages for porosity extraction on CULT 60-70 R1 and associated focus: (a) original image, (b) grayscale transform, (c) thresholded image, (d) final size filtered and classified image (gray: roots; orange: packing voids; red: cracks; green: endogeic burrows; blue: anecic burrows).	66
Figure III-3 : Spectral characterization of illuvial clay features at different scales; at the 7 x 7 px scale: RGB images, gray level images of the G/R ratio and pixels showing a G/R level lower than the mean G/R defined in a 299 x 299 px neighborhood (in orange); in the last images, numbers indicate the pixel G/R value; the three validation areas of 1883 x 1883 px are located on CULT 60-70 R1 (A: high thickness, B: medium thickness, C: low thickness).	68

Figure III-4 : Main stages for illuvial clay extraction on CULT 60-70 R1 and associated focus: (a) original image, (b) illuvial clay binary image, (c) illuvial clay binary image after size filtering and smoothing, (d) classified image (brown: papules; orange: clay coatings/infillings).	69
Figure III-5 : Micromorphologist outlinings (in white) under image analysis results (in red) for (a) porosity and for (b) illuvial clay in the validation area B.	74
Figure III-6 : Evolution of the areal percentages of the pedofeatures of interest in CULT 60-70 R1 as a function of the increasing analyzed area of the image; triangles indicate the size of the REAs.	77
Figure III-7 : Absolute and relative number of (a) pores and (b) illuvial clay features according to shape and size class ; based on CULT 60-70 R1, CULT 60-70 R2 and CULT 60-70 R3 data.	79
Figure III-8 : Pores and illuvial clay features characterization based on CULT 60-70 R1, CULT 60-70 R2 and CULT 60-70 R3 data : (a) median and associated boxplots for size (in EPD or equivalent diameter (mm)); (b) median and associated boxplots for shape factor (Sf).	82
Figure IV-1: a- Revêtements argileux connectés à la porosité (CULT 90-100 R3) ; b- Revêtement argileux déconnecté de la porosité (CULT 60-70 R2) ; c- Papules (CULT 60-70 R1).	89
Figure IV-2: Exemple de deux pores P_A et P_B contenant respectivement 3 et 4 revêtements : R_1 , R_2 et R_3 pour P_A et R_3 , R_4 , R_5 et R_6 pour P_B (CULT 120-130 R3).	90
Figure IV-3: Distribution en fonction de la profondeur de la porosité racinaire (en gris) ; de la porosité d'assemblage (en jaune) ; de la porosité fissurale (en rouge) ; et de la porosité créée par les vers endogés (en vert) et anéciques (en bleu) dans le profil CULT.	95
Figure IV-4: Distribution en fonction de la profondeur de la surface de la porosité racinaire (en gris) ; de la porosité d'assemblage (en jaune) ; de la porosité fissurale (en rouge) ; et de la porosité créée par les vers endogés (en vert) et anéciques (en bleu) : a) en pourcent de la surface analysée et b) en pourcent de la porosité totale. Profil CULT.	96
Figure IV-5: Distribution en fonction de la profondeur du nombre de pores constituant la porosité racinaire (en gris) ; la porosité d'assemblage (en jaune) ; la porosité fissurale (en rouge) ; la porosité créée par les vers endogés (en vert) et anéciques (en bleu) : a) la densité absolue en nombre par centimètre carré et b) densité relative en pourcent du nombre total de pore. Profil CULT.	96
Figure IV-6: Distribution en fonction de la profondeur de la taille en μm (diamètre de pore équivalent) de la porosité racinaire (en gris) ; de la porosité d'assemblage (en jaune) ; de la porosité fissurale (en rouge) ; et de la porosité créée par les vers endogés (en vert) et anéciques (en bleu). Profil CULT.	97

Figure IV-7: Distribution en fonction de la profondeur des revêtements en place (orange) et des papules (brun). Profil CULT.	99
Figure IV-8: Distribution en fonction de la profondeur de la surface des revêtements en place (orange) et des revêtements fragmentés et redistribués ou papules (brun) : a) en pourcent de la surface analysée et b) en pourcent de la surface totale des traits illuviaux. Profil CULT.	100
Figure IV-9: Distribution en fonction de la profondeur du nombre des revêtements en place (orange) et des revêtements fragmentés et redistribués ou papules (brun) : a) densité absolue en nombre par centimètre carré et b) densité relative en pourcent du nombre total de traits illuviaux. Profil CULT.	100
Figure IV-10: Distribution en fonction de la profondeur de la taille en μm (diamètre équivalent) des revêtements en place (orange) et des revêtements fragmentés et redistribués ou papules (brun). Profil CULT.	101
Figure IV-11: Distribution en fonction de la profondeur de : a) la surface relative et b) la densité relative des revêtements connectés et des revêtements non connectés à la porosité. Profil CULT.	101
Figure IV-12: Distribution en fonction de la profondeur de la taille en μm (diamètre équivalent) des revêtements connectés ($> 200 \mu\text{m}$) (à gauche) et des revêtements déconnectés de la porosité (à droite). Profil CULT.	102
Figure IV-13: Distribution en fonction de la profondeur de la proportion (en %) de pores racinaires, de pores d'assemblage, de fentes et des pores associés à l'activité des vers endogés et anéciques en contact avec au moins un revêtement argileux en place par rapport au nombre total de chaque type de pore. Profil CULT.	103
Figure IV-14: Distribution en fonction de la profondeur du taux de remplissage moyen (en %) de l'ensemble des pores, des pores racinaires, des pores d'assemblage, des fentes et fissures et des pores associés à l'activité des vers endogés et anéciques. Profil CULT.	104
Figure IV-15: Schéma conceptuel de formation d'un revêtement déconnecté avec photographies représentatives associées 1/ ensemble de revêtements connectés à la porosité racinaire 2/ pores lombriciens recoupant des revêtements 3/ remplissage biologique contenant des papules 4/ remplissage limoneux.	112
Figure IV-16: Indices de création, de conservation et d'abondance de la porosité lombricienne en fonction de la profondeur. Profil CULT.	113
Figure IV-17: Revêtements au contact d'un pore de vers anécique : a) fragments de revêtements recoupés par un pore de vers anécique (CULT 90-100 R1) et b) fin revêtement déposé sur la paroi d'un pore de vers anécique (CULT 70-80 R2).	116
Figure V-1 : Interactions et rétroactions entre mode d'occupation des sols, bioturbation et lessivage (d'après Faivre and Chamarro, 1995; Lamandé et al., 2003)	126

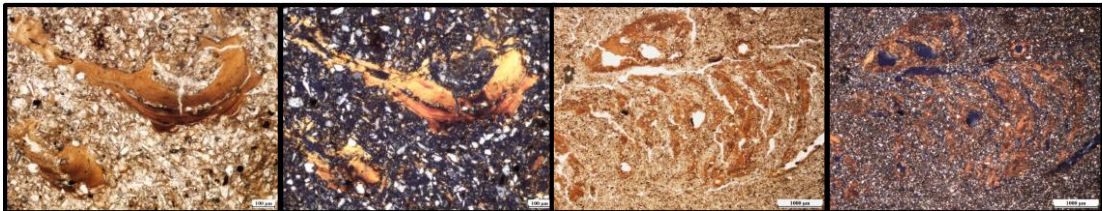
Figure V-2 : Evolution en fonction de la profondeur de (a) la surface en % de la surface totale de sol et (b) du nombre par cm ² des revêtements et des papules dans les trois profils FOR, CULT et FUM.	131
Figure V-3 : Evolution en fonction de la profondeur de (a) la proportion surfacique relative des revêtements et des papules et (b) des revêtements connectés et déconnectés dans les trois profils FOR, CULT et FUM.	132
Figure V-4: Evolution avec la profondeur de l'abondance (a) et de la densité (b) des pores racinaires (en gris), des pores d'assemblage (en jaune), des fentes et fissures (en rouge), et des pores associés à l'activité des vers endogés (en vert) et anéciques (en bleu) dans les trois profils FOR, CULT et FUM.	135
Figure V-5 : Indices de création de la porosité lombricienne et de conservation de la porosité en fonction de la profondeur pour les trois profils FOR, CULT et FUM. Normalisation des données en fonction des données issues des trois profils.	138
Figure V-6: Modélisation de la distribution avec la profondeur des flux de fraction < 2 µm (t.ha ⁻¹) liés à l'illuviation dans les trois modalités (AUC = area under curve).	143

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Données analytiques synthétisées par horizon pour les trois profils étudiés ; Da, densité apparente.	26
Tableau II-1 : Soil macromorphology.	39
Tableau II-2 :Selected physical and chemical properties.	42
Tableau II-3 : Soil Micromorphology.	44
Tableau II-4 : Clay coatings and illuviation features amounts (surface percentage) in the different horizons of the FOR and CULT profiles. Absolute counting error with a 95 percent confidence was determined according to Van der Plas and Tobi (1965). Illuviation indexes (in %.cm) were calculated according to Miedema and Slager (1972).	49
Tableau II-5 : Illuvial clay mass flux in FOR and CULT profiles (clay coatings bulk density = 1.75 + 0.12 g.cm-3); errors on calculations estimated according to Montagne (2006).	50
Tableau II-6 : Final mass balance calculations in FOR and CULT profiles.	55
Tableau III-1 : Morphological subclasses of pores based on equivalent pore diameter and shape factor.	71
Tableau III-2 : Morphological subclasses of illuvial clay based on size (equivalent diameter) and distance to pores.	71
Tableau III-3 : Confusion matrix derived from the porosity extraction (mm ²).	73
Tableau III-4 : Confusion matrix derived from illuvial clay extraction – validation area B (mm ²).	73

Tableau III-5 : Confusion matrix derived from illuvial clay extraction without border interactions - validation area B (mm ²).....	73
Tableau III-6 : Confusion matrix derived from illuvial clay extraction without border interactions - validation area A (mm ²).....	75
Tableau III-7 : Confusion matrix derived from illuvial clay extraction without border interactions - validation area C (mm ²).....	75
Tableau III-8 : Porosity and illuvial clay areal percentages and number per cm ² at a centimetric scale - mean, range and coefficient of variation (CV) were calculated using CULT 60-70 R1, CULT 60-70 R2 and CULT 60-70 R3 (n=3).....	80
Tableau III-9 : Porosity and illuvial clay areal percentages and number per cm ² at a metric scale - mean, range and coefficient of variation (CV) were calculated using CULT 60-70_0.5, CULT 60-70_1 and CULT 60-70_1.5 (n=3).	84
Tableau IV-1: Typologie des traits illuviaux.....	89
Tableau IV-2 : Flux de matière et de fraction < 2 µm (t. ha ⁻¹) associés aux processus de bioturbation et d'illuviation. Profil CULT.	105
Tableau IV-3 : Comparaison de la porosité extraite par analyse d'images dans un LUVISOL forestier (Bryk, 2016) et dans un LUVISOL cultivé (profil CULT).	108
Tableau V-1 : Surface (en % de la surface totale analysée) et densité (en nombre par cm ²) des revêtements, des papules et de l'ensemble des traits illuviaux en fonction des horizons (E, BT, C) et de la modalité (FOR, CULT, FUM). Des lettres différentes pour une variable donnée et un facteur donné indiquent des valeurs significativement différentes au seuil de 5%. La lettre S dans la colonne Int. (pour Interaction) signifie que l'interaction entre les deux facteurs est significative.	133
Tableau V-2: Surface (en % de la surface totale analysée) et densité (en nombre par cm ²) de la porosité totale, de la porosité racinaire, de la porosité d'assemblage, des fentes et fissures et de la porosité associée aux vers endogés et anéciques en fonction des horizons (E, BT, C) et de la modalité (FOR, CULT, FUM). Des lettres différentes pour une variable donnée et un facteur donné indiquent des valeurs significativement différentes au seuil de 5%. La lettre S dans la dernière colonne (intitulée Int. pour Interaction) signifie que l'interaction entre les deux facteurs est significative.....	137
Tableau V-3 : Flux de matière et de fraction < 2 µm (t. ha ⁻¹) associés aux processus de bioturbation et d'illuviation. Profil FOR.....	140
Tableau V-4 : Flux de matière et de fraction < 2 µm (t. ha ⁻¹) associés aux processus de bioturbation et d'illuviation. Profil FUM.....	141

INTRODUCTION GÉNÉRALE



I. Le sol : une ressource dynamique influencée par les activités humaines

Le sol, interface complexe et majeure entre l'atmosphère, la lithosphère, l'hydrosphère et la biosphère (Stockmann et al., 2011), constitue un véritable capital pour l'Homme du fait des différents services qu'il fournit : services d'approvisionnement (nourriture, fibres, matériaux, ressources génétiques), services de régulation (climat, inondations, maladies, qualité de l'eau) et services culturels (support des paysages, des activités de loisirs, de pratiques spirituelles, religieuses ou éducatives) (Dominati et al., 2010). La pérennisation et l'optimisation de ces services font l'objet d'une attention intergouvernementale croissante notamment en ce qui concerne le rôle du sol en tant que support de la production agricole et d'alternative à la séquestration du carbone. Certains objectifs exposés lors de la dernière conférence sur le climat à Paris en 2015 (COP21) ou encore la déclaration de l'année 2015 comme Année Internationale des Sols par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture constituent des exemples de cette préoccupation grandissante.

Comme le souligne la figure 0-1 le type de service rendu par le sol et l'intensité avec laquelle ils sont rendus dépendent en cascade des propriétés spécifiques à chaque sol, de processus pédologiques qui pilotent l'émergence de ces propriétés et finalement de facteurs de pédogénèse qui conditionnent ces processus (Targulian and Krasilnikov, 2007).

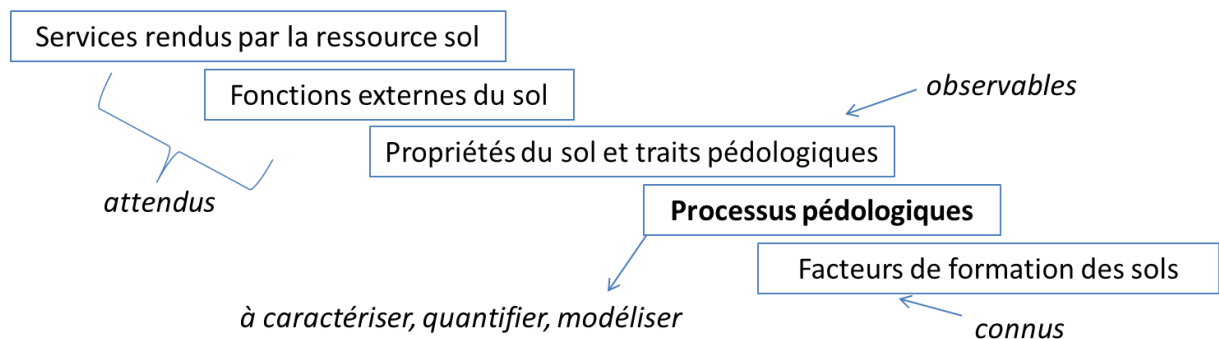


Figure 0-1 : Les processus pédologiques à l'origine des services rendus par les sols (adapté de Targulian and Krasilnikov, 2007).

Or, parmi les cinq grands facteurs de la pédogénèse que sont le climat, les organismes vivants, le relief, le matériel parental et le temps, l'Homme, partie intégrante du facteur « organismes vivants », représente aujourd'hui la principale variable de forçage du système sol que ce soit directement puisque les êtres humains utilisent environ un tiers de la surface émergée du globe pour l'agriculture (Smith et al., 2016) ou indirectement via leur impact sur les changements climatiques (Brinkman and Sombroek, 1996; Rounsevell et al., 1999). De plus, l'occupation des sols et les pratiques agricoles connaissent actuellement de profondes mutations du fait de l'émergence de nouvelles productions (biocarburants) ou de nouvelles manières de cultiver (agriculture de conservation). Les sols se trouvent ainsi exposés à une

multitude de perturbations anthropiques d'intensités variables, et ce sur différentes échelles de temps, du ponctuel (p.ex. un sous-solage) au long terme (p.ex. modification du couvert végétal) en passant par le périodique (p.ex. les amendements calciques ou organiques), et celles-ci viennent se superposer aux perturbations naturelles (Lin, 2011). Même si les capacités de résilience et de résistance des sols sont reconnues, certains processus physiques, chimiques ou biologiques réagissent à ces perturbations anthropiques (Richter, 2007; Stockmann et al., 2011; Tugel et al., 2005). Ils sont alors susceptibles d'induire des évolutions des propriétés des sols avec *in fine* des conséquences positives ou négatives sur le type et l'intensité des services rendus par les sols (Figure 0-1).

Yaalon & Yaron proposent ainsi dès 1966 que les pédologues se consacrent davantage à la compréhension et à l'évaluation de l'influence de l'Homme sur l'évolution du sol. Richter (2007) souligne quarante années plus tard que l'impact des pratiques anthropiques sur les sols manque toujours de caractérisation et de quantification. En effet, si la dynamique des processus réactifs sur des pas de temps inférieurs à la dizaine d'années (érosion, cycle des matières organiques) a fait l'objet de nombreuses études, la dynamique des processus pédologiques supposés réactifs uniquement sur des pas de temps plus longs, i.e. de l'ordre du siècle, est encore aujourd'hui largement négligée et reste particulièrement méconnue (Cornu et al., 2009; Minasny et al., 2008; Rounsevell et al., 1999). Or, des effets significatifs du climat, du mode d'occupation et des pratiques agricoles sur la direction et l'intensité de ces processus et par voie de conséquence sur l'évolution du sol ont pourtant été mis en évidence sur de tels pas de temps (Montagne et al., 2008; Montagne and Cornu, 2010; Richter, 2007; Tugel et al., 2005). Ainsi, bien qu'il soit reconnu depuis plusieurs dizaines d'années que l'Homme est un facteur de pédogénèse à part entière, les effets de nombreuses activités anthropiques, notamment agricoles, sur la direction et l'intensité des principaux processus pédologiques nécessitent encore d'être quantifiés (Lin, 2011).

Le sol constitue un système complexe jouant un rôle essentiel au sein des écosystèmes. Pour garantir la pérennité des services qu'il rend, il paraît nécessaire de quantifier à moyen terme (10-100 ans) les effets des modifications de l'usage des sols sur la direction et l'intensité des processus pédologiques.

II. Deux processus majeurs de transfert de matière : l'éluviation/illuviation et la bioturbation

II.1. Les processus de translocation de la fraction fine dans les sols

La fraction fine ($< 2 \mu\text{m}$) est principalement composée de minéraux argileux, d'oxyhydroxydes et de matières organiques. Son abondance, sa composition et sa distribution dans les sols conditionnent la structure du sol et donc le régime hydrique des sols. La fraction fine constitue par ailleurs une surface d'adsorption et d'échange des éléments chimiques dissous (Bonneau et al., 1994; Dümig et al., 2012). Les services rendus par les sols reposent ainsi en grande partie sur cette fraction fine des sols et il paraît donc essentiel de se concentrer sur les processus qui la mettent en jeu.

Soumise à des processus de transformation, de néoformation, ou encore de translocation, les dynamiques d'évolution de l'abondance, de la nature minéralogique ou encore de la distribution à l'échelle des profils de cette fraction fine sont plus rapides que ce qui est communément admis (Cornu et al., 2012b). En dehors des climats tropicaux pour lesquels les processus d'altération et de néoformation sont dominants, la fraction fine est redistribuée sans transformations minéralogiques majeures (Cornu et al., 2012b). Sous nos climats tempérés et humides, les transferts de matière particulaire par translocation sont essentiellement le résultat des processus d'éluviation/illuviation et de bioturbation (Bockheim et al., 2005; Phillips, 2007; Stockmann et al., 2011).

II.2. Transfert de matière par éluviation/illuviation

Le processus d'éluviation/illuviation (ou lessivage) est un processus de formation des sols se définissant par la migration verticale de particules fines au sein du profil de sol. Il correspond à un entrainement mécanique par les eaux gravitaires de la fraction fine des sols depuis les horizons supérieurs (éluviaux, notés E) vers les horizons profonds (illuviaux, notés BT). Trois étapes sont nécessaires à son déroulement : une phase de mobilisation des particules (éluviation), une phase de transport de ces particules éluviées via les eaux gravitaires et une phase de dépôt de ces particules par floculation et/ou filtration (illuviation). Ce processus se traduit finalement par i) un enrichissement en fraction fine des horizons illuviés, et ii) par l'apparition de revêtements argileux (ou argilanes) recouvrant les parois des pores de l'horizon illuvial. Le processus d'éluviation/illuviation est considéré comme le principal mécanisme à l'origine de la formation des luvisols, qui représentent à eux seuls plus de 60% des Unités Cartographiques de Sol en France, et ce principalement dans la moitié nord du pays (INRA, 1998 In Quénard et al. (2011)). Les études sur le processus d'éluviation/illuviation et sa dynamique ont essentiellement été conduites dans des

microcosmes en laboratoire (Bockheim and Gennadiyev, 2009). Elles ont notamment permis d'identifier les facteurs pilotant son intensité : abondance et distribution de la pluviométrie, abondance et minéralogie des minéraux argileux, abondance des matières organiques, nature et abondance relative des cations compensateurs, conditions de pH, etc.

Or, la mise en culture et les pratiques agricoles ont pour objectif et/ou pour effets secondaires une modification des conditions physico-chimiques du sol (via le chaulage et l'apport de matières organiques notamment) et de son fonctionnement hydrique (via la couverture végétale, l'irrigation et le drainage notamment), ou autrement dit de nombreuses propriétés des sols contrôlant l'intensité du processus d'éluviation/illuviation. Ainsi, Montagne et al. (2016, 2013, 2008) ont, par exemple, pu quantifier une intensification du processus d'éluviation/illuviation en réponse au drainage agricole de LUVISOLS DEGRADES (AFES, 2009).

II.3. Transfert de matière par bioturbation

Le processus de bioturbation est, quant à lui actif dans tous les sols avec une intensité variable et ne concerne pas exclusivement la fraction fine. Meysman et al. (2006) le définit comme le remaniement biologique des sols et des sédiments par tous les types d'organismes incluant les microbes, les plantes à racines, et les animaux tunneliers. Sous climat tempéré continental, les organismes les plus bioturbateurs sont les vers de terre suivis des vertébrés, puis des fourmis, et en dernier lieu d'autres invertébrés éventuellement actifs (Bastardie et al., 2003; Gobat et al., 2004; Wilkinson et al., 2009). La macrofaune lombricienne a fait l'objet d'une classification fonctionnelle par Bouché (1972). On distingue ainsi i) les épigés qui sont des transformateurs de litière vivant en surface, ii) les anéciques qui sont tunneliers et creusent des galeries verticales leur permettant de se nourrir de matières organiques en surface tout en vivant en profondeur, et iii) les endogés qui se nourrissent de sol et se déplacent plutôt horizontalement en dessous de la surface en creusant également des galeries. La bioturbation par les lombriciens se traduit ainsi par i) la création et l'entretien à plus ou moins long terme d'un réseau de galeries (Peres, 2003), et ii) la production de rejets déposés à la surface des sols sous forme de turricules ou au sein même des sols sous la forme d'agrégats organo-minéraux (Blouin et al., 2013; Lavelle et al., 1997; Pelosi, 2008).

En modifiant la structure physique de leur habitat ainsi qu'en changeant, directement ou indirectement, la localisation et la disponibilité des éléments chimiques au sein des écosystèmes (Blouin et al., 2013; Jones et al., 1994), les vers de terre, considérés comme ingénieurs de l'écosystème, orientent l'évolution du sol temporellement et spatialement (Lavelle et al., 1997) mais les mécanismes et dynamiques associés restent peu connus

(Meysman et al., 2006; Samouëlian and Cornu, 2008). Ces organismes sont par ailleurs particulièrement sensibles aux modes d'occupation et aux pratiques agricoles. Il est ainsi reconnu que les systèmes de monoculture, type maïs, présentent une plus faible abondance de vers de terre que les prairies permanentes ou les systèmes diversifiés incluant des prairies temporaires (Pelosi, 2008; Peres, 2003). Le travail du sol est par ailleurs responsable d'une diminution de l'abondance des vers anéciques suite à la destruction mécanique directe des populations et/ou aux perturbations de leur habitat et de la localisation des ressources trophiques (Chan, 2001). Les effets des matières actives utilisées pour la protection phytosanitaire des cultures sont aussi divers que les espèces de vers de terre existantes et la nature des molécules commercialisées (Edwards, 2004). A l'inverse, en augmentant les ressources trophiques disponibles pour les lombriciens, l'apport de matières organiques exogènes, comme le fumier ou le compost, favorise le développement des populations de vers de terre en comparaison de systèmes fertilisés avec des engrais minéraux (Capowiez et al., 2009). Quoi qu'il en soit, s'il existe une abondante littérature traitant des effets du mode d'occupation des sols ou des pratiques agricoles sur la diversité spécifique, la densité ou encore la biomasse des vers de terre, il reste très difficile de traduire ces effets en conséquences sur la nature et l'intensité de l'activité lombricienne.

Lessivage et bioturbation sont les principaux processus responsables de transfert de matière dans les sols de climat tempéré. Ces deux processus sont sensibles aux perturbations anthropiques même si leurs dynamiques respectives restent peu connues et encore moins quantifiées.

III. L'approche morphologique : un moyen de quantifier l'intensité des processus

III.1. Les modes de quantification usuels de l'intensité des processus

L'intensité du processus d'éluviation/illuviation est classiquement mesurée à partir du calcul de l'indice de différenciation texturale qui correspond au ratio entre la concentration en fraction < 2 µm de l'horizon illuvial et celle de l'horizon éluvié (AFES, 2009). Cependant, une telle approche basée sur la granulométrie ne permet pas de quantifier l'intensité relative du processus de lessivage par rapport à l'ensemble des très nombreux processus susceptibles de participer à la genèse des contrastes texturaux dans les sols parmi lesquels les processus de microdivision, de néoformation, de bioturbation, ou encore l'existence de discontinuités lithologiques (Phillips, 2004, 2007). Ainsi, Quénard et al. (2011) a estimé que le processus de lessivage peut être considéré comme le processus dominant dans

seulement 1 à 12% des profils de sol identifiés comme luvisols au sein de la base de données DoneSol.

L'intensité de la bioturbation est classiquement quantifiée à partir de la remontée de matière à la surface des sols. Cette quantification peut-être directe ou indirecte. Dans le premier cas, elle repose sur la quantification de la masse de terre déposée à la surface des sols sous forme de turricules (Gobat et al., 2004). Dans le second cas, la quantification de la bioturbation repose sur l'enfouissement d'éléments bien identifiés, notamment d'origine anthropique tels que des os à l'image de ce que faisait déjà Darwin à la fin du XIX^{ème} siècle, ou plus récemment sur des datations OSL (*optically stimulated luminescence*) qui permettent de dater la dernière exposition à la lumière du quartz (Johnson et al., 2014; Wilkinson et al., 2009). Toutefois, ces méthodes ne permettent de quantifier qu'une fraction minoritaire de la bioturbation par les vers de terre dans la mesure où les turricules déposées à la surface des sols ne représentent qu'environ 25% des rejets annuels des lombriciens (Bonneau et al., 1994; Bouché et al., 2014). L'intensité de la bioturbation peut également être mesurée à partir de la quantification de la biomasse de vers de terre au champ et du taux d'ingestion des vers de terre sachant par exemple qu'en climat tempéré un ver de terre anécique peut ingérer entre 0.08 et 0.50 g de sol sec.g^{-1} de ver (Pelosi, 2008). Les valeurs obtenues correspondent alors à des flux instantanés de matière et sont d'autant plus difficiles à intégrer sur le moyen ou le long terme que les biomasses de vers de terre varient très fortement à échelle saisonnière ou pluri-annuelle en fonction des conditions météorologiques. Enfin, d'autres études sur la bioturbation sont réalisées en laboratoire et consistent en l'observation, la caractérisation et le dénombrement de galeries et de rejets lombriciens (Capowiez et al., 2014a; Jegou et al., 1999; Le Couteulx et al., 2015). Cependant, la plupart de ces études correspondent à des approches monospécifiques, c'est à dire qu'elles décrivent la morphologie des traits créés par une espèce lombricienne isolée sans tenir compte des innombrables interactions ayant lieu en milieu naturel.

III.2. Une approche morphologique pour quantifier l'intensité des processus

Parallèlement à l'utilisation des méthodes citées précédemment, des méthodes dites d'analyse structurale basées sur l'analyse multi-échelle des relations structurales entre différents volumes de sol homogènes du point de vue de la nature et de l'arrangement de leurs constituants ont été utilisées pour identifier et hiérarchiser les processus pédologiques contrôlant les transformations et les redistributions de matière. Ces méthodes ont été développées et largement utilisées aux niveaux d'organisation des paysages (Boulet et al., 1982; Fritsch et al., 1992) ou des séquences de sol (Do Nascimento et al., 2004; Fritsch et al., 2007) et plus particulièrement dans le cadre de travaux portant sur les processus de

ferrallitisation et de podzolisation (Boulet et al., 1982; Do Nascimento et al., 2004; Fritsch et al., 1992, 2007). Elles sont toutefois parfaitement transposables aux niveaux d'organisation du profil ou de l'horizon de sol (Fritsch and Fitzpatrick, 1994) d'une part et à l'étude des processus d'éluviation/illuviation ou de bioturbation d'autre part. Il s'agit alors d'identifier les traits pédologiques spécifiques des deux processus cibles soit : i) les revêtements argileux d'une part (Kühn et al., 2010; McKeague et al., 1978; Schuylenborgh et al., 1970), et ii) les galeries et rejets des lombriciens d'autre part (Kooistra and Pulleman, 2010; Peres, 2003; Piron, 2008).

L'avantage essentiel de ces approches morphologiques basées sur l'identification et la caractérisation des traits pédologiques est qu'elles permettent d'avoir accès non seulement à l'intensité actuelle des processus mais aussi à leur intensité passée (Lamandé et al., 2011; Walkington, 2010; Wilkinson et al., 2009). Une telle quantification de l'intensité cumulée dans le temps des processus pédologiques est en effet nécessaire pour quantifier les impacts à moyen terme (10-100 ans) d'un changement du mode d'occupation des sols ou des pratiques agricoles, et ce d'autant plus que les modifications annuelles de la phase solide des sols sont généralement d'amplitudes faibles (Lin, 2011; Targulian, 2005) et donc difficiles à quantifier et que des événements rares, mais d'intensité extrême, peuvent être particulièrement impactants (Boulaine, 1978).

Toute la question est alors de connaître la durée de conservation des traits pédologiques dans les sols ou autrement dit la durée maximale sur laquelle l'intensité des processus pédologiques est cumulée (Carter and Davidson, 1998; Davidson, 2002). Si la durée de conservation des revêtements argileux ne semble a priori pas limitante dans la mesure où les revêtements argileux sont considérés comme particulièrement stables dans les sols, au moins en l'absence d'engorgements prononcés (Kühn et al., 2010), il existe à notre connaissance très peu d'estimations de la durée de conservation des galeries et des rejets lombriciens. Il est toutefois reconnu, qu'au moins à échelle macroscopique, le vieillissement des agrégats d'origine biologique rend leur identification sur critères morphologiques difficile (Bottinelli et al., 2012; Jouquet et al., 2009; Pulleman et al., 2005).

Les approches d'analyse structurale se sont fréquemment limitées à une description qualitative des traits pédologiques dans l'objectif d'identifier, de caractériser ou de hiérarchiser les processus. Toutefois, des travaux récents ont bien montré la faisabilité et l'intérêt d'une quantification des traits pédologiques pour quantifier des processus pédologiques aussi divers que les processus d'oxydo-réduction (Cornu et al., 2012a; Hayes and Vepraskas, 2000) ou pour ce qui nous intéresse plus directement, les processus d'éluviation/illuviation (Montagne et al., 2007, 2013, 2016) ou de bioturbation (Piron, 2008; Piron et al., 2012).

Les approches d'analyse structurale centrées sur l'identification et la quantification de l'abondance des traits diagnostics peuvent permettre de quantifier l'intensité des processus pédologiques. Elles sont d'autant plus pertinentes pour quantifier l'impact à moyen terme d'un changement du mode d'occupation des sols ou des pratiques agricoles qu'elles donnent accès à l'intensité cumulée dans le temps des processus pédologiques quand certaines des méthodes plus classiquement utilisées portent sur leur intensité instantanée. Dans le cas présent, il s'agira alors d'identifier et de quantifier les revêtements argileux d'une part et les traits biologiques d'autre part.

IV. L'échelle microscopique pour découpler et caractériser les processus

Bien que les revêtements argileux soient décelables sur le terrain, leur caractérisation est beaucoup plus précise à l'échelle microscopique. Cette échelle d'observation permet en effet de distinguer avec un minimum d'ambiguïté les revêtements liés au processus d'illuviation des revêtements liés à d'autres processus pédologiques dont les processus de retrait/gonflement (Kemp, 1998; Kühn et al., 2010). De plus, lors de leur vieillissement, les revêtements argileux sont susceptibles d'être fragmentés par des processus physiques ou biologiques. Difficilement observables à l'œil nu, ces fragments de revêtements, ou papules (Brewer, 1964), sont seulement identifiables à échelle microscopique. Par ailleurs, il existe une grande diversité de revêtements argileux (Kühn et al., 2010). Certains se caractérisent ainsi par la présence de « poussières » organiques ou de particules minérales de taille supérieure à 2 μm dont la présence est typique d'une occupation agricole des sols (Fedoroff and Courty, 1994; Kühn et al., 2010).

Pour ce qui concerne la quantification de la bioturbation, des approches macromorphologiques (Piron et al., 2008) ou micromorphologiques (Jeanson, 1964) ont été utilisées. Alors que les caractéristiques macromorphologiques propres aux structures biogéniques sont difficilement identifiables à l'œil nu (Jouquet et al., 2009), elles conservent des propriétés de couleur (Humphreys, 1994; Wilkinson et al., 2009) ou encore de microstructure (Bottinelli et al., 2012; Bruneau et al., 2004; Gargiulo et al., 2014) clairement identifiables à échelle microscopique. Il est de plus possible à cette échelle de distinguer, au moins dans un certain nombre de cas, l'activité des différents organismes bioturbateurs (Kooistra and Pulleman, 2010). Concernant plus spécifiquement l'activité des vers de terre, il existe une très grande diversité de marqueurs micromorphologiques qu'il est possible de classer en deux catégories principales : i) des macropores qu'il s'agisse de galeries, de chambres d'estivation ou encore de vides issus de la modification de vides existants, et ii) des traits excrémentaux ou autres traits spécifiquement biologiques, qu'il s'agisse de

boulettes fécales encore bien individualisées, de revêtements le long des galeries ou encore de divers types de déjections prenant la forme de remplissages d'anciens vides (Kooistra and Pulleman, 2010).

L'échelle microscopique permet de caractériser avec précision les propriétés des traits pédologiques (revêtements argileux, galeries, rejets lombriciens) et elle est donc à privilégier pour découpler et caractériser les multiples processus mis en jeu dans la formation des sols.

V. L'apport de l'analyse d'images à la micromorphologie quantitative

A l'image de l'ensemble des approches d'analyse structurale, les études micromorphologiques ont été le plus souvent descriptives. Lorsque les auteurs avaient pour objectif de quantifier des traits diagnostics, ils ont eu généralement recours à la mesure de leur fréquence par comptage au point sur lames minces de sol. Cependant, ce mode de quantification a fait l'objet de nombreuses critiques car il est uniquement semi-quantitatif et opérateur-dépendant (McKeague et al., 1980; Paton et al., 1995). Les développements récents en analyse d'images assistée par ordinateur ont permis de passer progressivement à des quantifications exhaustives de l'abondance mais aussi des caractéristiques de taille, de forme ou de topologie de la porosité ou des traits pédologiques (Bryant and Davidson, 1996; Cornu et al., 2012a; Munoz-Ortega et al., 2015; Ringrose-Voase, 1996; Taina and Heck, 2010).

L'analyse d'images offre ainsi la possibilité i) de traiter un grand nombre d'échantillons permettant d'assurer les différents changements d'échelles nécessaires à toute analyse structurale (lames minces/horizon de sol, horizon de sol/profil de sol, profil de sol/parcelle et enfin parcelle/mode d'occupation), et ii) de quantifier non seulement l'abondance mais aussi les paramètres de taille, de forme ou de voisinage des traits pédologiques particulièrement utiles pour caractériser et hiérarchiser les processus pédologiques les uns par rapport aux autres (Cornu et al., 2012a).

Le recours à l'analyse d'images sur lames minces de sol permet i) de quantifier et caractériser micromorphométriquement les traits diagnostics des processus, et ii) de garantir la représentativité des quantifications.

VI. Objectifs de la thèse et démarche associée

Dans un contexte de pression anthropique croissante sur les sols, il existe un réel besoin de prédiction de la vitesse d'évolution des sols et des services associés afin de prendre les

décisions adéquates quant à l'utilisation des terres. Ce travail de thèse s'est alors fixé pour **objectif général** de quantifier l'effet de la mise en culture et de l'apport de matières organiques exogènes sur l'intensité et la dynamique des deux processus majeurs de transfert de matière en climat tempéré que sont les processus d'éluviation/illuviation et de bioturbation à moyen terme (10-100 ans).

L'objectif général de la thèse sera décomposé en trois **objectifs scientifiques** : i) élaborer et valider une méthode de quantification de l'intensité des processus d'illuviation et de bioturbation à partir de mesures d'abondance des traits pédologiques spécifiques de ces processus sur lames minces de sol, ii) quantifier l'effet de la mise en culture et des apports de matières organiques exogènes sur l'intensité des processus étudiés, et finalement iii) déduire des variations d'intensité observées des informations sur la dynamique des processus d'éluviation/illuviation et de bioturbation et plus généralement sur les dynamiques d'évolution des sols.

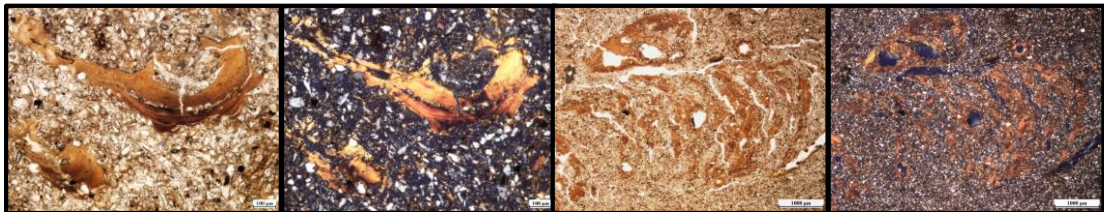
Par la même occasion, ce travail de thèse se fixe pour **objectif finalisé** d'apporter certaines des connaissances nécessaires à la prise en compte des effets à moyen terme sur la ressource en sol dans l'évaluation et le choix des pratiques agricoles. A plus long terme, les connaissances acquises sur les dynamiques comparées des processus d'éluviation/illuviation d'une part et de bioturbation d'autre part pourront être utilisées dans un double objectif de maximisation des flux verticaux ascendants liés à la bioturbation et de minimisation des flux verticaux descendants liés à l'éluviation. Une telle gestion préventive permettrait en effet de limiter les effets négatifs de l'entraînement en profondeur de la fraction < 2 μm . En effet, les pertes de matière des horizons de surface posent un certain nombre de problèmes agronomiques et environnementaux avec notamment une augmentation de la sensibilité au tassement et à la battance des sols par acidification progressive des horizons de surface (AFES, 2009), et des risques sanitaires amplifiés liés au transfert vertical de particules sur lesquelles sont adsorbés des polluants pouvant alors atteindre les nappes d'eau souterraines (Van Den Bogaert, 2015).

L'ensemble de ce travail de thèse a été réalisé sur un type de sol modèle : le LUVISOL TYPIQUE (AFES, 2009). Ce type de sol est en effet très largement représenté en France et plus largement en Europe et dans le monde (WRB, 2014). Les luvisols sont très largement mis en valeur par l'agriculture du fait de leur potentiel agronomique élevé mais leur pauvreté naturelle en matières organiques peut s'aggraver en l'absence de mesures de gestion appropriées. Les processus de formation de ces sols sous l'effet des facteurs « naturels » de formation des sols (climat, matériel parental, relief et temps) ont été abondamment étudiés depuis de longues années (voir par exemple Jamagne, 1978, 1973 pour des travaux précurseurs sur les luvisols du nord de la France). Leur sensibilité au mode d'occupation des sols et aux pratiques agricoles a ainsi été mise en évidence à plusieurs reprises sans

toutefois être quantifiée avec précision (Langohr, 2001; Thompson et al., 1990). Enfin, si le principal processus à l'origine de la formation des luvisols est le processus d'éluviation/illuviation (AFES, 2009), leur texture à dominante limoneuse liée aux couvertures loessiques à partir desquels ils se sont formés est particulièrement favorable à la présence des vers de terre (Peres, 2003). Afin de quantifier l'impact de la mise en culture et des apports de matières organiques exogènes sur l'intensité des processus d'éluviation/illuviation et de bioturbation d'une part et d'en déduire des informations sur la dynamique de ces processus d'autre part, nous avons quantifié l'abondance des traits pédologiques d'illuviation et de bioturbation dans trois LUVISOLS TYPIQUES constituant une anthropo-chrono-séquence, i.e. une séquence de sols se distinguant uniquement par les modes d'occupation ou les pratiques agricoles utilisées et dont il nous a été possible de dater avec plus ou moins de précision le dernier changement d'occupation des sols ou l'introduction des apports de matières organiques exogènes.

Ce travail repose finalement sur trois hypothèses centrales qui seront successivement testées après avoir présenté le secteur d'étude et notre stratégie d'échantillonnage (chapitre I). La première hypothèse suppose qu'il est possible de quantifier l'intensité des processus d'éluviation/illuviation et de bioturbation et leurs réponses à des forçages anthropiques à partir d'une approche micromorphologique basée sur la quantification de l'abondance surfacique des traits pédologiques spécifiques de ces processus (chapitre II). La deuxième suppose que les méthodes d'analyse d'images assistées par ordinateur sont des outils particulièrement efficaces pour identifier, quantifier et caractériser sur un grand nombre d'échantillons l'abondance et les propriétés morphologiques des traits diagnostics d'intérêt aux niveaux d'organisations de l'horizon (chapitre III) et du profil de sol (chapitre IV). Enfin, notre dernière hypothèse suppose que les processus d'éluviation/illuviation et de bioturbation réagissent rapidement et de manière significative à la mise en culture et à l'apport de matières organiques (chapitre V).

CHAPITRE I - SITE ET SOLS D'ETUDE: ECHANTILLONNAGE, METHODES D'ANALYSE ET DONNEES GENERALES



I. Présentation de la zone d'étude

I.1. Situation géographique

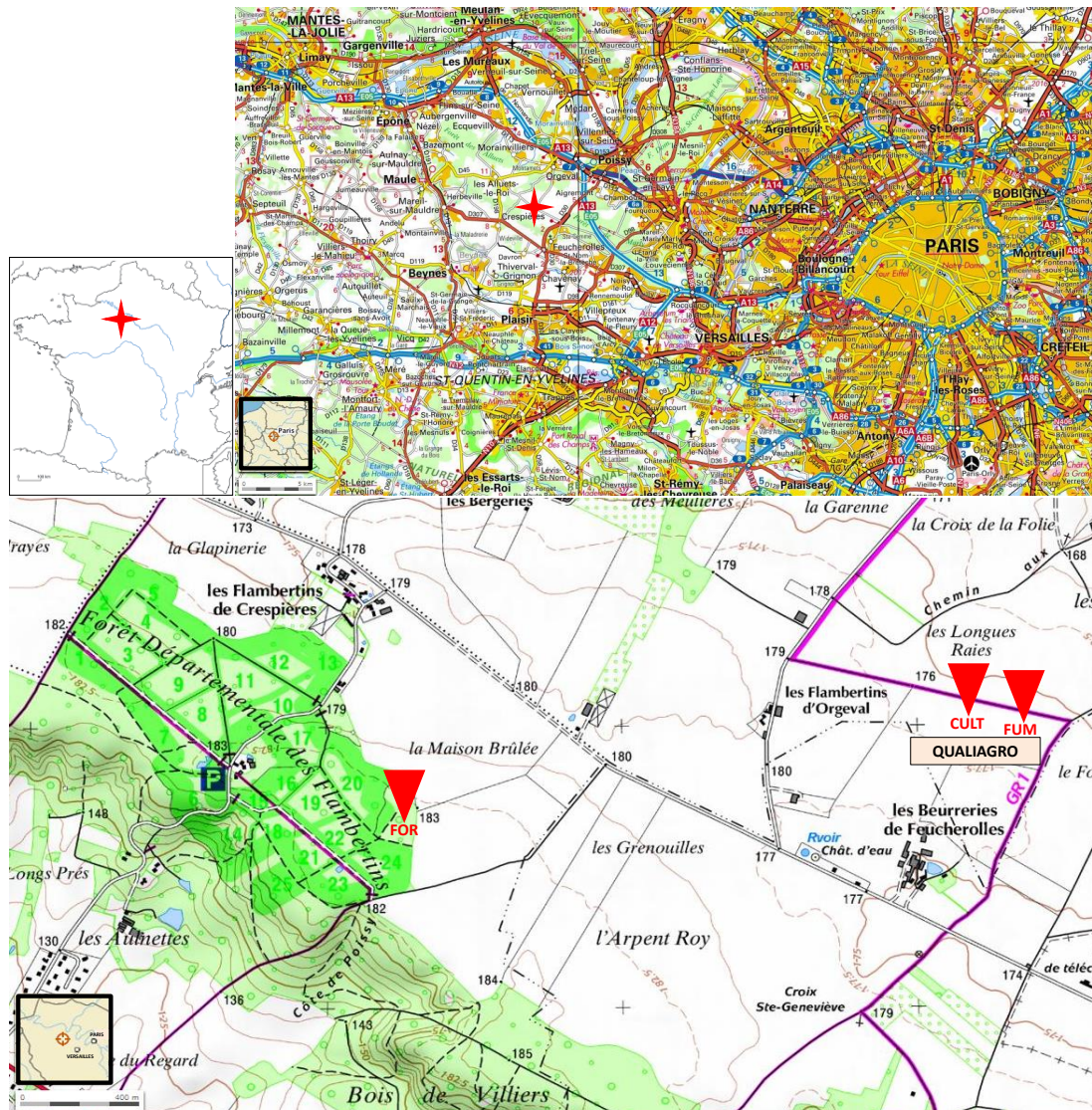


Figure I-1 : Localisation de la zone d'étude à l'échelle de la France, du bassin parisien et du plateau des Alluets (issu de Geoportail®).

Notre zone d'étude est située dans les Yvelines à 35 km à l'Ouest de Paris sur le plateau des Alluets entre les communes des Alluets-Le-Rois, d'Orgeval, de Feucherolles et de Crespières (Figure I-1). Il s'agit d'un plateau agricole bordé d'une couronne forestière s'étendant de la forêt domaniale de Marly à la forêt des Alluets en passant par la forêt départementale des Flambertins. Ce plateau domine la zone naturelle de la plaine de Versailles où coule le ru de Gally.

I.2. Contextes géologique et géomorphologique

Le plateau des Alluets correspond à une butte témoin du Tertiaire. Elle est constituée d'une couche de sables et grès de Fontainebleau (50-60 m) surmontée d'une couche d'argile à meulière de Montmorency (2-7,5 m), elle-même recouverte de limons carbonatés d'origine éolienne d'épaisseur inférieure à 2 m (Figure I-2). Les sols étudiés se développent dans ces loess typiques du bassin parisien. D'après Jagercikova et al. (2015), le dépôt de ces loess a débuté au cours du Pléistocène supérieur il y a 22–21 ka et s'est achevé il y a 15 ka. Cette configuration est classique de ce que l'on peut rencontrer sur les plateaux limoneux du bassin parisien et plus largement du nord de la France (Antoine et al., 2003). Une telle position de plateau nous permet de limiter l'influence des processus d'érosion.

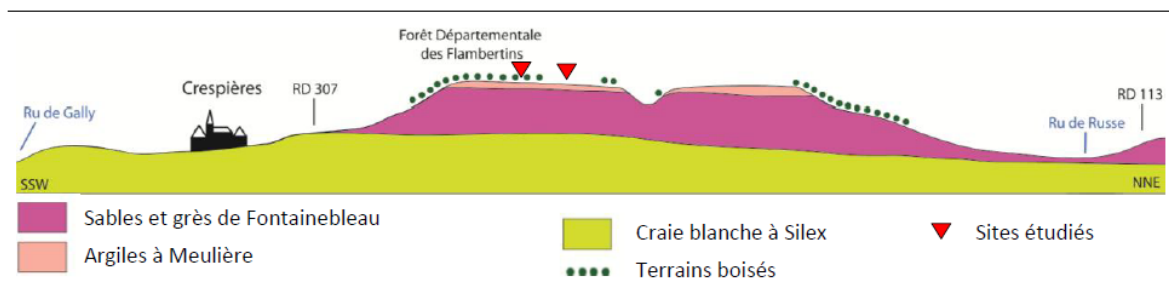


Figure I-2 : Schéma simplifié des contextes géologique et géomorphologique des sites étudiés (In Bajard, 2013).

I.3. Contexte pédoclimatique

Sous l'effet du climat océanique dégradé marqué par des précipitations et des températures moyennes annuelles de respectivement 582 mm et 11°C sur la période 1989-2009 (Mercier et al., 2010), les sols se développant dans cette couverture limoneuse sont typiques de la séquence évolutive décrite par Jamagne (1978, 1973). On y trouve ainsi des LUVISOLS TYPIQUES (Afes, 2009), des LUVISOLS DEGRADES ou des LUVISOLS REDOXISOLS en fonction de l'intensité des engorgements en eau (Nicole et al., 2003), des NEOLUVISOLS ou encore des BRUNISOLS plus ou moins acides selon le mode d'occupation. Ces sols sont représentatifs des sols de grandes cultures du Nord de la France (Jamagne, 2011).

I.4. Occupation actuelle et passée des sols

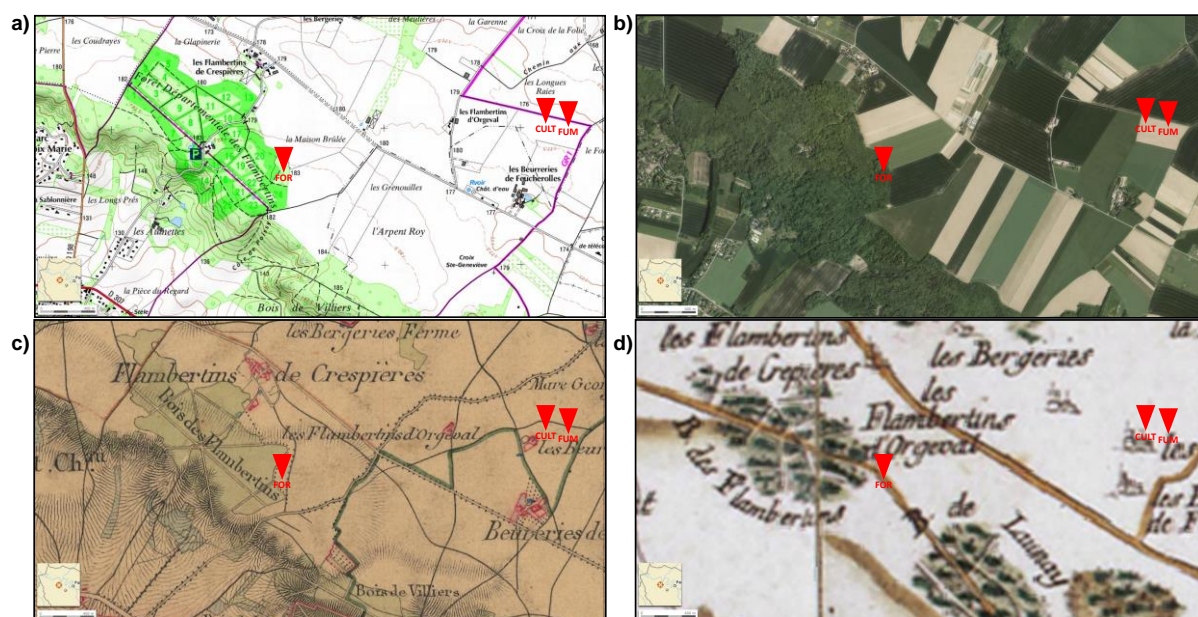


Figure I-3 : Occupation passée et actuelle des sites étudiés : a) occupation actuelle des sols (SCAN25 IGN, 2016) ; b) vue aérienne (IGN 2014) ; c) carte d'état-major (1820-1866) ; d) carte de Cassini (XVIII^{ème} siècle). Données issues de Geoportail®.

La Forêt Départementale des Flambertins, déjà implantée au XVIII^{ème} siècle d'après la carte de Cassini, est située en bordure du plateau des Alluets et s'étend sur 74 ha à une altitude d'environ 183 m (Figure I-1, Figure I-3). Cette forêt de feuillus a fait l'objet d'une exploitation de meulière de 1900 à 1930, activité très courante au sein des forêts du territoire. Les sols de cette forêt ont donc connu des perturbations liées à l'extraction des meulières et au nivellement des parcelles.

Sur ce même plateau et à une distance de 2 km de la forêt des Flambertins se trouve le dispositif expérimental de longue durée SOERE-PRO¹ QualiAgro situé sur la commune d'Orgeval à 177 m d'altitude (Figure I-1, Figure I-3). Le dispositif QualiAgro a été mis en place en 1998 à l'initiative de l'INRA de Grignon et de Veolia Environnement Recherche et Innovation. Il a pour objectif de caractériser la valeur agronomique de produits résiduels organiques et leurs impacts environnementaux. D'après la carte de Cassini de 1736, les parcelles de ce dispositif étaient déjà cultivées il y a 250 ans (Figure I-3). L'agriculteur propriétaire et exploitant les parcelles étudiées explique que du fumier de bovins/porcins a été régulièrement apporté au moins depuis le rachat de la ferme en 1941. A partir des années 1990, l'apport de matières organiques s'est fait sous la forme de fientes de poules

¹ Système d'Observation et d'Expérimentation, sur le long terme, pour la Recherche en Environnement sur les Epanchages de PROduits résiduels organiques

appliquées tous les quatre ans avant la culture du maïs et combinées à de la fertilisation minérale et de la chaux.

Le dispositif de 6 ha comprend 4 blocs de 10 parcelles (10 m x 45 m) (Figure I-4). Cinq traitements organiques sont étudiés : un compost d'ordures ménagères résiduelles (OMR), un compost de boue d'épuration (DVB), un compost de biodéchets (BIO), un fumier de bovins laitiers (FUM), aucun amendement organique (T). Les 5 traitements organiques sont croisés avec 2 niveaux de fertilisation azotée.

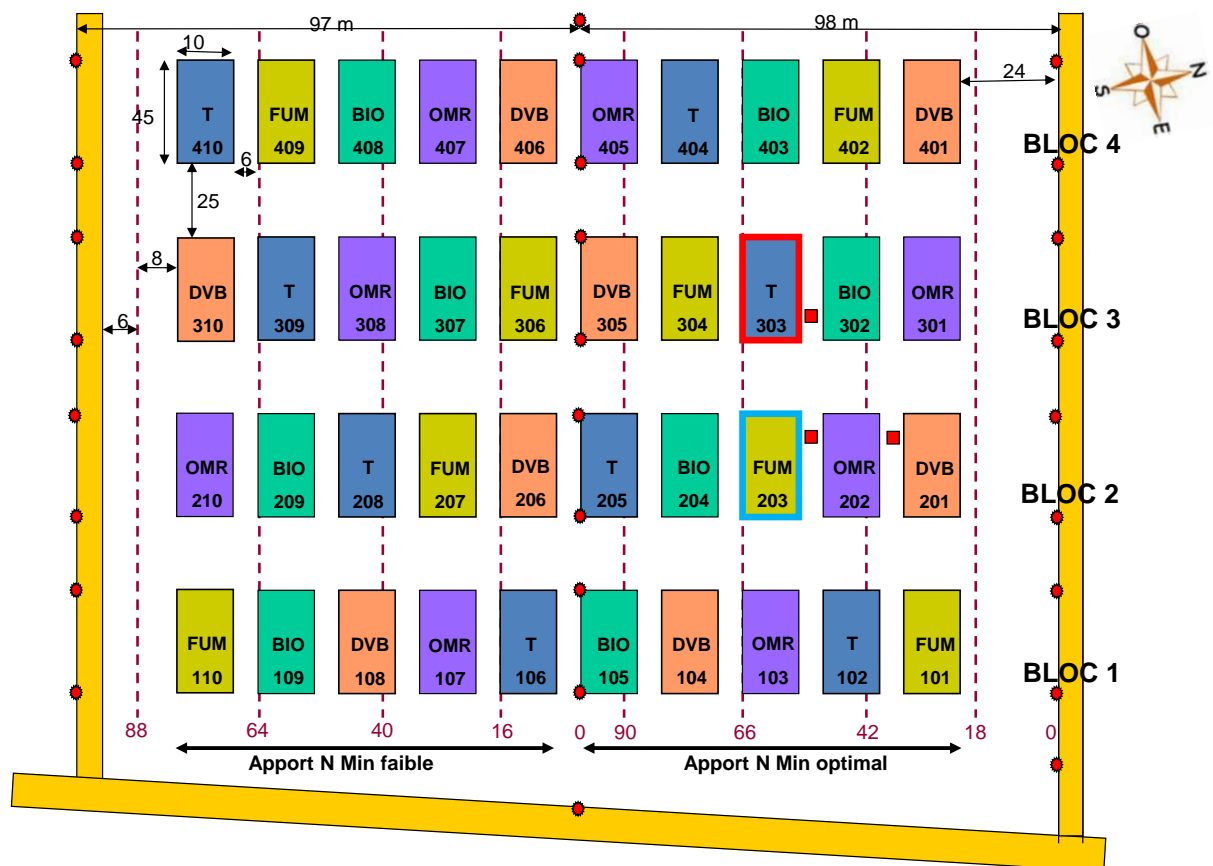


Figure I-4 : Plan du dispositif QualiAgro incluant 4 blocs de 10 parcelles ; la parcelle 303 correspond à notre modalité CULT et la parcelle 203 correspond à notre modalité FUM.

Le dispositif QualiAgro est cultivé selon une rotation blé-maïs depuis 1998 avec une interruption transitoire en 2007 (implantation d'orge en raison de l'interdiction du maïs suite à une alerte chrysomèle). Le sol est nu jusqu'au mois d'avril avant le semis du maïs qui est récolté en octobre. Le sol est ensuite labouré à 28 cm de profondeur et le blé est semé début novembre. Les résidus de blé sont exportés pour la paille alors que les résidus de maïs retournent au sol. Les amendements organiques sont apportés tous les deux ans depuis 1998 sur chaume de blé en fin d'été. La quantité apportée est de 4 tonnes de carbone organique par hectare et par épandage ce qui est deux fois supérieur à ce que l'on peut rencontrer classiquement en contexte de grandes cultures (Annabi et al., 2011). Deux jours après épandage, la parcelle est déchaumée ce qui permet un enfouissement des matières

organiques à 10 cm de profondeur. Une description plus détaillée des itinéraires techniques est consultable en Annexe I.

II. Construction d'une anthropo-chrono-séquence et échantillonnage des sols

II.1. *Echantillonnage en anthropo-chrono-séquence*

Pour répondre à notre objectif de caractérisation et de quantification des effets de la mise en culture d'une part et des apports organiques d'autre part, nous avons construit notre anthropo-chrono-séquence à partir de la sélection d'un sol sous forêt et de deux sols issus du dispositif QualiAgro : un sol cultivé sans apport de matières organiques et un sol avec apport régulier de fumier, amendement organique de référence.

Le sol sous forêt noté FOR se situe dans une parcelle actuellement sous occupation forestière située à la périphérie de la forêt départementale des Flambertins (Figures I.1 et I.3). Il s'agit d'un taillis sous futaie à chêne dominant dans lequel on rencontre également des charmes, des châtaigniers, des frênes et des merisiers. Située à l'interface entre la zone forestière et la zone cultivée, cette parcelle est susceptible d'avoir été cultivée par le passé (ONF/CG78, 2003). L'occupation forestière de cette parcelle date de 150 à 200 ans d'après la carte d'état-major et en tout état de cause d'au moins 100 ans d'après l'âge estimé des peuplements (Figure I-3).

Les deux autres sols constitutifs de la séquence étudiée (CULT et FUM) font partie du dispositif QualiAgro. Le sol cultivé de manière conventionnelle noté CULT correspond à la placette 303 du dispositif (modalité dite témoin) alors que le sol cultivé recevant des apports réguliers de fumier noté FUM correspond à la placette 203 (Figure I.4). Les parcelles CULT et FUM reçoivent une fertilisation azotée optimale mais aucune d'entre elles n'a été fertilisée ni en phosphore, ni en potassium depuis la mise en place du dispositif. Le fumier apporté présente un rapport C/N de 17,9, un pH (eau) de 9,2 et une teneur en CaCO_3 de 25 g.kg^{-1} (Mercier et al., 2010). Au démarrage du projet en 1998, les variations d'abondances des différentes classes granulométriques et notamment de la fraction $< 2 \mu\text{m}$ mesurées dans chacune des parcelles du dispositif n'excédaient pas 10% soulignant l'homogénéité des sols à l'échelle du dispositif (Montagne et al., 2010).

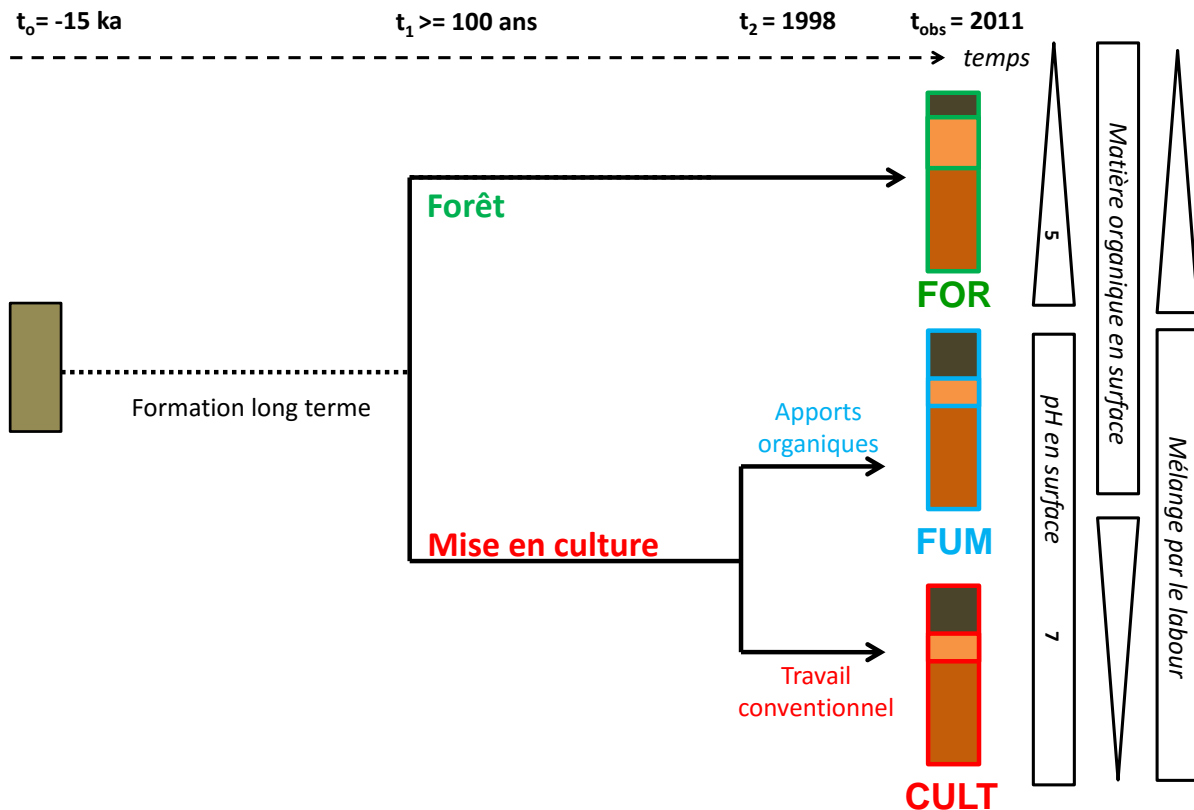


Figure I-5 : Construction d'une anthropo-chrono-séquence et impact sur l'horizonation et quelques propriétés des sols.

Depuis 100 à 200 ans, FOR et CULT n'ont pas connu de modification de leur mode d'occupation et la différenciation des pratiques agricoles entre les modalités FUM et CULT date de 1998. La comparaison du profil CULT par rapport au profil FOR, pris pour référence, permettra donc de quantifier l'impact d'un à deux siècles de mise en culture et la comparaison du profil FUM par rapport au profil CULT permettra de quantifier l'impact d'une dizaine d'années d'apports réguliers de matières organiques exogènes (Figure I-5).

II.2. Echantillonnage des sols

II.2a) Propriétés physico-chimiques

Les trois fosses ont été ouvertes en avril 2011, soit 13 ans après le démarrage de l'essai QualiAgro, dans le cadre de la campagne d'échantillonnage des sols du programme Agriped et de l'implantation de lysimètres pour ce qui concerne les deux modalités du dispositif QualiAgro. Les trois sols ont alors fait l'objet d'un échantillonnage continu en vrac. Le prélèvement sous forêt a été réalisé tous les 2 cm depuis la surface jusqu'à 20 cm, tous les 5 cm entre 20 cm et 65 cm de profondeur et enfin tous les 10 cm au-delà. Pour les deux sols cultivés, le prélèvement a été réalisé tous les 5 cm depuis la surface jusqu'à 75 cm puis

tous les 10 cm au-delà. La densité apparente de chacun des horizons a été mesurée dans chacun des horizons par la méthode du cylindre (500 cm³).

Les échantillons ont été confiés au laboratoire d'analyse des sols de l'INRA à Arras pour des mesures : i) de la granulométrie sans décarbonatation par tamisage pour les fractions sableuses et limoneuses et par la méthode de la pipette de Robinson pour la fraction < 2 µm conformément à la norme NF X 31-107, ii) des concentrations en carbone organique (NF ISO 10694) et en carbonates (NF ISO 10693), iii) du pH eau (NF ISO 10390), et iv) de la CEC et des cations échangeables par la méthode au chlorure de cobaltihexamine (NF X 31-130). Les données analytiques sont ensuite moyennées par horizon.

II.2b) Du bloc à structure conservée à la lame mince

L'échantillonnage des blocs de sol à structure conservée pour la réalisation des lames minces a été réalisé dans les trois fosses pédologiques à l'aide de boîtes de Kubiena (150 x 80 x 50 mm) à partir de 10 cm sous forêt et à partir de l'horizon E sous culture afin d'éviter les horizons directement perturbés par le labour. Le prélèvement est continu par épaisseur de 10 cm depuis l'horizon E jusqu'à 80 cm de profondeur puis il est discrétisé par horizon au-delà

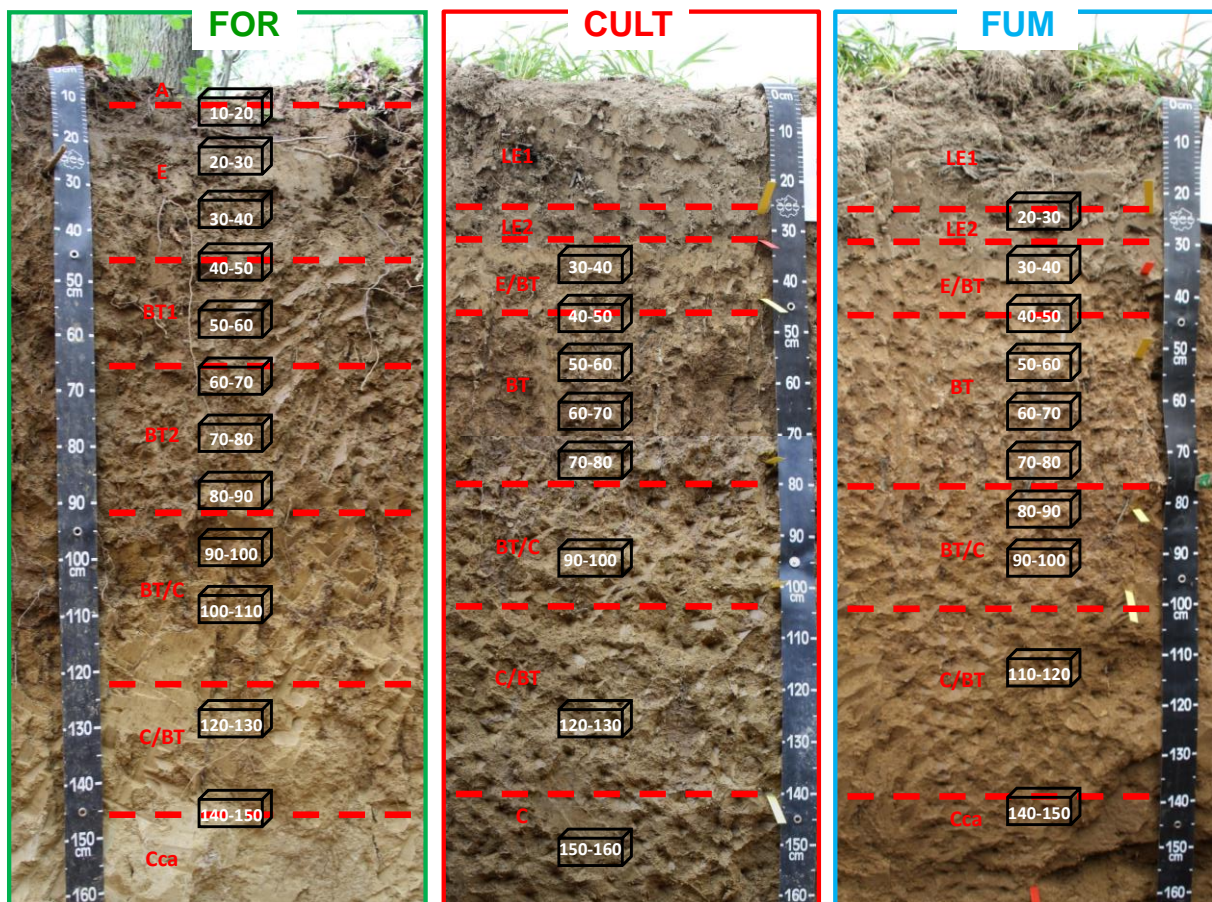


Figure I-6). Les trente blocs prélevés sont ensuite ramenés au laboratoire et séchés à l'air. Si nécessaire, cette phase de séchage à l'air est suivie d'un séchage à l'étuve à 40°C pendant deux jours juste avant leur imprégnation sous vide pendant 8 heures avec de la résine polyester. Les échantillons imprégnés sont ensuite placés à température ambiante et la résine polymérise alors lentement pendant au moins 4 semaines. Chacun des blocs est ensuite scié pour extraire au moins trois plaquettes séparées de plusieurs centimètres. Les lames minces sont ensuite fabriquées selon la méthode de Guilloire (1985). Les 90 lames fabriquées et analysées dans cette thèse mesurent 14 cm de largeur et 6 cm de hauteur pour une épaisseur d'environ 25 µm.

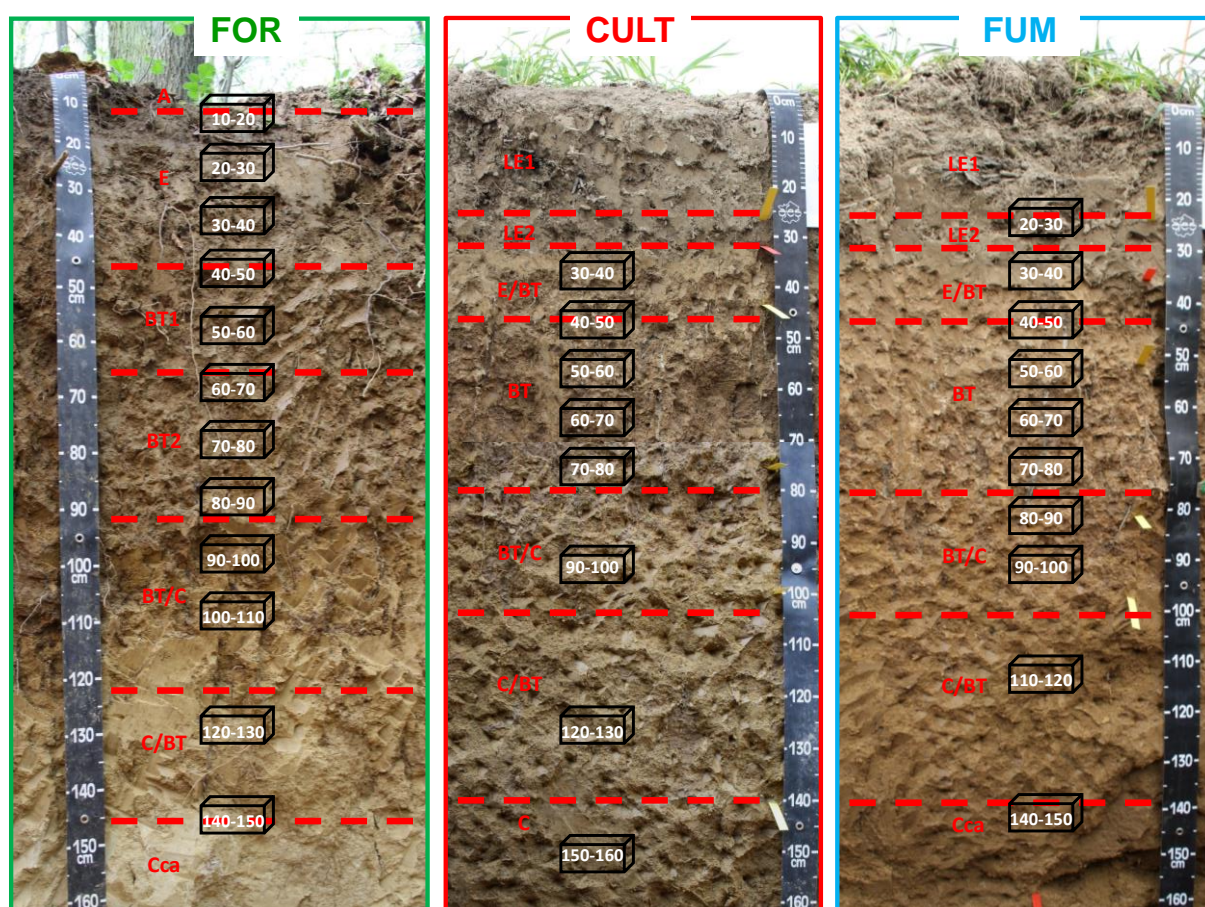


Figure I-6 : Horizonation et localisation des prélèvements de bloc à structure conservée dans les trois profils de sol étudiés.

Les vides, la microstructure, la masse basale et les traits pédologiques des lames de sol ont été décrites à partir d'observations au microscope optique polarisant (Eclipse50iPol, Nikon) en utilisant la terminologie classique de micromorphologie des sols : Bullock et al. (1985), Fedoroff and Courty (1994), Stoops and Vepraskas (2003).

Différents types de vides ont été distingués en fonction notamment de leur origine supposée. Les vides peuvent en effet être d'origine biologique (chenaux de vers de terre ou

de racines, chambres et vides modifiés par la mésofaune), ou bien encore d'origine physique comme les fentes qui se caractérisent par une longueur largement supérieure à l'ouverture. Les pores d'assemblage et les cavités peuvent être d'origine biologique et/ou physique puisqu'ils résultent de l'entassement ou de l'effondrement de grains ou d'agréats (Sauzet, 2012).

La microstructure correspond à l'agencement des vides et des agrégats ; sa description prend en compte les caractéristiques de forme et de taille de la porosité. La microstructure est dite massive lorsque la masse basale est continue. Elle peut être spongieuse quand la continuité de la phase solide est interrompue par de nombreux vides souvent interconnectés ou canaliculaire lorsque les vides présents sont en majorité de type chenaux (passage de racine ou de la faune du sol).

La masse basale comprend une fraction fine et une fraction grossière :

- la masse fine (ou matrice) est constituée de particules peu différenciées de la taille des limons et des argiles granulométriques. Elle se caractérise par un degré de limpidité ou d'empoussièrément variable et par un assemblage de biréfringence que l'on détermine en Lumière Polarisée Analyisée (LPA) permettant de déterminer la présence et l'organisation des argiles au sein de la matrice ;
- les éléments grossiers peuvent être organiques (résidus végétaux par exemple), inorganiques mais d'origine biologique (tels que les phytolites), minéraux (cristaux de quartz), ou bien encore anthropiques (matériaux manufacturés tels que la céramique). La distribution relative entre la masse fine et les constituants grossiers donne des indications sur les circulations hydriques. Ainsi, dans notre étude, cette distribution est généralement de type porphyrique c'est-à-dire que les éléments grossiers sont insérés dans la matrice (Sauzet, 2012).

La caractérisation des traits texturaux tels que les revêtements argileux est basée sur leur composition (analyse des proportions d'argile limpide, poussiéreuse ou impure, de limons, de sables), leur couleur (appréciation en lumière naturelle et en corrélation avec la teneur en fer et en matières organiques), leur litage (alternance de fines couches d'épaisseurs inférieures à 30 μm pour le microlitage par exemple), ou encore l'assemblage de biréfringence (appréciation en LPA de l'intensité de la biréfringence et de l'allure de l'extinction) (Fedoroff and Courty, 1994). Les traits texturaux sont également classés en fonction de leur position par rapport aux vides. Ainsi, les revêtements sont localisés sur les parois des vides. Ils sont appelés remplissages lorsqu'au moins 90% du vide concerné est rempli (Bullock et al., 1985). Le trait textural peut également prendre la forme d'une intercalation, unité de forme allongée, dispersée dans la masse basale. Enfin, les traits texturaux peuvent avoir fait l'objet d'une fragmentation par l'activité biologique notamment et sont alors appelés papules (Brewer, 1964).

Les traits biologiques (ou excrémentaux) associés à l'activité de la faune du sol peuvent correspondre à :

- des boulettes fécales, dont les caractéristiques de forme, de taille, de composition, de surface et d'organisation interne notamment permettent de déterminer le type de faune les ayant excrétées lorsque leur altération n'est pas trop prononcée ;
- des remplissages liés à l'activité de la faune du sol, encore appelés « pédotubules » (Brewer, 1964). Ils correspondent à des matériaux qui ont été ingérés par un organisme et par la suite excrétés pour prendre la forme d'agrégats biogéniques (Pulleman et al., 2005). Ils sont constitués de matériaux très variables selon la faune qui en est responsable (boulettes fécales individualisées, matériaux de surface, résidus végétaux, etc.) ;
- des intercalations organiques, correspondant à l'incorporation progressive des boulettes fécales au sein de la matrice (Thompson et al., 1990), elles peuvent être simples ou prendre des formes plus spécifiques (nids d'abeille).

II.2c) Echantillonnage des communautés de vers de terre

Dans le cadre du projet BioPRO consacré à l'évaluation de l'effet des apports répétés de matières organiques exogènes de différentes qualités sur les communautés de lombriciens et d'enchytréides, un échantillonnage des communautés de lombriciens a été réalisé sur les modalités FUM et CULT en avril 2014. Nous avons ajouté à cette campagne un échantillonnage du site sous forêt afin de disposer d'une caractérisation des communautés dans nos trois modalités.

Les lombriciens ont été échantillonnés dans trois placettes de 40 cm de côté par parcelle à l'aide d'une méthode mixte combinant deux applications d'AITC (allyl isothiocyanate) suivies d'un tri manuel sur 20 cm de profondeur (Carrayrou, 2014; Ricci et al., 2015).

III. Données de base

III.1. Description macromorphologique et micromorphologique des sols

Les sols étudiés présentent une horization classique de LUVISOLS TYPIQUES (AFES, 2009) à savoir: A/E/BT/C sous forêt et LE/E/BT/C sous cultures (Figure I.6). Le profil sous forêt présente plusieurs différences macromorphologiques par rapport aux deux profils cultivés alors que les profils CULT et FUM présentent des caractéristiques macromorphologiques similaires.

Le profil sous forêt présente un horizon A bien individualisable de l'horizon éluvié E sous-jacent. Cet horizon A est recouvert d'une litière de type mull. Le travail du sol a, en

effet, profondément modifié l'horizonation de surface des sols cultivés avec un horizon labouré LE1 de 0 à 25 cm à structure polyédrique sub-anguleuse au-dessus d'un horizon anciennement labouré LE2 correspondant aujourd'hui à une semelle de labour (de 25 à 31 cm). Trois sous-ensembles ont par ailleurs été identifiés dans l'horizon BT sous forêt. L'horizon BT1 présente une structure polyédrique subanguleuse alors que les deux autres horizons illuviaux sous-jacents (BT2 et BT/C) ont une structure prismatique décimétrique de plus en plus grossière. Par ailleurs, l'horizon BT/C présente une texture argilo-limoneuse alors que BT1 et BT2 sont limono-argileux (Tableau I-1). Les horizons BT et BT/C sous cultures présentent une structure prismatique (6 x 4 cm environ) et une texture limono-argileuse à argilo-limoneuse (Tableau I-1). Ces horizons BT reposent sur un horizon Cca à structure continue sans racines ni galeries visibles à l'oeil nu mais présentant de nombreuses reprécipitations carbonatées. Cet horizon apparaît à partir de 140 cm, 145 cm et 160 cm respectivement dans les profils FUM, FOR et CULT. L'argile à meulière cryoturbée est atteinte à 165 cm dans le cas de FUM et FOR et à 185 cm dans le cas de CULT. Au sein des horizons BT des trois profils, des traits d'oxydo-réduction sont visibles. Ils paraissent plus abondants sous cultures (horizons BT rédoxiques) que sous forêt, le sol sous forêt étant par ailleurs beaucoup plus sec au moment de l'ouverture des fosses que les sols cultivés. Les revêtements argileux sont observés sur le terrain depuis la base de l'horizon E jusqu'à la base de l'horizon C/BT. La profondeur d'enracinement atteint 160 cm sous forêt contre 100 cm sous cultures.

Dans les trois profils, les horizons E et les horizons BT présentent des microstructures complexes alors que dès les horizons C/BT à 120 cm de profondeur, une microstructure canaliculaire et lamellaire avec des cavités isolées témoignant d'une cryoturbation passée est observée. Les revêtements argileux présentent des formes, des tailles et des textures variées avec i) dans le E, des traits texturaux grossiers et épais de type agricutanes (Kühn et al., 2010), ii) dans le BT supérieur, des revêtements argileux complexes souvent fragmentés, iii) dans le BT inférieur, des revêtements argileux complexes ainsi que des remplissages d'argile illuviale limpide, et iv) dans le C, des revêtements argileux complexes polyphasiques. Plusieurs types de papules peuvent être différenciées: i) des papules issues d'une fragmentation en local (enchytréides), ii) des papules « fraîches » dans les remplissages biologiques encore individualisables en coupe transversale, iii) des papules incorporées dans la matrice. Les traces de fouissage (remplissages en piles d'assiette) et les intercalations organiques sont fréquentes dans les horizons BT des trois profils étudiés. Des boulettes fécales d'enchytréides sont présentes dans les trois profils, et ce jusque dans l'horizon C. Elles semblent malgré tout plus abondantes dans le profil sous forêt. Pour plus de détails, le lecteur pourra consulter les résultats du travail d'analyse micromorphologique mené en 2012 sur les mêmes sols (Sauzet, 2012).

III.2. Synthèse des caractéristiques analytiques des profils étudiés

Les concentrations en fraction $< 2 \mu\text{m}$ des trois profils sont caractéristiques du processus d'éluviation/illuviation marqué par un enrichissement en fraction fine entre 50 et 130 cm de profondeur environ (Tableau I-1). Les profils cultivés présentent des horizons de surface légèrement plus pauvres en fraction $< 2 \mu\text{m}$ que le profil sous forêt. Le pic de concentration en fraction $< 2 \mu\text{m}$ est plus profond dans le profil sous forêt (entre 105 et 115 cm de profondeur) que dans les profils cultivés (entre 75 et 85 cm pour CULT et FUM). Il n'y a aucune différence notable entre les profils FUM et CULT.

L'évolution du ratio limons grossiers sur limons fins (L_g/L_f) avec la profondeur permet d'identifier trois dépôts successifs de loess avec i) un ratio de 1,4 à 1,7 depuis la surface jusqu'à l'horizon BT soit entre 45 et 90 cm de profondeur environ, ii) un ratio supérieur à 2 pour les 20 à 40 cm suivants, et iii) un ratio autour de 1,9 au-delà de 140 cm de profondeur.

Le pH sous forêt est compris entre 5 et 6,5 pour l'ensemble des horizons à l'exception de l'horizon Cca présentant un pH de 8,6 caractéristique des matériaux carbonatés. Les profils cultivés présentent des pH plus élevés toujours supérieurs à 6,5. L'absence de chaulage depuis 1998 sur le dispositif QualiAgro et l'apport de fumier présentant un pH moyen de 9,2 sont à l'origine d'un pH plus élevé dans FUM que dans CULT (Tableau I-1).

Par ailleurs, alors que les concentrations en carbone organique sont très élevées sous forêt dans les horizons de surface (31 g.kg^{-1} dans l'horizon A) puis décroissent très rapidement avec la profondeur, le travail du sol a conduit à une homogénéisation de ces mêmes concentrations sur les 30 premiers cm du sol cultivé avec une concentration plus élevée sous FUM (14 g.kg^{-1}) que sous CULT (9 g.kg^{-1}) (Annabi et al., 2011; Peltre et al., 2012). Pour des profondeurs supérieures à 40 cm, les concentrations en carbone organique sont identiques dans les trois profils (Tableau I-1).

La densité apparente la plus faible est rencontrée dans l'horizon de surface (0-10 cm) sous forêt avec $0,99 \text{ g.cm}^{-3}$ alors que les horizons labourés présentent une densité de $1,35 \text{ g.cm}^{-3}$. De 40 à 140 cm de profondeur, la densité reste au dessus de $1,5 \text{ g.cm}^{-3}$ pour les trois profils. Le loess carbonaté a pour sa part une densité de $1,65 \text{ g.cm}^{-3}$ environ.

Horizon	Profondeur (cm)	Granulométrie (g.kg ⁻¹)						Da (g.cm ⁻³)	pH	CaCO ₃ (g.kg ⁻¹)	Carbone organique (g.kg ⁻¹)	CEC (cmol+/kg)	Taux de saturation %
		A < 2 µm	Lf 2-20 µm	Lg 20-50 µm	Sf 50-200 µm	Sg 200-2000 µm	Lg/Lf						
FOR													
A	0 – 10	176	284	463	64	13	1.63	0.99	5.6	-	30.5	11,4	96
E	10 – 40	167	288	463	66	17	1.61	1.36	5.1	-	10.9	6,7	92
BT1	40 – 65	216	284	428	56	16	1.51	1.51	5.6	-	3.6	8,3	96
BT2	65 – 90	250	278	396	58	18	1.42	1.56	5.9	-	2.3	10,5	98
BT/C	90 – 120	320	208	441	28	4	2.12	1.51	6.2	-	1.9	17,1	101
C/BT	120 – 145	240	222	510	27	1	2.30	1.50	6.6	-	1.7	13,9	100
Cca	> 145	137	240	457	19	2	1.90	1.49	8.6	143	0.9	11,3	115
CULT													
LE1	0 – 25	142	296	495	54	13	1.67	1.34	6.6	-	9.4	7,7	103
LE2	25 – 31	144	300	483	61	13	1.61	1.34	6.6	-	9.5	7,9	105
E/BT	31 – 45	202	297	437	45	18	1.47	1.49	6.9	-	4.3	8,3	102
BT	45 – 80	288	271	389	39	13	1.44	1.55	7.3	-	2.8	13,0	101
BT/C	80 – 100	314	203	460	21	2	2.27	1.53	7.5	-	2.3	18,7	99
C/BT	100 – 140	245	243	480	29	2	1.98	1.51	7.6	-	1.4	14,5	100
C	> 140	190	266	525	17	1	1.97	1.54	7.7	-	1.3	14,2	100
FUM													
LE1	0 – 25	144	296	489	55	16	1,65	1.35	7,3	-	14,0	9,7	104
LE2	25 – 31	143	292	492	58	15	1,69	1.35	7,4	-	11,7	8,8	109
E/BT	31 – 45	180	294	461	50	16	1,57	1.58	7,4	-	5,6	8,8	104
BT	45 – 80	293	235	425	34	12	2,03	1.59	7,6	-	2,5	15,6	100
BT/C	80 – 100	309	201	469	20	3	2,34	1.51	7,6	-	1,8	15,1	101
C/BT	100 – 140	240	254	479	24	3	1,89	1.49	7,5	-	1,7	14,1	101
Cca	> 140	194	255	343	44	21	1,35	1.65	8,5	140	0,9	14,0	119

Tableau I-1 : Données analytiques synthétisées par horizon pour les trois profils étudiés ; Da, densité apparente.

III.3. Caractérisation des communautés lombriciennes

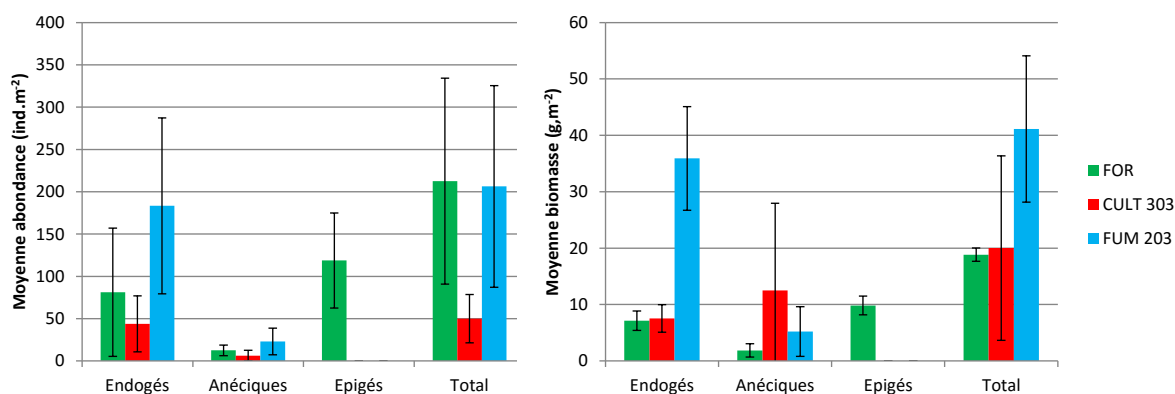


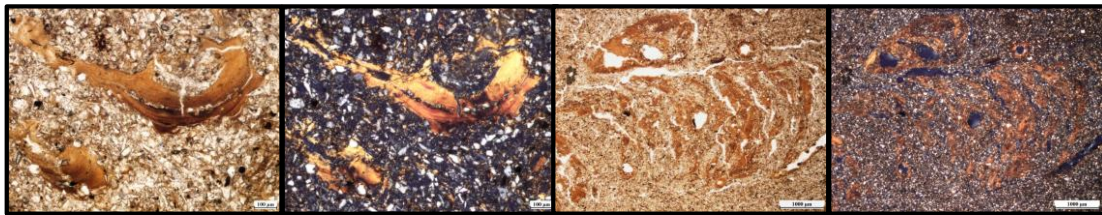
Figure I-7 : Caractéristiques des communautés lombriciennes des trois modalités étudiées (avril 2014).

Sous forêt, deux espèces d'anéciques stricts têtes noires (*A.longa* et *A.giardi*) deux espèces endogées (*A. caliginosa* et *A. antipais*) et une espèce épigée (*L.castaneus*) ont été inventoriées. *L.castaneus* représente plus de 50% de l'abondance et de la biomasse totale lombricienne sous forêt (Figure I-7). L'autre moitié est très largement dominée par les vers endogés (Figure I-7). La richesse spécifique diminue avec la mise en culture des sols puisque 3 espèces seulement ont été inventoriées dans les sols cultivés : deux espèces endogés (*Aporrectodea caliginosa* et *Allolobophora rosea*) et une espèce anécique (*Lumbricus terrestris*). Seule l'espèce endogée *A. caliginosa* est commune aux trois modalités étudiées. Il s'agit par ailleurs de l'espèce dominante parmi les endogés.

La mise en culture sans apport de matières organiques exogènes se traduit par une diminution par 4 du nombre de vers de terre, en grande partie lié à la disparition des vers épigés. En termes de biomasse, cette disparition des vers épigés est compensée par une augmentation de la biomasse des vers anéciques. Les vers anéciques représentent alors la majeure partie de la biomasse (Figure I-7).

Les apports de fumier sont particulièrement favorables aux vers endogés et secondairement aux vers anéciques dont le nombre et la biomasse augmentent par rapport au sol forestier (Figure I-7). Le profil FUM se caractérise par une biomasse et une abondance lombricienne totale et une abondance de vers endogés plus élevées que dans le profil CULT ce qui est en accord avec Capowiez et al. (2009) ou encore Peres et al. (2009). A l'inverse, les apports répétés de fumier s'accompagnent d'une diminution de la biomasse des vers anéciques malgré une augmentation de leur nombre (Figure I-7).

**CHAPITRE II - QUANTIFICATION PAR APPROCHE
MICROMORPHOLOGIQUE DE L'INTENSITE DU PROCESSUS
D'ILLUVIATION : ETUDE DE FAISABILITE**



Préambule:

Comme indiqué en introduction générale, ce second chapitre est consacré au test de l'hypothèse selon laquelle les variations d'intensité des processus d'illuviation et de bioturbation en réponse à un changement du mode d'occupation des sols ou des pratiques agricoles peuvent être quantifiées à partir d'une quantification par approche micromorphologique des variations d'abondance des traits pédologiques diagnostics de ces processus. Or, si la description des traits pédologiques diagnostics a depuis très longtemps été utilisée pour identifier et caractériser dans des horizons particuliers les processus pédologiques impliqués dans la genèse d'un sol donné (Walkington, 2010), rares sont les travaux ayant quantifié de manière systématique les variations d'abondance des traits pédologiques et tout particulièrement du processus d'illuviation, en fonction de la profondeur (Miedema and Slager, 1972) et moins encore en fonction du mode d'occupation des sols (Thompson et al., 1990). A l'inverse, la porosité, un des traits diagnostics du processus de bioturbation, a fait l'objet de très nombreux travaux de micromorphologie quantitative dans une perspective de compréhension du fonctionnement hydrique des sols (Lamandé et al., 2003). Cette étude de faisabilité et de sensibilité de la micromorphologie quantitative pour la pédogenèse portera donc sur la quantification des traits d'illuviation dans les deux modalités supposées les plus différenciées à savoir les modalités FOR et CULT. Les traits illuviaux seront quantifiés par comptage au point : méthode classique et présentant le meilleur rapport précision sur rapidité de la mesure tant que le nombre d'échantillons à analyser reste limité. En effet, si les approches par comparaison à des chartes d'abondance sont encore plus rapides, leurs précision est limitée par une trop grande subjectivité des mesures (Zhang et al., 2014). La quantification de l'intensité du processus d'illuviation par approche micromorphologique a finalement été comparée à une quantification classique par indicateurs granulométriques afin d'en évaluer la précision.

Cette première partie du travail de thèse a fait l'objet d'un article intitulé « Illuviation intensity and land-use change : Quantification via micromorphological analysis » publié dans Geoderma, 266 : 46-57, 2016.

Illuviation intensity and land-use change: Quantification via micromorphological analysis

Sauzet O., Cammas C., Barbillon P., Etienne M-P., Montagne D.

Abstract

Among soil processes governing the clay size fraction distribution with depth, illuviation is not only widespread but also particularly poorly understood. Using a micromorphological approach, this study aims at i) quantifying the intensity of illuviation independently of all other competing soil processes, ii) testing the sensitivity of illuviation to different land uses, and iii) assessing the relative contribution of illuviation to the genesis of textural differentiation. Two Luvisols developed from loess in Northern France were selected: the first under a deciduous forest and the second under conventional agricultural management, both with no change in land use for at least 100 years. In addition to classical mass balance calculations, clay illuviation features such as limpid and dusty clay coatings were used as diagnostic features of the illuviation process and were quantified by a point-counting approach in large thin sections. In the two Luvisols under study illuviation was found to be responsible for 75% and 86% of the textural contrast, respectively in the cultivated soil and the forested one. Illuviation was thus by far the dominant factor causing textural differentiation, even if accessory processes involving the clay size fraction were also at play such as lithological discontinuity, clay neoformation or biological and physical reworking. The recognition of dusty clay coatings considered as an indicator of cultivation in the soil under forest underlines the sensitivity of illuviation to past periods of cultivation and the legacy of anthropedogenesis on the present soil properties. A qualitative change in the nature of the translocated particles without significant changes in the intensity of illuviation was identified in the soil under cultivation. These results support the conclusion that illuviation is an active process in soils under present climatic conditions and must no more be considered as a fossil soil process.

I. Introduction

Humanity has strongly influenced soil evolution since the beginning of the Anthropocene Era through cultivation or urbanization manipulation purposes and is now considered as a primary geomorphologic agent (Lin, 2011; Richter, 2007). In order to predict the effects of land use on soil function and finally prevent soil degradation, land managers and policy makers need information about soil change and the associated natural or anthropic-driving factors (Tugel et al., 2005). Dynamic soil processes with short characteristic times (years to decades) are used to be more investigated than processes involved in soil formation and supposed to evolve over larger time scales (centuries to millennia) (Minasny et

al., 2008; Targulian and Krasilnikov, 2007). Soil was indeed classically considered as a slowly changing natural system and its formation is seen as a very slow process, with mature soil ages averaging between 10^4 to 10^5 years (Wilkinson and Humphreys, 2005). Nevertheless, various authors have documented significant changes of soil formation processes dynamics on time scales as short as a few decades, and they have argued that soils are evolving permanently (Chadwick and Chorover, 2001; Cornu et al., 2012b; Montagne et al., 2008).

Illuviation is one of the earliest recognized soil-forming process (Bockheim et al., 2005) and is involved in the genesis of many soil types under many climate types. It consists of a substantial vertical translocation of fine particles up to $10\ \mu\text{m}$ in size (Quénard et al., 2011) and results in the formation of an eluviated subsurface horizon called E-horizon and, an illuviated one underneath due to the accumulation of the fine fraction and also called Bt-horizon (WRB, 2014). This process is mainly responsible for the formation of Luvisols that extend over 500-600 million ha worldwide according to WRB (2014). Some authors consider illuviation as a fossil process (Slager and van de Wetering, 1977; Van Vliet-Lanoë, 1990) whereas others have documented significant changes of illuviation intensity as a result of anthropic driving-forces (Cornu et al., 2012b; Kozlovskii et al., 2001; Montagne et al., 2008). Despite considerable past research and because of a lack of accurate quantitative data about illuviation, two main issues are still particularly controversial: the present relevance of the illuviation process and its sensitivity to land use management.

Illuviation is manifested through a typical granulometric clay distribution along soil profiles due to the textural differentiation between the eluviated and the illuviated horizons, and the observations at a macromorphological or micromorphological scale of clay coatings in the Bt-horizons. Illuviation intensity is generally measured through a textural differentiation index between the eluvial and illuvial horizons. Unfortunately, data related to this differentiation are difficult to interpret unambiguously, because it can be caused by several different processes such as in-situ weathering, bioturbation, and microdivision (Phillips, 2004).

An alternative to the use of multi-processes textural differentiation indexes may be the quantification of diagnostic soil features specifically associated with the illuviation process, i.e., clay coatings. Such a morphological approach is acknowledged to have succeeded in quantifying the intensity of the genesis of albic materials in soils (Montagne et al., 2013). Using a micromorphological approach makes it possible to distinguish features that are due to illuviation process among others (Kemp, 1998). Clay coatings are indeed considered to have illuvial origin, depending on specific indicators such as the degree of clay particle orientation, internal laminations, and the sharpness of boundaries with the surrounding groundmass (McCarthy et al., 1999; Ufnar, 2007). Furthermore, describing textural

pedofeatures at a microscopic scale helps to understand their genesis and associated pedoclimatic context of formation. For example microlaminated limpid clay coatings are associated with typic clay illuviation i.e., under permanent vegetation cover (Fedoroff, 1997) whereas layered dusty or impure clay coatings are associated with heavy rain showers and drastic conditions and are generally met under cultivation (Fedoroff and Courty, 1994; Jongmans et al., 2001; Kühn et al., 2010). At this stage, a detailed comparison of the classical granulometric quantitative approach with the micromorphological one has yet to be carried out.

In this context, the aim of the present research is to carry out the micromorphological description and quantification of clay coatings in soil thin sections from a forested and a cultivated Luvisol. The key objectives of the research are to provide a proxy for the intensity of the illuviation process independently of other competing soil processes, to test the sensitivity of illuviation intensity to different land uses, and, to quantify the relative contribution of illuviation to the genesis of soil textural differentiation through a comparison to classical multi-processes granulometric calculations. Our working hypothesis is that this feature-based approach can provide a more accurate quantification of illuviation intensity than do classical granulometric measurements in soils facing different anthropic-driving forces.

II. Materials and Methods

II.1. *Study area*

In our investigation, we studied two Luvisols (WRB, 2014; Table 1) of approximately 1.5 m depth, which have developed in decarbonated quaternary loess deposits. As discussed in Jagercikova et al. (2015), three successive loess deposits may be distinguished. The first one is observed from the surface horizon to the Bt-horizon and shows a coarse to fine silt ratio ranging from 1.4 to 1.7. The second deposit is characterized by a coarse to fine silt ratio higher than 2, whereas the third one has a ratio around 1.9 (Table 2). The third deposit was dated at $\sim 22\text{ka }^{14}\text{C BP}$ and the two upper deposits correspond to the youngest loess unit of 15 to 16 kyr. One Luvisol is under conventional agricultural management (CULT) and is part of the so-called QualiAgro long-term soil experiment located on the Plateau des Alluets (Feucherolles, Yvelines, France). Since 1998, the CULT soil is ploughed once every year in October or November to a depth of 28 cm. It used to be limed regularly in order to keep a pH of 7 approximately in soil surface. The other plot (FOR), considered as a reference, was sampled in the Flambertins Forest, Yvelines, France. This deciduous forest with oaks and hornbeams is actually the only one i) extending on the Plateau des Alluets and consequently on Luvisols and, ii) sufficiently close to the QualiAgro

long-term experiment (less than five hundred meters away) to ensure that both Luvisols have developed on a similar parent material.

Historical records indicate that the cultivated plot experienced no change in land use for at least the past two centuries. However, the forest may not be so old as initially thought, and the FOR plot may have been cultivated before being reforested at least 100 years ago (IGN/EHESS, 2015). Both soils present the typical horizons of Luvisols according to WRB (2014): A or Ap E Bt C (Fig.1). Both sites are relatively flat (<1% slope) and under similar climatic conditions, with a mean annual precipitation of 582 mm and a mean annual temperature of 11°C (Mercier et al., 2011).

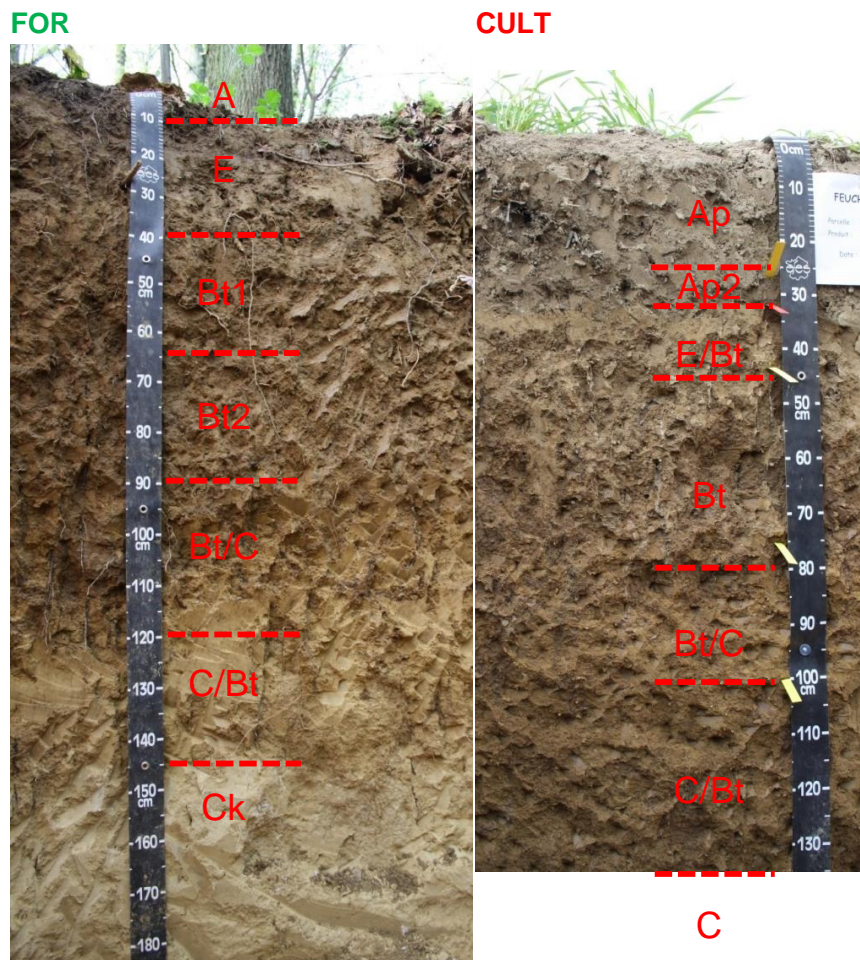


Figure II-1 : Photographs of the Luvisols under study.

II.2. Sampling procedures and associated measurements

In April 2011, soil pits, to a depth of 2 m, were dug in both sites. Bulk soil samples obtained in each soil horizon were oven-dried at 40°C before being sieved to 2 mm. Particle size analysis of soil was performed by sieving and Robinson's pipette methods following the AFNORX31-107 methodology after removal of organic compounds with H₂O₂ and dispersion

with Na-hexametaphosphate. pH was measured in a soil:water suspension of v:v ratio 1:5 (ISO 10390). Organic carbon content was quantified after dry combustion according to the NF ISO 10694. Soil bulk densities were determined in triplicate using the cylinder method (500 cm^3) for each soil horizon.

After manual sorting of clay coatings found in FOR Bt-horizon (63-73 cm), their mean bulk density was determined by the kerosene method (Monnier et al., 1973) using 21 replicates. Aggregates that have been manually sorted for bulk density determination had a granulometric clay content of 311 g.kg^{-1} , whereas the corresponding horizon had a clay content of 217 g.kg^{-1} . This clay size fraction enrichment confirmed the fact that these aggregates were actually clay coatings.

Kubiena boxes of $150 \times 80 \times 50 \text{ mm}$ were used to extract undisturbed soil samples. After each eluviated horizon was sampled, soil samples were taken at regular 10-20 cm intervals in the Bt-horizons in which clay coatings were supposed to be abundant (Fig.2). Then we collected one box for each Bt/C horizon and C/Bt horizon, respectively, because clay coatings were hypothesized to be less abundant in these horizons. In the case of CULT, we extracted a supplementary box from the C-horizon at 1.5 m depth.

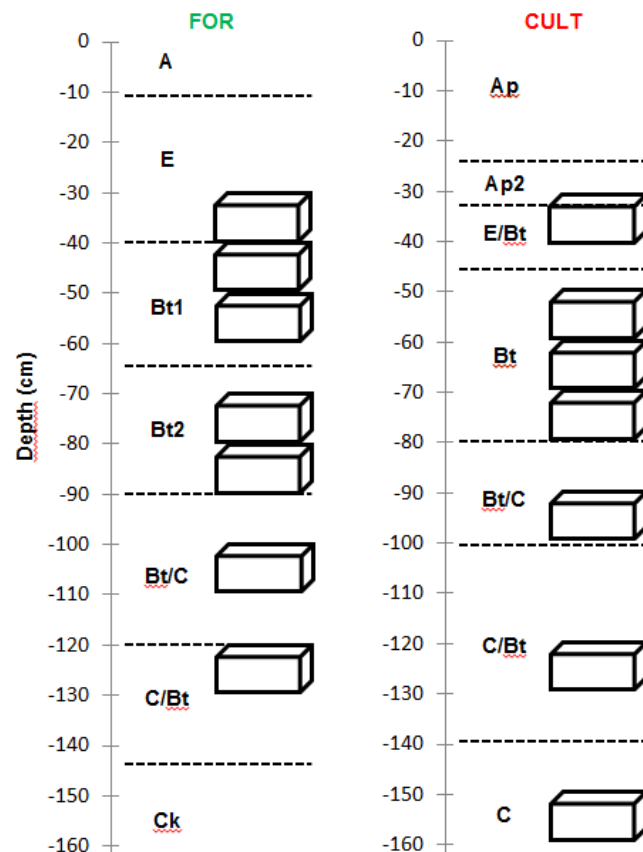


Figure II-2 : Sampling procedure in FOR and CULT profiles.

II.3. Micromorphological approach and quantification

Once we had taken vertically undisturbed soil blocks in both profiles, we oven-dried and impregnated them under vacuum with polyester resin. After polymerization, large thin sections (6x14 cm) were prepared following the procedures of Guilloché (1985). A micromorphological examination was done from 20x until 400x with a polarizing light microscope (Eclipse 50iPol, Nikon) and all thin sections were described according to the terminology of Bullock et al. (1985) and Stoops and Vepraskas (2003). Clay illuviation features such as clay coatings, clay infillings, clay intercalations and papules, i.e., fragments of clay coatings, were quantified by the same micromorphologist using a point-counting approach (Amonette, 1994; Murphy and Kemp, 1987). A mean of 480 points per thin section was counted at regular intervals of 4 mm. These parameters were selected in order to limit absolute counting error while avoiding excessive counting time (Grove and Jerram, 2011; Ulery A. and Drees R., 2008; Van der Plas and Tobi, 1965). This approach enabled us to detect and quantify the frequency of the features of interest in each thin section, and to determine their areal proportions (Gargiulo et al., 2013; McKeague et al., 1980; Weibel et al., 1966). As a first approximation, areal proportions were used to estimate volumetric proportions, as proposed by Anderson and Binnie (1961) and FitzPatrick (1984). Point counts errors were estimated by using Van der Plas and Tobi's (1965) chart, which is a standard tool to assess uncertainty in point-counting results (Howarth, 1998). We verified that the operator who did the determination tended to be consistent between point counts by recounting selected sets of thin sections (standard deviation of 3% maximum, Table A in Supplementary data file²).

II.4. Mass balance calculations

Mass balance is a classical way to estimate the amount of fine particles lost by the A/E horizons and gained by the Bt-horizons. Calculations were performed considering i) granulometric clay fraction as mobile element j and, ii) coarse granulometric fraction as invariant within soil profile (Agbenin and Felix-Henningsen, 2001; Nordt et al., 2004; Oh and Richter, 2005; Quénard et al., 2011). The coarse granulometric fraction was approximated using the coarse silt and sand content of each soil horizon.

The overall mass flux for any soil volume $m_{j,flux}$ in g.cm^{-2} was then calculated for each element j using the following equation proposed by Brimhall et al. (1991) and modified by Egli and Fitze (2000):

² Annexe II

$$m_{j,flux} = \frac{\frac{1}{100} \times \rho_{ref} \times C_{j,ref} \times Th \times \tau_{j,w}}{1 + \varepsilon_{i,w}} \quad (1)$$

where the subscripts *ref* and *w* refer, respectively, to the soil volume taken as a reference and to the weathered product, $C_{j,ref}$ is the concentration of *j* in the reference parent material in weight percent, *Th* is the thickness of the considered horizon, and ρ_{ref} is the bulk density of the reference material in g.cm⁻³. The two functions $\varepsilon_{i,w}$ and $\tau_{j,w}$ refer, respectively, to the strain and to open-system mass-transport. They were defined by Brimhall et al. (1991) to represent, for $\varepsilon_{i,w}$, the soil-volume change over time using an immobile element *i* and, for $\tau_{j,w}$, the mass fraction of element *j* gained or lost from the weathered product with respect to the mass originally present in the parent material. They were calculated according to the following equations:

$$\varepsilon_{i,w} = \frac{\rho_{ref} \times C_{i,ref}}{\rho_w \times C_{i,w}} - 1 \quad (2)$$

$$\tau_{j,w} = \frac{C_{j,w} \times C_{i,ref}}{C_{i,w} \times C_{j,ref}} - 1 \quad (3)$$

Volumetric strains and mass fluxes were calculated using the parent material characteristics based on the C-horizon characteristics of the CULT profile. Errors involved in the calculations were estimated according to the following rules:

$$\text{for } C = A + B \text{ or } C = A - B, \Delta C = \Delta A + \Delta B \quad (4)$$

$$\text{and for } C = A \times B \text{ or } C = \frac{A}{B}, \frac{\Delta C}{C} = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B} \quad (5)$$

with *A*, *B*, and *C* being variables and ΔA , ΔB , and ΔC the uncertainties related to *A*, *B*, and *C*. The analytical errors were set to 5% for the contents in the fine and coarse soil fraction and for the volume occupied by the different soil volumes. Errors related to bulk density measurements were determined thanks to their respective standard deviations.

II.5. Statistical analysis

The effect of land use change on illuviation was analyzed thanks to a second-order polynomial model taking into account the land use, the depth and the square depth. Such square depth model was chosen in order to represent the typical distribution with depth of the clay size fraction that increases with depth until it reaches a maximum in the Bt-horizons before decreasing towards the C-horizon. Denoting by *Yuk* the percentage of illuvial features in a thin section, the linear model (M1) is defined by:

$$(M1) \quad Y_{uk} = m + a_u + b \times depth_{uk} + c \times depth_{uk}^2 + d_u \times depth_{uk} + f_u \times depth_{uk}^2 + E_{uk}$$

where u stands for the land use, k the observation number, $depth_{uk}$ (respectively $depth_{uk}^2$) the depth (respectively the square depth) for observation k with land use u and E_{uk} independent identically distributed random normal variables.

The effect of land use u is captured by the coefficients a_u , d_u , f_u , therefore the model M1 is compared (thanks to a nested model test) to the simpler model M0:

$$(M0) \quad Y_{uk} = m + b \times depth_{uk} + c \times depth_{uk}^2 + E_{uk}$$

where no coefficient depends on the land use.

The integration of the parametric expression of the expected curve linking depth to the proportion of illuvial clay provides the area under the curve (AUC) given by: $(m + a_u) * (depth_{max_u} - depth_{min_u}) + (b + d_u) * 1/2 * (depth_{max_u}^2 - depth_{min_u}^2) + (c + f_u) * 1/3 * (depth_{max_u}^3 - depth_{min_u}^3)$, where $depth_{max_u}$ and $depth_{min_u}$ are respectively the maximal and minimal depths for land use u . Therefore, the difference between two AUC corresponding to different land uses u and v can be tested with the contrast: $(m + a_u) * (depth_{max_u} - depth_{min_u}) - (m + a_v) * (depth_{max_v} - depth_{min_v}) + (b + d_u) * 1/2 * (depth_{max_u}^2 - depth_{min_u}^2) - (b + d_v) * 1/2 * (depth_{max_v}^2 - depth_{min_v}^2) + (c + f_u) * 1/3 * (depth_{max_u}^3 - depth_{min_u}^3) - (c + f_v) * 1/3 * (depth_{max_v}^3 - depth_{min_v}^3)$

According to standard linear regression theory, this contrast follows a Student distribution. All statistical analyses have been carried out with the R software (R Core Team, 2013).

III. Results and discussion

III.1. **Macromorphological analysis and analytical measurements**

The surface A-horizon of FOR is 10-cm thick (Figure 1), whereas the Ap-horizon of CULT is 25-cm thick and is overlying a plough pan of several centimeters (Ap2). While the E-horizon is subangular blocky and 30-cm thick in the FOR profile, the CULT profile displays a 14-cm thick heterogeneous blocky E/Bt horizon.

Underneath, both profiles present a progressive development of the illuviated horizons (105-cm thick for FOR and 95-cm thick for CULT) including separate Bt/C and C/Bt illuviated horizons mixed with decarbonated loess. Clay coatings are visible to the naked-eye until the C-horizon reached at 145 cm depth for the FOR profile and at 140 cm depth for the CULT profile. Redoxic features are detected along profiles especially in the CULT one undoubtedly due to a change in parent material at the bottom of profiles (clay with millstone at 160 cm depth) and to regular perched water table (Table 1).

Horizon	Depth (cm)	Water State class	Color (moist)	Texture ^{a,b}	Structure ^{a,b}	Roots ^{a,b}	Pedofeatures	Boundary ^{a,b}
FOR								
A	0 – 10	Moist	10YR 3/3	sil	2mgr	1co, 2m, 2f	-	cw
E	10 – 40	Moist	10YR 4/4	sil	1fsbk	1vco, 1co, 2m, 2f	-	ai
Bt1	40 – 65	Moist	10YR 4/6	sil	1cosbk	2m, 2f	clay coatings	cs
Bt2	65 – 90	Moist	7.5YR 4/6	sil	2mpr	2f	clay coatings	gs
Bt/C	90 – 120	Dry	10YR 5/8	sicl	2mpr	2f	clay coatings	gs
C/Bt	120 – 145	Dry	10YR 6/6	sil	m	1vf	clay coatings	as
Ck	> 145	Dry	10YR 7/6	sil	m	1vf	2ndary carbonates	
CULT								
Ap1	0 – 25	Moist	10YR 4/4	sil	2fsbk	3vf	-	as
Ap2	25 – 31	Moist	10YR 4/4	sil	1vfbk	2vf	-	as
E/Bt	31 – 45	Moist	10YR 4/6	sil	1fbk	2vf	clay coatings, few Fe-Mn masses/nodules	aw
Bt	45 – 80	Moist	7.5YR 4/6	sicl	2mpr	1vf	clay coatings, few Fe-Mn masses/nodules	gs
Bt/C	80 – 100	Moist	10YR 5/6	sicl	2mpr	1vf	clay coatings, few Fe-Mn masses/nodules	gs
C/Bt	100 – 140	Moist	10YR 5/6	sil	m	-	clay coatings, few Fe-Mn masses/nodules	as
C	> 140	Wet	10YR 5/6	sil	m	-	-	

^a Soil description according to the terminology of Soil Survey Staff

^b Abbreviations : **Texture** – sil = silt loam; scl = silty clay loam. **Structure grade** – 1 = weak; 2 = moderate; 3 = strong. **Structure size** – vf = very fine; f = fine; m = medium; co = coarse. **Structure type** – gr = granular; sbk = subangular blocky; bk = blocky; pr = prismatic; m = massive. **Root quantity** – 1 = few; 2 = common; 3 = many. **Roots size** – vf = very fine; f = fine; m = medium; co = coarse; vco = very coarse. **Boundary distinctness** – a = abrupt; c = clear; g = gradual. **Boundary configuration** – s = smooth; w = wavy; i = irregular.

Tableau II-1 : Soil macromorphology.

Both soils are showing similar clay size fraction distribution with depth with i) an expected clay content increase in Bt-horizons and ii) a maximum clay content reached in the Bt/C horizons (Fig.3 and Table 2). The maximum clay content of 314 g.kg^{-1} is observed at 90 cm depth in CULT whereas the maximum content of 320 g.kg^{-1} appears deeper (105 cm depth) in FOR. While FOR profile displays greater amounts of granulometric clay from 0 to 30 cm and from 95 to 140 cm depth, CULT profile shows higher clay contents than FOR from 30 to 95 cm.

The organic carbon content in the cultivated plot displays an homogeneous content of 9 g.kg^{-1} until 30 cm depth due to ploughing homogenization whereas in the forested soil, it is mainly restricted to the A-horizon (0-10 cm) with a content of 30.5 g.kg^{-1} . From 31 cm to the basis of both soil profiles, the organic carbon content stays beneath 5 g.kg^{-1} (Fig.3 and Table 2). The pH in the forested soil ranges from 5.1 (E-horizon) to 8.6 (Ck-horizon) and from 6.6 (Ap-horizon) to 7.7 (C-horizon) under cultivation. The pH in FOR profile is theoretically more favorable for illuviation (particle mobilization) than under cultivation (Van Breemen and Buurman, 2002; Quénard et al., 2011).

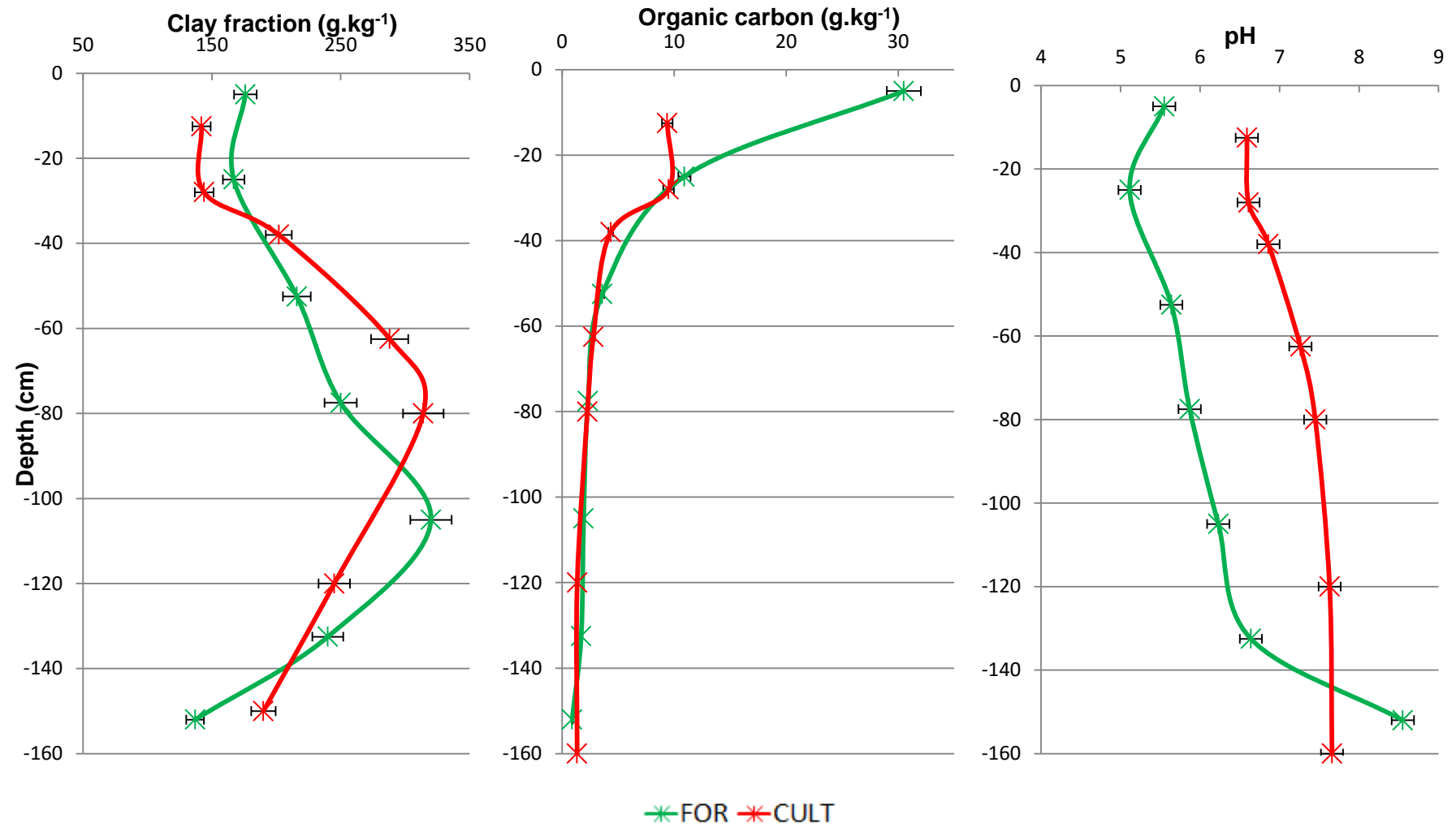


Figure II-3 : Distribution with depth in FOR and CULT profiles of a/ granulometric clay size fraction (g.kg⁻¹) b/ organic carbon content (g.kg⁻¹) c/ pH.

Horizon	Depth (cm)	Particle size distribution (g.kg ⁻¹) ^a						Bulk density (g.cm ⁻³)	pH (H ₂ O)	CaCO ₃ (g.kg ⁻¹)	OC ^b (g.kg ⁻¹)	Total N (g.kg ⁻¹)	C/N
		cl	fsi	csi	fs	cs	csi/fsi						
FOR													
A	0 – 10	176	284	463	64	13	1.63	0.99	5.6	-	30.5	2.44	12.5
E	10 – 40	167	288	463	66	17	1.61	1.36	5.1	-	10.9	1.08	10.1
Bt1	40 – 65	216	284	428	56	16	1.51	1.51	5.6	-	3.6	0.48	7.5
Bt2	65 – 90	250	278	396	58	18	1.42	1.56	5.9	-	2.3	0.36	6.4
Bt/C	90 – 120	320	208	441	28	4	2.12	1.51	6.2	-	1.9	0.35	5.4
C/Bt	120 – 145	240	222	510	27	1	2.30	1.50	6.6	-	1.7	0.29	5.9
Ck	> 145	137	240	457	19	2	1.90	1.49	8.6	143	0.9	0.21	4.3
CULT													
Ap1	0 – 25	142	296	495	54	13	1.67	1.34	6.6	-	9.4	0.88	10.7
Ap2	25 – 31	144	300	483	61	13	1.61	1.34	6.6	-	9.5	0.91	10.4
E/Bt	31 – 45	202	297	437	45	18	1.47	1.49	6.9	-	4.3	0.48	9.0
Bt	45 – 80	288	271	389	39	13	1.44	1.55	7.3	-	2.8	0.35	8.0
Bt/C	80 – 100	314	203	460	21	2	2.27	1.53	7.5	-	2.3	0.30	7.7
C/Bt	100 – 140	245	243	480	29	2	1.98	1.51	7.6	-	1.4	0.20	7.0
C	> 140	190	266	525	17	1	1.97	1.54	7.7	-	1.3	0.18	7.6

^a cl = clay (< 2µm); fsi = fine silt (2 – 20 µm); csi = coarse silt (20 – 50 µm); fs = fine sand (50 – 200 µm); cs = coarse sand (200 – 2000 µm)

^b OC = Organic Carbon

Tableau II-2 :Selected physical and chemical properties.

III.2. Micromorphological analysis

III.2a) General characteristics

While the organization between solid and pores is complex in both profiles (Table 3), porosity abundance tends to vary between 5 to 15 % surface area (Table A in Supplementary data file). Porosity is mostly related to biological activity as it is made up essentially of channels, packing voids, and mammilated vughs (resulting from the loose packing of soil components such as excremental features). Excremental features such as rough ellipsoidal organo-mineral enchytraeids excrements or infillings with a bow-like fabric produced by earthworms are well established all along both profiles (Table 3).

III.2b) Eluviated horizons

In FOR E-horizon and CULT E/Bt-horizon, large fabric units occur in a dense groundmass of smaller units with a close porphyric c/f related distribution pattern (Table 3). In case of cultivation, the b-fabric tends to be undifferentiated as tillage in case of cultivation and reworking through faunal activity under forest may have prevented particle orientation. The eluviated E-horizon of FOR profile displays some indications of past disturbance: a channel to massive microstructure at 30-35 cm depth overlying a complex microstructure (granular to vughy) at 35-40 cm depth with i) aboveground faunal activity features suggesting past clearance, and ii) subhorizontal planes undoubtedly due to compaction. In good agreement with historical records, these micromorphological data confirm that the soil under forest experienced a more complex land use history than initially thought including episodic cultivation.

Horizon	Depth (cm)	Related distribution pattern ^a	Birefringence Fabric	Microstructure	Main Pedofeatures	
					Textural	Other features
FOR						
E	30 – 40	close-por	undiff.	30-35: channel to massive 35-40: granular to vughy granular to vughy	unsorted compound layered features	Fe-Mn nodules, excremental
Bt1	40 – 50	close-por	stipple-speckled		dusty clay coatings and intercalations, thin limpid clay coatings, papules	Fe-Mn nodules, excremental
Bt1	50 – 60	close-por	stipple-speckled	channel, fissure and vughy	dusty and limpid clay coatings and infillings, papules	Fe-Mn nodules, excremental
Bt2	70 – 80	ss-/close-por	granostriated/ mosaic speckled	channel, fissure and vughy	unsorted compound layered features, laminated dusty and microlaminated limpid clay coatings and infillings, papules	Fe-Mn nodules, passage
Bt2	80 – 90	ss-por	granostriated/ mosaic speckled	vughy, channel and prismatic	unsorted compound layered features, silty limpid clay coatings, laminated dusty coatings and infillings	Fe-Mn nodules
Bt/C	100 – 110	ss-/close-por	granostriated/ mosaic speckled	prismatic, channel, fissure, vughy	dusty and limpid clay coatings, papules	passage, excremental
C/Bt	120 – 130	close-por	stipple-speckled	channel, vughy, fissure, platy, vesicular	unsorted compound layered features, dusty and limpid clay coatings, papules	passage, excremental
CULT						
E/Bt	30 – 40	close-por	undiff.	channel, fissure, prismatic, granular, subangular blocky	sedimentary crust, unsorted compound layered features, papules	excremental
Bt	50 – 60	close-por	stipple-speckled	channel, granular to vughy, fissure	dusty and limpid clay coatings, papules	Fe-Mn nodules, passage
Bt	60 – 70	ss-/close-por	stipple-speckled	fissure, prismatic, vughy to crumb, channel	dusty and limpid clay coatings and infillings, papules	Fe-Mn nodules, excremental
Bt	70 – 80	ss-por	granostriated/ mosaic speckled	fissure to blocky, channel, granular, crack	unsorted compound layered features, dusty and limpid clay coatings, papules	Fe-Mn nodules, passage
Bt/C	90 – 100	ss-/close-por	stipple-speckled	channel, fissure, blocky	dusty and limpid clay coatings, papules	Fe-Mn nodules, excremental, passage
C/Bt	120 – 130	ss-/close-por	stipple-speckled	channel, blocky, platy	unsorted compound layered features, dusty and limpid clay coatings, papules	Fe-Mn nodules, excremental, passage
C	150 – 160	close-por	stipple-speckled	platy, vughy	unsorted compound layered features, silty limpid clay coatings, dusty clay coatings	Fe-Mn nodules, excremental, passage

^a undiff = undifferentiated; ss = single-spaced; por = porphyric

Tableau II-3 : Soil Micromorphology.

III.2c) Illuviated horizons

Fissure and prismatic microstructure made of physical planar voids can be regularly observed in subsurface illuviated horizons. Vughs are still abundant in the C-horizon of the CULT profile (150-160 cm). While single spaced porphyric c/f related distribution is more regular in these subsurface horizons, b-fabric tends to be more oriented with depth (stipple speckled or mosaic speckled to granostriated b-fabrics).

Different types of textural pedofeatures were identified in each horizon of both soils: limpid or dusty clay coatings or intercalations, papules, compound layered of silty clay coatings, unsorted or silt infillings, sedimentary crust fragments (Table 3). Clay translocation due to illuviation is responsible for the formation of clay coatings, i.e., well-sorted and oriented clay bodies with sharp boundaries (Brewer, 1964; McCarthy et al., 1999; Ufnar, 2007). In the thin sections under study, two kinds of clay coatings are distinguished: i) yellow to yellow brown, limpid clay, often microlaminated ones, with sharp extinction lines and strong interference colors (Fig.4), ii) brown to dark brown dusty clay, comprising small organic particles or microparticles of up to 5 μm in diameter, moderately to well sorted, laminated to layered with diffuse extinction lines (Fig.5).

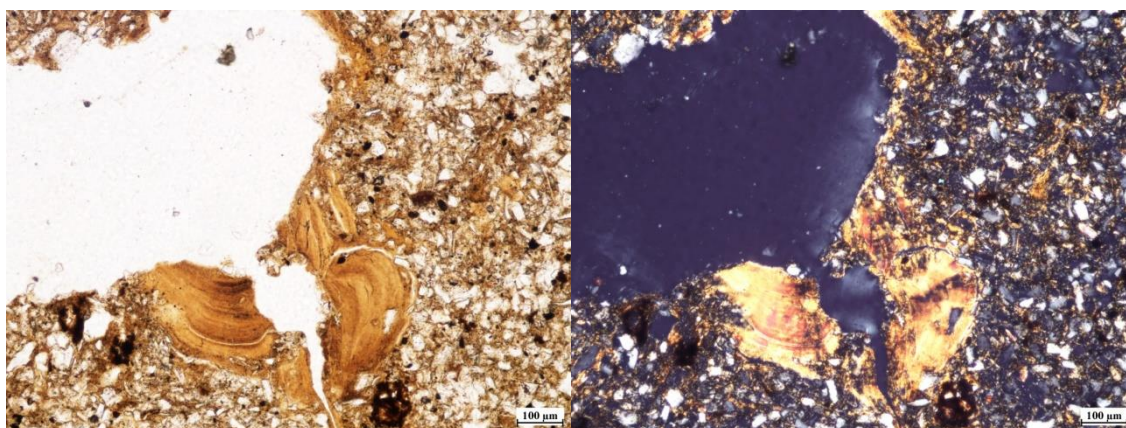


Figure II-4 : Microlaminated limpid clay coating (FOR 70-80 cm) (left PPL; right XPL).

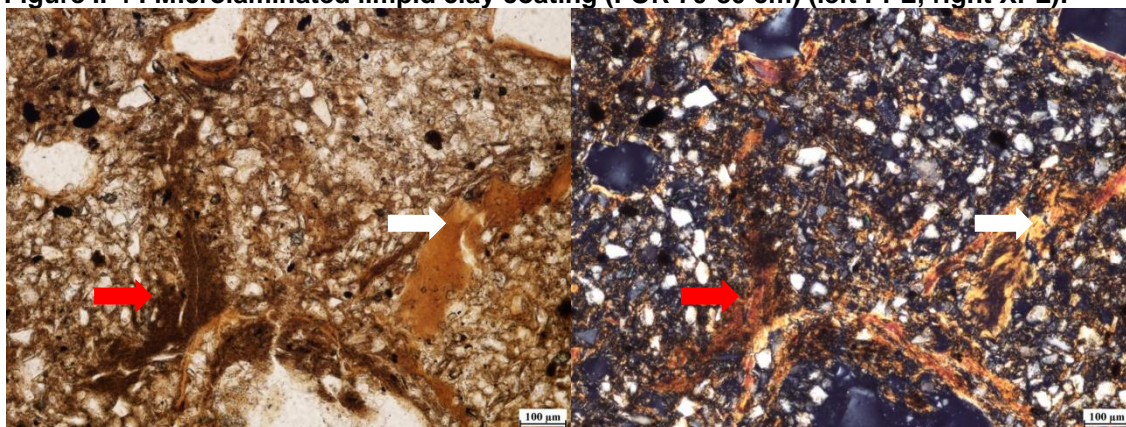


Figure II-5 : Some dusty (red arrow) and limpid (white arrow) clay coatings and intercalations (FOR 80-90 cm) (left PPL; right XPL).

The first kind of clay coatings is typical of primary illuviation (Jamagne et al., 1987) and is associated with homogeneous and low energy stratified flow accumulations (Bullock, 1985; Fedoroff, 1997; Fedoroff and Courty 1994; Kühn et al., 2010). The second type of clay coatings is similar to the organo-argillans described by Brewer (1964), to the clayey part of 'type b' coatings described by Jongmans et al. (1991) and to the organo-clay coatings observed by Miedema et al. (1999). They are also due to clay illuviation but as they may contain a low amount of silt-sized particles (Jamagne et al., 1987) and as they have a medium to poor orientation (Fedoroff, 1997), they are more related to successional patterns of deposition and concentration in soils affected by a change in internal drainage (Adderley et al., 2010). Even if it is still under discussion (Adderley et al., 2010; Goldberg and Macphail, 2006; Usai, 2001), dusty clay coatings are generally associated with cultivation (Brammer, 1971; Gebhardt, 1988) and agric horizons (Stoops and Vepraskas, 2003; WRB, 2014) whereas the limpid ones are related to unexposed soils with a permanent vegetation cover (Fedoroff, 1997).

Papules (i.e., fragments of clay coatings (Brewer, 1964)) are observed regularly all along both profiles (Fig.6). As they are mostly located into biological infillings, we firmly believe that they are related to biological activity. While papules are detected in both cases from the E-horizon to the C/Bt horizon, limpid and dusty clay coatings are clearly identified from the top of both Bt-horizons and were still observable in the C-horizon of the CULT profile.

Thick (>250 μm width) and coarse-textured features with a mixture of clay, silt and organic matter are seen locally in both profiles but especially in the E/Bt horizon of the CULT one (Fig.7). These unsorted or clayey silt compound layered features are similar to the "agricutans" defined by Jongerius (1970) and are classically associated with cultivation (Jongmans et al., 1991 and 2001).

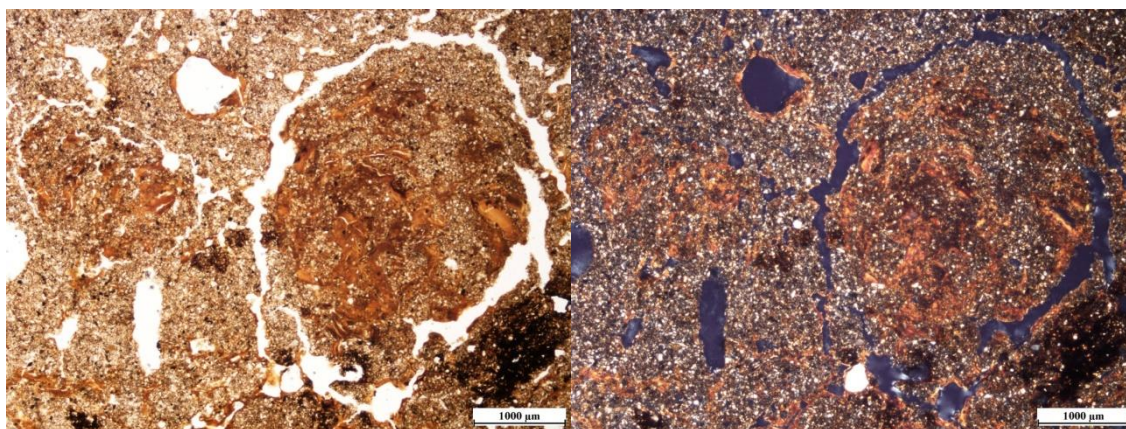


Figure II-6 : Papules corresponding to fragments of clay coatings in faunal infillings (FOR 90-100 cm) (left PPL; right XPL).

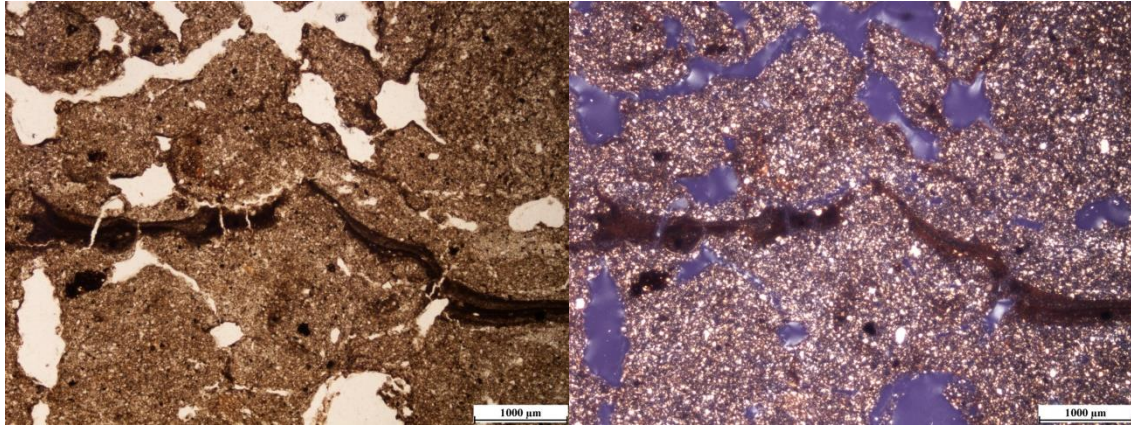


Figure II-7 : Layered silty clay intercalation: agricutan-like feature (CULT 30-40 cm) (left PPL; right XPL).

These qualitative results confirm previous macromorphological observations and granulometric data. They clearly suggest that illuviation has contributed to the textural contrast and to the specific clay size fraction distribution of both soil profiles. These micromorphological data provide important additional information regarding macromorphological description of both soils : i) clay coatings observed in the C-horizon of CULT profile were too scarce to be detected in the field, ii) papules detected all along both profiles were too small (<100 µm) to be directly visible to the naked eye, iii) the two main types of illuvial clay coatings (limpid and dusty ones) were not differentiable macromorphologically due to their fine textural characteristics. In light of these micromorphological descriptions, the illuviation process appears to have produced two different types of textural pedofeatures: the limpid and the dusty clay coatings, the latter being considered in the following as an indicator of cultivation.

III.3. Quantification of illuviation intensity and sensitivity to land use change

After having selected the diagnostic features associated with illuviation, it was possible to quantify them according to our point-counting approach. Results in Table 4, related to illuvial clay quantification (areal percentage in thin sections) suggest, as expected, that the abundance of illuvial clay features in E-horizons is low (<1%) and essentially made of papules. A great variability of illuvial clay abundances can be underlined in Bt-horizons of both profiles: from 0.7% in the top of the Bt-horizon of FOR profile (40-50 cm) to 10.2% in the bottom of the Bt-horizon of CULT profile (70-80 cm). Unexpectedly, both profiles reach a maximum of illuvial clay percentage in the Bt/C horizon with 14.0% for the FOR profile and 12.4% for the CULT profile but not in the Bt-horizon. Deeper, the abundances decrease but remain significant nonetheless since 2.3% of total illuvial clay is still present in the C-horizon of the CULT profile. The illuviated horizons under study display more than enough amounts of illuvial oriented clay to be classified as argic horizons according to WRB (2014), i.e., more

than 1%. The clay illuviation indexes of 876 %.cm and 862 %.cm, in FOR and CULT profiles respectively (Table 4) are indicative of a 'very high' degree of illuviation according to Miedema and Slager (1972). The data obtained in both Bt/C horizons (14.0% and 12.4% in FOR and CULT respectively) are in accordance with the highest degree of illuviation recorded in the literature for subhorizons of the argillic horizon : 6.2 to 19.9% (Kühn et al., 2010). The degree of reworking is considered as 'weak' in the illuviated horizons of both our soils according to Miedema and Slager's (1972) classes. The results depicted in Figure 8 suggest that illuvial clay accumulations are positively correlated with granulometric clay contents ($R^2=0.70$). These results clearly suggest that illuviation has been quantitatively involved in textural contrast and associated clay size fraction distribution with depth in both profiles.

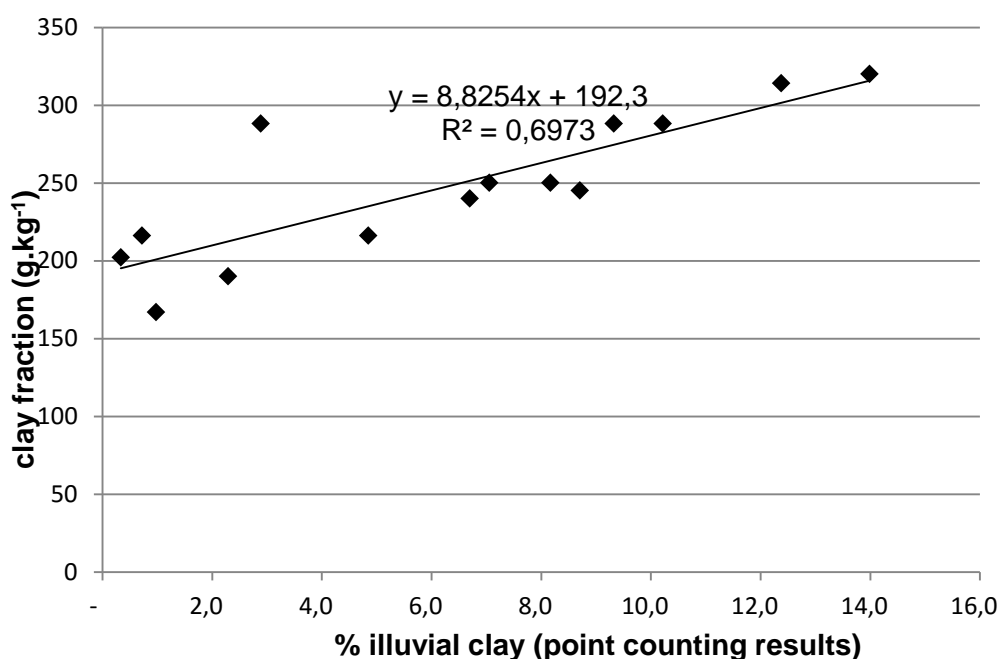


Figure II-8 : Correlation between illuvial clay from point counting results (areal percentage) and granulometric clay size fraction (g.kg-1) for all studied thin sections.

FOR					CULT				
Depth (cm)	Limpid (%)	Dusty (%)	Papules (%)	Total (%)	Depth (cm)	Limpid (%)	Dusty (%)	Papules (%)	Total (%)
E									
30-40	0 ± 1%	0.5 ± 1%	0.5 ± 1%	1.0 ± 1%	30-40	0 ± 1%	0 ± 1%	0.3 ± 1%	0.3 ± 1%
Bt									
40-50	0.7 ± 1%	0 ± 1%	0 ± 1%	0.7 ± 1%	50-60	1.3 ± 1%	1.0 ± 1%	0.6 ± 1%	2.9 ± 1%
50-60	2.0 ± 1%	2.2 ± 1%	0.7 ± 1%	4.9 ± 2%	60-70	5.1 ± 2%	4.0 ± 2%	0.2 ± 1%	9.3 ± 3%
70-80	4.9 ± 2%	2.0 ± 1%	0.2 ± 1%	7.1 ± 2%	70-80	5.4 ± 2%	4.7 ± 2%	0.1 ± 1%	10.2 ± 3%
80-90	7.7 ± 2%	0.5 ± 1%	0 ± 1%	8.2 ± 2%					
Bt/C									
100-110	11.0 ± 3%	2.3 ± 1%	0.7 ± 1%	14.0 ± 3%	90-100	8.4 ± 2%	3.2 ± 2%	0.9 ± 1%	12.4 ± 3%
C/Bt									
120-130	2.8 ± 1%	2.3 ± 1%	1.6 ± 1%	6.7 ± 2%	120-130	6.4 ± 2%	1.7 ± 1%	0.6 ± 1%	8.7 ± 2%
C									
					150-160	1.6 ± 1%	0.7 ± 1%	0 ± 1%	2.3 ± 1%
Illuviation index (%.cm)									
	590	202	85	876		560	245	57	862

Tableau II-4 : Clay coatings and illuviation features amounts (surface percentage) in the different horizons of the FOR and CULT profiles. Absolute counting error with a 95 percent confidence was determined according to Van der Plas and Tobi (1965). Illuviation indexes (in %.cm) were calculated according to Miedema and Slager (1972).

Horizon	Thin sections used	Horizon thickness (cm)	% illuvial clay	flux (g.cm ⁻²)
FOR				
E	30-40	30	1.0	0.5 ± 0.6
Bt1	40-50	25	2.8	1.2 ± 0.6
	50-60			
Bt2	70-80	25	7.6	3.3 ± 1.3
	80-90			
Bt/C	100-110	30	14	7.3 ± 2.5
C/Bt	120-130	25	6.7	2.9 ± 1.2
Sum (profile)				15.3 ± 6.1
CULT				
E/Bt	30-40	14	0.3	0.1 ± 0.3
Bt	50-60	35	7.5	4.6 ± 1.8
	60-70			
	70-80			
Bt/C	90-100	20	12.4	4.3 ± 1.6
C/Bt	120-130	40	8.7	6.1 ± 2.1
Sum (profile)				15.1 ± 5.7

Tableau II-5 : Illuvial clay mass flux in FOR and CULT profiles (clay coatings bulk density = 1.75 ± 0.12 g.cm⁻³); errors on calculations estimated according to Montagne (2006).

Among the three quantified kinds of illuvial pedofeatures, the limpid clay coatings are the most abundant (Table 4). Dusty clay coatings represent around one third of total illuvial clay in both soil profiles (Table 4). Papules generally represent between 5 and 10% of total illuvial clay, except in the C/Bt-horizon of the FOR profile where papules are particularly abundant (Table 4). The recognition of dusty clay coatings in the FOR profile suggests that illuviation has not only occurred under a permanent forest vegetation cover but also during some periods of cultivation before the last afforestation at least one hundred years ago. Such a complex land use management history detected in our FOR site is in good agreement with other micromorphological indicators of past disturbances as discussed above (see section 3.2.2) and is very common in this part of France where first local forest clearings for agro-pastoral purposes dated back from 5400 BP and were generalized before 4500 BP (Pastre et al., 2015). According to the highly significant abundance of dusty clay coatings in both soil profiles, the legacy of anthropic-driven illuviation over the past millennia is far from being negligible.

With a global mass flux of $15.1 \pm 5.7 \text{ g.cm}^{-2}$ for the CULT profile and of $15.3 \pm 6.1 \text{ g.cm}^{-2}$ for the FOR profile (Table 5), it appears that the last land-use change dated back from at least one hundred years for the FOR profile and two hundred years for the CULT profile did not induced a significant effect on total illuvial clay according to statistical results (p-value associated with Fisher test $\text{Pr}(> F) = 0.45$, Fig.9). This result is clearly in accordance with the one obtained by Jagercikova et al. (2015) on the same soil profiles using a ^{10}Be isotopic approach and tend to confirm the results previously obtained by Slager and van de Wetering (1977). On the opposite, Thompson et al. (1990) have studied very similar soils and land uses and they observed that illuviation was more expressed in the cultivated soil than under forest. As the forest in their study has been probably established in the 17th century, their forested site experienced a longer period under forest than our FOR plot.

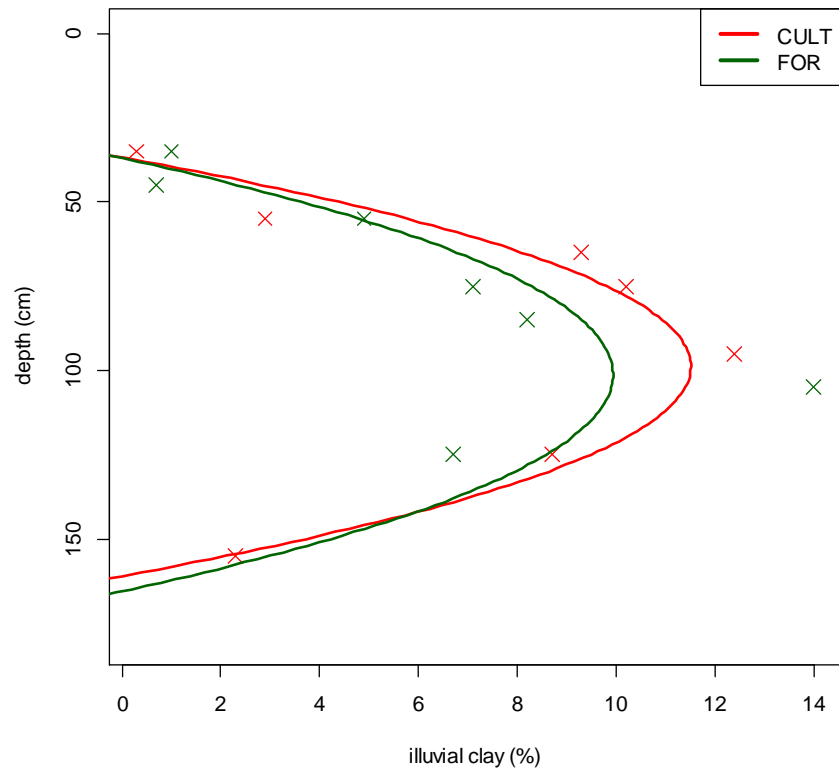


Figure II-9 : Statistical modelling of illuvial clay distribution with depth in CULT and FOR profiles.

In addition to a higher amount of agricutans-like pedofeatures in the CULT profile than in the FOR profile (see paragraph 3.2.3), the CULT profile shows a slightly higher, but not statistically significant ($Pr(>F)=0.14$), dusty clay illuviation index at the scale of the entire profile (Table 4). At the horizon scale, the abundance of dusty illuvial clay coatings is moreover twice higher in the Bt-horizon of the CULT profile than in the Bt-horizon of the FOR profile (Table 4). All these results are in agreement with Simpson (1997), who associated a greater frequency of coarser textural pedofeatures to more intense cultivation. These concordant results suggest i) a qualitative change in the nature of the translocated particles with coarser particles and more abundant organic rich particles being translocated in CULT than in FOR profile, and ii) a differentiation of the dusty clay illuviation index between the FOR and CULT profiles since the last shift in land-use.

In good agreement with the general framework of Richter (2007), two telescoping time scales of anthropedogenesis may be distinguished : i) the legacy of human history over the past millennia with more or less episodic periods of cultivation resulting in the formation of significant amount of dusty clay coatings in both soil profiles, and ii) active human impacts since the last land-use change that mainly induced a qualitative change in the nature of the translocated particles in the direction of more abundant dusty and coarse-textured features.

III.4. *Relative contribution of illuviation to the genesis of textural contrast*

CULT C-horizon (with a bulk density of 1.54 g.cm^{-3}) contains a considerable amount of illuvial clay, i.e., 26 g.kg^{-1} based on the estimated bulk density of 1.75 g.cm^{-3} for clay coatings. According to these observations and measurements, a correction of the granulometric characteristics of the CULT C-horizon was carried out. Using this new virtual reference horizon allowed us to do adequate mass balance calculations regarding a non illuviated C-horizon.

As mass balance calculations were done regarding the corrected C-horizon of CULT profile, we can note that, as expected, the soil volume change over time $\varepsilon_{i,w}$ of the overlying horizon (C/Bt horizon) is low (Table 6). The FOR A-horizon displays the highest $\varepsilon_{i,w}$ related to its high content of organic matter. Bt-horizons of both profiles have intermediate values of $\varepsilon_{i,w}$ due to moderate expansion related to clay accumulation in these illuviated horizons. While A and E-horizons have very low to negative mass flux values, Bt, Bt/C and C/Bt horizons have positive mass flux values as high as $8.4 \pm 3.5 \text{ g.cm}^{-2}$ in the Bt-horizon of the CULT profile. These results clearly confirm the occurrence of clay accumulation in subsurface horizons.

As gains are markedly larger than losses, it can be suggested that additional processes were involved in addition to illuviation. In order to assess the relative contribution of illuviation, present mass balance calculations were compared with illuvial clay mass flux calculations presented in Table 5. Three cases may be identified : i) mass balance flux is lower than illuviation mass flux in FOR E-horizon, ii) mass balance fluxes are higher than illuviation mass fluxes in all Bt-horizons and, iii) mass balance flux values are close to illuviation mass flux values in the Bt/C and C/Bt horizons of both profiles.

Mass balance flux is negligible in FOR E-horizon whereas its illuviation mass flux obtained thanks to the micromorphological approach is equal to $0.5 \pm 0.6 \text{ g.cm}^{-2}$. This low gain in clay size fraction, partly due to the presence of papules, is undetectable by the mass balance approach as it is counterbalanced by a higher loss in clay size fraction thanks to eluviation. Quantification of the cumulative effect of these opposite phenomena shows that mass balance fluxes are lower than mass fluxes, as determined with the micromorphological approach, and finally lead to an underestimation of the intensity of the illuviation process.

Bt-horizons display higher clay size fraction gains with the mass balance approach than with the micromorphological quantification (Tables 5 and 6). Several complementary hypotheses could explain such a difference. According to the description of loess deposits, the first loess deposit, in which Bt-horizons formed, is slightly finer than the third deposit corresponding to the present C-horizon. It has resulted in an overestimation of the ratio between the contents of the coarse silt and sand fraction between the C-horizon taken as reference and the Bt-horizons, and finally in overestimations of the ε (equation 2) and τ

(equation 3) functions. Contrastingly, the micromorphological quantification is not sensitive to such lithological discontinuities. In addition, as soon as clay neoformation or microdivision are involved, some gains in clay size fraction in Bt-horizons unrelated to the illuviation process may be quantified by the mass balance approach but not by the micromorphological approach. Finally, illuvial features could have been integrated in the soil groundmass through biological or physical reworking and reorganization processes (Schuylenborgh et al., 1970; Ufnar 2007) and consequently may have induced an underestimation of illuvial fluxes by the micromorphological approach.

Contrastingly, the Bt/C and C/Bt horizons show mass balance fluxes very close to their illuviation mass fluxes (Tables 5 and 6) as well as a similar or a higher intensity of biological reworking than the Bt-horizons as measured by the relative abundance of papules (Table 4). Such results suggest that i) in the Bt/C and C/Bt horizons, lithological discontinuity, clay neoformation and reorganization processes did not interfere with illuviation that was the main active process, ii) the integration of illuvial features through biological reworking did not induced significant underestimations of the micromorphological fluxes and may consequently be neglected at least in the studied soils, and iii) the clay coatings were particularly stable over time in these two horizons. Finally, at least in soils with a 'weak' reworking intensity, the micromorphological quantification of illuvial features provide a more accurate quantification of the intensity of the illuviation process than a mass balance approach particularly sensitive to lithological discontinuities as well as to competing (E-horizon) or synergic (Bt-horizons) processes.

Whatever the occurrence of soil processes like neoformation, microdivision or lithological discontinuities in some of the different soil horizons, the total mass flux obtained through micromorphological quantification represents between 75% in the CULT profile and 86% in the FOR profile of the gains calculated thanks to the mass balance approach. Even if the micromorphological point-counting quantification can lead to an overestimation of the illuvial clay amounts partly due to edge effect (Murphy and Kemp, 1984), illuviation is thus by far the most important process in the genesis of the textural contrast in the soils under study.

Horizon	Depth (cm)	Thickness (cm)	$\epsilon_{\text{HorCcult}}$	$\zeta_{\text{j.HorCcult}}$	flux (g.cm ⁻²)
FOR					
A	0 – 10	10	0.6	0.1	-
E	10 – 40	30	0.2	0.0	-
Bt1	40 – 65	25	0.1	0.4	2.5 \pm 1.0
Bt2	65 – 90	25	0.2	0.8	4.2 \pm 1.8
Bt/C	90 – 120	30	0.2	1.2	8.0 \pm 3.4
C/Bt	120 – 145	25	0.1	0.5	2.9 \pm 1.2
Gains sum					17.6 \pm 7.5
CULT					
Ap	0 – 25	25	0.1	-0.2	-0.9 \pm 0.4
A2	25 – 31	6	0.1	-0.1	-0.2 \pm 0.1
E/Bt	31 – 45	14	0.2	0.3	1.1 \pm 0.4
Bt	45 – 80	35	0.3	1.2	8.4 \pm 3.5
Bt/C	80 – 100	20	0.2	1.2	5.2 \pm 2.2
C/Bt	100 – 140	40	0.1	0.6	5.5 \pm 2.3
C	> 140	10	0.0	0.0	0.0 \pm 0.0
Gains sum					20.1 \pm 8.4

Tableau II-6 : Final mass balance calculations in FOR and CULT profiles.

IV. Conclusion

To quantify illuviation matter fluxes separately from all other soil processes implying clay size fraction, the method proposed here relies on an exhaustive quantification of clay coatings abundance at a microscopic scale and the determination of their bulk density after selective manual sampling. In addition to being in very good agreement with more classical macromorphological descriptions and bulk analyses, demonstrating that its results can be interpreted with a good level of confidence, this method is not invalidated by lithological discontinuities or by the presence of other accessory soil processes like clay neoformation or microdivision, frequently encountered under the field conditions. The micromorphological quantification of illuvial clay coatings is a promising way to improve the accuracy of the quantification of illuviation intensity and consequently to provide new insight on the process of illuviation and on its sensitivity to land use change.

As a first example, the micromorphological quantification of clay coatings result in demonstrating that illuviation was responsible for 75% and 86% of the textural contrast in the cultivated and forested soils, respectively. Illuviation was thus by far the dominant factor causing textural differentiation in the two Luvisols under study, even if accessory processes involving the clay size fraction were also at play, such as lithological discontinuity, clay neoformation, or biological and physical reworking.

In addition, the quantification of high amounts of dusty clay coatings in the soil profile under forest for at least the last hundred years clearly underlines the sensitivity of illuviation to past periods of cultivation and the legacy of anthropedogenesis on the present soil properties. Similarly, the recognition of “agricutans” and the slight increase of dusty clay coatings abundance in the cultivated soil in comparison with the forested one, taken as a reference, points out the fact that illuviation is strongly sensitive and reacts rapidly, at least qualitatively, to changes in soil properties impacted by land-use changes such as soil cover, soil water dynamics, soil pH or soil organic matter content, to name just a few.

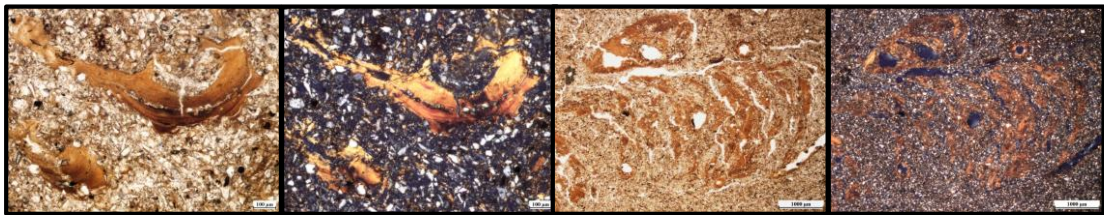
All these results strongly support the conclusions that illuviation is active in soils under present climatic conditions and must no more be considered as a fossil process. More work is needed, however, to better constrain the temporal dynamics of the illuviation process and its sensitivity to key soil properties.

Acknowledgments

This research was conducted in the framework of the Agriped project (ANR-10-BLANC-605), which was supported by the French National Research Agency (ANR). The authors are grateful to the Agriped team for contributing to the sampling and to INRA Grignon

for providing access to their long-term experimental site and its associated data. We would also like to thank Hervé Gaillard for providing soil bulk density data, Christophe Labat for helping with impregnation and thin section preparation and Philippe Baveye for providing editorial comments on an early draft of this article.

CHAPITRE III - L'ANALYSE D'IMAGES POUR LA QUANTIFICATION DES TRAITS DIAGNOSTICS



Préambule:

Dans le chapitre précédent, nous avons pu valider l'hypothèse selon laquelle la micromorphologie quantitative permet de quantifier l'intensité du processus d'illuviation et ses variations entre différents horizons. Cette étude de faisabilité a de plus été l'occasion de démontrer la sensibilité du processus d'illuviation aux différentes phases de mise en culture des sols, que celles-ci soient actuelles comme dans le profil CULT ou plus anciennes comme dans le profil FOR. Il ne nous a toutefois pas été possible de mettre en évidence un effet statistiquement significatif de la mise en culture actuelle sur l'intensité du processus d'illuviation. Or, les approches par comptage au point ne permettent pas de traiter un grand nombre d'échantillons limitant d'autant la sensibilité des tests statistiques. De plus, elles reposent sur un dénombrement des traits illuviaux plus que sur une mesure de leur surface et supposent ainsi, de manière implicite, que la taille de chacun des traits d'illuviation est constante, hypothèse qui ne résiste pas aux observations, au moins entre les différents horizons. Afin de traiter un grand nombre d'échantillons et améliorer ainsi la sensibilité des tests statistiques et surtout de quantifier la morphologie des différents traits illuviaux (taille et forme), nous proposons et validons dans le présent chapitre une nouvelle méthode d'analyse d'images permettant de quantifier l'abondance et les paramètres de taille et de forme des traits pédologiques d'intérêt. Cette seconde phase du travail de thèse porte alors tant sur la quantification des traits illuviaux utilisés comme indicateurs du processus d'illuviation que sur la quantification de la porosité d'origine biologique utilisée comme indicatrice du processus de bioturbation. **Ce travail de développement méthodologique a fait l'objet de la rédaction d'un article intitulé « Development of a novel image analysis procedure to quantify biological porosity and illuvial clay in large soil thin sections » actuellement en phase de révision avant publication dans la revue Geoderma.**

Development of a novel image analysis procedure to quantify biological porosity and illuvial clay in large thin sections

Sauzet O., Gilliot J-M., Bajard M., Cammas C., Montagne D.

Abstract

Among other effects, climate change may lead to significant modifications of soil properties through modifications of the intensity and dynamics of a number of soil processes. In particular, the ubiquitous processes of bioturbation and illuviation are believed to be especially sensitive to climate change. Progress toward the quantification of these processes needs to be made in order to ascertain the impact of climate change. In this study, we develop, and validate through an exhaustive accuracy assessment, a digital 2D image analysis method adapted to large soil thin sections, leading to the quantification, characterization and classification of pores and illuvial clay features considered diagnostic of bioturbation and illuviation, respectively. The need to consider large soil thin sections (14 x 6 cm) stems from observations that areas from 684 mm² to more than 5 000 mm² are needed to obtain representative measurements of fragments of illuvial clay (papules) and porosity associated with earthworms respectively. Whereas the soil heterogeneity in thin sections of such a large size prohibits the use of classical global and colorimetric image analysis procedures, we succeeded to quantify and characterize the porosity and illuvial clay features with accuracies as high as 96% for porosity and 92% for illuvial clay by carefully considering different levels of soil organization from aggregates to individual illuvial clay features. Quantification of the size and the shape of pores and of illuvial clay features makes it possible to develop morphological classifications distinguishing pores of biological origin (earthworms or roots) from others, or clay coatings and infillings from papules. All these data are particularly useful to better characterize underlying soil processes. Results suggest that the proposed methodology provides an accurate and representative quantification of biological porosity and illuvial clay features in large thin sections. We argue that the use of this approach could be extended to study and quantify bioturbation and illuviation intensities at the profile scale.

I. Introduction

In the last few decades, a number of authors have argued that climate change and the associated modifications of man's use of landscapes have already affected the rate and direction of Holocene pedogenesis, leading to significant alterations of soil properties (e.g., Macphail et al., 1987; Richter, 2007).

By increasing litter or crop residues, as well as root mass and organic matter content, climate change may stimulate the activity of soil macrofauna (i.e., bioturbation), with consequent increases in infiltration rate and bypass flow due to the larger numbers of biopores (Brinkman and Sombroek, 1996; Rounsevell et al., 1999). In addition, the expected

increase in precipitation over the next 50–100 years in northern Europe (IPCC, 2001) might result in an increasing amount of water infiltrating into soils and thus in more intense lixiviation or eluviation (Rounsevell et al., 1999). In that context, Montagne and Cornu (2010), using agricultural soil drainage as an analogy to climate change, have suggested that eluviation intensity, i.e., the amount of fine particles up to 10 μm that are transferred vertically, increases as a result of climate change.

To understand better the possible effect of climate change on these soil processes, especially given the fact that eluviation have proven able to respond faster than initially expected (Montagne and Cornu, 2010), it is crucial to be able to quantify their intensity precisely (Rounsevell et al., 1999). In that respect, morphological studies present a great interest (Montagne et al., 2007). Bioturbation process can be identified and quantified by analyzing the extent of the porosity associated with burrowing activity (Bruneau et al., 2004; Lamandé et al., 2003) or by measuring the extent of casting activity (Cassagne et al., 2008; Davidson, 2002; Davidson and Grieve, 2006; Pietsch, 2013). By quantifying illuvial clay features such as clay coatings in soil thin sections, Jongmans et al. (1991), McKeague et al. (1980), Miedema et al. (1983), Miedema and Slager (1972), Murphy (1983), Sauzet et al. (2016), and Thompson et al. (1990) have generated several quantitative data about the degree of illuviation.

Starting in the 1940s, research on quantitative soil micromorphology has been based either on visual estimates with reference to appropriate empirical charts of (e.g., Bullock et al., 1985; Thompson et al., 1990) or on counting procedures. Point counting used to be the most common procedure to determine frequency (modal analysis) but it is considered tedious and error prone (Aydemir et al., 2004; Marschallinger, 1997). Both quantitative techniques tend to be too operator dependent (Ulery and Drees, 2008; Zhang et al., 2014). With the 1970s, digital image processing has been developed and used for quantitative micromorphology as it seems to be potentially superior over point counting in accuracy and speed of data extraction (Grove and Jerram, 2011). Image analysis methods moreover afford distinct advantages over conventional microscopic ones in that they can provide a range of previously unobtainable quantitative information including measurements of morphological aspects and spatial relationships of different soil components (Adderley et al., 2006; Bielders et al., 1996; Bruneau et al., 2004; Bryant and Davidson, 1996; Gargiulo et al., 2013; Taina and Heck, 2010).

While porosity has been studied extensively, and researchers have succeeded in characterizing and classifying pores according to different morphological attributes, only three studies deal with the characterization and quantification of clay coatings by image analysis (Protz and VandenBygaart, 1998; Terribile and Fitzpatrick, 1992, 1995). None of

these articles, however, proposes a detailed and quantitative characterization of illuvial clay features.

Due to technical difficulties during sampling and because manufacturing larger thin sections resulted in larger variations in thickness within single slides (Simpson et al., 2003), biological activity and illuviation have been generally quantified on small areas (e.g., 10 x 10 mm for Cassagne et al. (2008) or 10.7 x 6.4 mm for Bruneau et al. (2004)). Such sizes are in most cases smaller than the representative elementary areas (REA), leading to variability in the results (Bruneau et al., 2004). Some authors succeeded in quantifying porosity on larger images (70 x 50 mm for Hallaire et al. (1997) or 90 x 90 mm for Moran et al. (1988)) but they worked at a low resolution (90 to 176 μm per pixel), unsuitable for the study of a large part of the soil porosity and for most illuvial clay features. In order to have accurate and representative measurements, high resolution image mosaics covering a large contiguous area is required (Adderley et al., 2002; VandenBygaart and Protz, 1999).

In the work carried out to date, only a few authors have tried to validate their image analysis protocol. They have often compared their results with point counting ones (Aydemir et al., 2004; Bruneau et al., 2004; Grove and Jerram, 2011; Piron et al., 2012; Terribile and Fitzpatrick, 1995), whereas Protz et al. (1992) proposed direct visual assessment, and Terribile and Fitzpatrick (1992), a comparison with a reference image.

In that general context, the main objective of our study is to develop and validate a novel image analysis procedure in order to identify and quantify pores and illuvial clay features considered as diagnostic features of bioturbation and illuviation processes, respectively. The procedure is adapted to large thin sections (i.e., larger than the representative elementary area of the quantified parameters), and it is validated through an exhaustive accuracy assessment procedure commonly used in remote sensing studies (e.g., Laba et al., 2008), and recently adopted in the analysis of soil images (Baveye et al., 2010). The proposed procedure is used subsequently to i) determine the REA for porosity and illuvial clay features, ii) quantify the size and the shape of illuvial clay features, and finally iii) characterize the spatial variability of porosity and illuvial clay at the meter scale.

II. Materials and Methods

II.1. Study area, sampling and thin section preparation

The soil used in the research is classified as a Luvisol (WRB, 2014) of approximately 1.5 m depth that has developed on decarbonated quaternary loess deposits (more details in Sauzet et al., 2016). This Luvisol is under conventional agricultural management (CULT) with a maize–wheat crop succession and is part of the QualiAgro long-term field experiment located on the Plateau des Alluets (Yvelines, France). This soil presents the typical

horizonation of a Luvisol according to WRB (2014), namely: Ap E Bt C. The ploughed layer contains 14% clay, 79% silt, and 7% sand whereas the Bt horizon exhibits the diagnostic clay content increase and is composed of 31% clay, 64% silt, and 5% sand. After having dug a soil pit down to 2 m in CULT in April 2011, a 150 x 80 x 50 mm Kubiena box oriented vertically was used to extract an undisturbed soil sample in the core of the Bt-horizon (60-70 cm depth), to maximize diversity and to obtain a significant number of pores and illuvial clay features. This Kubiena box was oven-dried and impregnated under vacuum with polyester resin. After polymerization, three thin sections of 14 cm width x 6 cm depth, spaced 3 to 5-cm apart, and around 25- μ m thickness, hypothesized to be of a larger size than the representative elementary areas of pores and illuvial clay features, and called CULT 60-70 R1, CULT 60-70 R2, CULT 60-70 R3, respectively, were prepared following the procedures of Guillore (1985). In order to analyze the spatial variability of our measurements, three supplementary Kubiena boxes were taken laterally at regular 0.5 m intervals in the soil pit, and in each case one thin section was manufactured. These additional thin sections are labeled as CULT 60-70_0.5, CULT 60-70_1, and CULT 60-70_1.5.

II.2. Image acquisition

Each thin section was photographed under transmitted light by using an optical microscope Leica DM5500B with an automated stage, combined with a digital camera. The automation of the picture taking was achieved by using the dedicated Power Mosaic software (Leica Microsystems, Wetzlar, Germany). The whole procedure of mosaicing over a duration of twenty minutes allowed 576 pictures to be taken for each thin section.

Eventually, we obtained 6 images of 22024 x 9224 pixels with a spatial resolution of 5.3 μ m and with a color depth of 2^{24} (RGB, i.e., Red, Green and Blue bands). Images were cropped in order to avoid any edge effect. Final images have a size of 21725 x 8924 pixels, corresponding to an area of 5475 mm².

II.3. Image analysis procedure

II.3a) Porosity

As porosity clearly appears as contrasted areas in brightness, each RGB color image was transformed to a unique luminance band image (Fig. 1, 2a and 2b). The gray-level distributions obtained are bimodal, i.e., each image histogram is well structured by two well-defined peaks, related respectively to pore or solid space (Marschallinger, 1997). Automatic triangle thresholding (Fig. 1) was used to segment the image between voids and non-voids according to the typical bimodal configuration of the gray level histogram distribution (Zack et

al., 1977). A binary image was then obtained with voids defined as 1 and non voids defined as 0 (Fig. 2c). Then, in order to eliminate noise, quartz particles, and voids smaller than 45 μm while preserving thin cracks, an opening morphological operation with a circular structural element of 4 pixel radius was applied to binary images (Fig. 1). These two steps of RGB to luminance conversion and of automatic thresholding were processed using the Fiji software which is a distribution of imageJ (Schindelin et al., 2012). Finally, the objects were automatically vectorized and labeled using ArcGis 10.2.2[®] before a final size filtering of 100 μm Equivalent Pore Diameter (EPD). After this individualization and labelling step, each pore must be considered as a cross-section visible in the 2D images because poral network is studied on a plane section (Moran et al., 1988).

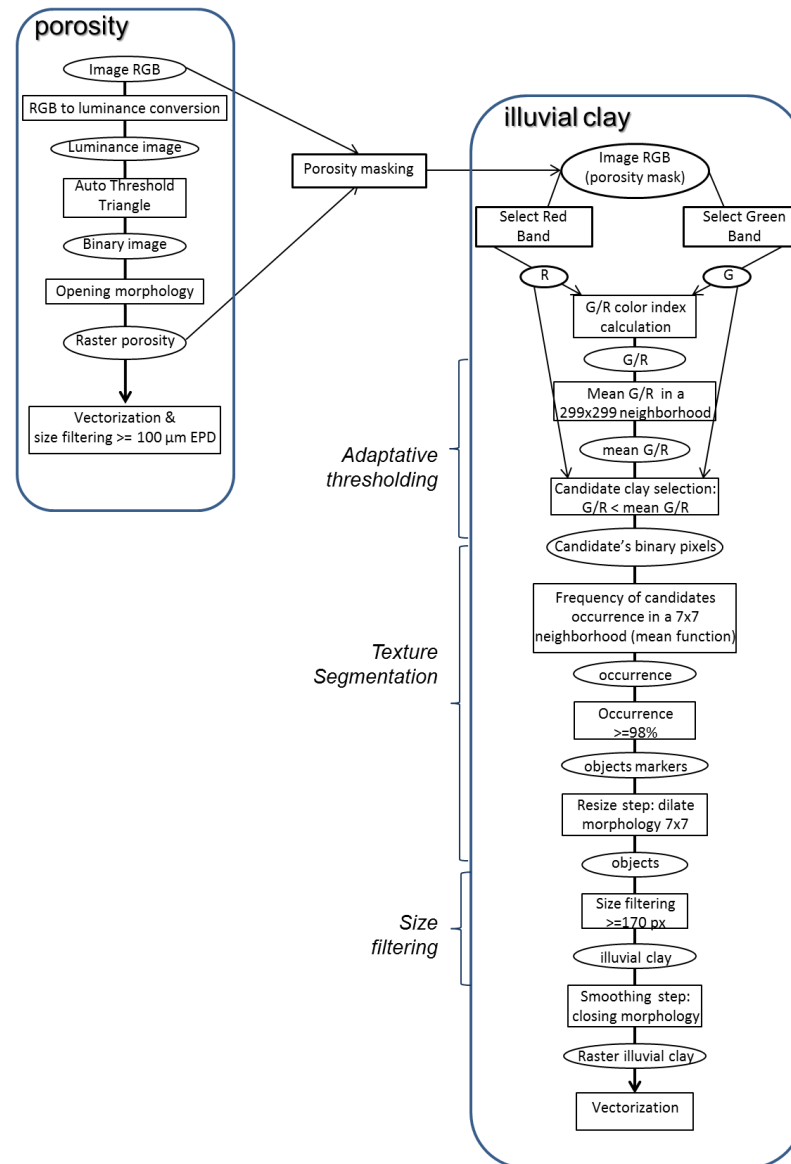


Figure III-1 : Flowchart of the protocol of porosity and illuvial clay extraction by image analysis in thin sections (rectangles: functions used; ovals: associated results).

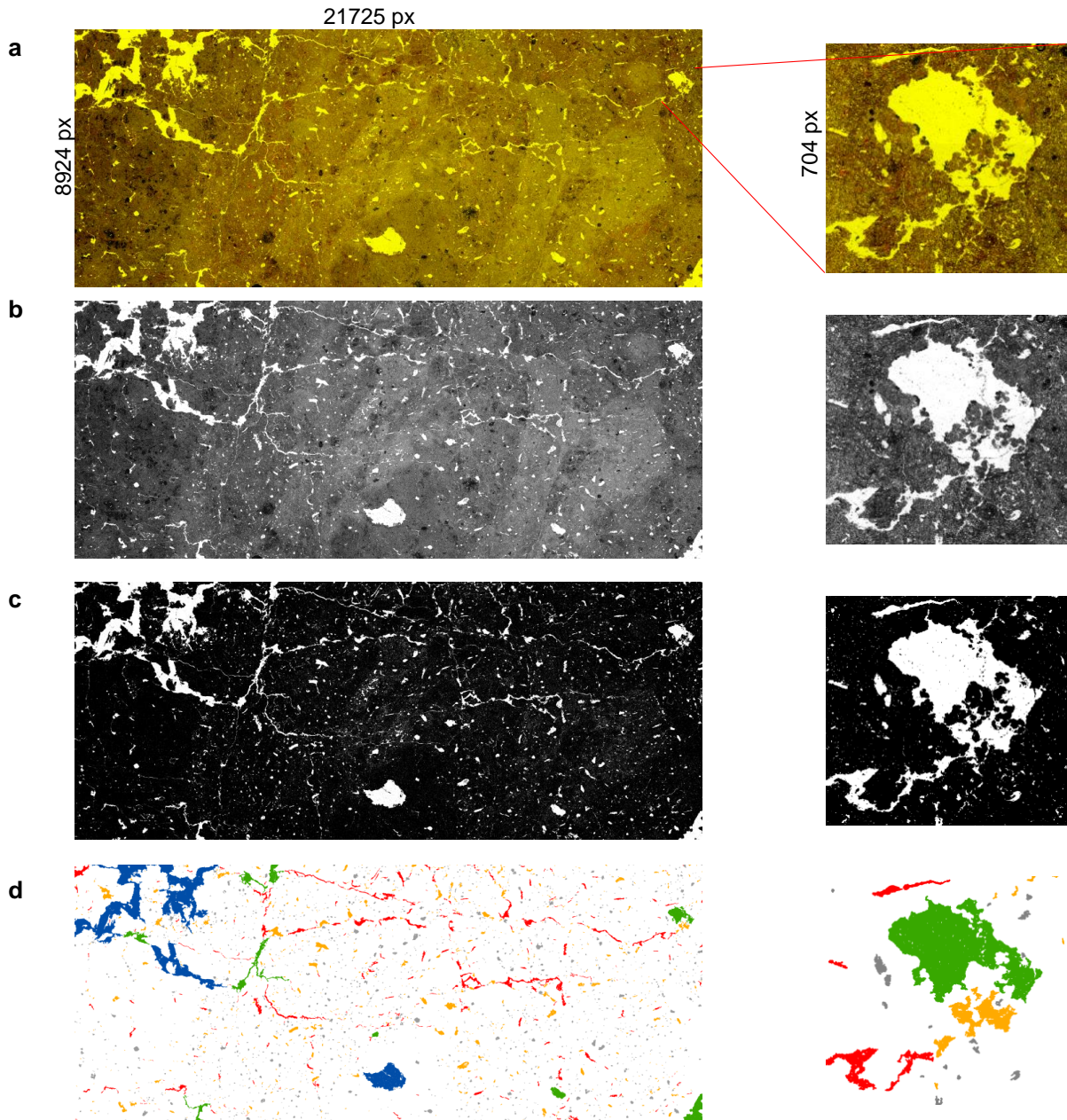


Figure III-2 : Main stages for porosity extraction on CULT 60-70 R1 and associated focus: (a) original image, (b) grayscale transform, (c) thresholded image, (d) final size filtered and classified image (gray: roots; orange: packing voids; red: cracks; green: endogeic burrows; blue: anecic burrows).

II.3b) Illuvial clay features

Illuvial clay features are micromorphologically distinguishable because in most cases the presence of iron oxides gives them a yellowish or reddish color (Kühn et al., 2010), and because they present a difference in grain size compared with the groundmass (Stoops and Vepraskas, 2003). However, as Miedema et al. (1983) pointed out, illuvial clay features may present a great diversity of color and morphological characteristics. Moreover, the color of illuvial features may be greatly affected by slide thickness and therefore the definition of thresholds needs to be carefully addressed if a segmentation based on color terms is to be

carried out (Adderley et al., 2002). A specific preliminary color analysis (Fig. 3) was thus performed to determine i) the spectral characteristics of illuvial features, and ii) how they are influenced by thickness variations in thin sections images.

Whereas pixels from pores show the highest red and green values, and pixels from the dark ferruginous nodules show the lowest red and green values, pixels of illuvial clay features are characterized by i) relatively low values on the green band, ii) relatively high values on the red band, and iii) hence low Green/Red (G/R) ratios (Fig. 3).

Even if the groundmass or other features such as ferruginous nodules also contain pixels with such a low G/R ratio (Fig. 3), only the illuvial clay features constitute homogeneous patches in a close neighborhood (plasmic concentration). Isolating illuvial clay features thus needs to take into account not only the color of a given pixel but also the color of the surrounding pixels, i.e., the feature texture.

An increase (respectively a decrease) in slide thickness induces a shift towards lower values (respectively higher values) on the red and on the green bands (Fig. 3). While illuvial clay is still characterized by homogeneous patches of pixels with a relatively low G/R ratio (Fig. 3), this ratio cannot any more be absolutely defined for the entire thin section but needs to be adapted to local variations in the thickness of the slide.

Taking into account these spectral and textural characteristics, an adaptive thresholding in a neighborhood of 299 x 299 pixel was first used to separate the pixels candidate for illuvial clay extraction from the others, according to their relatively low G/R ratio (Fig. 1). Then, a simple texture segmentation, based on first-order-statistics (occurrence frequency) in a neighborhood of 7 x 7 pixel enabled to identify a homogeneous texture indicative of illuvial clay features and consequently to extract the pixel candidates forming 7 x 7 patches from the others that were isolated (Fig. 1). A binary image was then obtained with illuvial clay defined as 1 and non-illuvial clay defined as 0 (Fig. 4b). Finally, overly small objects containing less than 170 contiguous pixels (i.e., 77 μm equivalent diameter) were eliminated and a closing morphological operation with a circular structural element of 2 pixel radius was applied on binary images to smooth the shape of the remaining objects (Fig. 1 and Fig. 4c).

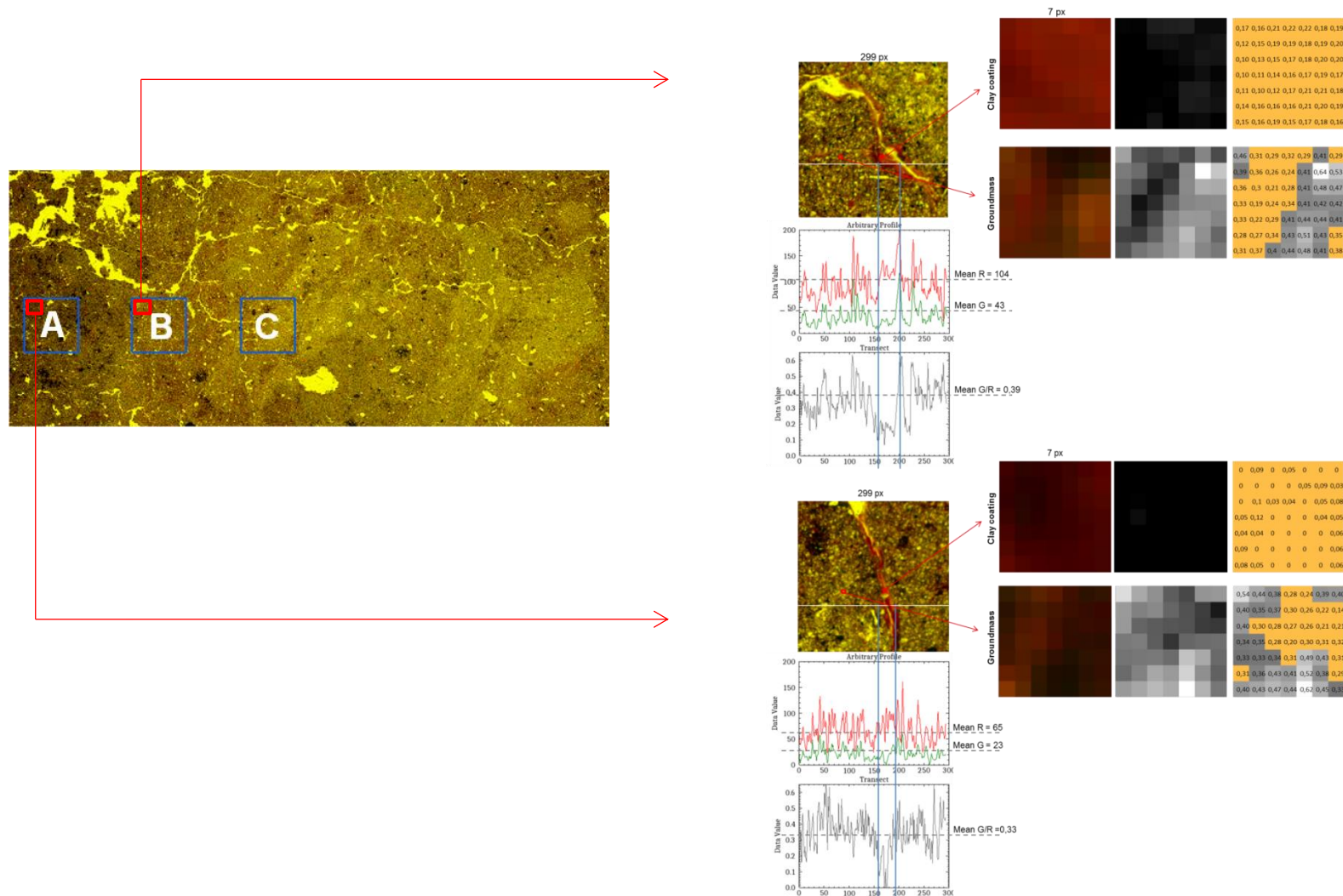


Figure III-3 : Spectral characterization of illuvial clay features at different scales; at the 7 x 7 px scale: RGB images, gray level images of the G/R ratio and pixels showing a G/R level lower than the mean G/R defined in a 299 x 299 px neighborhood (in orange); in the last images, numbers indicate the pixel G/R value; the three validation areas of 1883 x 1883 px are located on CULT 60-70 R1 (A: high thickness, B: medium thickness, C: low thickness)

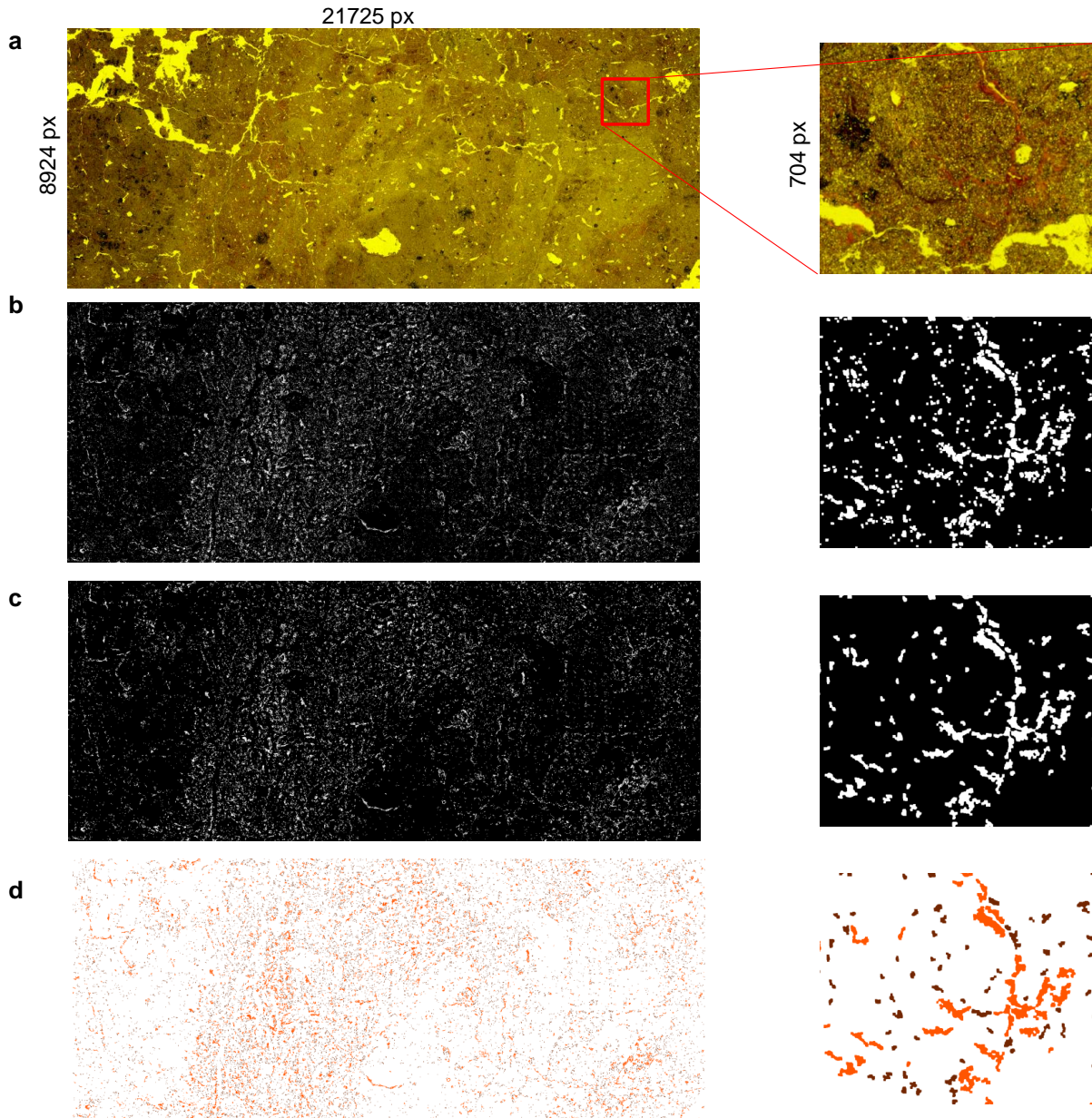


Figure III-4 : Main stages for illuvial clay extraction on CULT 60-70 R1 and associated focus: (a) original image, (b) illuvial clay binary image, (c) illuvial clay binary image after size filtering and smoothing, (d) classified image (brown: papules; orange: clay coatings/infillings).

II.4. Accuracy assessment procedure

In the case of porosity, 15 sub samples covering 1151 mm² in total were randomly chosen inside the CULT 60-70 R1 image, whereas for illuvial clay, 3 sub samples of 100 mm² each were isolated from areas of different thicknesses: high (A), medium (B) and low (C) (Fig. 3). On the original sub sample images, a micromorphologist delineated manually the objects of interest and the polygons obtained were overlayed on the polygons extracted with our image analysis procedure. The results were summarized in a confusion matrix, which provides a comparison between “micromorphologist observed” (in columns) and “image analysis predicted” (in rows) classes. The diagonal boxes correspond to matches (well

classified), whereas the off-diagonal boxes are mismatches. For each column, the ratio of the matches to the total area delineated by the micromorphologist represents the “producer's accuracy” (in %). It quantifies the proportion of the micromorphologist's image that was well identified by image analysis. For each row, the ratio of the matches to the total area classified by the image analysis procedure represents the “user's accuracy”. It quantifies the proportion of the digitally analyzed image that is included in the micromorphologist's image.

II.5. Description of porosity parameters and associated classification

At the image scale, we calculated the relative areal percentage of pores (%) and the number of pores per cm². At the pore scale, we collected the area (mm²), the Equivalent Pore Diameter (EPD in μm) and the shape factor (Sf), i.e., the ratio of the circumscribed circle area to the pore area.

Whereas this shape factor (equivalent to the inverse of roundness) is not commonly used in soil science morphological studies, it is widespread in remote sensing studies (Jiao and Liu, 2012) because it presents the following advantages : i) to be less sensitive to noise or resolution (Hubert et al., 2007; Russ, 2011) than shape factors based on perimeter characteristics like the circularity or the compactness factor used by Adderley et al. (2006), and ii) to permit direct comparison of the pore shape with a circle (a circular void has a small shape factor close to 1).

A morphological classification was established based on equivalent pore diameter and shape factor to create morphological subclasses of pores as presented in Table 1 and illustrated in Figure 2d. This classification gives us the possibility to differentiate biological pores from physical ones, and thereby to quantify bioturbation through an assessment of the intensity of burrowing activity. Thresholds were determined thanks to i) bibliographic references on earthworm morphology (Kooistra and Pulleman, 2010; Lamandé et al., 2003; Piron et al., 2012; Rasa et al., 2012), and ii) field sampling of earthworm community realized on CULT plot detailed in Ricci et al. (2015). This study underlined the presence of three earthworm species: one anecic species, *Lumbricus terrestris*, and two endogeic species, *Aporrectodea caliginosa* and *Allolobophora rosea*. The endogeic *Aporrectodea caliginosa* is the most abundant taxon in the soil profile under study. Pore size was first categorized into four size classes: small (100-1000 μm EPD), medium (1-2 mm EPD), large (2-5 mm EPD), and very large (≥5 mm EPD). Porosity due to earthworm activity is variable in shapes and of large sizes (≥2 mm EPD) as the body width is larger than 5 mm in diameter for *Lumbricus terrestris* and between 2 and 5 mm for *Aporrectodea caliginosa* and *Allolobophora rosea* (Bouché, 1972; Kooistra and Pulleman, 2010; Lamandé et al., 2003). We hypothesized that rounded pores with sizes ranging between 1 and 2 mm are linked with the activity of

endogeic earthworms because i) 1 mm corresponds to the smallest body earthworm width (Cooper et al., 2005), ii) burrows of such sizes were observed in silty soils by Sveistrup et al. (1997), iii) endogeic are more abundant than anecic in the CULT profile (Ricci et al., 2015), and finally iv) the studied soil has been under cultivation for several centuries so that only roots of small sizes (<1 mm EPD) are expected. For the small and medium pores, three shape classes are defined to distinguish between rounded ($Sf < 2.5$), irregular ($2.5 \leq Sf < 4$) and elongated pores ($Sf \geq 4$). Whereas pores created by roots are supposed to be mostly rounded (Rasa et al., 2012; Ringrose-Voase and Bullock, 1984; Thompson et al., 1990), packing pores tend to have irregular shapes, and cracks are generally elongated (Ringrose-Voase, 1996; Stoops and Vepraskas, 2003; VandenBygaart et al., 2000).

Size EPD Shape factor	100 μm-1 mm	1-2 mm	2-5 mm	>= 5 mm
Rounded SF < 2,5	ROOTS	ENDOGEIC		ANECIC
Irregular 2,5 =< SF < 4	PACKING			
Elongated SF >= 4	CRACKS			

Tableau III-1 : Morphological subclasses of pores based on equivalent pore diameter and shape factor.

Size (equivalent diameter)	77 μ m-200 μ m	≥ 200 μ m
Distance to pores		
0	CLAY COATINGS/INFILLINGS	CLAY COATINGS/INFILLINGS
>0	PAPULES	CLAY COATINGS/INFILLINGS

Tableau III-2 : Morphological subclasses of illuvial clay based on size (equivalent diameter) and distance to pores.

II.6. Description of illuvial clay parameters and associated classification

At the scale of the image, we calculated the relative areal percentage of illuvial clay features (%) and the number of objects per cm^2 . At the object scale, we computed the area (mm^2), the equivalent diameter (μm), the shape factor (Sf, ratio of circumscribed circle surface to object surface), and the distance to the closest pore.

A classification was established based on size and distance to pores to create morphological subclasses of illuvial clay as presented in Table 2 and illustrated in Figure 4d. This classification affords the opportunity to differentiate undisturbed clay coatings and infillings from fragments of clay coatings called papules (Brewer, 1964) redistributed by bioturbation (Sauzet et al., 2016). Papules are indeed said to be small ($< 200 \mu\text{m}$ equivalent diameter) and incorporated in the groundmass (Miedema et al., 1983), i.e., without relation to porosity.

II.7. Representative elementary area estimation

In order to know the minimum area required to represent the areal percentages of pedofeatures of interest, we carried out an evaluation of the representative elementary area (REA). REA is a 2D variant of the representative elementary volume (REV) concept first used by Bear (1972). Several authors over the years have argued, and in some cases shown experimentally, that an REV in the deterministic sense of Bear (1972) may not always exist in soils (Baveye et al., 2002). In the following, a statistical definition of the REA is used as measurements are performed at different locations in a certain area (Zhang et al., 2000).

In that context, the REA is the smallest area within a 2D cut or image of a soil sample that needs to be considered to obtain a consistent value of the measurement of a given parameter in this sample (Ferreira et al., 2015). For the CULT 60-70 R1 image, we selected six initial square areas of $0.15 \text{ mm} \times 0.15 \text{ mm}$. Three of them were centered in the features of interest, i.e., porosity or illuvial clay, and three other were centered outside the features of interest. We measured the porosity or illuvial clay areal percentage within windows of increasing size beginning with the initial areas of $0.15 \text{ mm} \times 0.15 \text{ mm}$ previously selected. At each step, the size of the test window was increased by 2 mm on every side if possible. The REA is defined in our study as the size beyond which the coefficient of variation of our measurements stays beneath 5%. The same procedure was applied to determine the REA of the different classes of pores, papules and clay coatings/infillings.

III. Results and discussion

III.1. Assessment of the image analysis procedure

With accuracies greater than 85%, our image analysis procedure correctly identifies porosity (Table 3). While user's accuracy is very high (96%) indicating that our image analysis procedure does not confuse pores with other types of features, the 85% producer's accuracy suggests that our image analysis procedure forgets some voids and tends to underestimate the porosity in comparison with the micromorphologist's observation. This

phenomenon appears to be essentially due to the size-filtering of pores smaller than 100 μm EPD and to the misidentification and disconnection of elongated cracks (Fig. 5a).

		Micromorphologist		
		Pores	Non pores	Total
Image analysis class	Pores	92	4	96
	Non pores	16	1039	1055
	Total	108	1043	1151
	Producer's Accuracy (%)	85		

Tableau III-3 : Confusion matrix derived from the porosity extraction (mm^2).

		Micromorphologist		
		Illuvial clay	Non-illuvial clay	Total
Image analysis class	Illuvial clay	4,48	1,84	6,31
	Non illuvial clay	1,69	92,00	93,69
	Total	6,17	93,83	100,00
	Producer's Accuracy (%)	73		

Tableau III-4 : Confusion matrix derived from illuvial clay extraction – validation area B (mm^2).

		Micromorphologist		
		Illuvial clay	Non-illuvial clay	Total
Image analysis class	Illuvial clay	5,79	0,52	6,31
	Non illuvial clay	1,13	92,55	93,69
	Total	6,93	93,07	100,00
	Producer's Accuracy (%)	84		

Tableau III-5 : Confusion matrix derived from illuvial clay extraction without border interactions - validation area B (mm^2).

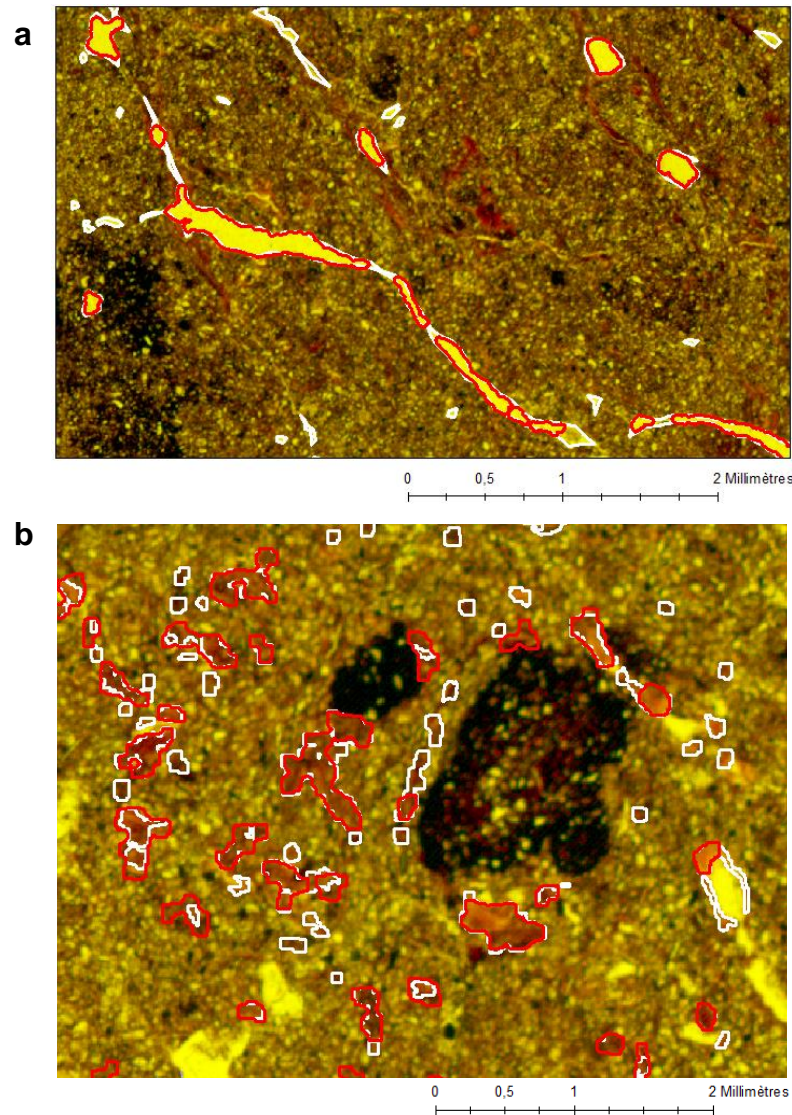


Figure III-5 : Micromorphologist outlinings (in white) under image analysis results (in red) for (a) porosity and for (b) illuvial clay in the validation area B.

Considering the B validation area of medium thickness (Fig. 3), the extraction of illuvial clay appears to be satisfactory (Table 4) with accuracies higher than 70%. The misidentifications are essentially due to several very thin clay coatings ($<77 \mu\text{m}$ equivalent diameter, voluntary size filtered) or illuvial clay features with unexpected spectral characteristics, such as very dusty/dark brown or very limpid/yellowish-white ones, which are missing in the image analysis results (Fig. 5b). Furthermore, some borders of ferruginous nodules and minor plasmic concentrations are wrongly classified as illuvial clay (Fig. 5b). Finally, the accuracy assessment results are clearly affected by the manual delineation of the boundaries of features by the micromorphologist during the validation procedure. When the confusion matrix presented in Table 4 is computed without considering these border interactions, results concerning illuvial clay extraction are more satisfactory with a producer's accuracy of 84% and a user's accuracy of 92% (Table 5). This is in line with the conclusion

reached by Russ (2011), according to whom reliance on manual outlining is indeed generally unacceptable while thresholding and subsequent morphological processing may also affect pixels along the boundaries of the features. Finally, the image analysis procedure proposed in this article tends to underestimate illuvial clay in comparison with the micromorphologist observation in areas of medium thickness.

Considering the A and C validation areas located respectively in a thicker and a thinner part of the CULT 60-70 R1 thin section (Fig. 3), we obtained in both cases high producer's accuracies indicating that our image analysis procedure succeeded in identifying almost the totality of illuvial features (Tables 6 and 7). As user's accuracies are around 70% (65% and 72% respectively), it seems likely that in these areas, our image analysis procedure tends to overestimate the areal percentage of illuvial clay due to less contrasted pixels. In spite of these discrepancies, our image analysis procedure stays valid whatever the areas considered in our large thin sections.

		<i>Micromorphologist</i>			User's accuracy (%)
		Illuvial clay	Non-illuvial clay	Total	
Image analysis class	Illuvial clay	1,64	0,87	2,51	65
	Non illuvial clay	0,17	97,32	97,49	
	Total	1,81	98,19	100,00	
	Producer's Accuracy (%)	91			

Tableau III-6 : Confusion matrix derived from illuvial clay extraction without border interactions - validation area A (mm²).

		<i>Micromorphologist</i>			User's accuracy (%)
		Illuvial clay	Non-illuvial clay	Total	
Image analysis class	Illuvial clay	6,70	2,58	9,28	72
	Non illuvial clay	0,17	90,55	90,72	
	Total	6,87	93,13	100,00	
	Producer's Accuracy (%)	98			

Tableau III-7 : Confusion matrix derived from illuvial clay extraction without border interactions - validation area C (mm²).

III.2. REA report

As a stabilization level can systematically be found for the areal percentage of all the parameters of interest, our images of 5475 mm² appear to be larger than the REAs and thus of sufficient size to insure that our quantitative measurements are representative (Fig. 6). The REA for total macroporosity is reached at 4654 mm². VandenBygaart and Protz (1999) obtained a smaller average REA of 673 mm² for total void area of pores between 0.5 and 2 mm EPD in silt loam agricultural soils of southern Ontario. The fact that we have quantified pores larger than 2 mm EPD is undoubtedly responsible for our resulting larger REA. "The larger the individual pedofeature, the larger the area required for a REA" according to VandenBygaart and Protz (1999). This is confirmed in our study by the fact that REAs for endogeic and anecic porosity (5465 mm² and 5311 mm² respectively) are greater than the cracks (4277 mm²), packing (2568 mm²), and roots ones (909 mm²). For total illuvial clay and clay coatings/infillings, REA was reached at 2318 mm² and 2542 mm² respectively. To our knowledge, no study has dealt with REAs for illuvial clay features but as a comparison, O'Donnell et al. (2011) obtained REAs comprised between 1770 mm² and 2540 mm² for parameters describing soil redoximorphic features. Papules have the smallest REA encountered in this study (i.e., 684 mm²), which is in accordance with their small sizes.

Therefore, the size of soil sample blocks and the associated analyzed image area must be chosen appropriately according to the kind of features to be quantified. The following rules can be followed: i) areas lower than 1000 mm² (i.e., at least 3 x 3 cm) are large enough to quantify papules and roots, ii) areas around 2500 mm² (i.e., at least 6 x 4 cm) are adequate for clay coatings/infillings and packing voids quantification, and iii) areas ranging from 4000 mm² (i.e., at least 6 x 6 cm) to more than 5000 mm² (i.e., 10 x 5 cm) are necessary to quantify cracks and areal percentages of earthworm burrows. Seldom studies in the past have worked on surfaces larger than 1000 mm² with resolutions of some tens of squared micrometers (see for example Bryk (2016), Costantini et al. (2006), Gargiulo et al. (2013), Hubert et al. (2007), Jangorzo et al. (2013)) so that, in light of our results, it is likely that the analyzed images were of an insufficient size for most of the features of interest. This is particularly the case for previous quantitative studies of illuvial clay features (McKeague et al., 1980; Murphy, 1983) which were based on 2.5 x 2.5 cm areas (i.e., 625 mm²). In light of these results, the use of large thin sections (at least 10 x 5 cm) seems to be mandatory to quantify areal percentages and to characterize morphological attributes of pores and clay coatings/infillings.

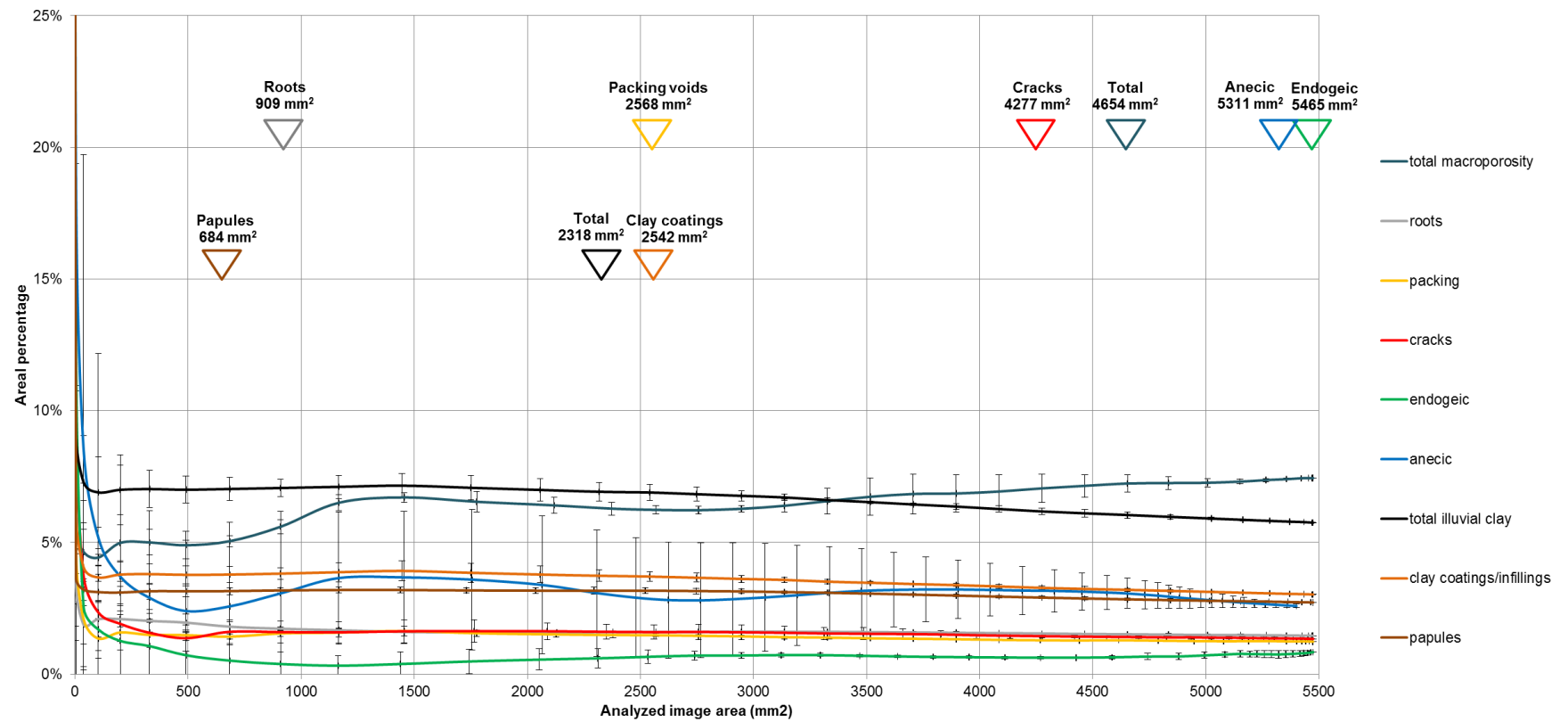


Figure III-6 : Evolution of the areal percentages of the pedofeatures of interest in CULT 60-70 R1 as a function of the increasing analyzed area of the image; triangles indicate the size of the REAs.

III.3. Porosity results

Pore size distribution is characterized by a very high number of small pores of 100 to 500 μm EPD and only a few pores larger than 1 mm EPD, for a 163 μm median EPD (Fig. 7a). Most of the small pores are rounded (Fig. 7a) and have a 161 μm median EPD. This median size is in a very good agreement with the classification of the small and rounded pores as roots because wheat is said to develop roots in the size range of 100-400 μm diameter and modal class for maize roots is between 100-200 μm in diameter (VandenBygaart et al., 1999). With a 175 μm median EPD, packing voids are slightly larger and characteristic of the crumb to vughy microstructure observed in thin sections (Sauzet et al., 2016). Cracks are more variable in size than roots or packing voids even if they belong to the same size class (Fig. 8a) maybe due to the disconnection of the cracks during our image analysis procedure. Whereas the sizes of the two observed endogeic species vary between 2 to 3.5 mm for *Allolobophora rosea* and between 3.5 to 4.5 mm for *Apporectodea caliginosa*, (Bouché, 1972), the median EPD of pores attributed to endogeic earthworms is equal to 2.35 mm (Fig. 8a), probably due to the influence of endogeic or anecic juvenile organisms or to partial refilling of burrows with casts. Finally, anecic pores appear to have a maximum size of 10 mm EPD, in accordance with literature data (Pelosi, 2008). As the size of the pores increases, the relative abundance of the elongated and to a lower extent the rounded pores increases at the expense of the irregular ones until complete disappearance for sizes larger than 5 mm EPD (Fig. 7a). Such elongated, respectively rounded, shapes for sizes larger than 5 mm EPD are coherent with longitudinal, respectively transversal, cuts through anecic earthworms burrows on vertically oriented thin sections.

Global measurements of porosity in the CULT 60-70 R1, CULT 60-70 R2 and CULT 60-70 R3 images suggest that with a total macroporosity of 8.4% and 72 pores per cm^2 , the mean area of pores obtained in this study is 0.12 mm^2 (Table 8). While porosity due to anecic activity is the major contribution to the total areal percentage, roots contribute mostly to the total number of pores per cm^2 . By quantifying macropores ($>21.17 \mu\text{m}$ EPD) with a resolution of 21.17 μm , Bryk (2016) obtained a macroporosity of 5.3 % with a density of 156 pores per cm^2 and a mean area of 0.036 mm^2 for a Bt horizon of a Haplic Luvisol located under a deciduous forest in south eastern Poland. Their results may be due to the fact that they worked in a forested area with more abundant small pores of roots than in a cultivated one as in our present study.

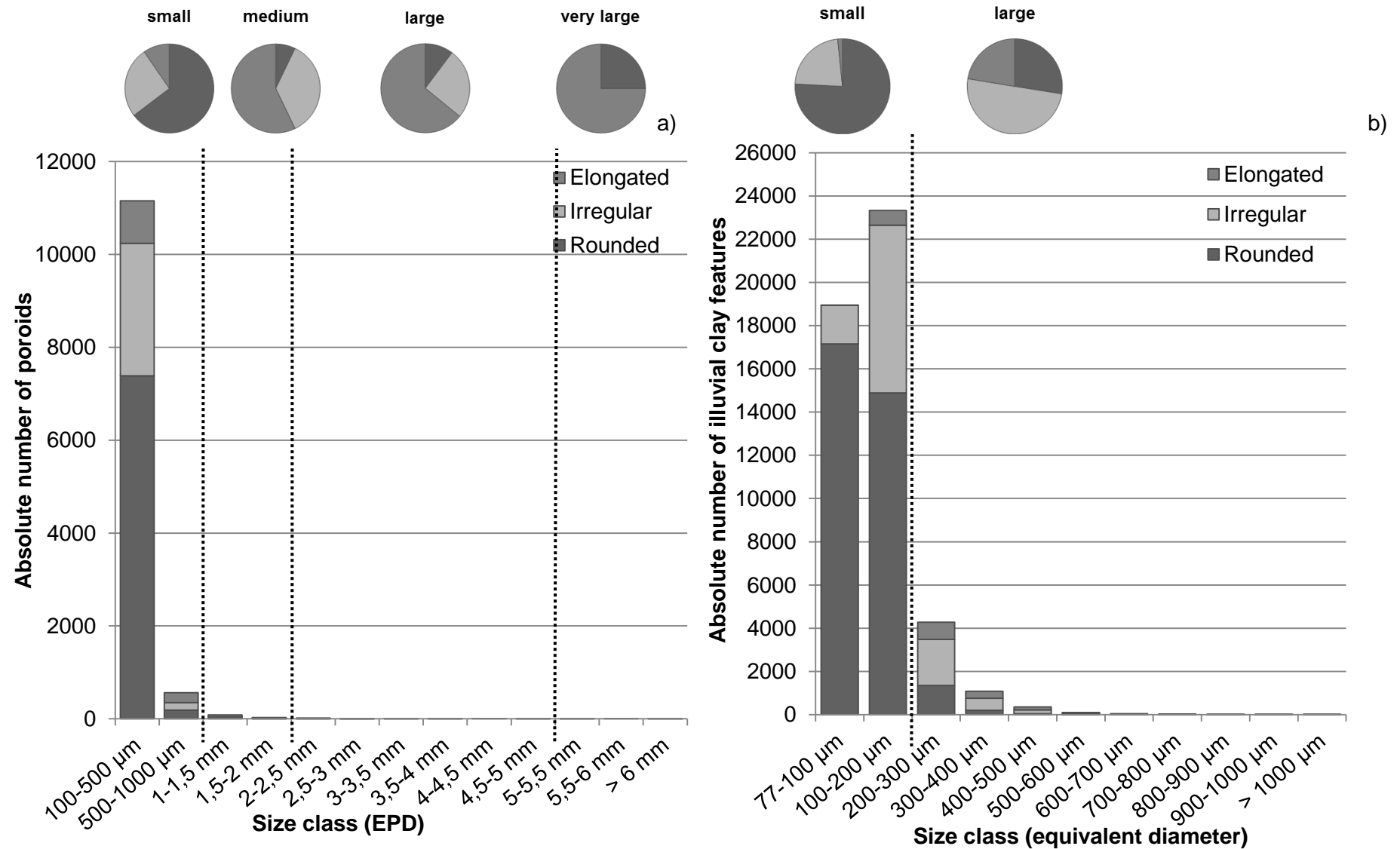


Figure III-7 : Absolute and relative number of (a) pores and (b) illuvial clay features according to shape and size class ; based on CULT 60-70 R1, CULT 60-70 R2 and CULT 60-70 R3 data.

		Porosity						Illuvial clay	
		Roots	Packing voids	Cracks	Endogeic	Anecic	Total	Papules	Clay coatings/ infillings
Total area (%)	CULT_60_70_R1	1,5%	1,2%	1,3%	0,8%	2,6%	7,4%	2,7%	3,0%
	CULT_60_70_R2	1,9%	1,5%	1,7%	2,4%	1,2%	8,7%	2,5%	2,9%
	CULT_60_70_R3	1,7%	1,3%	1,3%	1,9%	3,0%	9,2%	2,1%	2,4%
	Mean	1,7%	1,3%	1,5%	1,7%	2,2%	8,4%	2,4%	2,8%
	Range	[1,5-1,9]	[1,2-1,5]	[1,3-1,7]	[0,8-2,4]	[1,2-3,0]	[7,4-9,2]	[2,1-2,7]	[2,4-3,0]
	CV	14%	8%	18%	46%	43%	11%	12%	13%
Number per cm ²	CULT_60_70_R1	37,9	14,5	5,7	0,16	0,05	58,4	256,4	68,3
	CULT_60_70_R2	53,8	21,0	8,9	0,33	0,04	84,1	229,1	64,0
	CULT_60_70_R3	46,7	20,2	7,1	0,37	0,05	74,4	202,7	58,8
	Mean	46,1	18,6	7,2	0,29	0,05	72,3	229,4	63,7
	Range	[37,9-53,8]	[14,5-21,0]	[5,7-8,9]	[0,16-0,37]	[0,04-0,05]	[58,4-84,1]	[202,7-256,4]	[58,8-68,3]
	CV	17%	19%	22%	37%	22%	18%	12%	8%

Tableau III-8 : Porosity and illuvial clay areal percentages and number per cm² at a centimetric scale - mean, range and coefficient of variation (CV) were calculated using CULT 60-70 R1, CULT 60-70 R2 and CULT 60-70 R3 (n=3).

III.4. Illuvial clay results

Size distribution presents a positive skewness with a high number of small features and fewer larger ones for a 110 μm median equivalent diameter and a mean density of 293 illuvial clay features per cm^{-2} (Table 8 and Fig. 7b).

Whereas the size distribution of papules is relatively narrowed around its median value (103 μm equivalent diameter), the size of clay coatings/infillings is highly variable as it may be as high as 1.47 mm equivalent diameter, with a median size of 209 μm (Fig. 8a). This is in line with data collected in descriptive micromorphological studies, for example by Kemp (1998), who reported 100-1000 μm thick clay coatings along fissures. This higher spread of clay coatings/infillings sizes may be due to areas of preferential illuvial clay deposition leading to irregular clustering as was already observed by Dalrymple and Theocharopoulos (1987). While clay coatings show a median shape factor of 2.6 but very varied shapes from almost rounded to clearly elongated, papules are more rounded as their median shape factor is 2.1 (Fig. 7b and Fig. 8b). This rounded shape of papules was already noticed by Kemp (1998) and Brewer (1964), the latter characterizing these objects as “equant to prolate”.

With a mean of 5.2% of illuvial clay areal percentage (Table 8), our result is in accordance with those obtained by various authors who reported between 5% to 12% for Luvisols in temperate regions (Faivre and Chamarro, 1995; Jongmans et al., 1991; McKeague et al., 1980; Miedema and Slager, 1972). Among the 48146 objects analyzed, papules are the most frequent (78% of the total number of objects per cm^2). Total illuvial clay areal percentage is equally shared between papules and clay coatings/infillings classes. These data may be used to compute the degree of reworking and redistribution of the illuvial clay previously deposited as defined by Miedema and Slager (1972). With a 50% degree of reworking, our Bt horizon presents a moderate degree (Miedema and Slager, 1972).

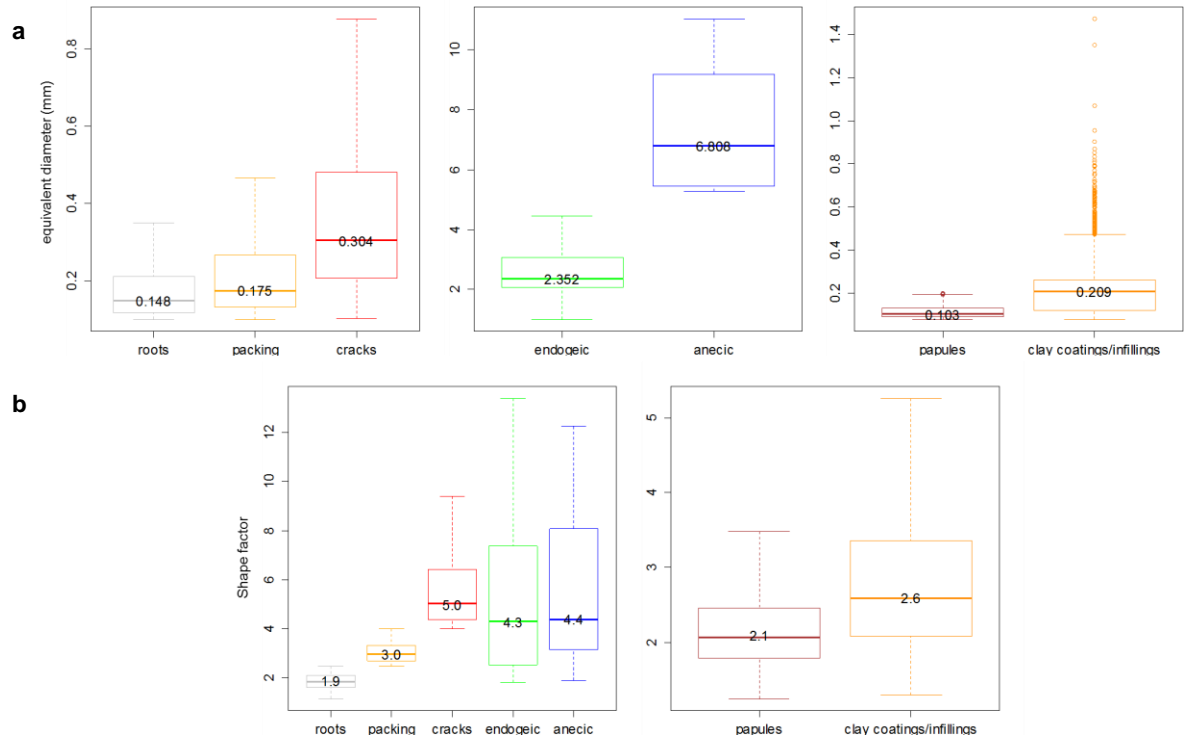


Figure III-8 : Pores and illuvial clay features characterization based on CULT 60-70 R1, CULT 60-70 R2 and CULT 60-70 R3 data : (a) median and associated boxplots for size (in EPD or equivalent diameter (mm)); (b) median and associated boxplots for shape factor (Sf).

III.5. Lateral variability at a metric scale

Mean values obtained with samples collected at a metric scale (Table 9) are close to the ones obtained at a centimetric scale (Table 8) for roots, packings voids, cracks and illuvial clay features. Furthermore, all classes, including endogeic and anecic pores, present one or several values inside the range observed at a centimetric scale. These results confirm that with three measures collected at a centimetric scale, a mean value representative of the metric scale can be obtained for the parameters under study.

Variability at the metric scale appears to be systematically greater than the one obtained at a centimetric scale as shown by extreme values at a metric scale that are out of the range obtained at a centimetric scale. This observation suggests that the centimetric scale is not able to catch the whole variability observed at a metric scale. Such results are in accordance with Skvortsova (2015), who observed a high spatial variability of soil pores within 4 m long soil trenches. In our study, variability is more pronounced for earthworm porosity and this may be explained by the fact that the associated pores i) were initially not defined through shape characteristics, which are considered as quite stable at a metric scale (Skvortsova et al., 2015), and ii) have higher REAs requirements due to even distributed burrows and aestivation chambers observed at the studied depth. Whatever its degree, this variability does not seem to be linked with any spatial gradient as extreme values are

observed in the closest thin sections (CULT 60-70_0.5 and CULT 60-70_1) but not in the farthest (CULT 60-70_1.5).

Finally, by sampling replicates at a centimetric scale, the quantified properties are representative of the horizon under study even if the whole metric intrahorizon variability cannot be entirely measured at this scale. As it has already been suggested by various authors (Puentes et al., 1992; Thompson et al., 1992; Ulery and Drees, 2008), replicates have to be considered during sampling design by extracting several blocks per horizon and producing at least 3 thin sections per block.

		Porosity						Illuvial clay		
		Roots	Packing voids	Cracks	Endogeic	Anecic	Total	Papules	Clay coatings/ infillings	Total
Total area (%)	CULT 60-70 0.5D	1,4%	1,0%	1,1%	0,2%	0,0%	3,7%	3,1%	2,9%	6,1%
	CULT 60-70 1D	2,6%	1,7%	1,3%	0,9%	1,0%	7,5%	2,1%	2,1%	4,1%
	CULT 60-70 1.5D	1,2%	1,1%	1,2%	0,6%	0,0%	4,2%	2,7%	1,9%	4,7%
	Mean	1,7%	1,3%	1,2%	0,6%	0,3%	5,1%	2,6%	2,3%	5,0%
	Range	[1,2-2,6]	[1,0-1,7]	[1,1-1,3]	[0,2-0,9]	[0,0-1,0]	[3,7-7,5]	[2,1-3,1]	[1,9-2,9]	[4,1-6,1]
	CV	43%	27%	11%	65%	173%	40%	20%	23%	20%
Number per cm²	CULT 60-70 0.5D	37,7	16,6	6,2	0,07	0,00	60,5	292,4	64,7	357,1
	CULT 60-70 1D	63,7	24,1	7,2	0,18	0,04	95,3	191,1	45,6	236,8
	CULT 60-70 1.5D	34,0	15,6	6,8	0,21	0,00	56,6	260,8	48,1	308,9
	Mean	45,1	18,8	6,8	0,15	0,01	70,8	248,1	52,8	300,9
	Range	[34,0-63,7]	[15,6-24,1]	[6,2-7,2]	[0,07-0,21]	[0,00-0,04]	[56,6-95,3]	[191,1-292,4]	[45,6-64,7]	[236,8-357,1]
	CV	36%	25%	7%	46%	173%	30%	21%	20%	20%

Tableau III-9 : Porosity and illuvial clay areal percentages and number per cm² at a metric scale - mean, range and coefficient of variation (CV) were calculated using CULT 60-70_0.5, CULT 60-70_1 and CULT 60-70_1.5 (n=3).

IV. Conclusion

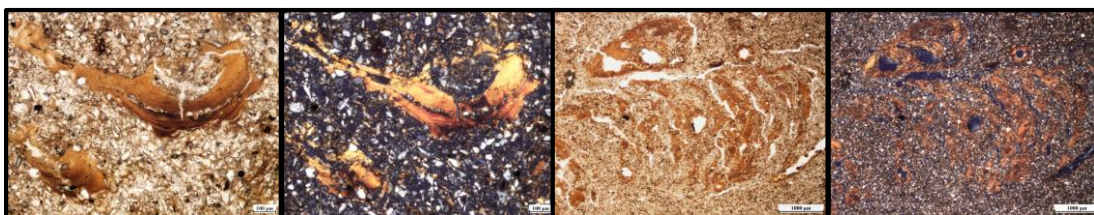
As shown by REA determinations, only large thin sections (14 x 6 cm) as the ones we used in this study are large enough to be representative of the porosity and illuvial clay areal percentages. The natural soil organization and spatial variability on such large sizes forces to develop a new image analysis procedure that cannot simply rely on a global colorimetric approach when illuvial clay features are concerned. However, by considering the different scales and levels of organization of the soil and by carefully validating the digital procedure, we succeeded in accurately quantifying and characterizing the porosity and illuvial clay features on images of large thin sections.

Accessing the size and the shape of the pores and of the illuvial clay features makes it possible i) to develop morphological classifications of porosity distinguishing pores with a biological origin (earthworms or roots) from the others, or the so-called papules from clay coatings and infillings, and ii) to propose the first exhaustive quantification of morphological attributes of illuvial clay features. We have seen for example that papules represent almost three third of the total number but only half of the total area of illuvial clay features. The quantification of rare but very large clay coatings or infillings clearly demonstrates the existence of preferential illuvial clay deposition areas, illustrating the usefulness of morphological data to better understand underlying soil processes. While quantifications in large thin sections from a unique soil box do not permit to catch the whole metric intrahorizon variability of the abundance or the density of pores and illuvial clay features, we demonstrated that metric mean values are thus reasonably well assessed as long as REA requirements are met. Further research could focus on generalizing our methodological approach to quantify bioturbation and illuviation process intensities at the profile scale, and then to different soil profiles. This would pave the way to quantify the intensity of bioturbation and illuviation, and the associated influence of global changes on the dynamic of soil processes.

Acknowledgments

This research was conducted in the framework of the Agriped project (ANR-10-BLANC-605), which was supported by the French National Research Agency (ANR). The authors gratefully acknowledge Pierre Fristot for the helpful discussions during the early stages of this project and the considerable involvement in the computing process. We also thank Philippe Cambier for providing editorial comments and Philippe Baveye for English revision of this article.

**CHAPITRE IV - QUANTIFICATION DE L'INTENSITE DES
PROCESSUS DE TRANSFERT PAR BIOTURBATION ET
ILLUVIATION DANS UN LUVISOL CULTIVE**



I. Introduction

Dans ce chapitre, nous proposons de généraliser à l'ensemble du profil cultivé CULT la quantification de la porosité et des traits illuviaux par analyse d'images dans l'objectif de quantifier les flux de matière associés aux deux processus de bioturbation et d'illuviation.

Les mesures exhaustives de la surface des traits illuviaux par analyse d'images permettront de préciser et de compléter les premiers résultats obtenus par comptage au point (chapitre II).

Les flux de matière associés au processus de bioturbation seront quant à eux estimés à partir de la détermination du volume puis de la masse de sol remaniés par les vers de terre considérés comme les principaux agents de la bioturbation en climat tempéré (Bastardie et al., 2003; Gobat et al., 2004). Nous avons vu précédemment que les remaniements d'origine lombricienne se traduisent par une diversité de marqueurs pédologiques puisque ces organismes ont la capacité i) de se déplacer dans le sol en créant et en maintenant de la porosité (galeries et chambres d'estivation), et ii) de produire des déjections organo-minérales intégrées dans le sol (Kooistra and Pulleman, 2010). La quantification des flux de matière liés à la création et à l'entretien de porosité reposera sur l'identification et la quantification des pores associées à l'activité des vers de terre (Bastardie et al., 2003; Hallaire et al., 2004; Peres et al., 2010). Etant donné que les déjections de vers de terre correspondent à une redistribution de la matière solide interne au sol, nous proposons d'estimer ce brassage à partir de la redistribution des revêtements argileux sous forme de papules (Miedema and Slager, 1972). Une telle approche sera limitée aux horizons contenant des revêtements argileux susceptibles d'être redistribués et donc principalement aux horizons BT.

La quantification simultanée des flux de matière par illuviation d'une part et par bioturbation d'autre part permettra de comparer puis de hiérarchiser l'importance relative des processus de bioturbation et d'illuviation et ainsi d'évaluer la capacité de la bioturbation et de ses flux majoritairement ascendants à compenser les flux descendants associés à l'éluviation/illuviation (Faivre and Chamarro, 1995; Phillips, 2007). De plus, disposant pour le même sol de la localisation et des caractéristiques des pores et des traits illuviaux, il devient possible de caractériser les relations entre le système poral et l'illuviation. Nous chercherons en particulier à tester l'hypothèse d'une sélectivité du processus d'illuviation par rapport à une ou plusieurs catégories de pores.

II. Matériel et Méthodes

II.1. *Identification des pores revêtus et calcul d'un taux de remplissage*

Dans les chapitres II et III, nous avons différencié les traits illuviaux en place, appelés revêtements argileux (Fig. IV-1 et 2), des traits illuviaux redistribués et fragmentés, appelés papules (Fig. IV-3). On cherchera dans ce chapitre à distinguer au sein de l'ensemble des revêtements argileux:

- les revêtements connectés à un pore (Fig. IV-1) dont la genèse peut en première approximation être associée au fonctionnement particulier du pore dans lequel le revêtement est identifié et ;
- les revêtements déconnectés de tout pore (Fig. IV-1) dont la genèse peut s'interpréter comme le résultat d'une dynamique temporelle différenciée des pores d'une part et des revêtements argileux d'autre part.

Ainsi, un revêtement sera considéré comme déconnecté (Fig. IV-1) lorsque qu'il présente: i) un diamètre équivalent supérieur ou égal à 200 μm , et ii) une distance aux pores environnants non nulle (Tableau IV-1).

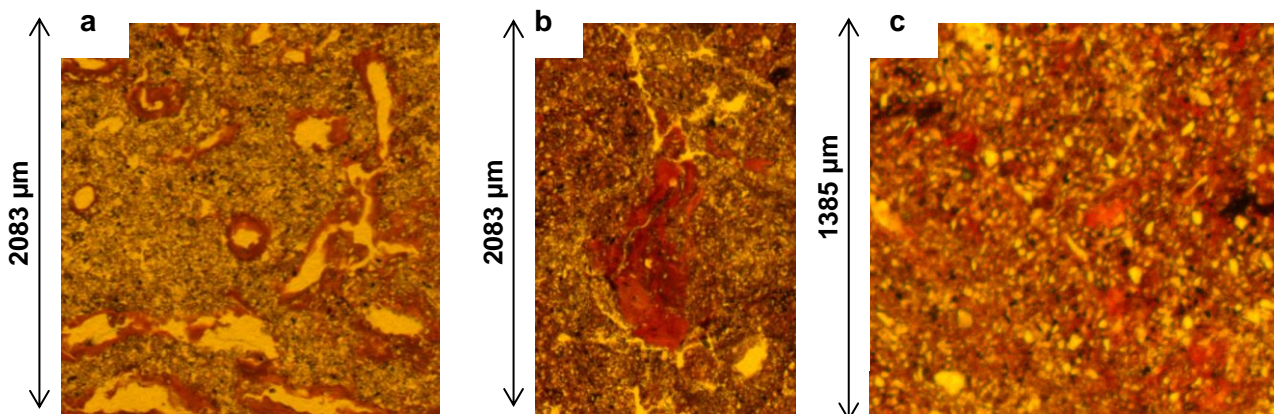


Figure IV-1: a- Revêtements argileux connectés à la porosité (CULT 90-100 R3) ; b- Revêtement argileux déconnecté de la porosité (CULT 60-70 R2) ; c- Papules (CULT 60-70 R1).

Taille (diamètre équivalent) Distance aux pores	77 μm -200 μm	$\geq 200 \mu\text{m}$
Nulle	Revêtements connectés	Revêtements connectés
Non nulle	Papules	Revêtements déconnectés

Tableau IV-1: Typologie des traits illuviaux.

Un taux de remplissage a alors été calculé (Eq. 1, Fig. IV-2) pour chacun des pores revêtus i en contact avec au moins un revêtement à l'aide de l'équation 1 :

$$TR_i = \frac{\sum_{k=1}^{n_i} Sr_k}{\sum_{k=1}^{n_i} Sr_k + Sp_i} \quad \text{Eq. 1}$$

Avec TR_i le taux surfacique de remplissage en % du pore i ; Sp_i la surface en mm^2 du pore i ; n_i le nombre de revêtements connectés au pore i et Sr_k la surface en mm^2 du $k^{\text{ième}}$ revêtement connecté au pore i . Ainsi, la surface de revêtements comblant le pore A est calculée comme la somme de la surface des revêtements 1, 2 et 3 (Fig. IV-2) et celle comblant le pore B comme la somme de la surface des revêtements 3, 4, 5 et 6 (Fig. IV-2). On remarquera qu'un même revêtement peut ainsi être associé à plusieurs pores en cas de connexions multiples surestimant ainsi le taux de remplissage réel (Fig. IV-2).

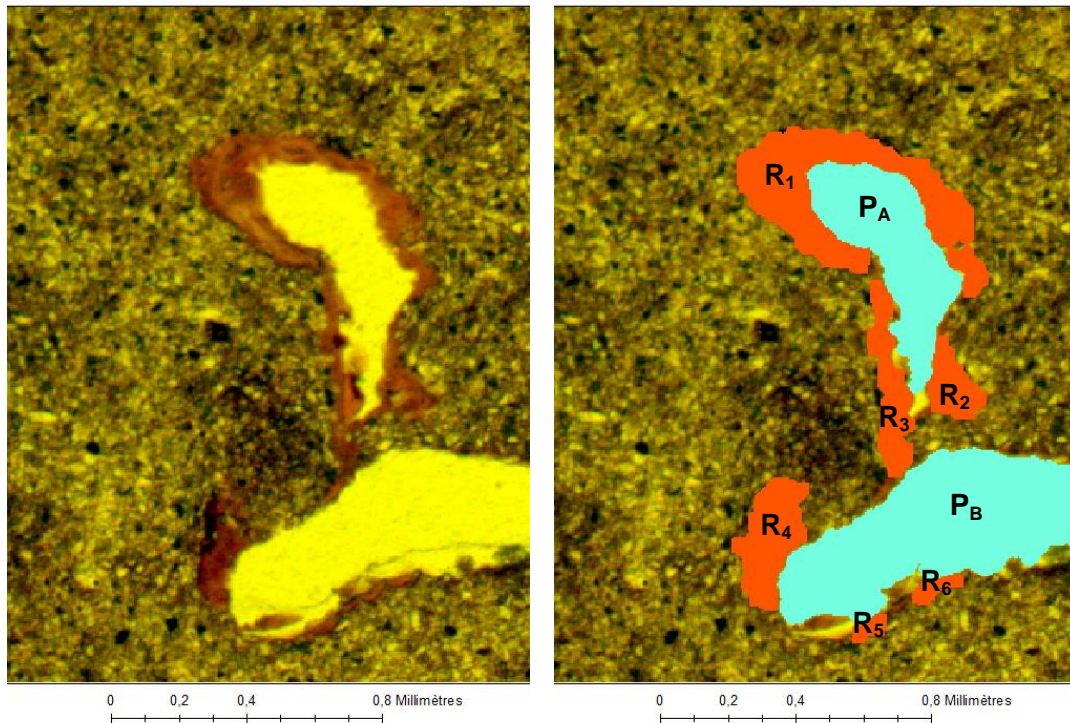


Figure IV-2: Exemple de deux pores P_A et P_B contenant respectivement 3 et 4 revêtements : R_1 , R_2 et R_3 pour P_A et R_3 , R_4 , R_5 et R_6 pour P_B (CULT 120-130 R3).

Finalement, un taux de remplissage moyen parmi l'ensemble des pores de chaque profondeur de sol est calculé. La caractérisation du type de pore dans lequel sont localisés les revêtements connectés et le calcul de leur taux de remplissage permettra finalement d'évaluer la sélectivité du processus d'illuviation par rapport aux différentes catégories de pores identifiées dans le chapitre III (pores racinaires, pores d'assemblage, fentes et fissures, pores des vers endogés et pores des vers anéciques).

II.2. Quantification des flux de matière

II.2a) Bioturbation

II.2.a.1 Flux de matière associés à la création et à l'entretien des galeries

Pour chaque tranche de sol de 10 centimètres d'épaisseur comprise entre 30 et 160 cm de profondeur, nous disposons de l'abondance des pores lombriciens. En considérant que ce volume poral correspond à un volume de sol déplacé, nous pouvons calculer un flux massique de matière lié à cette activité (Eq. 2). Tous les flux obtenus sont alors sommés pour mesurer l'intensité de la bioturbation à l'échelle du profil. Pour certaines épaisseurs de 10 cm pour lesquelles nous ne disposons pas de mesures, les grandeurs utiles sont alors linéairement interpolées.

$$M_{gal} = \sum_{i=1}^n (P_{ane} + P_{end})_i \times \rho_i \times E_i \quad \text{Eq. 2}$$

Avec M_{gal} , la masse de terre par unité de surface (kg.m^{-2}) initialement contenue dans la porosité lombricienne ; i désignant la $i^{\text{ème}}$ tranche de sol de masse volumique ρ_i (kg.m^{-3}) et d'épaisseur E_i (m) ; P_{ane} et P_{end} le volume poral en pourcent du volume de sol total respectivement attribué à l'activité des vers de terre anéciques et endogés. La masse de fraction $< 2 \mu\text{m}$ déplacée par l'activité de création et d'entretien des galeries a été calculée en multipliant, pour chaque profondeur de sol, la masse de sol bioturbée par la concentration massique en fraction $< 2 \mu\text{m}$.

II.2.a.2 Flux de matière associés aux traits biologiques (remplissages)

Pour chaque épaisseur de sol, nous disposons de la proportion relative de papules par rapport à l'ensemble des traits illuviaux. La quantification par comptage au point des revêtements argileux et des papules a permis de mettre en évidence la localisation de la grande majorité des papules au sein de remplissages biologiques (Fig. II.6). Dans les sols étudiés, la fragmentation des revêtements argileux et leur redistribution sous forme de papules apparaissent donc liées à l'activité biologique. A l'inverse, la participation de processus physiques à la fabrication des papules tels que l'apport de fragments d'horizon BT par colluvionnement (Cremaschi et al., 1990; Fedoroff and Goldberg, 1982) et les cycles de retrait-gonflement ou de gel-dégel (Kühn et al., 2010) paraissent peu probables ou pour le moins secondaires. Les sols échantillonnés sont en effet localisés en position de sommet de plateau protégé des processus d'érosion. De plus, ni la porosité lamellaire caractéristique des cycles de gel-dégel (Van Vliet-Lanoë, 2010), ni les motifs granostriés typiques de l'orientation des particules fines autour des agrégats ou des grains du squelette sous l'effet

des cycles de retrait-gonflement (Gunal and Ransom, 2006) n'ont été identifiés comme des caractéristiques micromorphologiques majeures du profil de sol étudié (Tableau II-3).

En considérant que les revêtements argileux sont, au moins en l'absence d'hydromorphie marquée dans les sols, stables dans le temps (Kühn et al., 2010) et que la faune ne consomme pas préférentiellement les revêtements argileux par rapport au reste du sol, on peut finalement supposer que le rapport entre la surface des traits illuviaux fragmentés par l'activité biologique, ou papules (S_{pap} en m^2), et la surface totale des traits illuviaux (S_{pap} additionné de S_{rev} avec S_{rev} la surface occupée par l'ensemble des revêtements connectés ou non en m^2) est équivalente à la proportion de remplissages biologiques (V_{rem} en m^3) par rapport au volume total de sol considéré (V_{tot} en m^3) selon la relation suivante :

$$\frac{V_{rem}}{V_{tot}} = \frac{S_{pap}}{S_{pap} + S_{rev}} \quad \text{Eq. 3}$$

Pour chaque épaisseur de 10 cm de sol entre 30 et 160 cm, il est alors possible de calculer la masse de sol présente sous forme de remplissages biologiques. Les flux obtenus sont alors sommés à l'échelle du profil (Eq. 4). Les flux massiques ne sont pas calculés lorsque l'abondance totale des traits illuviaux est trop faible, i.e. inférieure à 0.5%, et que celle des revêtements est inférieure à 0.05%.

$$M_{rem} = \sum_{i=1}^n V_{rem_i} \times \rho_i \times E_i \quad \text{Eq. 4}$$

Avec M_{rem} la masse de sol sous forme de remplissages d'origine biologique par unité de surface en $kg.m^{-2}$; i désignant la $i^{ème}$ tranche de sol de masse volumique ρ_i ($kg.m^{-3}$) et d'épaisseur E_i (m).

Pour certaines épaisseurs de 10 cm pour lesquelles nous ne disposons pas de mesures sur lames minces, les grandeurs utiles sont linéairement interpolées. Les flux de fraction $< 2 \mu m$ associés à l'activité de brassage ont, comme pour les flux de fraction $< 2 \mu m$ associés à l'activité de création et d'entretien des galeries, été calculés en multipliant pour chaque profondeur la masse de sol déplacée par sa concentration massique en fraction $< 2 \mu m$.

II.2b) Illuviation

Pour chaque épaisseur de sol, nous disposons de l'abondance surfacique des traits illuviaux (revêtements argileux connectés, déconnectés et papules) ce qui permet une estimation du flux massique de fraction $< 2 \mu m$ relatif à l'illuviation pour chaque épaisseur de 10 cm de sol entre 30 et 160 cm (Eq. 5). Tous les flux obtenus sont alors sommés pour

obtenir la masse de fraction $< 2 \mu\text{m}$ illuviée par unité de surface M_{ill} (en kg.m^{-2}) à l'échelle du profil. Pour certaines épaisseurs de 10 cm pour lesquelles nous ne disposons pas de mesures, les grandeurs utiles sont linéairement interpolées.

$$M_{ill} = \sum_{i=1}^n (S_{pap} + S_{rev})_i \times \rho_{rev} \times E_i \quad \text{Eq. 5}$$

Avec S_{pap} et S_{rev} la surface respective des papules et des revêtements exprimée en pourcent de la surface totale analysée et i , la $i^{\text{ème}}$ tranche de sol d'épaisseur E_i (m). La masse volumique des revêtements argileux (ou papules) mesurée dans le chapitre II est de 1750 kg.m^{-3} .

II.3. Analyse statistique

Un test paramétrique de type ANOVA 1 facteur (i.e., horizon) est réalisé pour tester l'effet de l'horizonation sur la surface (%), la densité (nombre.cm^{-2}) et la taille (diamètre équivalent) des différents traits pédologiques étudiés : pores et traits illuviaux de type papules ou revêtements. L'horizonation du profil est alors simplifiée avec un horizon E de 30 à 50 cm (avec $n=6$), un horizon BT de 50 à 100 cm (avec $n=10$) et un horizon C de 100 à 160 cm (avec $n=6$). Si le test de l'homogénéité des variances n'est pas vérifié (*bartlett.test*), nous avons recours au test non paramétrique de Kruskal Wallis. Les résultats des comparaisons entre les horizons (test de comparaisons multiples de Tukey en cas de test paramétrique et test de Dunn en cas de test non paramétrique) sont compilés dans le tableau récapitulatif des données en Annexe III. Le seuil de significativité a été fixé à 5%.

A l'échelle du profil, nous testons un modèle à variable muettes (une variable muette par type de pore) afin de mesurer l'impact du type de pore sur le taux de remplissage. Ceci est réalisé en vue de confirmer si certains types de pores ont des taux de remplissage significativement plus élevés que d'autres à l'échelle du profil.

Tous les tests statistiques sont réalisés avec R (R Core Team, 2013).

III. Résultats

III.1. Evolution de la macroporosité avec la profondeur

La porosité totale augmente significativement avec la profondeur jusqu'à atteindre un maximum d'environ 12% dans l'horizon BT à 75 cm de profondeur puis diminue de moitié dans l'horizon C (Fig. IV-3 et 4a). Bien qu'en nombre très limité, n'excédant pas quelques pores par cm^2 (Fig. IV-5a), mais avec des diamètres équivalents atteignant parfois le cm (Fig. IV-6), la porosité associée aux lombriciens et tout particulièrement la porosité associée

aux vers anéciques pilote l'essentiel des évolutions de la porosité totale en fonction de la profondeur. Ainsi, la porosité lombricienne augmente jusqu'à cette même profondeur de 75 cm pour diminuer plus profondément (Fig. IV-4a). Quoi qu'il en soit, avec une porosité lombricienne représentant encore à 160 cm de profondeur environ 1% de la surface totale analysée (Fig. IV-4a), soit plus de 15 % de l'ensemble de la porosité (Fig. IV-4b), la faune explore la totalité de l'épaisseur du sol. Les variations de la surface des pores associées aux vers de terre sont liées à une augmentation combinée du nombre (Fig. IV-5) ou de la taille (Fig. IV-6) des pores d'anéciques et d'endogés dans l'horizon BT par rapport aux horizons E et C.

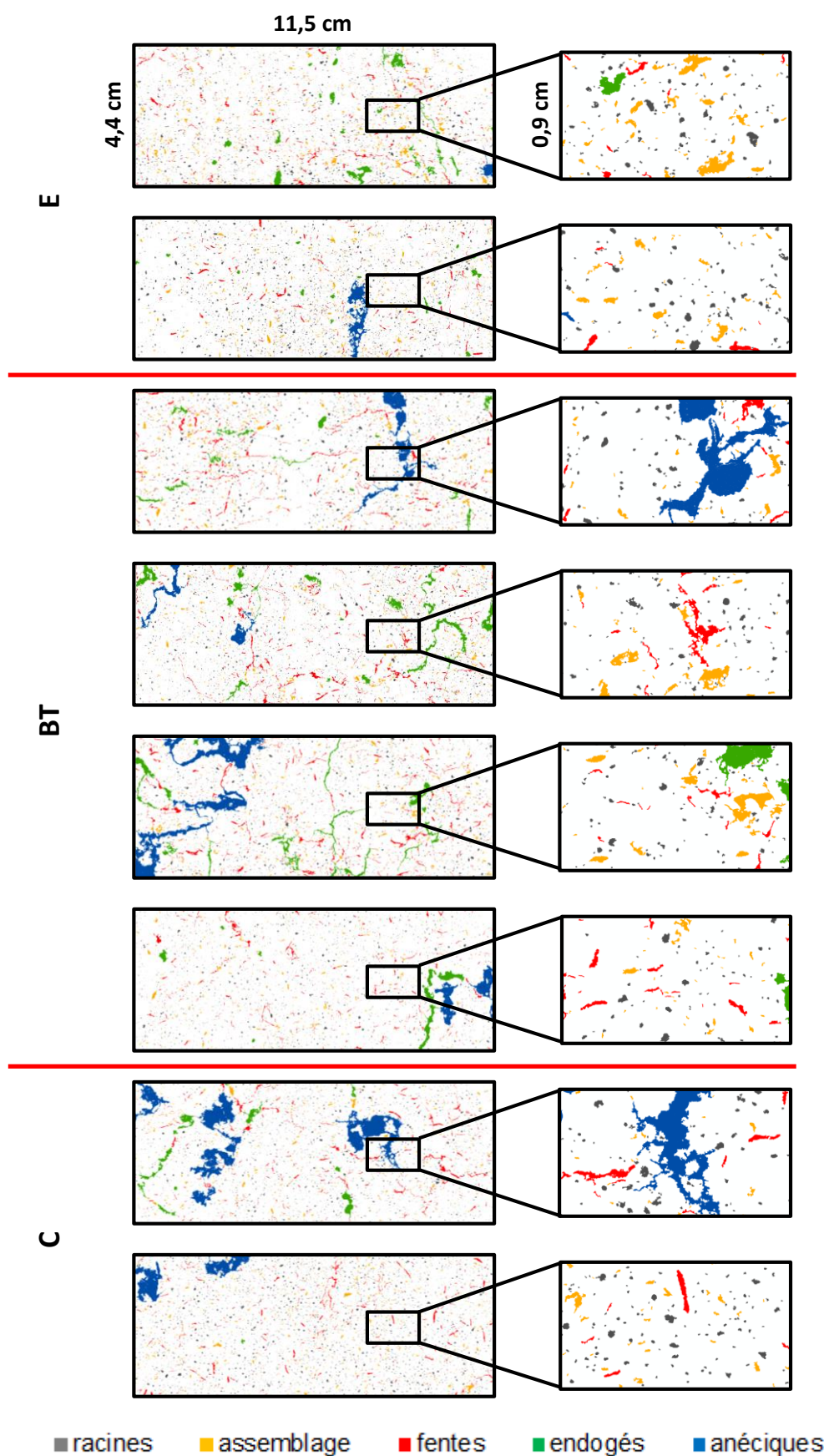


Figure IV-3: Distribution en fonction de la profondeur de la porosité racinaire (en gris) ; de la porosité d'assemblage (en jaune) ; de la porosité fissurale (en rouge) ; et de la porosité créée par les vers endogés (en vert) et anéciques (en bleu) dans le profil CULT.

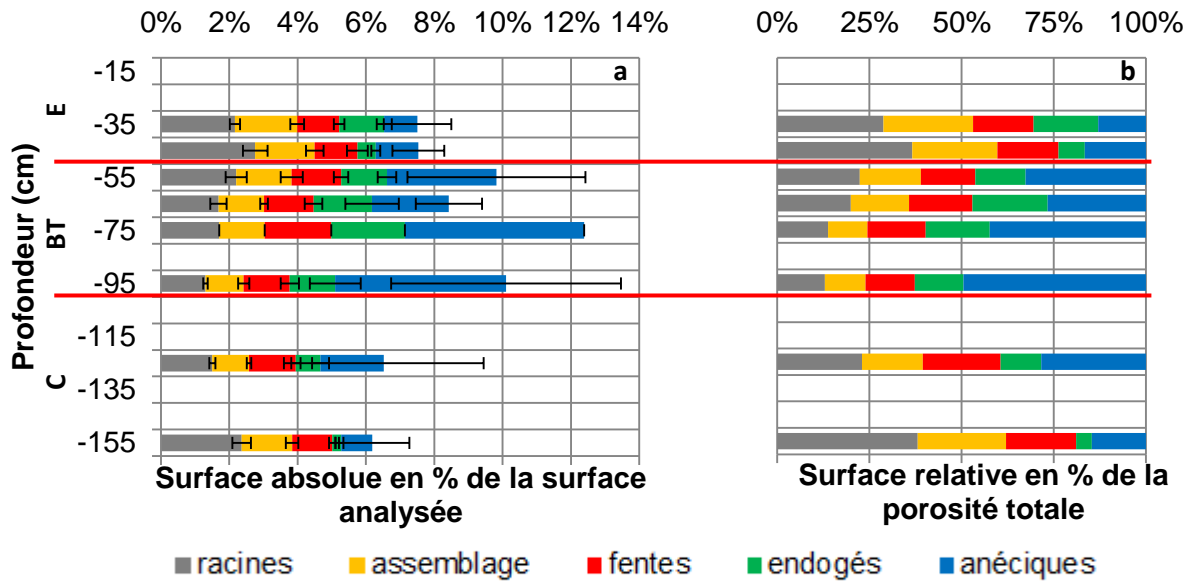


Figure IV-4: Distribution en fonction de la profondeur de la surface de la porosité racinaire (en gris) ; de la porosité d'assemblage (en jaune) ; de la porosité fissurale (en rouge) ; et de la porosité créée par les vers endogés (en vert) et anéciques (en bleu) : a) en pourcent de la surface analysée et b) en pourcent de la porosité totale. Profil CULT.

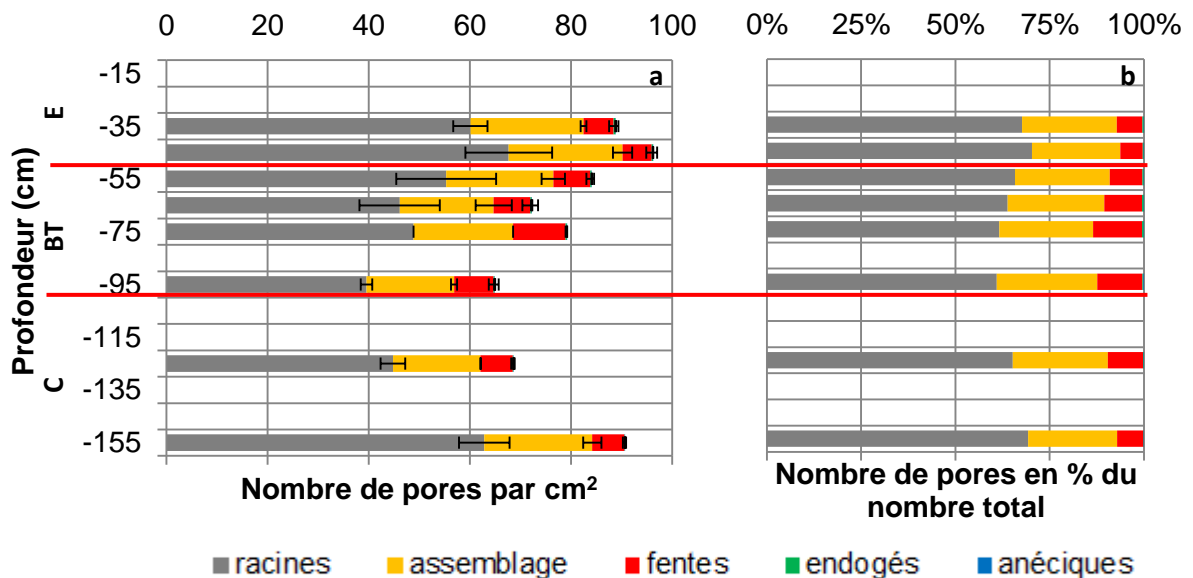


Figure IV-5: Distribution en fonction de la profondeur du nombre de pores constituant la porosité racinaire (en gris) ; la porosité d'assemblage (en jaune) ; la porosité fissurale (en rouge) ; la porosité créée par les vers endogés (en vert) et anéciques (en bleu) : a) la densité absolue en nombre par centimètre carré et b) densité relative en pourcent du nombre total de pore. Profil CULT.

Les surfaces des pores racinaires et des vides d'assemblage sont maximales dans l'horizon E puis diminuent significativement avec la profondeur (Fig. IV-4a, Annexe III). Ces diminutions avec la profondeur s'expliquent principalement par une diminution du nombre des pores (Fig. IV-5a) dont la taille varie par ailleurs assez peu (Fig. IV-6). L'horizon C se caractérise néanmoins, en particulier à 160 cm de profondeur, par des pores racinaires i) en

grand nombre avec une densité de l'ordre de 60 pores par cm^2 quasiment similaire à celle observée dans l'horizon E (Fig. IV-5) et ii) d'un diamètre équivalent médian de 160 μm supérieur au diamètre de 150 μm observé dans les horizons E et BT (Fig. IV-6).

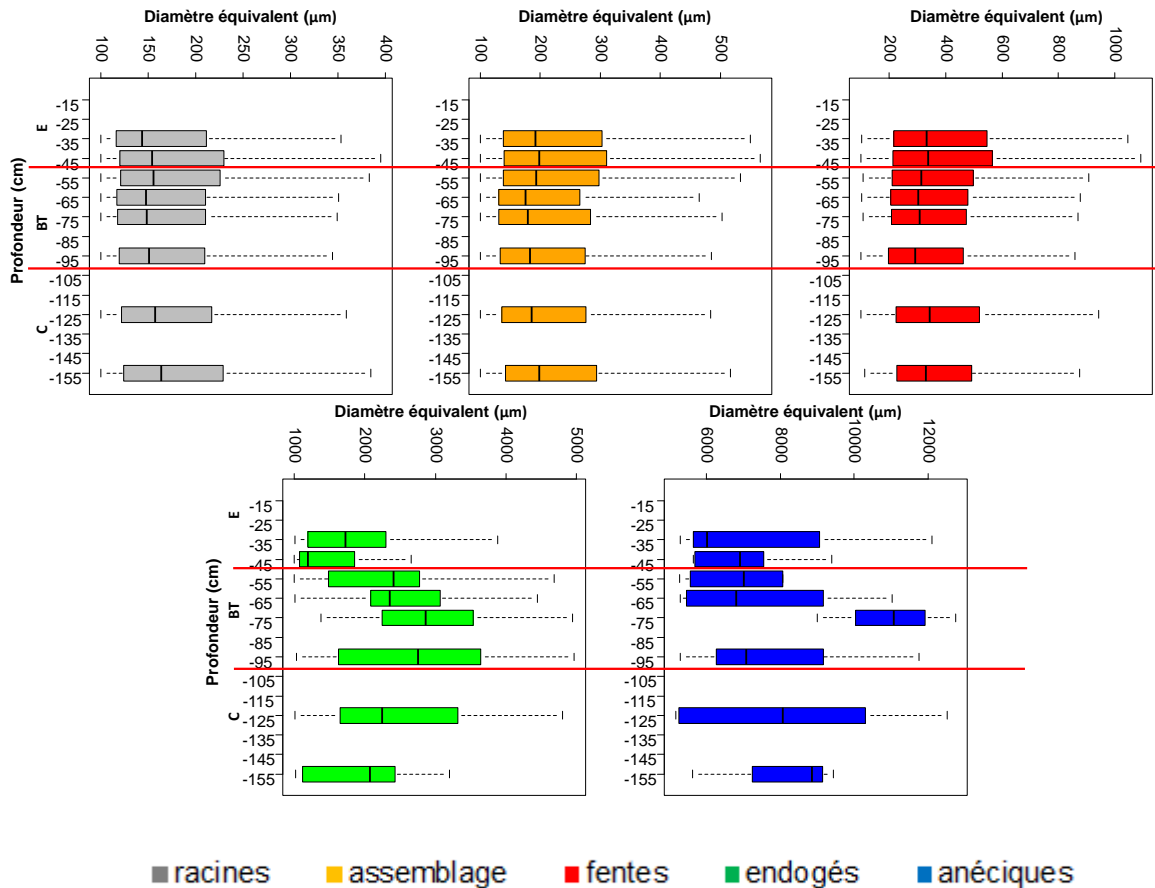


Figure IV-6: Distribution en fonction de la profondeur de la taille en μm (diamètre de pore équivalent) de la porosité racinaire (en gris) ; de la porosité d'assemblage (en jaune) ; de la porosité fissurale (en rouge) ; et de la porosité créée par les vers endogés (en vert) et anéciques (en bleu). Profil CULT.

Enfin, la surface des fentes et fissures ne varie pas significativement avec la profondeur. En effet, si la densité des fentes et fissures augmente dans l'horizon BT et diminue plus en profondeur (Fig. IV-5), leur taille varie en sens inverse (Fig. IV-6).

En conséquence des distributions contrastées des différents types de porosité en fonction de la profondeur, la porosité racinaire est la première composante, en surface, de la porosité dans les horizons E et C alors qu'il s'agit de la porosité associée à l'activité lombricienne dans l'horizon BT (Fig. IV-4b). Les pores racinaires comptent toutefois pour plus de la moitié du nombre total de pores et sont ainsi largement et quelle que soit la profondeur considérée, beaucoup plus nombreux que l'ensemble des autres pores (Fig. IV-5).

III.2. Evolution de l'argile illuviale avec la profondeur

Des traits illuviaux de différentes natures sont observables sur la totalité de l'épaisseur de sol étudiée (Fig. IV-7) depuis l'horizon E, où les traits illuviaux sont majoritairement, en surface et en nombre, présents sous la forme de fragments redistribués de type papules (Fig. IV-8 et IV-9), jusque dans l'horizon C, à 160 cm de profondeur, où il s'agit au contraire majoritairement de revêtements en place (Fig. IV-8 et IV-9). La surface totale occupée par ces traits illuviaux augmente puis diminue avec la profondeur en passant par un maximum localisé entre 75 et 95 cm de profondeur (Fig. IV-8a). La diminution graduelle de la surface occupée par les papules proportionnellement à celle occupée par les revêtements en place (Fig. IV-8b) souligne que la surface occupée par les papules augmente moins rapidement que celle des revêtements en place entre l'horizon E et l'horizon BT.

Quasiment absents de l'horizon E avec une densité d'à peine 10 revêtements par cm^2 , la densité des revêtements en place augmente jusqu'à un maximum de 100 revêtements par cm^2 dans l'horizon BT puis se stabilise autour de 60 revêtements par cm^2 dans l'horizon C (Fig. IV-9a). Parallèlement, leur taille médiane et leur taille maximale doublent de l'horizon E à l'horizon BT (Fig. IV-10). Dans ce dernier horizon on peut ainsi observer des revêtements dont le diamètre équivalent excède 500 μm . A l'instar de ce qui a été vu à 65 cm dans le chapitre précédent, l'horizon BT se distingue en effet par une agglomération des revêtements avec quelques gros objets de plus de 500 μm à 2 mm de diamètre équivalent.

Les papules sont quant à elles systématiquement plus nombreuses que les revêtements en place notamment dans l'horizon BT où elles sont plus particulièrement nombreuses (Fig. IV-9a et 9b). Leur taille, d'environ 100 μm de diamètre équivalent, varie peu avec la profondeur (Fig. IV-10) suggérant que toutes les papules ont été fabriquées par un seul et même processus.

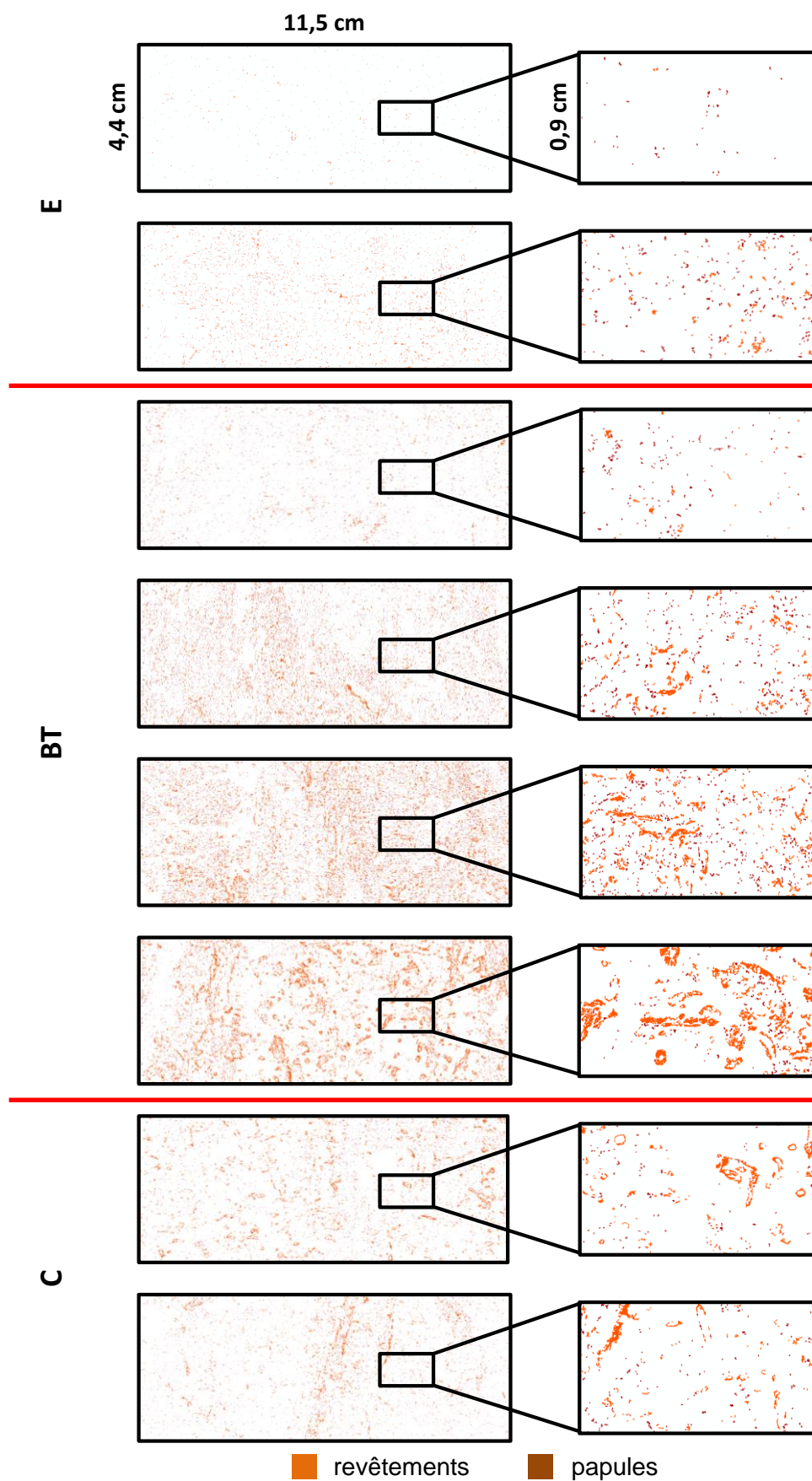


Figure IV-7: Distribution en fonction de la profondeur des revêtements en place (orange) et des papules (brun). Profil CULT.

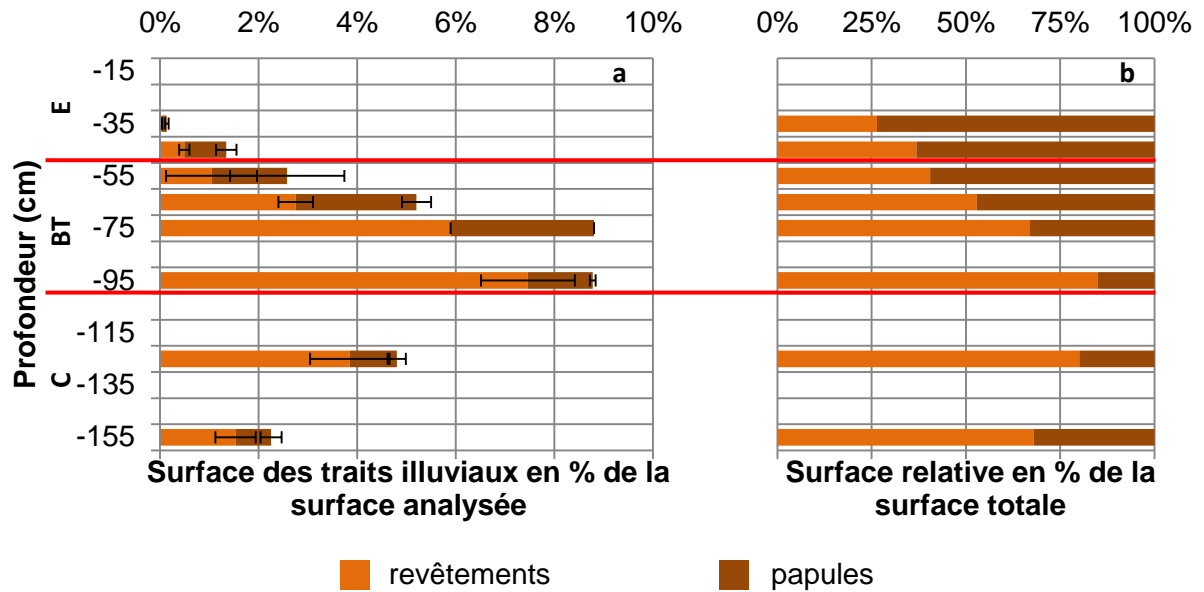


Figure IV-8: Distribution en fonction de la profondeur de la surface des revêtements en place (orange) et des revêtements fragmentés et redistribués ou papules (brun) : a) en pourcent de la surface analysée et b) en pourcent de la surface totale des traits illuviaux. Profil CULT.

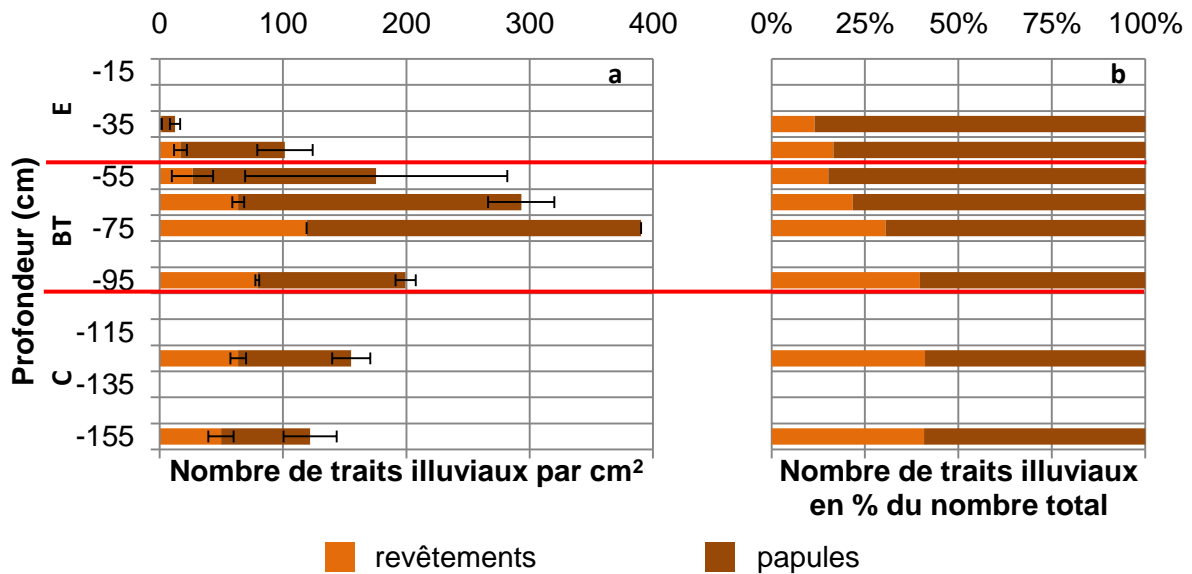


Figure IV-9: Distribution en fonction de la profondeur du nombre des revêtements en place (orange) et des revêtements fragmentés et redistribués ou papules (brun) : a) densité absolue en nombre par centimètre carré et b) densité relative en pourcent du nombre total de traits illuviaux. Profil CULT.

Ainsi, les variations de la surface des papules et des revêtements en fonction de la profondeur sont liées à l'augmentation de leur nombre et de leur taille avec un effet nombre très marqué pour les papules et un double effet nombre et taille pour les revêtements en place (Fig. IV-9 et IV-10).

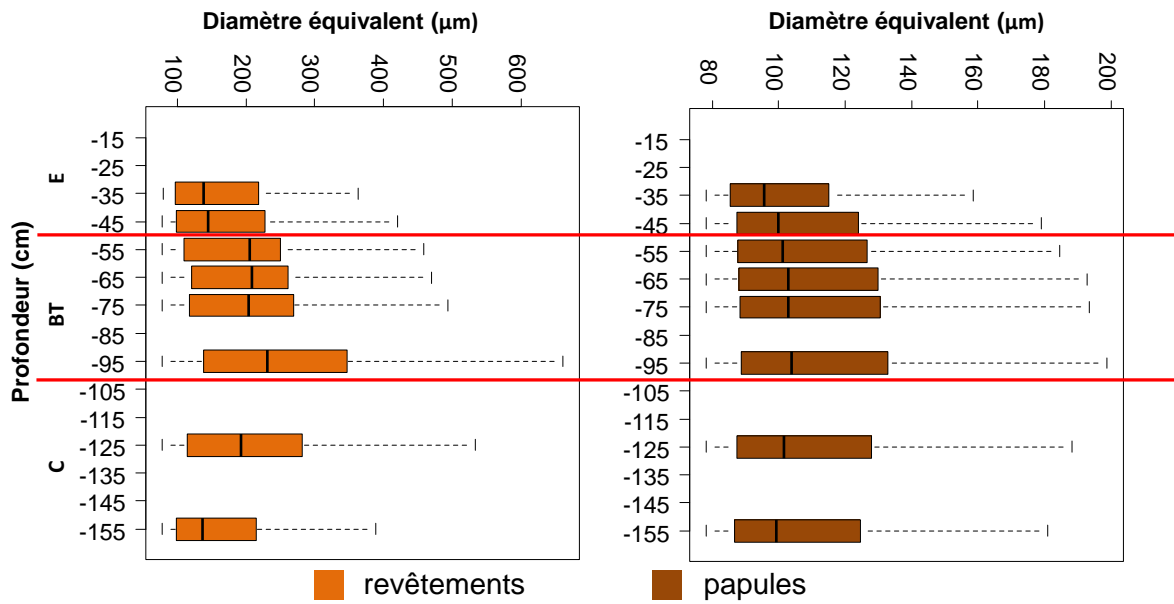


Figure IV-10: Distribution en fonction de la profondeur de la taille en µm (diamètre équivalent) des revêtements en place (orange) et des revêtements fragmentés et redistribués ou papules (brun). Profil CULT.

III.3. Porosité et revêtements argileux

III.3a) Connexion/déconnexion entre pores et revêtements

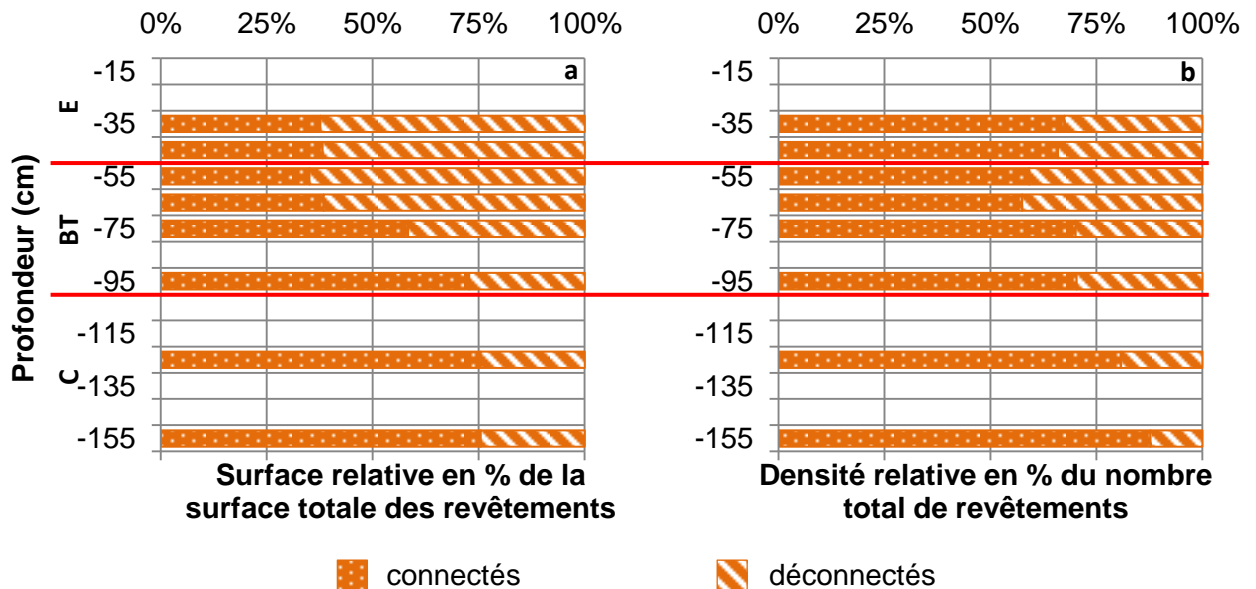


Figure IV-11: Distribution en fonction de la profondeur de : a) la surface relative et b) la densité relative des revêtements connectés et des revêtements non connectés à la porosité. Profil CULT.

Les revêtements déconnectés de la porosité représentent plus de la moitié de la surface totale des revêtements argileux jusqu'à 70 cm de profondeur, soit jusqu'à la première moitié de l'horizon BT (Fig. IV-11a). Ils deviennent ensuite minoritaires plus en profondeur (Fig. IV-11a), et ce même si leur taille croît jusqu'à 95 cm de profondeur (Fig. IV-12). De la même manière, les revêtements déconnectés de la porosité sont proportionnellement plutôt plus nombreux entre 30 et 70 cm de profondeur qu'entre 70 et 160 cm de profondeur (Fig. IV-11b). Enfin, quelle que soit la profondeur considérée, les revêtements déconnectés de la porosité ont des tailles médianes ou maximales significativement inférieures à celles des revêtements connectés à la porosité (Fig. IV-12).

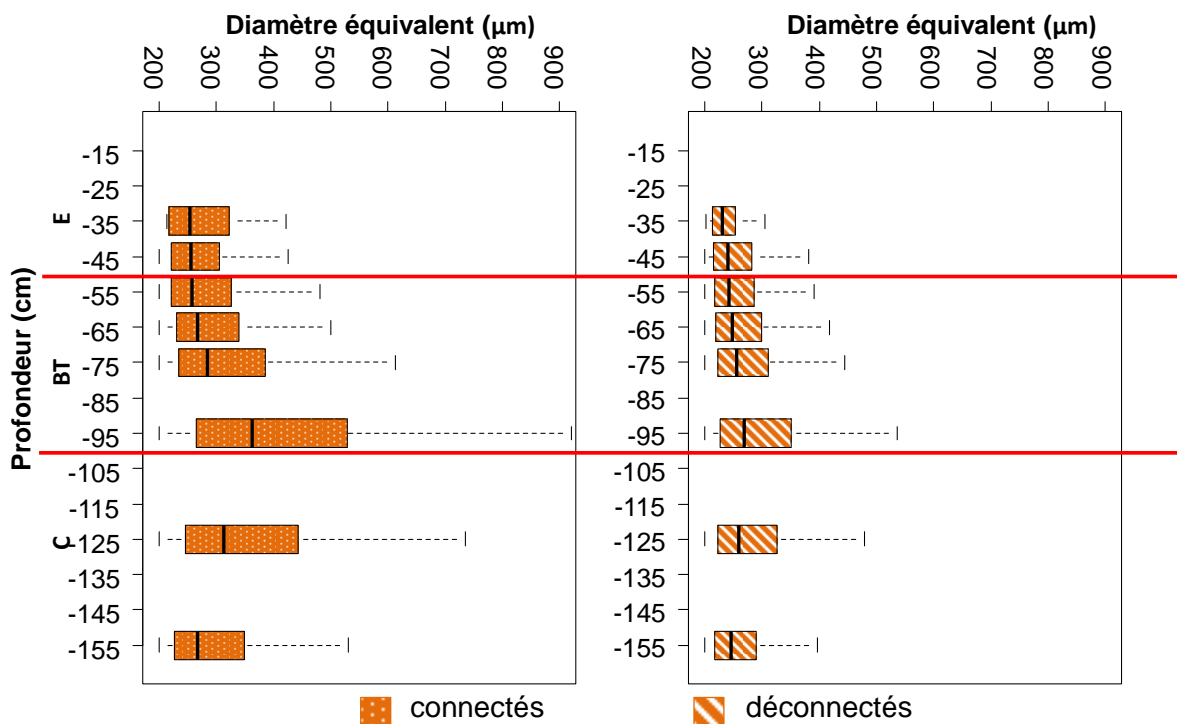


Figure IV-12: Distribution en fonction de la profondeur de la taille en µm (diamètre équivalent) des revêtements connectés (> 200 µm) (à gauche) et des revêtements déconnectés de la porosité (à droite). Profil CULT.

III.3b) Localisation des revêtements dans la porosité et taux de remplissage

La proportion de pores revêtus ou encore le taux de remplissage de ces pores augmentent avec l'augmentation de la surface totale des traits illuviaux jusqu'à la profondeur de 95 cm (Fig. IV-13 et 14). A cette profondeur, plus de la moitié des pores contiennent un ou plusieurs revêtements (Fig. IV-13) et leur taux de remplissage dépasse les 60% (Fig. IV-14). La proportion de pores contenant au moins un revêtement et leur taux de remplissage diminuent ensuite plus en profondeur (Fig. IV-13 et 14). Toutefois, à 160 cm de profondeur, plus d'un tiers des pores contiennent toujours un ou plusieurs revêtements (Fig. IV-13) et le taux de remplissage de ces pores est toujours d'au moins 40% (Fig. IV-14).

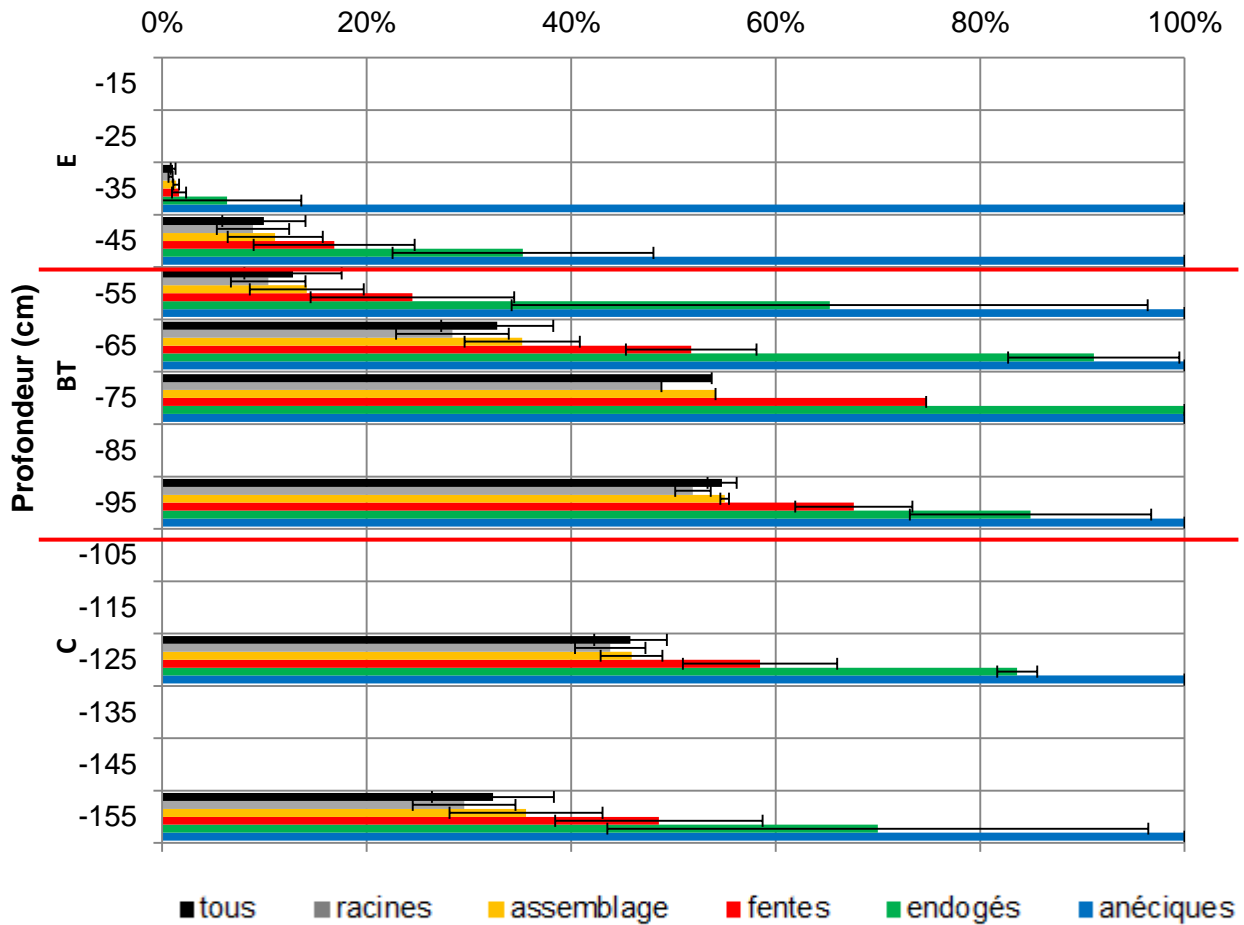


Figure IV-13: Distribution en fonction de la profondeur de la proportion (en %) de pores racinaires, de pores d'assemblage, de fentes et des pores associés à l'activité des vers endogés et anéciques en contact avec au moins un revêtement argileux en place par rapport au nombre total de chaque type de pore. Profil CULT.

Les pores de lombriciens contiennent plus fréquemment des revêtements que les autres catégories de pores de plus petite taille (Fig. IV-13). Ainsi, la totalité des pores de vers anéciques contiennent au moins un revêtement quelle que soit la profondeur considérée alors que ce n'est qu'au plus le cas de 50% des pores racinaires (Fig. IV-13). Toutefois, bien qu'ils contiennent systématiquement des revêtements, les pores d'anéciques, et dans une moindre mesure les pores d'endogés, présentent des taux de remplissage relativement faibles, le plus souvent inférieurs à 10% (Fig. IV-14). Les pores de plus petite taille (pores racinaires, pores d'assemblage, fentes et fissures) montrent quant à eux des taux de remplissage significativement plus élevés (p value $< 2e-16$) compris entre 10 et près de 70% (Fig. IV-14) avec une moyenne de 50% à l'échelle du profil. Finalement, la probabilité de contenir un ou plusieurs revêtements augmente avec la taille du pore quand le taux de remplissage diminue.

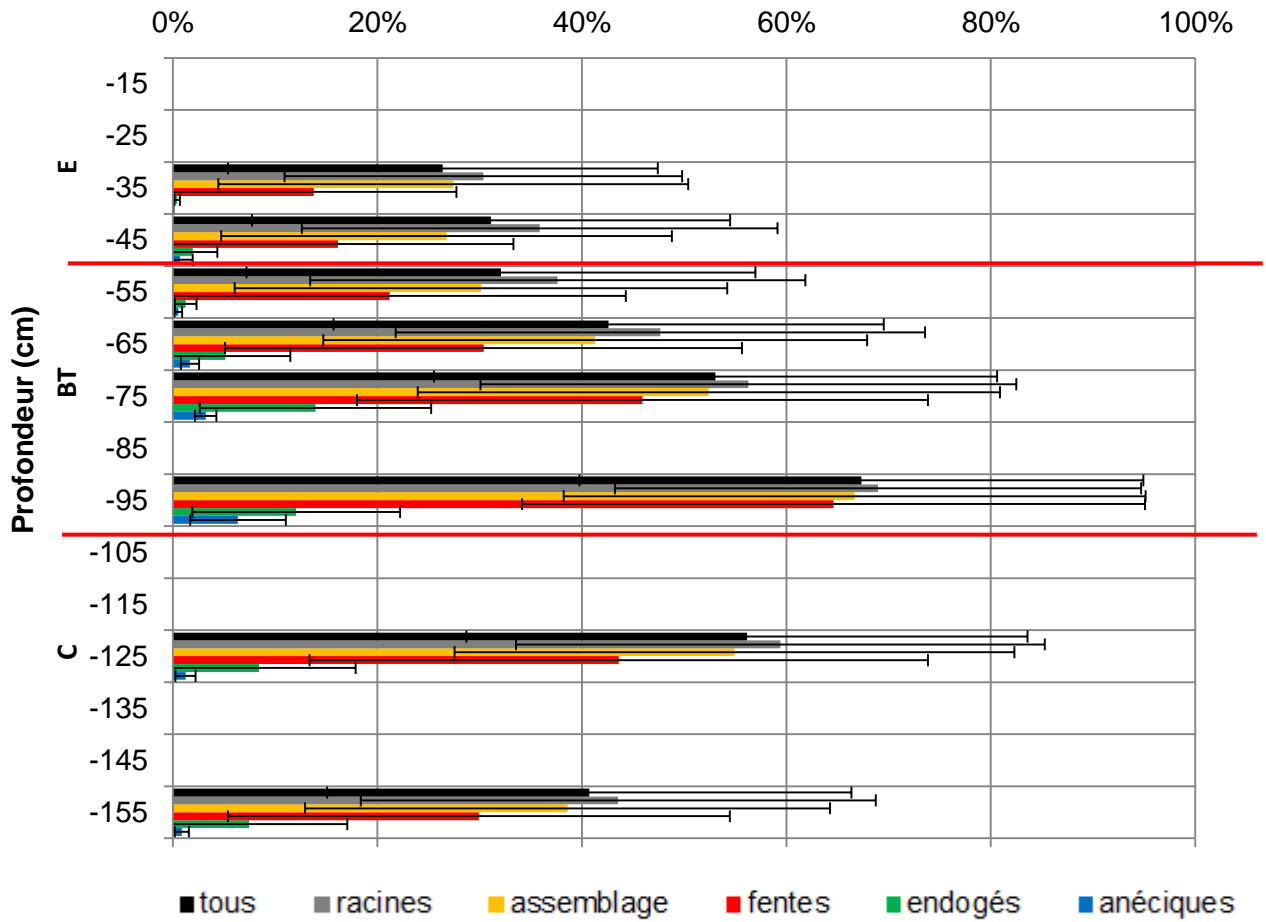


Figure IV-14: Distribution en fonction de la profondeur du taux de remplissage moyen (en %) de l'ensemble des pores, des pores racinaires, des pores d'assemblage, des fentes et fissures et des pores associés à l'activité des vers endogés et anéciques. Profil CULT.

III.4. Quantification des flux de matière

Horizon			Bioturbation									Illuviation	
			Volume bioturbé			Flux total			Flux <2µm			V _{ill}	M _{ill<2µm}
			(% du volume total)			(t.ha ⁻¹)			(t.ha ⁻¹)				
Profondeur (cm)			V _{gal}	V _{remp}	V _{tot}	M _{gal}	M _{remp}	M _{tot}	M _{gal<2µm}	M _{remp<2µm}	M _{tot<2µm}	(%)	(t.ha ⁻¹)
CULT	E	-35	2,3	nd	nd	34 ±17	nd	nd	6,9 ±3,8	nd	nd	0,14	2,4 ±1,0
CULT	E	-45	1,8	63	65	27 ±12	940 ±110	967 ±122	5,4 ±2,6	190 ±32	195 ±35	1,3	24 ±7,2
CULT	BT	-55	4,5	61	66	70 ±47	950 ±100	1020 ±147	20 ±15	270 ±43	290 ±58	2,6	45 ±40
CULT	BT	-65	4	47	51	61 ±17	730 ±51	791 ±68	18 ±5,8	210 ±25	228 ±31	5,2	91 ±19
CULT	BT	-75	7,4	33	40	110 ±28	510 ±45	620 ±73	33 ±10	150 ±20	183 ±30	8,8	150 ±25
CULT	BT	-85	6,9	24	31	110 ±40	370 ±47	480 ±87	33 ±14	120 ±21	153 ±35	8,8	150 ±27
CULT	BT	-95	6,3	15	21	97 ±58	230 ±48	327 ±106	30 ±20	73 ±19	103 ±39	8,8	150 ±29
CULT	C	-105	4,6	16	21	69 ±55	250 ±47	319 ±102	17 ±14	61 ±15	78 ±29	7,7	140 ±27
CULT	C	-115	3,3	18	21	50 ±53	270 ±52	320 ±105	12 ±13	67 ±16	79 ±29	6,4	110 ±25
CULT	C	-125	2,6	20	23	39 ±50	300±63	339 ±113	10 ±13	74 ±19	84 ±32	4,8	84 ±24
CULT	C	-135	1,6	24	26	25 ±42	370 ±66	395 ±108	6,1 ±10	89 ±21	95 ±31	4,6	81±24
CULT	C	-145	1,1	28	29	18 ±32	430 ±88	448 ±120	3,3 ±6,2	82 ±21	85 ±27	3,8	67 ±21
CULT	C	-155	1,2	32	33	18 ±18	490 ±94	508 ±112	3,4 ±3,5	94 ±22	97 ±26	2,3	39 ±14
Somme 30-140 cm						692 ±419	4920 ±629	5578 ±1031	191 ±121	1304 ±231	1488 ±349		1027 ±248
Somme profil						728 ±469	5840 ±811	6534 ±1263	198 ±131	1480 ±274	1670 ±402		1133 ±283

Tableau IV-2 : Flux de matière et de fraction < 2 µm (t. ha⁻¹) associés aux processus de bioturbation et d'illuviation. Profil CULT.

Le volume total de sol bioturbé (somme du volume occupé par les galeries et du volume occupé par les remplissages) est compris entre un minimum d'environ 20% et un maximum de 60 à 70% (Tableau IV-2). Le volume bioturbé décroît avec la profondeur jusqu'à une profondeur d'environ 1 mètre puis tend à se stabiliser plus en profondeur autour d'une proportion de sol bioturbé comprise entre 20 et 30%. Le processus de bioturbation, loin de se limiter aux horizons de surface (non étudiés), modifie ainsi une part significative du sol quelle que soit la profondeur considérée sans toutefois affecter, pour une profondeur donnée, l'ensemble du volume de sol.

Le volume occupé par les galeries est systématiquement plus faible que le volume occupé par les remplissages (Tableau IV-2). L'abondance relative de ces deux marqueurs est toutefois relativement variable du fait de distributions en fonction de la profondeur distinctes. Ainsi, alors que le volume des remplissages biologiques est maximal à faible profondeur, décroît très rapidement jusqu'à un mètre de profondeur puis augmente de nouveau ensuite, le volume occupé par les galeries présente une distribution inverse avec des valeurs de quelques pourcents seulement dans les horizons E et les horizons C et des valeurs maximales dans l'horizon BT vers un mètre de profondeur.

Quoi qu'il en soit, en redistribuant en moyenne près de 40% du volume de sol total entre 40 et 160 cm de profondeur, l'activité des vers de terre est à l'origine d'un flux de matière d'environ 6 500 t.ha⁻¹ soit environ 1 700 t.ha⁻¹ de fraction < 2 µm (Tableau IV-2). Compte-tenu d'une masse volumique des sols de l'ordre de 1 500 kg.m⁻³, la masse totale de sol bioturbé par l'activité des vers de terre équivaut à la masse de sol contenue dans les 40 premiers cm de sol.

Le processus d'illuviation est quant à lui à l'origine d'un flux total de fraction < 2 µm estimé à 1 133 t.ha⁻¹ (Tableau IV-2). Relativement négligeables dans l'horizon E, les flux sont maximaux dans l'horizon BT où ils atteignent 150 t.ha⁻¹ par tranche de sol de 10 cm d'épaisseur puis diminuent avec l'augmentation de la profondeur. Les flux de fraction < 2 µm restent toutefois très significatifs jusqu'à 150 cm de profondeur où ils représentent encore près de 40 t.ha⁻¹, soit des valeurs proches de celles quantifiées dans la partie supérieure de l'horizon BT.

A l'échelle du profil de sol, les flux de fraction < 2 µm associés au processus d'illuviation sont environ 2 fois moins élevés que ceux liés au processus de bioturbation (Tableau IV-2). Trois situations très différentes peuvent toutefois être distinguées en fonction de la profondeur :

1- jusqu'à une profondeur de 70 cm, soit dans l'horizon E et dans la partie supérieure de l'horizon BT, les flux de fraction < 2 µm liés au processus de bioturbation sont supérieurs à ceux liés au processus d'illuviation ;

2- Entre 70 et 90 cm de profondeur puis au-delà de 120 cm de profondeur, les flux liés aux deux processus de bioturbation et d'illuviation s'équilibrent ;

3- Entre 90 cm et 120 cm de profondeur enfin, soit dans la partie inférieure de l'horizon BT et dans la partie supérieure de l'horizon C, le processus d'illuviation occasionne des flux de fraction $< 2 \mu\text{m}$ plus élevés que le processus de bioturbation.

IV. Discussion

IV.1. Entre création et disparition : la dynamique du réseau poral

IV.1a) Caractéristiques de taille et de forme du réseau poral en fonction de la profondeur

La surface totale des pores identifiés est comprise entre un minimum d'environ 6% et un maximum d'environ 12%, ce qui est très peu par rapport à la porosité totale classiquement mesurée dans ce type de sol, de l'ordre de 42% (Bryk, 2016). En effet, notre méthode d'analyse d'images a pour objectif de détecter uniquement la fraction de la porosité totale supérieure à 100 μm de diamètre équivalent, soit une fraction minoritaire de la porosité totale (Lamandé et al., 2003).

La macroporosité est en revanche, quel que soit l'horizon considéré, du même ordre de grandeur que celle quantifiée par Bryk (2016) dans des luvisols (Haplic Luvisol) de forêts de feuillus développés dans des lœss non calcaires de Pologne pour une taille de pixel de 20 x 20 μm (Tableau IV-3). La taille moyenne des macropores est cependant systématiquement plus élevée dans notre étude alors que le nombre de macropores est au contraire plus faible (Tableau IV-3). L'abondance plus importante des pores racinaires en sols forestiers pourrait expliquer ces différences de nombre et de taille des pores. Une telle hypothèse est cohérente avec une taille moyenne des pores observés par Bryk et al. (2016) se rapprochant de la taille moyenne des pores racinaires observés dans notre étude soit 0,018 mm^2 (diamètre équivalent de 150 μm) ainsi qu'avec une biomasse racinaire généralement plus élevée sous forêt que sous culture (Gobat et al., 2004; Lavelle and Spain, 2007).

	Macroporosité (%)		Densité (nombre/cm ²)		Taille moyenne (mm ²)	
	Bryk (2016)	CULT	Bryk (2016)	CULT	Bryk (2016)	CULT
E		7.5		93		0.08
BT	5.3	9.7	156	74	0.036	0.13
BC	4.4		125		0.036	
C	4.6	6.4	112	80	0.041	0.08

Tableau IV-3 : Comparaison de la porosité extraite par analyse d'images dans un LUVISOL forestier (Bryk, 2016) et dans un LUVISOL cultivé (profil CULT).

Il est classiquement supposé que l'accumulation de fraction < 2 µm et la fabrication des revêtements argileux dans l'horizon BT serait susceptible de conduire à une diminution de la porosité des horizons BT et éventuellement à leur colmatage (Bockheim and Gennadiyev, 2009; Jamagne, 1978; Payton, 1993; Pedro et al., 1978). Si une telle diminution de la porosité de l'horizon éluvié E à l'horizon illuvié BT est effectivement observée par Bryk (2016), c'est bien au contraire l'horizon BT qui présente dans notre cas la porosité maximale du fait d'une porosité lombricienne particulièrement abondante. Un tel phénomène a déjà été observé par Lamandé et al. (2011) et Hallaire et al. (1997) pour différents types de sol dont des luvisols. Ce résultat indique finalement qu'un processus comme la bioturbation est capable de compenser le colmatage des pores associés au processus d'illuviation et de régénérer ou maintenir ainsi la porosité des horizons BT, en particulier si cette dernière est bien conservée.

La diminution de la surface des pores attribués aux racines avec la profondeur est cohérente avec la diminution de la densité racinaire du blé et du maïs avec la profondeur (Nicoullaud et al., 1995). De même, ces pores présentent un diamètre équivalent médian d'environ 150 µm relativement stable avec la profondeur ce qui est en cohérence avec les tailles de racines enregistrées par Bruand et al. (1996) et Kooistra et al. (1992). Si la présence de pores racinaires dans l'horizon C a déjà été observée et décrite par Jamagne (1973), l'augmentation du nombre et de la taille des pores attribués aux racines à 155 cm de profondeur pourrait s'expliquer par le contraste textural brusque et marqué entre l'horizon C limoneux et le plancher argileux constitué par les argiles à meulière immédiatement sous-jacent (Jabiol, 2013).

A l'image des racines, la porosité d'assemblage est plus abondante et de plus grande taille dans l'horizon E que dans les horizons plus profonds. Cette porosité d'assemblage est pour partie le résultat de processus abiotiques de remplissage ou de vieillissement de la structure et pour partie associée à l'activité biologique via la coalescence de boulettes fécales produites par les Oligochètes (Bruneau et al., 2004; Hallaire et al., 2004; Hubert et

al., 2007; VandenBygaart et al., 2000) et notamment par les vers endogés et les enchytréides. A mesure que l'intensité de l'activité biologique diminue avec la profondeur, les phénomènes d'arrondissement des agrégats sont de moins en moins prononcés et les pores d'assemblage deviennent alors moins abondants et de plus petite taille (Ringrose-Voase, 1996). Malgré cette diminution avec la profondeur, la persistance des pores d'assemblage sur la totalité de l'épaisseur du sol peut s'expliquer par une activité biologique résiduelle matérialisée sur toute l'épaisseur du sol par l'observation de boulettes fécales (chapitre II).

Les fentes et fissures sont plus nombreuses mais plus petites dans l'horizon BT que dans les autres horizons. Un tel résultat est cohérent avec la diminution de la taille des fentes et de leur connectivité avec la profondeur (Jarvis, 2007) et impliquant dès lors une augmentation de leur nombre. L'augmentation de la taille des fentes et fissures observée dans l'horizon C est plus problématique dans la mesure où cet horizon présente une structure massive, dépourvue de fentes et fissures à l'échelle macroscopique et il semblerait alors qu'une large fraction des pores identifiés comme fentes soient en réalité des pores de racines coupés transversalement (Fig. IV-3). La caractérisation de l'irrégularité des pores à l'aide d'indicateurs tels que le rapport entre le périmètre convexe et le périmètre pourrait permettre d'améliorer cette distinction entre pores racinaires et pores de type fente (Hubert et al., 2007; Pagliai et al., 1984; Rasa et al., 2012; Ringrose-Voase, 1996).

La diminution de la surface des pores attribués à l'activité des vers endogés avec la profondeur jusqu'à leur quasi-disparition à 150 cm de profondeur est caractéristique de cette catégorie écologique qui vit le plus souvent à faible profondeur (Bouché, 1972). L'attribution de pores à l'activité des endogés dans les horizons BT puis dans la partie supérieure de l'horizon C pourrait alors s'expliquer par : i) la présence et l'activité de vers endogés capables de prospector les sols jusqu'à des profondeurs correspondant à la profondeur d'enracinement (Edwards, 2004), ii) une confusion avec des pores créés par des juvéniles de vers anéciques de même taille que les vers endogés et donc impossibles à différencier (Fig. IV-3), et iii) une confusion avec des fentes ou des fissures et inversement (Fig. IV-3). Là encore, la caractérisation de l'irrégularité de la forme des pores pourrait permettre d'améliorer la distinction entre fentes et galeries de vers endogés.

Enfin, les pores attribués aux vers anéciques ont des tailles particulièrement élevées dans l'horizon BT, notamment entre 70 et 80 cm de profondeur, où ces pores de grande taille peuvent correspondre aux logettes d'estivation des vers endogés et anéciques. A ces profondeurs, les vers de terre peuvent en effet trouver des conditions de température et d'humidité favorables. De telles logettes ont ainsi été observées pour ces profondeurs sur le terrain et sur les lames minces.

L'identification de la porosité par analyse d'images ne permet pas d'identifier la totalité de la porosité et la classification entre porosité racinaire, porosité d'assemblage, porosité physique et finalement porosité lombricienne sur des critères de taille et de forme en deux dimensions est imparfaite du fait de confusions possibles entre racines et fentes, entre fentes et vers endogés ou encore entre catégories écologiques de vers de terre. Cependant, les variations d'abondance, de taille et de forme de la macroporosité totale d'une part mais également des différents types de pores d'autre part sont globalement cohérentes avec la littérature. En conséquence, les résultats obtenus par notre méthode d'identification et de classification de la porosité peuvent être interprétés et discutés avec un niveau satisfaisant de confiance.

IV.1b) La proportion de papules, un indicateur de création de porosité lombricienne

Nous avons pu constater dans le chapitre II que la grande majorité des papules était localisée dans des remplissages d'origine biologique et que leur présence était de toute façon systématiquement associée à celle d'une microstructure dominée par les chenaux et les traces de fouissage. De plus, les coiffes et les hypo revêtements à limites diffuses respectivement caractéristiques des processus de gel-dégel (Van Vliet-Lanoë, 2010) ou de retrait-gonflement (Gunal and Ransom, 2006) également susceptibles de générer des papules (Kühn et al., 2010) sont absents entre 30 et 60 cm de profondeur (Tableau II-3) alors que les papules représentent à cette profondeur plus de 50% de la surface totale des traits illuviaux (Tableau II-3, Figure IV-8). Ainsi, la fragmentation des revêtements argileux et leur redistribution sous forme de papules sont, dans le sol étudié, essentiellement liées à l'activité biologique de type brassage prenant la forme de remplissages biologiques. Ces remplissages témoignent de l'action ambivalente des vers de terre qui créent des galeries qu'ils remplissent ensuite simultanément ou avec un décalage dans le temps lorsqu'ils la retraversent (Capowiez et al., 2014a; Jangorzo et al., 2015). La proportion de papules par rapport à la quantité totale de traits illuviaux peut par conséquent être interprétée comme une mesure indirecte de la création de galeries par les vers de terre.

IV.1c) La connexion/déconnexion des revêtements, un indicateur de conservation/disparition de la porosité

Les revêtements argileux sont classiquement formés par dispersion et mobilisation de particules fines, transport en suspension et finalement dépôt sur la paroi de vides (Kühn et al., 2010). Ils sont donc, lors de leur formation, toujours associés à la porosité. Plusieurs causes peuvent toutefois conduire à la déconnexion d'un revêtement du pore dans lequel il s'est formé.

La première cause est purement opérationnelle puisqu'une coupe tangentielle d'un revêtement réellement connecté à la porosité peut suffire pour le déconnecter artificiellement (Kühn et al., 2010). La deuxième cause est associée à un colmatage complet du vide au fur et à mesure de l'épaississement du revêtement. La troisième est liée non pas à la dynamique propre au revêtement argileux mais à celle du vide qui disparaît par effondrement/modification de la structure initiale (Cornu et al., 2014; Gebhardt, 1988; Hallaire et al., 2004; Jongmans et al., 1991) ou par comblement par un remplissage biologique (Capowiez et al., 2014a, 2014b; Jangorzo et al., 2015). La fréquence des deux premières causes devrait augmenter avec l'augmentation du nombre et de la taille des revêtements. Or si, l'abondance (Fig. IV-8) et la taille (Fig. IV-9) des revêtements sont maximales entre 90 et 100 cm de profondeur, les revêtements déconnectés représentent plus de 50% de la surface totale des revêtements entre 30 et 60 cm de profondeur contre à peine plus de 25% entre 90 et 100 cm de profondeur (Fig. IV-11). La surface totale des revêtements déconnectés est en revanche positivement corrélée à la surface des papules ($R^2 = 0,73$) et leur taille est légèrement plus faible que celle des revêtements connectés (Fig. IV-12). Ces résultats suggèrent que les revêtements déconnectés sont, avec les papules, l'un des deux produits de la bioturbation lombricienne (Fig. IV-15). Il pourrait en effet s'agir de la partie du revêtement connectée qui n'a été ni fragmentée ni redistribuée par le passage des vers de terre alors que les papules constitueraient la partie du revêtement fragmentée et redistribuée. Ainsi, la fermeture de la porosité par des remplissages biologiques et/ou par simple effondrement de la structure semble être la cause principale, à défaut d'être exclusive, de la genèse des revêtements déconnectés.

Finalement, à l'image de la proportion de papules par rapport à la quantité de traits illuviaux qui peut être utilisée comme un indicateur de création de porosité par l'activité lombricienne, la proportion de revêtements déconnectés, respectivement connectés, par rapport à la surface totale des revêtement sera utilisée comme un indicateur de la disparition, respectivement de la conservation, de la porosité.

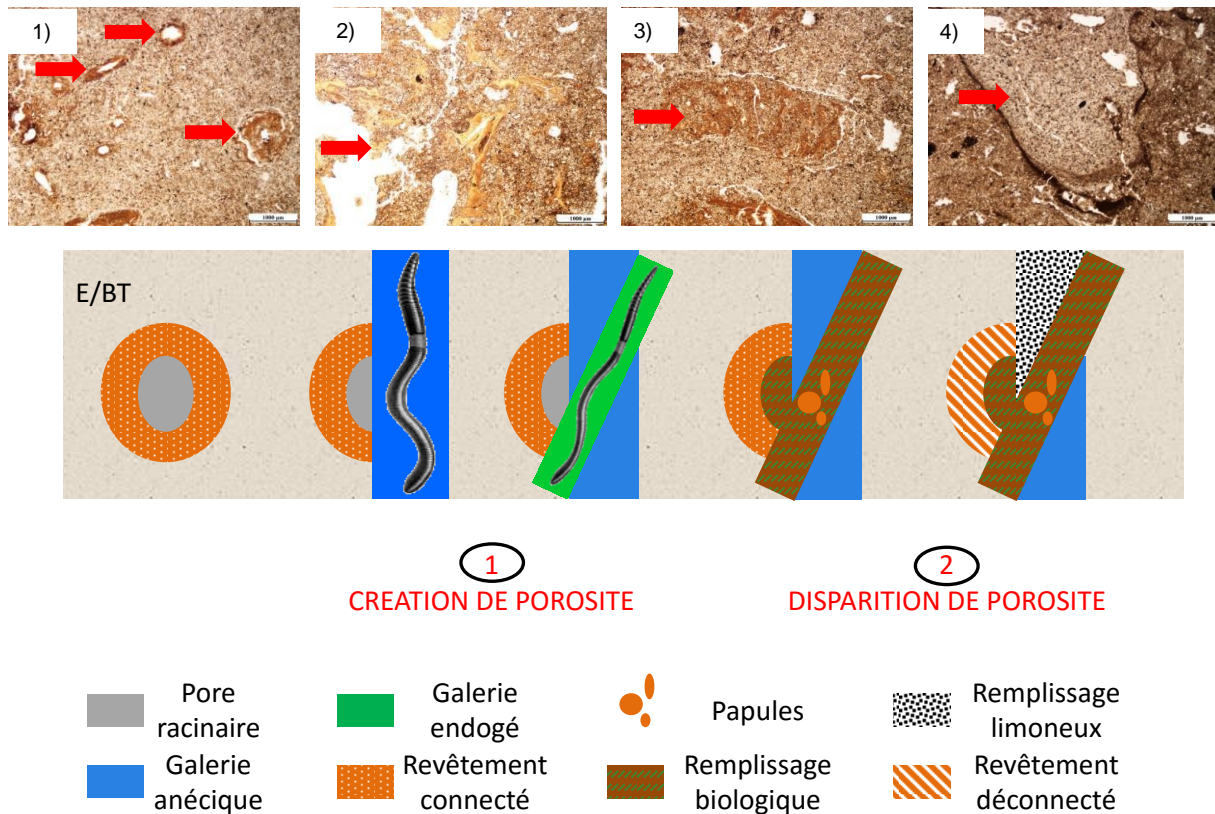


Figure IV-15: Schéma conceptuel de formation d'un revêtement déconnecté avec photographies représentatives associées 1/ ensemble de revêtements connectés à la porosité racinaire 2/ pores lombriciens recoupant des revêtements 3/ remplissage biologique contenant des papules 4/ remplissage limoneux.

IV.1d) Dynamique du réseau poral et profondeur

Sur la base des modalités d'interprétation proposées ci-dessus, des indices normalisés conformément à l'équation 6 et représentant respectivement l'intensité de la création de porosité lombricienne, de conservation de la porosité et finalement d'abondance surfacique de la porosité lombricienne ont été calculés. Leur distribution en fonction de la profondeur est représentée figure IV-16.

$$I = \frac{M - M_{min}}{M_{max} - M_{min}} \quad \text{Eq. 6}$$

Avec pour une profondeur de sol donnée, I l'indice de création, de conservation ou d'abondance surfacique de la porosité ; M la surface relative de papules par rapport à la surface de l'ensemble des traits illuviaux, la surface relative des revêtements connectés par rapport à la surface totale des revêtements (i.e., hors papules) ou la surface de la porosité lombricienne pour respectivement l'indice de création, de conservation et d'abondance de la

porosité ; M_{max} et M_{min} les valeurs maximales et minimales mesurées de M à l'échelle du profil. Les valeurs des indices de création, de conservation ou d'abondance de la porosité sont ainsi comprises entre 0 et 1 lorsque M est respectivement égal à M_{min} ou à M_{max} (Fig. IV-16).

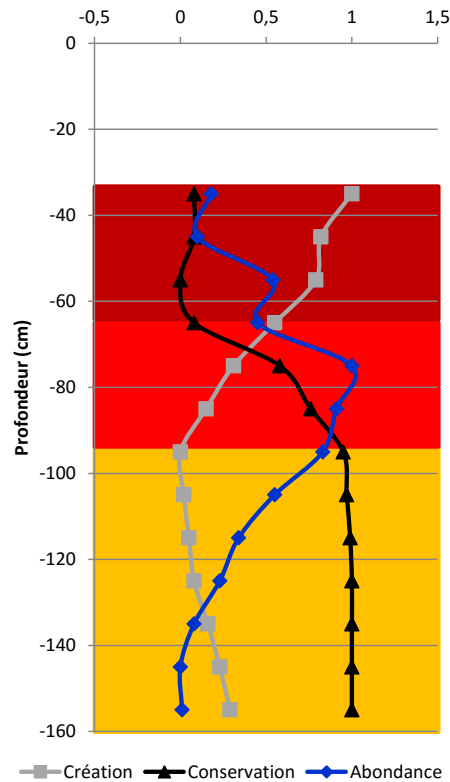


Figure IV-16: Indices de création, de conservation et d'abondance de la porosité lombricienne en fonction de la profondeur. Profil CULT.

Le profil CULT peut ainsi être découpé en trois sous-ensembles sur la base de l'intensité relative de la création et de la conservation de la porosité et de ses conséquences sur l'abondance de la porosité lombricienne.

Le premier sous-ensemble, compris entre 30 et environ 60 cm se caractérise par une création très abondante de porosité lombricienne. Celle-ci n'étant en revanche que très peu conservée, la surface de porosité est alors minimale pour ces profondeurs. Dans cette première partie du sol, couvrant à la fois l'horizon E et la partie supérieure de l'horizon BT, la structure du sol apparaît ainsi très dynamique sous l'effet de la combinaison de possibles perturbations du réseau poral biologique par les répercussions du travail du sol, les phénomènes d'humectation/dessiccation, de gél/dégel. Une telle dynamique de la porosité lombricienne pourrait également caractériser une activité lombricienne très intense largement influencée par les vers endogés (Fig. IV-4b). Les vers endogés n'entretiennent pas un réseau de galeries spécifique et bien identifié et, ne remontant jamais à la surface du

sol, remplissent une part du réseau poral qu'ils ont créé avec leurs déjections (Capowiez et al., 2014a, 2014b; Peres, 2003).

Entre 60 et 90 cm de profondeur, de moins en moins de porosité est créée par l'activité lombricienne. Toutefois, dans la mesure où la conservation de cette porosité s'améliore, le peu de porosité créée est conservée avec pour résultat final une augmentation de l'abondance de la porosité. Le maximum de porosité est ainsi atteint autour de 70 cm de profondeur lorsque création et conservation de la porosité s'équilibrent. Si la diminution de l'activité de création de porosité est évidemment à mettre en parallèle avec la diminution de l'activité générale des vers de terre avec la profondeur (Capowiez et al., 2014a; Tonneijck and Jongmans, 2008; Wilkinson et al., 2009), l'augmentation de la durée de conservation de cette porosité pourrait s'expliquer par une diminution des perturbations subies par le réseau poral sous l'effet des cycles d'humectation/dessiccation et de gel/dégel mais aussi par le passage d'une activité lombricienne dominée par les vers endogés à une activité lombricienne dominée par les vers anéciques. Une telle modification de la nature de l'activité lombricienne est cohérente avec des surfaces de pores attribuées aux vers anéciques largement supérieures à celles des pores attribués aux vers endogés à partir de 60 cm de profondeur (Fig. IV-4). Or, les vers anéciques sont connus pour déposer leurs turricules à la surface des sols, limitant ainsi la formation de remplissage biologiques au sein des sols, et, plus généralement, pour entretenir leurs galeries sur des durées pouvant s'étaler sur plusieurs années (Capowiez et al., 2014a).

Enfin, en-dessous de 90 cm de profondeur ce qui correspond globalement à l'horizon C, il y a trop peu de création même si la porosité créée présente un très fort potentiel de conservation pour maintenir l'abondance de la porosité qui diminue avec la profondeur.

L'abondance du réseau poral d'origine lombricienne d'un sol apparaît ainsi tout autant liée à l'intensité de création de pores, qui tend à décroître en fonction de la profondeur, qu'à la stabilité dans le temps de la porosité créée. Cette stabilité tend à augmenter en fonction de la profondeur au fur et à mesure de la diminution de la fréquence et de l'intensité des perturbations du réseau poral biologique par des mécanismes physiques mais aussi du passage d'une activité lombricienne dominée par les vers endogés à une activité dominée par les vers anéciques. Cette différence de dynamique en fonction de la profondeur a déjà été décrite par Lamandé et al. (2011). Les auteurs considèrent ainsi que jusqu'à 40 cm de profondeur la macroporosité est sous contrôle de l'activité des vers de terre selon une dynamique rapide (annuelle) alors que plus profondément, les propriétés intrinsèques du sol et la géologie pilotent sa dynamique sur une échelle de temps plus longue (> 100 ans).

IV.2. L'illuviation : un processus actif et sélectif

A notre connaissance, de très rares travaux ont cherché à caractériser les relations liant taille des pores et épaisseur des revêtements. Dalrymple and Theocharopoulos (1987) ont ainsi qualitativement analysé une trentaine de pores contenant des revêtements argileux au sein de quadrats de 4*4 cm sur plusieurs lames minces de sol sans toutefois trouver de corrélation entre la taille des pores et l'épaisseur des revêtements probablement du fait d'un trop petit nombre de pores analysés. Dans ce travail, l'identification systématique des pores contenant des revêtements et la quantification du taux de remplissage pour la totalité des 26 171 pores contenant des revêtements a permis d'identifier deux principaux types de porosité au comportement distincts vis-à-vis du processus d'illuviation : d'une part la porosité associée aux vers endogés et anéciques d'un diamètre équivalent supérieur au mm, dite de grande taille, et d'autre part la porosité associée aux racines, aux pores d'assemblage et aux fentes et fissures d'un diamètre équivalent inférieur au mm, dite de petite taille.

Les pores de grande taille se caractérisent par une très forte probabilité de contenir des revêtements (jusqu'à 100% des galeries de vers anéciques, Fig. IV-13), mais des taux de remplissage peu élevés n'excédant généralement pas 10% (Fig. IV-14). L'analyse qualitative des revêtements contenus dans 43 pores d'anéciques provenant de 18 lames minces a alors permis d'identifier deux principaux types de revêtements.

Les revêtements appartenant à la première catégorie, majoritaire, s'observent sur la totalité de l'épaisseur du sol, sont de taille relativement grande, n'épousent pas la forme du pore et dans un certain nombre de cas, sont composés de deux ou plusieurs fragments distribués sur les parois opposées d'un même pore (Fig. IV-17a). Cette première catégorie peut être interprétée comme des fragments de revêtements recoupés par des galeries de vers postérieures à la fabrication des revêtements observés. Elle correspondrait au stade intermédiaire de développement entre le revêtement connecté non transformé et le revêtement déconnecté après remplissage ou effondrement de la structure tel que schématisé en figure IV-15. Ainsi, la connexion entre porosité de grande taille et revêtement ne serait pas liée au fonctionnement actuel du pore considéré mais serait purement aléatoire d'où une probabilité de trouver cette catégorie de revêtement croissante avec la taille des pores. Une telle déconnexion fonctionnelle malgré une connexion spatiale entre cette catégorie de revêtements et les pores de grande taille est en accord avec le fait qu'au-delà de 0,3 à 0,5 mm de diamètre, les pores sont favorables au transport préférentiel à forte compétence et donc au transport des particules plus qu'à leur dépôt (Jarvis, 2007).

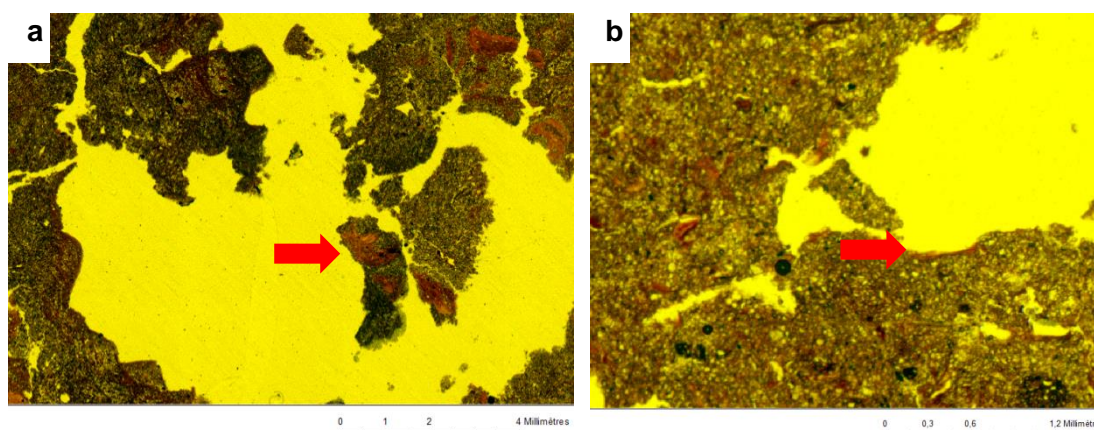


Figure IV-17: Revêtements au contact d'un pore de vers anécique : a) fragments de revêtements recoupés par un pore de vers anécique (CULT 90-100 R1) et b) fin revêtement déposé sur la paroi d'un pore de vers anécique (CULT 70-80 R2).

A l'inverse, les revêtements de la seconde catégorie s'observent principalement pour des profondeurs inférieures ou égales à 80 cm, sont très fins, épousent parfaitement la forme de la paroi du pore d'anécique et ne sont pas recoupés par de la porosité ou par un autre trait pédologique (Fig. IV-17b). Cette seconde catégorie de revêtement est alors interprétée comme le produit du fonctionnement du pore dans lequel le revêtement est observé. Dans la mesure où la durée de vie des pores d'anéciques est tout au plus estimée à quelques années (Lee, 1985), l'existence de ces revêtements suggère que le processus d'illuviation est actif, ou pour le moins contemporain, dans les sols étudiés, et ce même s'ils sont peu nombreux. Une telle activité du processus d'éluviatation/illuviation est conforme avec son rôle, bien étudié, dans les transferts particuliers de polluants (Bradford et al., 2004; Van den Bogaert et al., 2016).

A l'exact opposé des pores de grande taille, les pores de diamètre équivalent moyen inférieur au mm se caractérisent par i) une proportion significative de pores ne contenant pas de revêtements (Fig. IV-13), ainsi que par ii) des taux de remplissage très élevés dépassant fréquemment 60 % (Fig. IV-14). Ces taux de remplissage élevés dans les pores de petite taille sont cohérents avec les résultats obtenus par Van den Bogaert et al. (2016) à partir d'expérimentations de transport de microsphères fluorescentes sur colonnes de sol non remaniés. La sélectivité de la rétention pour les pores de plus petite taille s'expliquerait alors par un pilotage de la rétention des particules par la sorption capillaire des suspensions colloïdales depuis la macroporosité vers la microporosité de la matrice du sol, sorption d'autant plus facilitée que le flux d'eau est ralenti et que la surface de contact entre la phase solide et la phase liquide augmente ou autrement dit que la taille des pores diminue (Van Den Bogaert, 2015). Enfin, l'absence de revêtements dans un grand nombre de pores souligne sans aucun doute que ces pores font partie de la porosité inactive dans laquelle

l'eau ne s'écoule pas et non de la porosité active souvent minoritaire (Sammartino et al., 2015; Van Den Bogaert, 2015).

IV.3. Les flux de matière

IV.3a) Valeurs absolues et littérature

IV.3.a.1 Analyse d'images et comptage au point

A partir de la quantification exhaustive des traits illuviaux (revêtements et papules) et de la mesure de la masse volumique des revêtements argileux, le flux de fraction $< 2 \mu\text{m}$ lié au processus d'illuviation a été estimé à $1\,130 \text{ t.ha}^{-1}$ (Tableau IV-2). Cette estimation est du même ordre de grandeur que les $1\,510 \text{ t.ha}^{-1}$ estimés par comptage au point (chapitre II, Tableau II-5), bien que légèrement plus faible. L'abondance des revêtements argileux estimée par comptage au point est comprise entre un minimum d'environ 2% dans la partie supérieure de l'horizon BT et un maximum de 11,5% dans la partie supérieure de l'horizon C (Tableau II-4). Elle est donc supérieure à celle estimée par analyse d'images comprise entre un minimum inférieur à 1% et un maximum inférieur à 8% (Fig. IV-8). A l'inverse, l'abondance des papules estimée par comptage au point est toujours inférieure à 1% alors qu'elle peut excéder 2% d'après la méthode par analyse d'images. Ainsi, la méthode par analyse d'images tend, par rapport au comptage au point, à sous-estimer l'abondance des revêtements et au contraire à surestimer l'abondance des papules. Une sous-estimation de la surface totale des traits illuviaux d'environ 30% par la méthode d'analyse d'images par rapport à une approche à dires d'expert est impossible puisqu'elle fournit des résultats identiques dans les zones d'épaisseur modale et tend à surestimer la surface des revêtements dans les zones trop épaisses ou trop fines (chapitre III).

La différence entre les deux méthodes ne peut donc s'expliquer uniquement par les performances de la méthode par analyse d'images. En effet, la méthode par comptage au point a été basée sur l'utilisation d'un unique maillage partiellement adapté à la quantification simultanée des papules de diamètre équivalent inférieur à $200 \mu\text{m}$ et des revêtements de beaucoup plus grande taille avec pour conséquence une sous-estimation de l'abondance des papules et au contraire une surestimation de celle des revêtements (Ulery and Drees, 2008). Quoi qu'il en soit, la cohérence des résultats obtenus par les deux méthodes soulignent l'efficacité et la pertinence des approches par analyse d'images, et ce d'autant plus que le traitement d'un grand nombre d'images est nécessaire (22 pour le seul profil CULT) et que l'on cherche à évaluer aussi précisément que possible l'abondance de traits de taille très différente.

IV.3.a.2 Flux de matière liés au processus d'illuviation et bibliographie

Les quantifications des flux de matière liés au processus d'éluviation/illuviation sont rares dans la littérature du fait des difficultés objectives pour les mesurer (Cornu et al., 2014; Quénard et al., 2011). Les rares données disponibles ont été obtenues, soit à partir de mesures expérimentales en laboratoire des quantités de particules éluviées de colonnes de sol non remaniées couplées à des estimations des durées de formation des horizons BT (Cornu et al., 2014; Quénard et al., 2011), soit à partir de modélisations multi-isotopique des transferts de fraction $< 2 \mu\text{m}$ (Jagercikova et al., 2014, 2015). Les flux de fraction $< 2 \mu\text{m}$ mesurés dans le profil CULT ($1\ 130 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$) se situent ainsi dans la gamme haute des estimations proposées par Quénard et al. (2011) comprises, pour 11 luvisols distincts, entre 1 et $1\ 150 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. De plus, si l'on accepte l'hypothèse émise par Quénard et al. (2011) selon laquelle la durée nécessaire et suffisante pour occasionner de tels flux de fraction $< 2 \mu\text{m}$ est comprise entre un minimum de 710 ans et un maximum de 9 100 ans (période d'activité du processus), alors la quantité moyenne de fraction $< 2 \mu\text{m}$ illuviée chaque année dans le profil CULT est comprise entre $0,12$ et $1,6 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$. Ces vitesses d'illuviation sont du même ordre de grandeur que les vitesses d'éluviation comprises entre $0,06$ et $1,28 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ quantifiées par Jagercikova et al. (2014) pour les 40 premiers cm d'un luvisol sous prairie.

La similarité des vitesses d'illuviation et des vitesses d'éluviation suggère ainsi que la grande majorité, si ce n'est la totalité, des particules mobilisées depuis les 40 premiers cm des sols sont susceptibles d'être fixées, à une profondeur ou à une autre, sur une épaisseur de sol de l'ordre d'environ un mètre, soit dans le cas du profil CULT entre 40 et 160 cm de profondeur. Bien que relativement surprenante, cette capacité du sol à retenir la quasi-totalité des particules mobilisées depuis les horizons de surface est parfaitement cohérente avec les taux de rétention mesurés sur des colonnes de sol qui sont le plus souvent supérieurs à 50% et atteignent parfois 100% des particules pour des épaisseurs de sol traversées de seulement 15 cm (Cornu et al., 2014; Van Den Bogaert, 2015).

Les vitesses d'éluviation estimées par Jagercikova et al. (2014) ont été obtenues à partir de la redistribution en profondeur de ^{137}Cs , dont le temps de demi-vie est de 30,2 ans. Elles correspondent donc à des vitesses d'éluviation « contemporaines » ou de court terme (Jagercikova et al., 2014). A l'inverse, les vitesses d'illuviation mesurées dans ce travail ont été calculées pour des durées d'illuviation comprises entre 710 et 9 100 ans. Elles peuvent donc être considérées comme des vitesses d'illuviation « historiques » ou de long-terme. La similarité des vitesses « long-terme » avec les vitesses « court-terme » souligne une certaine stabilité dans le temps de l'intensité du processus d'éluviation/illuviation à l'opposé des hypothèses suggérant que le processus d'éluviation/illuviation serait un processus essentiellement fossile (Van Vliet-Lanoë, 1990).

IV.3.a.3 Flux de matière liés à la bioturbation et bibliographie

Le volume de sol bioturbé estimé à partir de la quantification de l'abondance des pores et des remplissages d'origine lombricienne correspond à deux tiers du volume total à 40 cm de profondeur et entre un quart et un tiers du volume total entre 80 et 160 cm de profondeur. La part des remplissages dans ce volume de sol remanié est largement majoritaire et varie entre 71 et 97 %. La porosité lombricienne est relativement faible dans l'horizon E alors que ce dernier présente la plus forte activité biologique. Ainsi, sur l'unique base de l'abondance des galeries lombriciennes, l'intensité de l'activité biologique est d'une part grandement sous-estimée d'un point de vue quantitatif, et la représentation de sa distribution avec la profondeur est par ailleurs erronée.

La faune lombricienne est à l'origine d'un déplacement d'environ 6 500 t.ha⁻¹ de sol dont 1 700 t.ha⁻¹ de fraction < 2 µm (Tableau IV-2). Dans la double mesure où i) ces quantifications sont liées à la fragmentation et à la redistribution des revêtements argileux sous forme de papules, et où ii) les revêtements argileux et les papules sont, en l'absence d'hydromorphie, stables dans le temps (Kühn et al., 2010), les quantifications du volume de sol et des flux de matière bioturbés sont cumulées sur un pas de temps compris entre la mise en place des traits illuviaux et aujourd'hui. Si les travaux présentés ici suggèrent que certains traits illuviaux sont contemporains, les modélisations par Jagercikova et al. (2015) de la redistribution de ¹⁰Be en fonction de la profondeur dans des luvisols comparables à ceux étudiés ici suggèrent que le processus d'illuviation a débuté il y a environ 10 000 à 15 000 ans juste après la mise en place des limons éoliens (âge de démarrage du processus). Ainsi, la bioturbation telle qu'estimée dans ce travail doit être interprétée comme le volume total ou la quantité totale de sol redistribué par l'activité lombricienne sur une période maximale de 10 000 à 15 000 ans. De plus, il n'est pas possible de différencier à partir de l'approche proposée la première fragmentation et redistribution d'un revêtement en papules des éventuelles reprises et redistributions ultérieures de ces mêmes papules. Ainsi, nos mesures d'intensité de bioturbation quantifient bien davantage le volume et la masse de sol déplacés au moins une fois par l'activité biologique que le nombre de fois où cette masse de sol a été déplacée.

Sur la base d'une bioturbation cumulée sur une période de 10 000 à 15 000 ans, le volume moyen de sol nouvellement exploré et la masse moyenne de sol nouvellement déplacée chaque année par l'activité lombricienne correspond à respectivement 0,004% à 0,006 % du volume total de sol à 40 cm de profondeur, 0,001% à 0,002% du volume total de sol pour des profondeurs supérieures à 80 cm et à une masse de sol déplacée comprise entre 0,44 t.ha⁻¹.an⁻¹ et 0,65 t.ha⁻¹.an⁻¹. Ce taux de bioturbation est i) 10 à 100 fois plus faible que les 5 à 53 t.ha⁻¹ proposées par Wilkinson et al. (2009) à partir de mesures des biomasses lombriciennes et d'estimation de taux d'ingestion, et ii) jusqu'à 1000 fois plus

faible que les 400 t.ha⁻¹ citées par Jagercikova et al. (2014) pour les sols de climat tempéré. Une telle sous-estimation des masses de sol déplacées n'est pas étonnante car nos quantifications de la bioturbation ne prennent pas en compte les 40 premiers cm de sol dans lesquels l'intensité de la bioturbation est maximale (Johnson et al., 2014; Wilkinson et al., 2009). Elle souligne également la tendance des vers de terre à remobiliser sur le long terme plus ou moins régulièrement les mêmes masses de sol tout en n'explorant pas ou très peu une large fraction du volume de sol. Un telle *re-bioturbation* (Bouché et al., 2014; Bruneau et al., 2004; Wilkinson et al., 2009) des vers de terre i) des horizons de surface par rapport aux horizons profonds mais aussi ii) d'anciens remplissages biologiques par rapport à la matrice du sol, est parfaitement cohérente avec la genèse de traits pédologiques spécifiques de la *re-bioturbation* (Humphreys, 1994; Wilkinson et al., 2009), avec la concentration des turricules en fraction < 2 µm (Edwards, 2004) mais aussi avec la conservation de revêtements argileux en place et plus généralement de la juxtaposition dans les sols d'une structure sous contrôle de l'activité biologique avec une structure largement indépendante de cette même activité.

Les estimations du volume de sol bioturbé à partir d'approches similaires à celle développée dans le cadre de ce travail, de ce fait directement comparables, sont plutôt rares (Fernandez et al., 2010; Jongmans et al., 2003, 2001; Tonneijck and Jongmans, 2008; Wilkinson et al., 2009). Le volume de sol bioturbé dans des sols limoneux des Pays-Bas poldérisés entre le 17^{ème} et le 18^{ème} siècle est ainsi compris entre un maximum de 51% dans les horizons de surface et un minimum de 7% entre 20 et 30 cm de profondeur (Jongmans et al., 2003). Dans des sols sableux d'Australie, le volume bioturbé représente 20% du volume total du sol à 10 cm de profondeur, 5% à 30 cm de profondeur et environ 1% à 70 cm de profondeur (Wilkinson et al., 2009). Enfin, dans un sol limono-sableux pollué du nord de la France (Fernandez et al., 2010), 56%, 26% et 7% du volume total du sol étaient bioturbés respectivement en surface, entre 25 et 50 cm de profondeur et entre 50 et 75 cm de profondeur sous prairie contre seulement 8%, 16% et 0% aux mêmes profondeurs d'un sol cultivé comparable.

La décroissance de l'intensité de la bioturbation avec la profondeur apparaît ainsi clairement comme un point commun à l'ensemble de ces études. Cette décroissance n'est généralement pas régulière mais répond plutôt à des phénomènes de seuil comme cela peut s'observer sur le profil CULT avec une diminution par un facteur 2 du volume de sol bioturbé entre 60 et 70 cm de profondeur (Tableau IV-2). Si ce type de décroissance peut correspondre à la transition entre deux horizons (Jongmans et al., 2003; Wilkinson et al., 2009), elle est localisée pour le profil CULT au sein même de l'horizon BT. La profondeur de cette limite est globalement concordante avec la profondeur d'observation des logettes d'estivation et pourrait donc être interprétée comme la profondeur limite de l'habitat ou d'un

type d'activité d'un organisme bioturbateur particulier (Wilkinson et al., 2009). Par ailleurs, il semble que l'évolution avec la profondeur de l'intensité de l'activité biologique dépende de l'abondance des racines et de la profondeur d'enracinement à l'instar de ce qui a été mis en évidence par Johnson et al. (2014), les racines et les remplissages étant tous deux particulièrement abondants dans l'horizon E et à la base de l'horizon C (> 120 cm).

L'intensité de la bioturbation est en revanche extrêmement variable d'une étude à une autre. Si le peu de données disponibles interdit d'identifier avec certitude le ou les facteurs susceptibles d'expliquer les variations d'intensité de la bioturbation, l'intensité de la bioturbation particulièrement élevée dans le profil CULT, notamment pour des profondeurs supérieures au mètre, pourrait être liée à : i) un sol beaucoup plus vieux que les sols étudiés par Jongmans et al. (2003) âgés d'au plus 400 ans, ii) une texture limoneuse globalement plus favorable à l'activité des vers de terre que les textures sableuses (Wilkinson et al., 2009) ou sablo-limoneuses (Fernandez et al., 2010), ou encore iii) par un effet limitant des pollutions sur la bioturbation (Fernandez et al., 2010). L'impact d'effets complémentaires tels que la composition, la diversité et l'abondance des communautés d'organismes bioturbateurs ou encore de la dynamique de conservation des traits biologiques sont probables et malheureusement impossibles à mettre en évidence à partir des données disponibles. L'ensemble de ces effets resteraient donc à quantifier avec plus de précision si l'on souhaite un jour être en mesure de prédire ou modéliser l'intensité de la bioturbation et sa distribution en fonction de la profondeur.

IV.3b) Lien entre les deux processus : équilibre global et variations avec la profondeur

La bioturbation n'est pas un processus de transfert de matière granulométriquement sélectif de la fraction < 2 μm . Pour autant, en déplaçant du sol, la bioturbation occasionne des flux de fraction < 2 μm (Tableau IV-2) dont l'intensité peut alors être comparée à l'intensité des flux liés au processus d'éluviation/illuviation. A l'échelle du profil CULT dans son ensemble, les flux de fraction < 2 μm liés au processus de bioturbation sont plutôt plus élevés que ceux liés au processus d'illuviation. En ce sens, la bioturbation pourrait compenser ou limiter l'entraînement en profondeur de la fraction < 2 μm des sols.

Toutefois, l'existence de flux d'illuviation plus élevés que les flux de bioturbation entre 80 et 120 cm de profondeur indiquent i) qu'au moins une partie des particules mobilisées atteignent la profondeur de 80 cm malgré des flux de bioturbation beaucoup plus élevés que les flux d'illuviation dans la partie supérieure du sol, et ii) qu'une fois cette profondeur atteinte, certaines de ces particules ne pourront jamais être remontées par l'activité biologique et sont ainsi irréversiblement perdues pour les horizons de surface. Cette persistance d'un flux globalement descendant, pour au moins une partie des particules du

sol, malgré une bioturbation au moins aussi intense que l'illuviation souligne plusieurs différences entre ces deux processus.

Tout d'abord, si le processus d'illuviation est majoritairement descendant et si la partie de la bioturbation correspondant au dépôt de turricules à la surface des sols par les vers anéciques est clairement ascendant, il n'existe que très peu d'informations permettant de statuer avec précision sur l'origine, la distance parcourue ou encore la direction moyenne des déplacements des particules de sol contenues dans les remplissages biologiques. Or, les quantités de matière redistribuées sous la surface du sol, soit entre deux horizons, soit au sein même d'un horizon, sont très supérieures aux quantités de matière apportées à la surface des sols sous forme de turricules. Les turricules de surface ne représentent ainsi que 25% environ des rejets annuels des lombriciens (Bonneau et al., 1994; Bouché et al., 2014; Müller-Lemans and van Dorp, 1996). Mieux comprendre l'origine et le trajet effectué par les particules contenues dans les remplissages biologiques est ainsi indispensable à une meilleure caractérisation du mouvement moyen des particules de sol sous l'effet de la bioturbation.

L'observation de papules dans les horizons E (Fig. IV-8), ou autrement dit dans un horizon théoriquement dépourvu de traits illuviaux, suggère qu'une partie de la matière contenue dans les remplissages biologiques provient d'horizons plus profonds. Toutefois, la surface ou le nombre de papules observés dans l'horizon E est très faible par rapport au stock potentiellement mobilisable depuis les horizons sous-jacents (Fig. IV-8). De plus, revêtements en place et papules montrent des distributions identiques en fonction de la profondeur (Fig. IV-8). La fabrication des papules à partir des revêtements en place n'implique ainsi aucune redistribution des papules en fonction de la profondeur. Une large part des remplissages biologiques dans lesquelles se trouvent ces papules correspondent donc très probablement à des déplacements horizontaux de matières et par conséquent à une activité dominée par les endogés qui, à la différence des anéciques, ont pour caractéristique de créer un réseau de galeries sub-horizontales (Pelosi, 2008) et de brasser le sol sur de faibles distances verticales (Tonneijck and Jongmans, 2008). Ainsi, seule une partie des $1\,700\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ de fraction $< 2\text{ }\mu\text{m}$ déplacée par l'activité lombricienne correspondrait à des flux ascendants. Dans le cas étudié, cette fraction n'est pas suffisante pour compenser les flux descendants liés au processus d'éluviation/illuviation.

Par ailleurs, les particules déplacées par le processus d'éluviation proviennent soit de la surface du sol où elles sont mobilisées par effet « splash » soit de la surface des pores où elles sont mobilisées par les « stress » hydrodynamiques provoqués par les flux d'eau (Van Den Bogaert, 2015). Spatialement localisé, le stock de particules mobilisables par le processus d'éluviation est donc limité et potentiellement épuisable. La fraction $< 2\text{ }\mu\text{m}$ déplacée par les vers de terre correspond à un mélange en proportions variables i) de

revêtements argileux et donc de particules déjà déplacées par le processus d'éluviation/illuviation, ii) de la remobilisation d'anciens remplissages biologiques, mais aussi iii) de particules provenant de zones du sol non encore explorées par l'activité biologique. Ce faisant, l'activité biologique va générer d'une part de nouvelles surfaces de pores et d'autre part des remplissages biologiques. Ces nouvelles surfaces et ces nouveaux remplissages constitueront autant de nouveaux stocks de fraction $< 2 \mu\text{m}$ potentiellement mobilisables par le processus d'éluviation (Jouquet et al., 2009). Ainsi, si la bioturbation peut, dans une certaine mesure, compenser les flux verticaux descendants de fraction $< 2 \mu\text{m}$ par éluviation/illuviation, la bioturbation permet également le renouvellement permanent du stock de particules mobilisables conformément au modèle conceptuel proposé par Phillips (2007, 2004). Ce renouvellement permanent du stock de fraction $< 2 \mu\text{m}$ est d'autant plus efficace dans le cas étudié ici qu'au-dessus de 80 cm de profondeur, la bioturbation mobilise plus de fraction $< 2 \mu\text{m}$ que le processus d'illuviation (Tableau IV-2).

V. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons identifié, quantifié et classé l'ensemble des pores et des traits illuviaux du profil CULT localisés entre 30 cm et 160 cm de profondeur. Cela a tout d'abord permis de valider l'attribution des 5 classes de porosité définies sur la base de critères morphologiques de taille et de forme à une origine biologique (racines, vers endogés, vers anéciques), physique (fentes et fissures) ou mixte (assemblage). L'activité lombricienne, notamment anécique, et l'activité racinaire ont ainsi été identifiées comme les principaux facteurs contrôlant respectivement la surface du réseau poral et le nombre des pores. L'utilisation de critères morphologiques permettant de quantifier l'irrégularité des pores pourrait toutefois permettre de limiter certaines confusions résiduelles entre classes et améliorer encore la précision de cette classification de la porosité relativement à son origine.

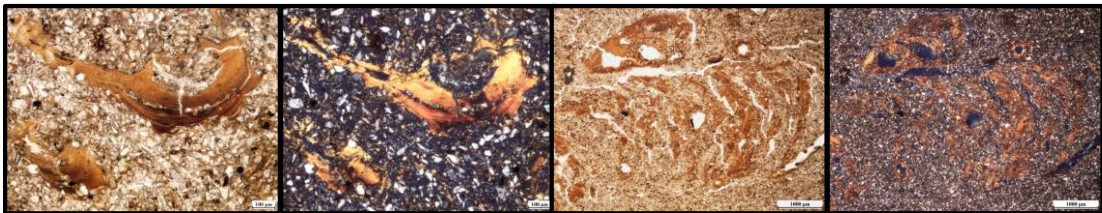
A l'aide de l'interprétation d'une part de la proportion de papules par rapport à l'ensemble des traits illuviaux comme indicateur de création de porosité et d'autre part de la proportion de revêtements connectés à la porosité par rapport à l'ensemble des revêtements comme indicateur de conservation de cette porosité, il a été possible de caractériser la dynamique de la porosité lombricienne. Trois zones ont en particulier été distinguées. Entre 30 et 60 cm de profondeur, l'abondance de la porosité est limitée par la durée de conservation malgré une forte création de porosité par l'activité lombricienne. Entre 90 et 160 cm de profondeur, l'abondance de la porosité est au contraire limitée par la création de porosité par l'activité lombricienne malgré des durées de conservation potentiellement longues. Enfin, entre 60 et 90 cm de profondeur, l'abondance de la porosité est maximale du fait de l'équilibre entre création et conservation. Pour aller, plus loin, il serait intéressant

d'une part d'étudier dans quelle mesure cette dynamique du réseau poral et l'abondance de la porosité qui en découle sont spécifiques du sol étudié ou au contraire génériques et d'autre part de tester dans quelle mesure il serait possible d'utiliser les indicateurs proposés non plus uniquement de manière relative mais aussi de manière absolue dans l'objectif de calculer des taux de renouvellement du réseau poral en fonction de la profondeur.

L'extraction, la quantification et la classification des pores et des traits illuviaux a également permis d'améliorer nos connaissances sur les deux processus de bioturbation et d'illuviation. Ainsi, une fraction non négligeable des redistributions de matière par les processus de bioturbation correspondent à des transferts subhorizontaux et à la reprise d'anciennes zones bioturbées. Il a par ailleurs pu être démontré que le processus d'illuviation est très probablement encore actif dans le sol étudié, que la vitesse contemporaine de ce processus est sensiblement identique aux vitesses moyennes d'illuviation calculées sur l'ensemble de la phase active du processus et que l'intensité du processus d'illuviation est d'autant plus importante que la taille de la porosité diminue. Enfin, il a pu être montré que si la bioturbation pouvait en partie compenser le processus d'illuviation, la bioturbation de la partie supérieure du sol assurait également le renouvellement permanent du stock de particules potentiellement mobilisables par le processus d'éluviation et constituait ainsi une étape préliminaire indispensable à l'expression du processus d'illuviation.

Finalement, la généralisation de la quantification des traits pédologiques spécifiques des processus de bioturbation et d'illuviation à l'échelle de l'ensemble du profil a permis pour la première fois de quantifier simultanément l'intensité de chacun de ces deux processus. Ainsi le volume de sol bioturbé depuis l'apparition des premiers revêtements argileux, soit depuis 10 000 à 15 000 ans, est compris entre 2/3 du volume total à 40 cm de profondeur et 20 à 30% du volume total à 150 cm de profondeur. La masse totale de sol déplacée au moins une fois correspond alors à $6\,500\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, soit à l'équivalent d'une tranche de sol de 40 cm d'épaisseur. Le processus d'illuviation est, quant à lui, à l'origine d'un flux de fraction $< 2\text{ }\mu\text{m}$ de l'ordre de quelques tonnes par hectare à plus d'une centaine de tonnes par hectare en fonction de la profondeur pour un total sur l'ensemble du sol d'un peu plus $1\,000\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Si la bioturbation est plus intense que l'illuviation jusqu'à 80 cm de profondeur et que cette hiérarchie s'inverse plus en profondeur, ces deux processus de transfert de matière restent toutefois significativement actifs sur toute l'épaisseur du profil de sol, soit pour des profondeurs rarement mentionnées dans la littérature, notamment pour ce qui concerne la bioturbation.

CHAPITRE V - EFFETS DU MODE D'OCCUPATION SUR LES PROCESSUS DE TRANSFERT ET DYNAMIQUES ASSOCIEES



I. Introduction

Dans les chapitres précédents, nous avons développé, validé et testé une méthode de quantification de l'intensité de deux processus de transfert de matière : l'éluviation/illuviation et la bioturbation. Or, le mode d'occupation des sols et les pratiques agricoles sont susceptibles d'impacter l'intensité de ces processus soit directement soit indirectement (Figure V-1).

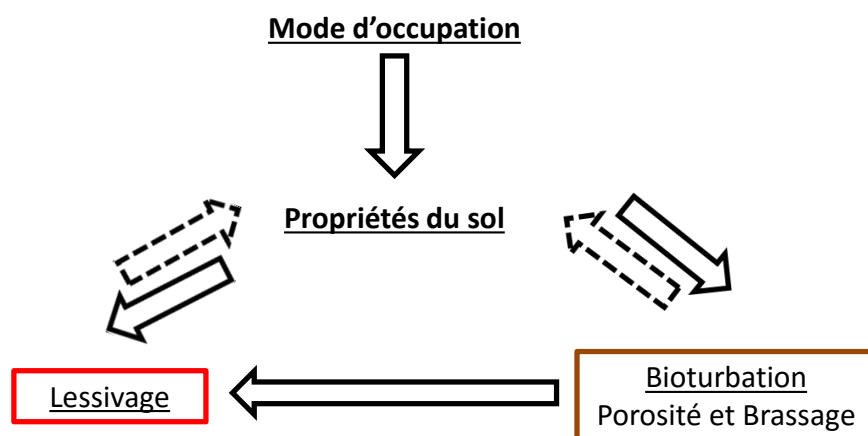


Figure V-1 : Interactions et rétroactions entre mode d'occupation des sols, bioturbation et lessivage (d'après Faivre and Chamarro, 1995; Lamandé et al., 2003)

La mise en culture provoque en effet une modification des communautés lombriciennes avec le plus souvent une diminution de leur diversité, de leur densité et/ou de leur biomasse (Pelosi, 2008; Peres et al., 2010). La disparition des litières forestières et le relèvement des pH acides par chaulage avec la mise en culture impliquent notamment la disparition des espèces épigées classiquement rencontrées sous forêt et qui apprécient les pH proches de 5 (Edwards, 2004). La diminution de la ressource en carbone avec la mise en culture est également un facteur fréquemment invoqué pour expliquer l'effet négatif de la mise en culture des sols sur la démographie des communautés lombriciennes. De plus, l'enfouissement des résidus de culture modifie l'équilibre entre vers endogés et vers aéciques au profit des vers endogés étant donné que les vers anéciques se nourrissent à la surface des sols (Pelosi, 2008). Alors que le labour régulier du sol perturbe plus particulièrement les populations anéciques (Chan, 2001; Pelosi, 2008), les traitements phytosanitaires réguliers ont un effet globalement négatif sur l'ensemble des populations lombriciennes même si les effets sont très variables selon les espèces présentes et les molécules utilisées (Edwards, 2004). Enfin, le tassement par les engins agricoles est également défavorable au développement des communautés. A l'inverse, certaines pratiques agricoles peuvent avoir un effet positif sur la démographie des lombriciens. Ainsi,

la fertilisation minérale, si elle reste modérée et ne provoque pas une acidification du milieu, tend à avoir un effet positif sur les populations (Edwards, 2004). Par ailleurs, les pratiques de chaulage permettent de remonter des pH souvent initialement très bas ce qui est propice au développement des communautés lombriciennes et au brassage de matière par bioturbation (Langohr, 2001). Par ailleurs, l'épandage de matières organiques sur sols cultivés (hormis certains lisiers) permet une augmentation de la densité et de la biomasse des vers de terre et de la bioturbation associée (Capowiez et al., 2009; Edwards, 2004). Enfin, en limitant la fréquence, la durée et l'intensité des périodes de sécheresse auxquelles les vers de terre sont particulièrement sensibles, l'irrigation leur est plutôt favorable (Pelosi, 2008).

La mise en culture des sols est généralement supposée stopper ou pour le moins diminuer l'intensité du processus d'éluviation/illuviation (Fedoroff, 1997; Langohr, 2001). En effet, alors que le pH des sols forestiers, et notamment des luvisols, sont susceptibles d'être compris entre 5 et 6,5 (chapitre I), soit dans une gamme de pH favorable à la mobilisation des particules et *in fine* au processus d'éluviation, les pratiques de chaulage ont pour objectif de maintenir le pH des sols à des valeurs proches de 7, soit en dehors de la gamme de pH favorable à la mobilisation des particules (Quénard et al., 2011). Il est ainsi supposé que le chaulage des sols agricoles depuis au moins 3 000 ans a permis de ralentir le processus d'éluviation/illuviation (Quénard et al., 2011). Toutefois, la suppression d'un couvert végétal permanent, les perturbations de la structure du sol par le travail régulier des sols ou encore la diminution des concentrations en matières organiques dans les horizons de surface des sols cultivés sont autant de facteurs connus pour diminuer la stabilité structurale des sols et favoriser la mobilisation des particules. Si, l'impact de la mise en culture sur la phase de mobilisation des particules est ambivalent, il en est de même pour la phase de transport. En effet, les flux d'eau généralement plus importants dans les sols cultivés par rapport à leurs homologues forestiers, notamment en période hivernale, du fait d'une moindre interception des pluies par le couvert végétal (Rockefeller et al., 2004), pourraient favoriser le transport des particules mobilisées à la surface des sols vers les horizons profonds. A l'inverse, l'absence de couverture végétale pérenne favorise l'effet splash, la formation d'une croûte de battance et le ruissellement de surface associé au détriment de l'infiltration au sein du profil du sol ce qui est potentiellement défavorable au transport en profondeur des particules (Fedoroff, 1997). De même, l'effet négatif des pratiques agricoles, et notamment du travail du sol sur les anéciques, pourrait conduire à une diminution de l'abondance de leurs galeries connues pour être des voies privilégiées pour le transport des particules (Oygarden et al., 1997).

A l'image des effets de la mise en culture, les effets potentiels des apports de matières organiques sur l'intensité du processus d'éluviation/illuviation sont également contradictoires. L'apport de matières organiques est connu pour augmenter la stabilité structurale des

horizons de surface soit directement, soit indirectement via leur effet positif sur la bioturbation (Faivre and Chamarro, 1995; Langohr, 2001), ce qui est à l'origine d'une diminution de la quantité de particules susceptibles d'être éluviées (Balabane et al., 2005; Quénard et al., 2011). A l'inverse, les apports de matières organiques sont favorables au maintien d'un réseau poral propice à la phase de transport du fait de leur impact direct sur la structure des sols ou indirect via l'activité des vers de terre.

S'il semble ainsi évident que la mise en culture des sols ou les apports de matières organiques sont susceptibles de modifier l'intensité des processus d'éluviation/illuviation et de bioturbation, très peu d'informations permettent aujourd'hui de statuer sans ambiguïté sur la direction et moins encore sur l'amplitude de ces modifications. Le présent chapitre a ainsi pour objectif de quantifier l'impact d'un à deux siècles de mise en culture (comparaison des profils FOR et CULT) et de quelques dizaines d'années d'apports de matières organiques d'origine exogène (comparaison des profils CULT et FUM) sur l'intensité et la dynamique de ces deux processus.

II. Matériel et Méthodes

Le travail réalisé dans ce chapitre consiste essentiellement en une généralisation aux profils FOR et FUM de l'approche réalisée sur le profil CULT dans le chapitre précédent. La quantification et la caractérisation des traits d'illuviation et de bioturbation sera basée sur le traitement des lames minces de sol fabriquées à partir de l'échantillonnage des blocs de sol dans les profils FOR et FUM présenté dans le chapitre I (Fig. I-6).

Un test paramétrique de type ANOVA 2 facteurs (i.e., horizon et modalité) est mis en œuvre pour étudier l'effet de la modalité sur les variables d'intérêt quant à i) l'intensité de l'illuviation (abondance et densité des papules et des revêtements argileux), ii) l'intensité de la bioturbation (abondance et densité des galeries et des remplissages biologiques), et iii) les dynamiques de création/entretien et de disparition du réseau poral évalués respectivement à partir de la proportion des papules par rapport à l'ensemble des traits illuviaux et de la proportion des revêtements déconnectés par rapport à l'ensemble des revêtements conformément aux indicateurs développés dans le chapitre précédent. Si les conditions nécessaires à la réalisation d'un test paramétrique ne sont pas remplies (normalité et homoscedasticité des variances), les données sont alors transformées à l'aide de la fonction $f(x) = \ln(x+1)$.

L'effet unique de la profondeur sur les variables telles que l'abondance surfacique (%), la densité (nombre.cm⁻²) et la taille (diamètre équivalent) des traits illuviaux puis des pores est étudiée pour FOR et FUM de la même manière que cela a été réalisé pour CULT dans le

chapitre IV. Les résultats des comparaisons deux à deux entre les trois horizons sont compilés dans le tableau récapitulatif des données en Annexe III.

Les flux de matière associés aux processus d'illuviation (M_{ill}) et de bioturbation (M_{gal} et M_{remp}) sont calculés pour chacun des profils suivant la méthodologie proposée dans le chapitre IV. L'existence d'un effet modalité sur les flux de fraction $< 2 \mu\text{m}$ liés au processus d'illuviation est testée grâce au modèle statistique développé dans le chapitre II. Brièvement, la distribution en fonction de la profondeur des flux est modélisée par un polynôme du second ordre entre 30 et 150 cm de profondeur. Lorsqu'il existe un effet modalité, c'est-à-dire lorsque les paramètres du modèle décrivant la distribution en fonction de la profondeur des flux liés à l'illuviation sont significativement différents, le flux total de matière est calculé pour chacune des modalités (aire sous les courbes de distribution). Les flux totaux dans les profils FOR, CULT et FUM sont alors comparés deux à deux grâce à un test de Student.

III. Résultats

III.1. Distribution et abondance des traits illuviaux

Quel que soit le profil considéré, des traits illuviaux s'observent des horizons E jusqu'aux horizons C (Fig. V-2). La surface et la densité des traits illuviaux montrent des distributions en fonction de la profondeur similaires à celles classiquement observées pour les concentrations en fraction $< 2 \mu\text{m}$ dans les luvisols. Elles augmentent ainsi des horizons E aux horizons BT où elles sont alors maximales, puis diminuent ensuite dans les horizons C (Fig. V-2, Tableau V-1). Le maximum d'abondance des traits illuviaux est atteint dès 75 cm de profondeur dans les deux profils cultivés alors qu'il n'est atteint qu'à 105 cm de profondeur dans le profil FOR (Fig. V-2). Les papules sont systématiquement plus nombreuses que les revêtements quel que soit le profil ou l'horizon considéré (Fig. V-2). L'abondance relative des papules est particulièrement élevée dans l'horizon E puis diminue progressivement avec l'augmentation de la profondeur sauf en dessous de 130 cm de profondeur où elle tend de nouveau à augmenter (Fig. V-3).

La surface moyenne des revêtements et de l'ensemble des traits illuviaux à l'échelle du profil n'évoluent pas significativement avec la mise en culture même si celle des papules tend à augmenter dans le profil CULT et augmente significativement dans le profil FUM par rapport au profil FOR (Tableau V-1). La mise en culture, avec ou sans apports de fumier, se traduit toutefois par une légère augmentation de la surface des traits illuviaux par rapport à la forêt quelle que soit la profondeur considérée à la seule exception de la profondeur 105 cm pour laquelle la surface des traits illuviaux est maximale sous forêt (Fig. V-2). Cette différence est particulièrement marquée à partir de 140 cm de profondeur du fait de l'absence totale de traits illuviaux sous forêt. Ces augmentations de la surface des traits

illuviaux s'expliquent par une augmentation de la densité (Fig. V-2, Tableau V-1) et de la taille des traits illuviaux (Annexe III). Dans les horizons BT, les revêtements ont par exemple un diamètre équivalent médian de 179 μm dans le profil FOR contre 214 μm dans le profil CULT. Bien que la surface des papules soit plus faible sous forêt que sous culture avec ou sans apports de fumier, les papules représentent encore sous forêt plus de 50% de la surface totale des traits illuviaux jusqu'à 75 cm de profondeur alors que ce même seuil est atteint dès 55 cm de profondeur sous culture. La mise en culture avec ou sans apports de fumier se traduit enfin par une diminution de la surface relative des revêtements connectés par rapport à l'ensemble des revêtements. Cette diminution est particulièrement marquée dans les horizons E (Tableau V-1 et Fig. V-3).

Les deux profils cultivés CULT et FUM montrent des abondances des traits illuviaux, des revêtements et des papules similaires (Tableau V-1). On note toutefois une légère différence de distribution de l'ensemble des traits illuviaux avec la profondeur. Ainsi, avec des surfaces maximales de 9% et 11% respectivement dans le profil CULT et dans le profil FUM, le pic d'abondance des traits illuviaux est plus intense dans le profil FUM que dans le profil CULT. Avec une épaisseur de 10 cm (entre 70 et 80 cm de profondeur) contre 30 cm (entre 70 et 100 cm de profondeur) respectivement dans les profils FUM et CULT, ce pic d'abondance des traits illuviaux est à l'inverse moins épais dans le profil FUM que dans le profil CULT (Fig. V-2). Dans la mesure où les surfaces relatives des revêtements et des papules d'une part ou des revêtements connectés et déconnectés d'autre part sont identiques dans les deux profils (Fig. V-3, Tableau V-1), cette modification de la distribution en fonction de la profondeur concerne uniquement l'abondance totale des traits illuviaux sans modification de leur type ou de leur relation à la porosité.

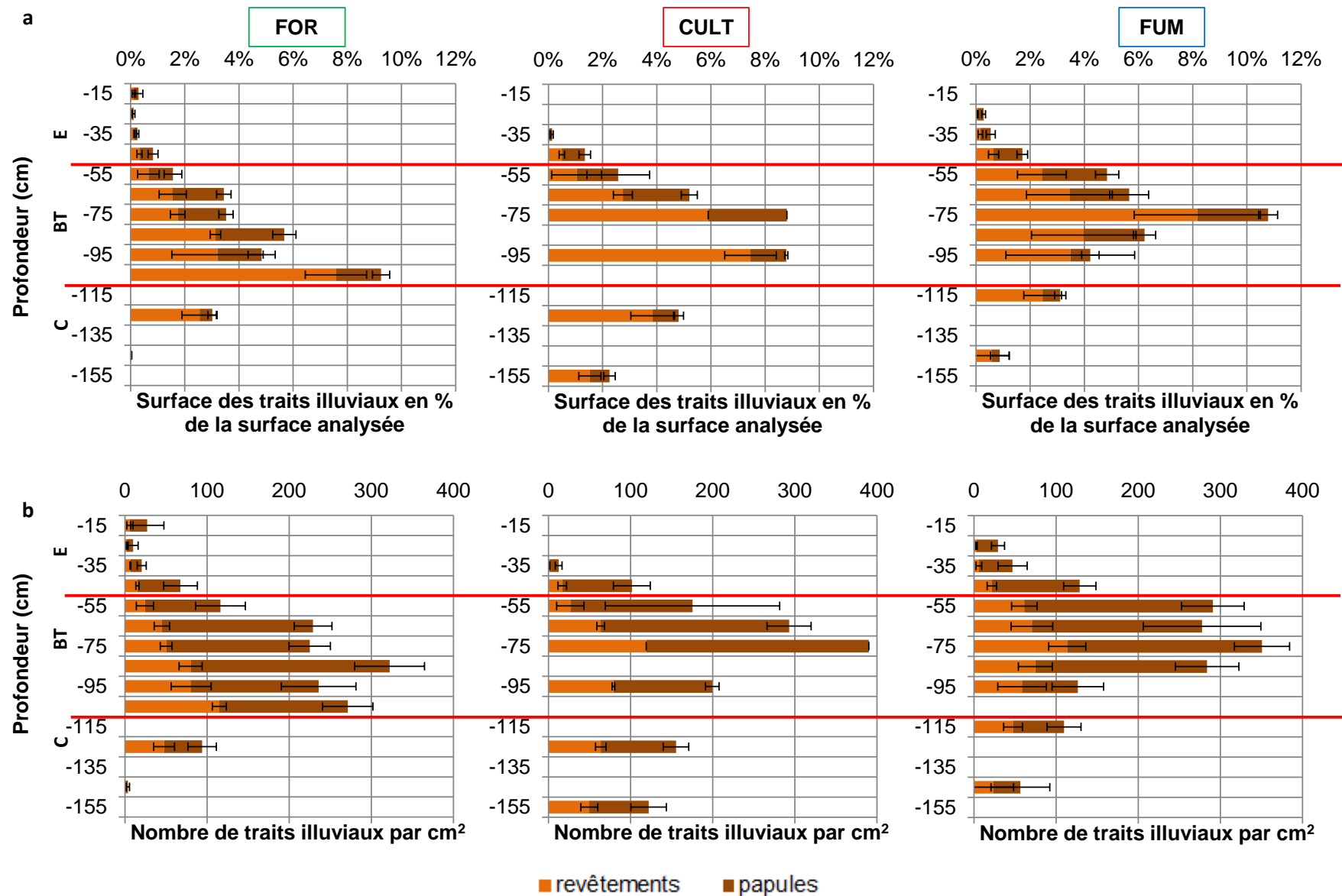


Figure V-2 : Evolution en fonction de la profondeur de (a) la surface en % de la surface totale de sol et (b) du nombre par cm² des revêtements et des papules dans les trois profils FOR, CULT et FUM.

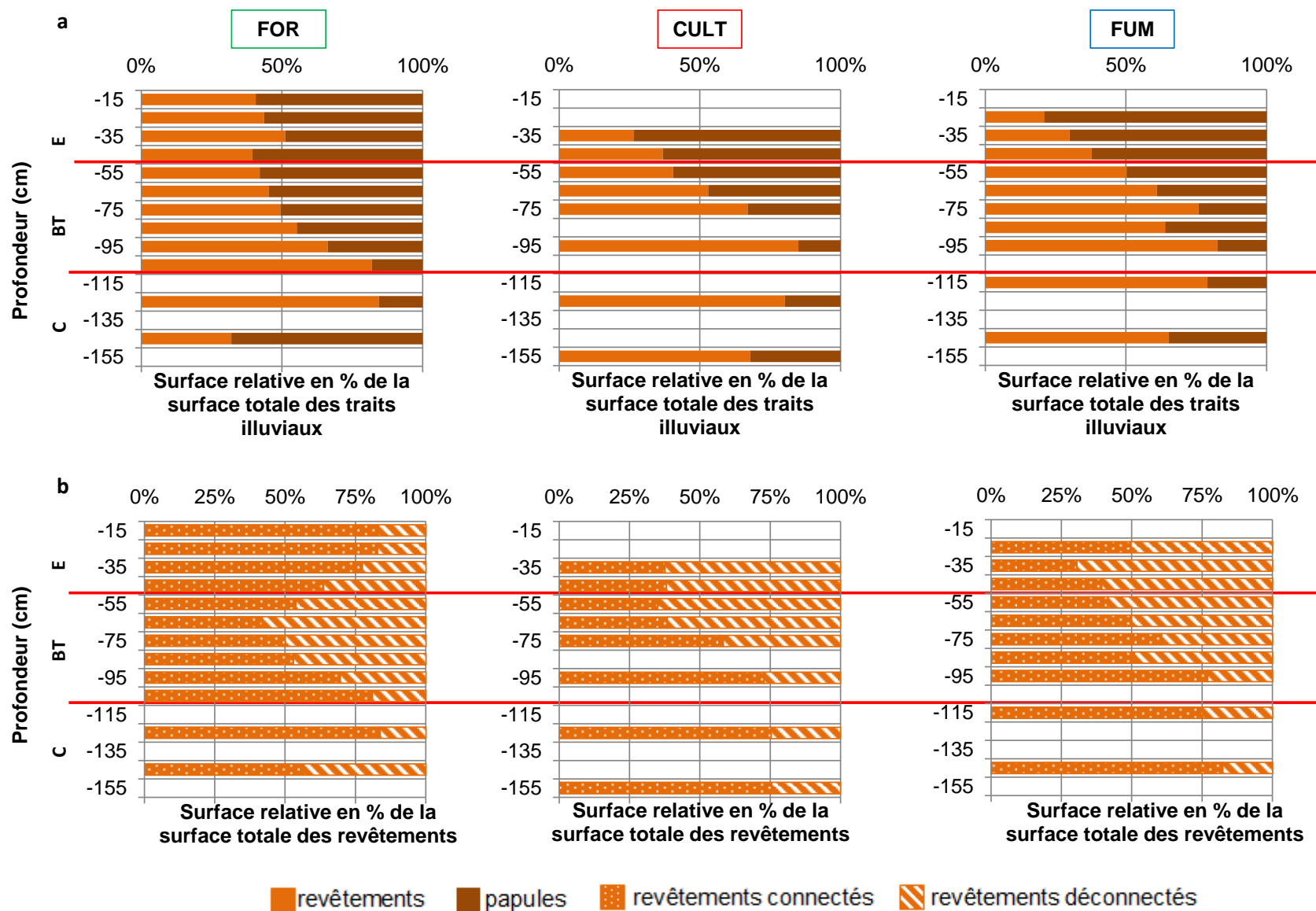


Figure V-3 : Evolution en fonction de la profondeur de (a) la proportion surfacique relative des revêtements et des papules et (b) des revêtements connectés et déconnectés dans les trois profils FOR, CULT et FUM.

Variable	Surface en % de la surface totale							Nombre par cm ²						
	Profondeur			Modalité			Int.	Profondeur			Modalité			Int.
	E	BT	C	FOR	CULT	FUM		E	BT	C	FOR	CULT	FUM	
Revêtements	0,23 ^c	3,69 ^a	1,84 ^b	1,85 ^a	2,61 ^a	2,58 ^a	-	8.84 ^c	68.9 ^a	38.1 ^b	40.2 ^b	46.5 ^a	48.6 ^a	S
<i>Dont connectés</i>	0,11 ^b	2,30 ^a	1,43 ^a	1,30 ^a	1,66 ^a	1,53 ^a	-	6.71 ^b	48.3 ^a	32.5 ^a	31.6 ^a	32.9 ^a	33.4 ^a	S
<i>Dont déconnectés</i>	0,12 ^b	1,39 ^a	0,41 ^b	0,55 ^b	0,95 ^a	1,05 ^a	-	2.13 ^c	20.6 ^a	5.67 ^b	8.68 ^b	13.6 ^a	15.2 ^a	-
Papules	0,38 ^b	1,88 ^a	0,50 ^b	0,96 ^b	1,21 ^{ab}	1,34 ^a	S	40.6 ^b	178 ^a	49.5 ^b	93.6 ^b	116 ^a	127 ^a	S
Total traits illuviaux	0,61^c	5,57^a	2,34^b	2,81^a	3,82^a	3,92^a	-	49.4^b	246^a	87.6^b	134^a	162^a	176^a	-
Proportion de papules	62,5 ^a	40,2 ^b	32,7 ^b	46,1 ^a	43,9 ^a	45,4 ^a	S							
Proportion de revêtements connectés	55,8 ^b	55,5 ^b	73,9 ^a	66,6 ^a	53,5 ^b	54,0 ^b	S							

Tableau V-1 : Surface (en % de la surface totale analysée) et densité (en nombre par cm²) des revêtements, des papules et de l'ensemble des traits illuviaux en fonction des horizons (E, BT, C) et de la modalité (FOR, CULT, FUM). Des lettres différentes pour une variable donnée et un facteur donné indiquent des valeurs significativement différentes au seuil de 5%. La lettre S dans la colonne Int. (pour Interaction) signifie que l'interaction entre les deux facteurs est significative.

III.2. Caractéristiques et dynamique du réseau poral

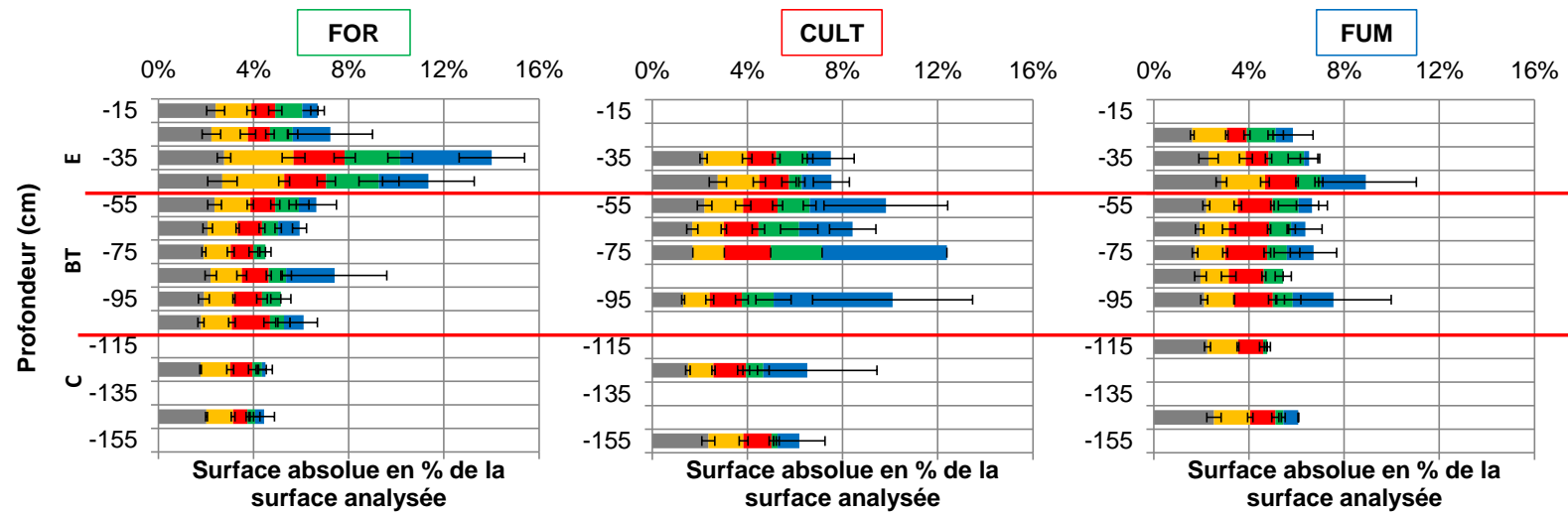
III.2a) Distribution de l'abondance et des types de porosité en fonction de la profondeur

La surface du réseau poral diminue significativement des horizons E aux horizons C même si cette tendance est plus particulièrement marquée sous forêt (Fig. V-4, Tableau V-2). Elle s'explique par une diminution de la surface de tous les types de pores et notamment des pores racinaires, des pores d'assemblage et des pores d'endogés (Fig. V-4, Tableau V-2). La surface des pores racinaires et d'assemblage diminue dès les horizons BT alors que celle des fentes et fissures et des pores des vers anéciques et endogés est davantage marquée des horizons BT aux horizons C (Fig. V-4, Tableau V-2).

La mise en culture avec ou sans apports de fumier n'a pas d'impact global à l'échelle du profil de sol sur l'abondance de la porosité totale ou sur l'abondance des différents types de porosité à la seule exception de la porosité associée aux vers anéciques qui augmente avec la mise en culture sans apport de fumier (Tableau V-2). Les différentes modalités montrent en revanche des distributions en fonction de la profondeur de la porosité totale et de l'ensemble de ses composantes significativement différentes comme en témoigne l'existence d'interactions significatives entre les facteurs « profondeur » et « modalités » (Tableau V-2).

Ainsi entre 30 et 50 cm de profondeur, la porosité est plus abondante dans le profil FOR que dans le profil CULT alors que l'inverse est observé entre 50 et 160 cm de profondeur (Fig. V-4). L'abondance maximale de porosité est ainsi localisée à la base de l'horizon E dans le profil FOR mais au sein de l'horizon BT dans le profil CULT (Fig. V-4). Entre 30 et 50 cm de profondeur, la plus faible abondance de la porosité totale dans les profils cultivés s'explique par une diminution de l'abondance de tous les types de porosité depuis les pores racinaires jusqu'aux pores associées à l'activité des vers de terre (Fig. V-4). En dessous de 50 cm de profondeur, la diminution de la surface et du nombre des pores racinaires et, dans une moindre mesure, des pores d'assemblage est en revanche compensée par une augmentation de la surface des pores associés aux vers de terre et plus particulièrement aux vers anéciques (Fig. V-4). Cette augmentation de la porosité associée aux vers de terre et notamment aux vers anéciques est d'une amplitude telle que la porosité dans le profil CULT est maximale dans les horizons BT. Une telle compensation de la diminution de la surface des pores racinaires et d'assemblage par une augmentation de la surface des pores des vers de terre ne s'observe pas dans le profil FUM.

a



b

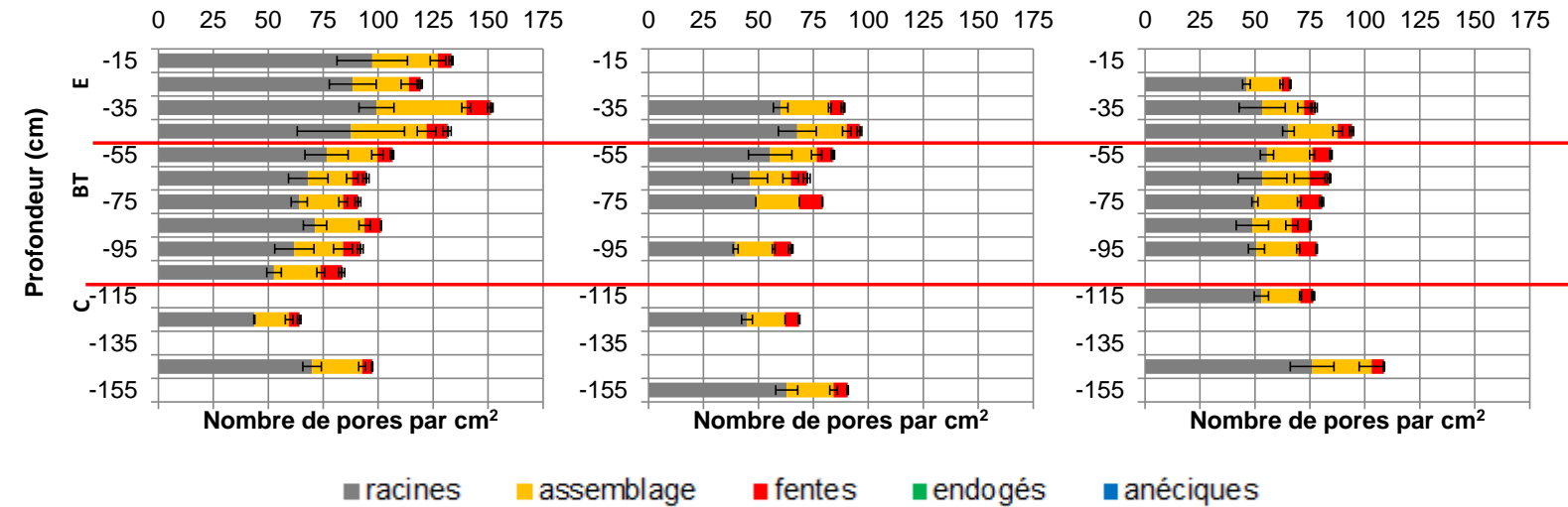


Figure V-4: Evolution avec la profondeur de l'abondance (a) et de la densité (b) des pores racinaires (en gris), des pores d'assemblage (en jaune), des fentes et fissures (en rouge), et des pores associés à l'activité des vers endogés (en vert) et anéciques (en bleu) dans les trois profils FOR, CULT et FUM.

Au sein des sols cultivés, la surface de la porosité totale diminue avec les apports de matières organiques (Tableau V-2), et ce quelle que soit la profondeur considérée (Fig. V-4). Si cette diminution est limitée dans l'horizon E dans lequel on peut observer le maximum de porosité pour le profil FUM, elle est au contraire particulièrement marquée dans l'horizon BT avec une abondance surfacique totale de 6 % dans le profil FUM contre 10 % environ dans le profil CULT. Dans cet horizon BT, les apports de fumier s'accompagnent d'une diminution d'un facteur 3, respectivement d'un facteur 2, de la porosité associée à l'activité des vers anéciques, respectivement des vers endogés alors que la surface ou le nombre des pores racinaires, des pores d'assemblage et des fentes et fissures varient relativement peu (Fig. V-4, Tableau V-2). Du fait de ces différences, le profil FUM présente finalement i) une distribution de la porosité en fonction de la profondeur marquée par une porosité maximale à la base de l'horizon E, et ii) une abondance moyenne de cette porosité à l'échelle du profil similaire à celle observée sous forêt (Tableau V-2). Le maximum de porosité dans le profil FUM reste toutefois inférieur de 30% à celui observé dans le profil FOR (Fig. V-4).

Variable	Surface en % de la surface analysée							Nombre par cm ²						
	Profondeur			Modalité				Profondeur			Modalité			
	E	BT	C	FOR	CULT	FUM	Int.	E	BT	C	FOR	CULT	FUM	Int.
Racines	2,42 ^a	1,95 ^b	2,03 ^b	2,16 ^a	1,98 ^a	2,14 ^a	S	73.9 ^a	57.0 ^b	57.3 ^b	72.1 ^a	53.6 ^b	54.6 ^b	S
Vides d'assemblage	1,89 ^a	1,30 ^b	1,27 ^b	1,53 ^a	1,45 ^a	1,39 ^a	S	25.9 ^a	20.5 ^b	19.9 ^b	24.4 ^a	20.1 ^b	19.9 ^b	S
Fentes/fissures	1,27 ^{ab}	1,38 ^a	1,0 ^b	1,18 ^a	1,35 ^a	1,33 ^a	S	6.40 ^b	7.98 ^a	5.44 ^b	6.99 ^a	6.86 ^a	7.02 ^a	S
Endogés	1,36 ^a	0,96 ^a	0,37 ^b	0,93 ^a	1,08 ^a	0,89 ^a	S	0.30 ^a	0.21 ^b	0.11 ^c	0.21 ^a	0.22 ^a	0.21 ^a	
Anéciques	1,47 ^{ab}	1,41 ^a	0,61 ^b	1,04 ^b	2,34 ^a	0,72 ^b	S	0.03 ^a	0.02 ^a	0.01 ^a	0.02 ^{ab}	0.04 ^a	0.01 ^b	S
Total	8,40^a	7,0^a	5,28^b	6,84^{ab}	8,21^a	6,46^b	S	107^a	85.7^b	82.7^b	104^a	80.8^b	81.8^b	S

Tableau V-2: Surface (en % de la surface totale analysée) et densité (en nombre par cm²) de la porosité totale, de la porosité racinaire, de la porosité d'assemblage, des fentes et fissures et de la porosité associée aux vers endogés et anéciques en fonction des horizons (E, BT, C) et de la modalité (FOR, CULT, FUM). Des lettres différentes pour une variable donnée et un facteur donné indiquent des valeurs significativement différentes au seuil de 5%. La lettre S dans la dernière colonne (intitulée Int. pour Interaction) signifie que l'interaction entre les deux facteurs est significative.

III.2b) Création et conservation de la porosité

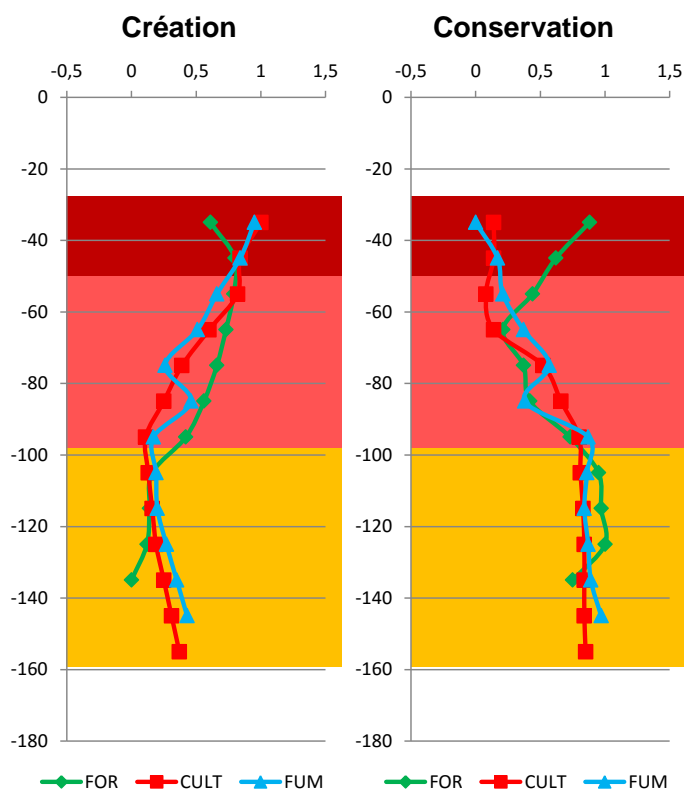


Figure V-5 : Indices de création de la porosité lombricienne et de conservation de la porosité en fonction de la profondeur pour les trois profils FOR, CULT et FUM. Normalisation des données en fonction des données issues des trois profils.

Sous forêt, l'abondance de la porosité est maximale entre 30 et 50 cm de profondeur. En effet, à cette profondeur, ni la création ni la conservation de la porosité créée ne sont des facteurs limitants (Fig. V-5). L'abondance de la porosité décroît ensuite très rapidement avec la profondeur du fait d'une limitation par i) la durée de conservation entre 50 et 100 cm de profondeur malgré une création de porosité par l'activité lombricienne proche de celle observée entre 30 et 50 cm de profondeur puis par ii) la création de porosité par l'activité lombricienne entre 100 et 140 cm malgré une grande stabilité de la porosité créée (Fig. V-3 et V-5).

La mise en culture avec ou sans apports de fumier s'accompagne par rapport à la forêt d'une diminution de la stabilité de la porosité créée entre 30 et 50 cm de profondeur pour une création de porosité par l'activité lombricienne au moins aussi intense que celle observée sous forêt (Fig. V-5). Entre 60 et 90 cm de profondeur, la mise en culture se traduit par une diminution de la création de porosité particulièrement marquée sous FUM et d'une augmentation de la stabilité de la porosité créée dans les profils CULT et FUM (Fig. V-5).

Enfin, en dessous de 100 cm de profondeur, création et conservation de la porosité sont d'intensité comparable dans les trois profils FOR, CULT et FUM.

III.3. Quantification des flux de bioturbation et d'illuviation

III.3a) La bioturbation

Conformément à ce qui a pu être décrit dans le chapitre IV pour le seul profil CULT, le volume total de sol remanié par l'activité biologique (V_{tot}) décroît avec la profondeur jusqu'à une profondeur d'environ 1 mètre puis tend à se stabiliser plus en profondeur (Tableaux IV-2, V-3 et V-4). Le volume total de sol bioturbé représente ainsi entre 60 et 70 % du volume des horizons E, 60 à 20 % des horizons BT et finalement 20 à 30% des horizons C. La grande majorité de ce volume de sol bioturbé est constitué de remplissages d'origine biologique quel que soit le profil considéré.

Les flux liés à la bioturbation n'ont pas pu être calculés ni dans le profil FOR pour des profondeurs supérieures à 140 cm ni dans le profil CULT entre 30 et 40 cm du fait de l'absence de revêtements susceptibles d'être redistribués et de servir de marqueur de la bioturbation. Dans le profil FUM, ces flux n'ont pu être calculés pour la profondeur 150-160 cm faute de prélèvement (Fig V-2, Tableaux V-3 et V-4).

Sur l'épaisseur de sol comprise entre 30 et 140 cm, la bioturbation a déplacé environ 6 400 t.ha⁻¹, 5 600 t.ha⁻¹ et 6 500 t.ha⁻¹ de sol respectivement dans les profils FOR, CULT et FUM ce qui correspond à 1 500 t.ha⁻¹ de fraction < 2 µm quel que soit le profil considéré. La mise en culture des sols avec ou sans apport de fumier ne semble donc pas avoir d'effet sur la bioturbation si ce n'est une légère redistribution de son intensité en fonction de la profondeur. Ainsi, la bioturbation est plus intense dans le profil FUM et dans le profil CULT, dans une moindre mesure, que dans le profil FOR entre 30 et 50 cm de profondeur (Tableaux IV-2, V-3 et V-4), alors que c'est l'inverse entre 70 et 90 cm de profondeur (Tableaux IV-2, V-3 et V-4).

Horizon	Profondeur (cm)	Bioturbation									Illuviation		
		Volume bioturbé (% du volume total)			Flux total (t.ha ⁻¹)			Flux <2µm (t.ha ⁻¹)			V _{ill} (%)	M _{ill<2µm} (t.ha ⁻¹)	
		V _{gal}	V _{remp}	V _{tot}	M _{gal}	M _{remp}	M _{tot}	M _{gal<2µm}	M _{remp<2µm}	M _{tot<2µm}			
FOR	E	-35	6,2	47	54	84 ±27	650 ±198	734 ±225	14 ±5,3	110 ±38	124 ±43	0,26	4,5 ±1,2
FOR	E	-45	4,3	60	64	58 ±36	820 ±92	878 ±128	9,7 ±6,5	140 ±22	150 ±29	0,83	15 ±6,0
FOR	BT	-55	1,7	59	61	26 ±21	900 ±150	926 ±171	5,6 ±4,7	190 ±42	196 ±47	1,6	27 ±15
FOR	BT	-65	1,6	55	57	24 ±7,0	840 ±130	864 ±137	5,1 ±1,8	180 ±37	185 ±39	3,4	60 ±19
FOR	BT	-75	0,5	51	52	7,9 ±4,2	790 ±53	798 ±57	2,0 ±1,1	200 ±23	202 ±24	3,5	62 ±15
FOR	BT	-85	2,8	45	48	43 ±35	690 ±87	733 ±122	11 ±9,3	170 ±30	181 ±39	5,7	99 ±19
FOR	BT	-95	0,8	35	36	12 ±7,2	530 ±120	542 ±127	3,8 ±2,5	170 ±46	174 ±49	4,8	85 ±45
FOR	BT	-105	1,4	18	19	21 ±11	270 ±51	291 ±62	6,9 ±3,7	87 ±21	94 ±25	9,2	160 ±37
FOR	BT	-115	1	17	18	15 ±7,7	250 ±50	265 ±58	4,8 ±2,7	81 ±20	86 ±23	6,1	110 ±28
FOR	C	-125	0,5	15	16	8,2 ±4,8	230 ±48	238 ±53	2,0 ±1,2	56 ±14	58 ±15	3	53 ±18
FOR	C	-135	0,6	7,7	8,3	9,4 ±5,6	120 ±60	129 ±66	2,2 ±1,5	28 ±16	30 ±18	1,5	27 ± 9
FOR	C	-145	0,7	nd	nd	10 ±6,4	nd	nd	2,5 ±1,7	nd	nd	0,03	0,6 ±0,4
FOR	C	-155	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Somme 30-140 cm						309 ±167	6090 ±1039	6398 ±1206	67 ±40	1412 ±309	1480 ±351		703 ±212
Somme profil						319 ±173	nd	nd	70 ±42	nd	nd		703 ±213

Tableau V-3 : Flux de matière et de fraction < 2 µm (t. ha⁻¹) associés aux processus de bioturbation et d'illuviation. Profil FOR.

Horizon		Profondeur (cm)	Bioturbation									Illuviation	
			Volume bioturbé			Flux total			Flux <2µm			V _{ill} (%)	M _{ill<2µm} (t.ha ⁻¹)
			(% du volume total)			(t.ha ⁻¹)			(t.ha ⁻¹)				
			V _{gal}	V _{remp}	V _{tot}	M _{gal}	M _{remp}	M _{tot}	M _{gal<2µm}	M _{remp<2µm}	M _{tot<2µm}		
FUM	E	-35	1,7	70	72	27 ±11	1106 ±170	1133 ±181	4,8 ±2,2	200 ±41	205 ±43	0,55	9,6 ±5,1
FUM	E	-45	2,9	63	65	46 ±37	990 ±140	1036 ±177	8,2 ±7,1	180 ±34	188 ±41	1,7	30 ±9,2
FUM	BT	-55	1,7	51	52	26 ±25	810 ±150	836 ±175	7,7 ±7,7	240 ±55	248 ±63	4,8	85 ±30
FUM	BT	-65	1,5	41	42	24 ±15	650 ±250	674 ±265	7,1 ±4,7	190 ±83	197 ±88	5,7	99 ±41
FUM	BT	-75	1,9	25	27	31 ±11	390 ±81	421 ±92	9,1 ±3,6	120 ±30	129 ±34	11	190 ±63
FUM	BT	-85	0,8	38	39	12 ±5,9	570 ±190	582 ±196	3,8 ±2,0	180 ±68	184 ±70	6,2	110 ±47
FUM	BT	-95	2,6	19	22	39 ±34	290 ±86	329 ±120	12 ±11	89 ±31	101 ±42	4,2	74 ±53
FUM	C	-105	1,4	20	21	20 ±18	300 ±75	320 ±93	4,9 ±4,5	71 ±22	76 ±27	3,7	64 ±37
FUM	C	-115	0,2	21	21	2,6 ±2,1	310 ±67	313 ±69	0,62 ±0,5	75 ±20	76 ±21	3,1	54 ±20
FUM	C	-125	0,9	26	26	13 ±2,7	380 ±61	393 ±64	3,2 ±0,8	91 ±19	94 ±20	2,9	51 ±20
FUM	C	-135	1,2	31	32	18 ±2,8	450 ±58	468 ±61	4,3 ±0,9	110 ±19	114 ±20	2,2	39 ±20
FUM	C	-145	1	36	37	16 ±2,7	590 ±68	606 ±71	3,1 ±0,7	120 ±19	123 ±20	0,88	15 ±19
FUM	C	-155	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Somme 30-140 cm						259 ±165	6246 ±1328	6505 ±1493	66 ±45	1546 ±422	1612 ±469		806 ±345
Somme profil						275 ±167	6836 ±1396	7111 ±1565	69 ±46	1666 ±441	1735 ±489		821 ±364

Tableau V-4 : Flux de matière et de fraction < 2 µm (t. ha⁻¹) associés aux processus de bioturbation et d'illuviation. Profil FUM.

III.3b) L'illuviation

Quel que soit le profil considéré, les flux de fraction $< 2 \mu\text{m}$ liés au processus d'illuviation pour une épaisseur de sol de 10 cm sont compris entre i) une à quelques tonnes par hectare dans les horizons E ; ii) 150 à 200 t.ha^{-1} dans les horizons BT et finalement iii) une dizaine à une centaine de tonne par hectare dans les horizons C, y compris jusqu'à 150 cm de profondeur dans le cas du profil CULT (Tableaux IV-2, V-3 et V-4).

L'intensité de l'illuviation est significativement plus élevée dans le profil CULT que dans les deux profils FOR et FUM pour lesquels l'illuviation montre une même intensité (Fig. V-6 et Tableaux IV-2, V-3 et V-4). Cette intensité plus élevée du processus d'illuviation dans le profil CULT s'observe sur toute l'épaisseur du profil de sol à la seule exception de la base de l'horizon E, soit entre 30 et 40 cm et dans une moindre mesure entre 40 et 50 cm, où les flux de fraction $< 2 \mu\text{m}$ associés à la présence de traits illuviaux tendent à être plus élevés dans le profil FUM (Fig. V-6 et Tableaux IV-2, V-3 et V-4). A ces profondeurs, les traits illuviaux sont en grande majorité des papules (Fig. V-2 et V-3).

Avec des flux de l'ordre de 700, 1 100 et 800 t.ha^{-1} respectivement dans les profils FOR, CULT et FUM, les flux de fraction $< 2 \mu\text{m}$ liés au processus d'illuviation sont du même ordre de grandeur que ceux liés au processus de bioturbation dans le profil CULT alors qu'ils sont inférieurs dans les profils FOR et FUM. Des flux d'illuviation supérieurs aux flux de bioturbation, peuvent toutefois être observés pour certaines profondeurs particulières comme entre 100 et 120 cm dans le profil FOR et entre 70 et 80 cm dans le profil FUM.

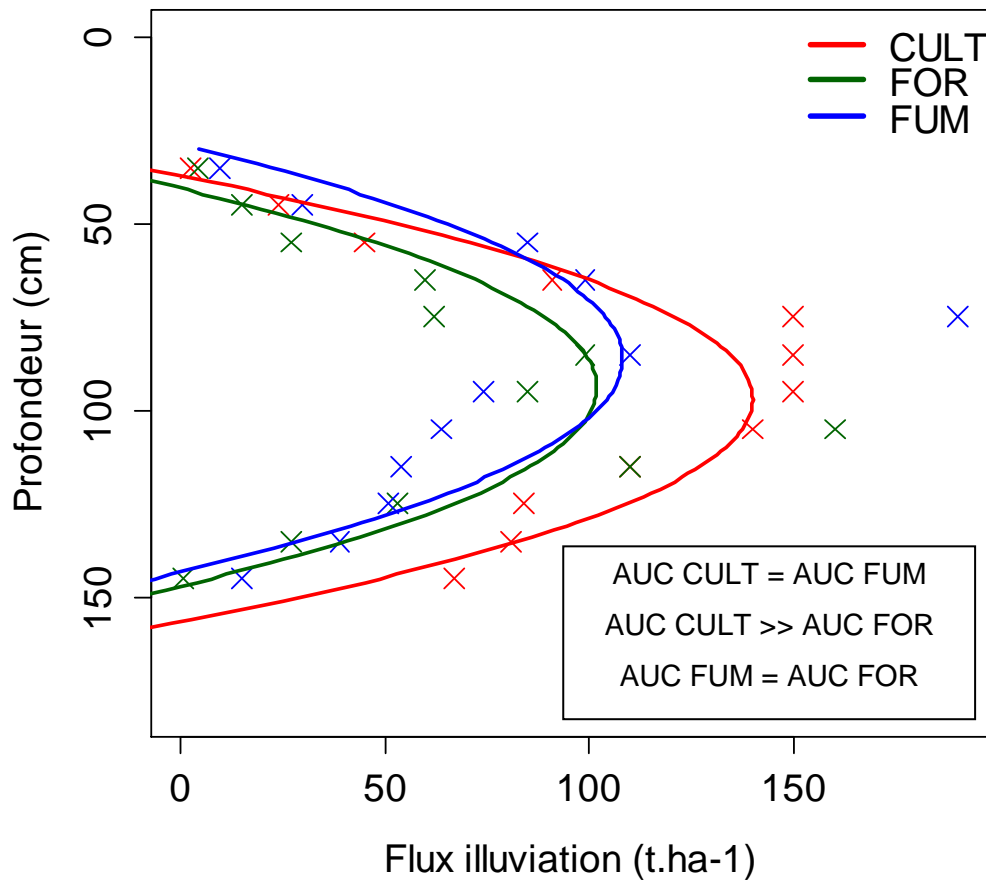


Figure V-6: Modélisation de la distribution avec la profondeur des flux de fraction $< 2 \mu\text{m}$ (t.ha^{-1}) liés à l'illuviation dans les trois modalités (AUC = area under curve).

IV. Discussion

IV.1. *Stabilité et sensibilité des indicateurs micromorphométriques*

Les horizons BT se caractérisent par rapport aux horizons E et C par une plus grande surface et un plus grand nombre de fentes et fissures. La mise en culture (avec ou sans apport de matières organiques) ne provoque en revanche aucune variation significative de la surface ou du nombre des pores de type fentes et fissures. Or, les horizons BT se caractérisent par leur richesse en fraction $< 2 \mu\text{m}$ (Tableau V-2) et notamment par leur richesse en minéraux argileux gonflants de type smectite (Cornu et al., 2012b; Jamagne et al., 1984). L'augmentation de la surface et du nombre des fentes et fissures dans les horizons BT est sans aucun doute le résultat de phénomènes de retrait-gonflement plus marqués dans ces horizons que dans les horizons E ou C. A l'inverse, l'absence de

variations significatives de la surface ou du nombre des fentes et fissures entre les trois profils FOR, CULT et FUM souligne l'homogénéité des matériaux dans lesquels les sols étudiés se sont développés. L'abondance (en surface et en nombre) des fentes et fissures apparaît ainsi plus sensible aux variations de la granulométrie et/ou de la minéralogie des différents horizons que du mode d'occupation des sols ou des pratiques agricoles qui ne modifient pas significativement, au moins dans le cas étudié, la nature ou l'abondance relative des constituants minéraux des sols.

Par ailleurs, en réponse à une biomasse racinaire plus élevée en sols forestiers qu'en sols cultivés (Gobat et al., 2004; Granier, 2007; Lavelle and Spain, 2007), la surface et le nombre des pores racinaires diminuent significativement avec la mise en culture dans les horizons E et BT des profils CULT et FUM (Tableau V-2 et Fig. V-4). Les deux profils CULT et FUM cultivés selon les mêmes rotations et par conséquent avec des biomasses et des architectures racinaires similaires montrent des distributions des pores racinaires en fonction de la profondeur également semblables.

L'ensemble de ces résultats souligne i) la sensibilité des approches de micromorphologie quantitative aux variations d'intensité des processus (ici des processus de retrait-gonflement et de l'activité racinaire quantifiés respectivement à partir de l'abondance des fentes et fissures et des pores racinaires), et ii) la stabilité des indicateurs quantifiés dès lors que les facteurs contrôlant l'intensité du processus ne varient pas en fonction du mode d'occupation ou des pratiques agricoles (ici respectivement la granulométrie et la minéralogie des sols ou la biomasse et l'architecture racinaire).

Ainsi, les variations observées de nos indicateurs micromorphométriques pourront légitimement être interprétées comme des conséquences du mode d'occupation des sols ou des pratiques agricoles sur l'intensité des processus de structuration biologique des sols ou de transfert de matière.

IV.2. Effets de la mise en culture et des apports de fumier sur la structuration biologique des sols et l'intensité des processus de transfert de matière

IV.2a) Structuration : état et dynamique du réseau poral

IV.2.a.1 Mise en culture

La mise en culture sans apport de matières organiques se traduit par diverses modifications du réseau poral dont i) une diminution de l'abondance (en surface et en nombre) de tous les types de porosité dans les horizons E et notamment des pores racinaires, et par ii) une augmentation de la surface des pores associées aux vers anéciques, et dans une moindre mesure aux vers endogés, tant dans les horizons BT (Fig. V-4) qu'en moyenne sur l'ensemble du profil (Tableau V-2). De plus, sous forêt, les racines

des strates arbustives et arborées sont susceptibles de générer des pores d'un diamètre supérieur à 1 mm. Du fait de leur diamètre supérieur au mm et de leur forme arrondie, ces pores seront classés comme des pores lombriciens (Tableau III-1). Une telle confusion entre les pores associés aux racines de grande taille et les pores lombriciens sous-estime l'abondance des pores racinaires au profit des pores lombriciens et par voie de conséquence la diminution, respectivement l'augmentation, de la surface des pores racinaires, respectivement des pores lombriciens, avec la mise en culture.

Si la surface des pores lombriciens, et tout particulièrement des vers anéciques d'une part, et l'indice de conservation de la porosité créée d'autre part, sont plus élevés dans l'horizon E du profil FOR que dans celui du profil CULT, l'indice de création de porosité est au contraire plus élevé dans le profil CULT que dans le profil FOR (Fig. V-4 et V-5). De même, alors que la surface des pores associés aux vers anéciques d'une part et l'indice de conservation de la porosité d'autre part sont plus élevés dans l'horizon BT du profil CULT que dans celui du profil FOR, l'indice de création de porosité est au contraire plus élevé dans le profil FOR que dans le profil CULT (Fig. V-4 et V-5). L'abondance de la porosité est ainsi premièrement sous contrôle de la durée de conservation et secondairement de l'activité de création, au moins tant qu'il y a création de pores.

Différents effets plus ou moins directs de la mise en culture des sols sont susceptibles de participer à ces variations des indices de création et de conservation de la porosité en fonction du mode d'occupation des sols et finalement d'expliquer les évolutions du réseau poral avec la mise en culture.

Premier effet, directement liés à la mise en culture, le tassement du fond de labour est très probablement à l'origine de la diminution de la conservation, et donc de la diminution simultanée de la surface de l'ensemble des types de pores de l'horizon E sous culture. Les sols limoneux sont en effet particulièrement sensibles au tassement et des semelles de labour ont pu être identifiées dans les sols cultivés du dispositif QualiAgro (Roger-Estrade, communication personnelle, juin 2016).

Un autre effet, plus indirect, pourrait être lié à la suppression du couvert forestier à l'origine de conditions plus humides dans les sols cultivés (Rockefeller et al., 2004) conformément aux observations de terrain effectuées lors de la phase de prélèvement. Les conditions plus sèches sous forêt vont alors pousser les vers de terre à se réfugier dans les horizons profonds des sols pour rechercher des conditions hydriques plus favorables (Bouché et al., 2014; Bryk, 2016) favorisant ainsi sous forêt la création de porosité lombricienne dans les horizons BT.

Enfin, la modification de la composition spécifique des communautés de vers de terre avec la mise en culture pourrait également impacter les caractéristiques du réseau poral. La mise en culture s'accompagne en effet d'un remplacement des deux espèces anéciques

stricts à têtes noires (*A.longa* et *A.giardi*) par une espèce épi-anécique *L.terrestris* (Fig. I-7). Or, le comportement des espèces épi-anéciques se caractérise par la création de réseaux de galeries moins denses que ceux des anéciques stricts et au contraire par un entretien plus régulier de leurs galeries (Bastardie et al., 2003; Jegou et al., 1999). En conséquence, alors que le réseau de galeries de *L.terrestris* peut être qualifié de quasi-permanent, celui de *A.giardi* présente des caractéristiques d'orientation et de volume proches du réseau de galeries des vers endogés (Jegou et al., 1999). Le remplacement d'espèces anéciques stricts par des espèces épi-anéciques sous l'effet de la mise en culture serait finalement à l'origine tant de la diminution de la création de porosité que d'un entretien plus régulier des pores dans les horizons BT des sols cultivés.

IV.2.a.2 Apport de matières organiques

L'apport de fumier se traduit par une diminution de la porosité totale et plus particulièrement de la porosité d'origine lombricienne par rapport au profil cultivé sans apport. D'après l'analyse de la dynamique du réseau poral, la diminution de la porosité dans le profil cultivé avec apports répétés de fumier s'explique principalement par une légère diminution de la création de porosité lombricienne dans l'horizon BT alors qu'au contraire la conservation de la porosité créée tend elle à augmenter (Fig. V-5). Cette diminution de la création de porosité par l'activité lombricienne est alors d'autant plus surprenante que les apports de fumier se sont révélés induire une augmentation de la densité et de la biomasse de vers de terre par rapport à la situation sans apport de fumier (Fig. I-7).

Toutefois, les apports de fumier sont essentiellement favorables aux vers endogés et beaucoup moins aux vers anéciques dont la biomasse tend à diminuer même si leur densité augmente (Fig. I-7). Or, si une augmentation de la porosité associée aux endogés a effectivement pu être observée par Capowiez et al. (2009) ou Vedere (2016), il semble que cet effet positif des apports organiques sur la création de porosité par l'activité lombricienne reste limité aux horizons labourés enrichis en matières organiques où vivent la majorité des vers endogés.

De plus, les espèces épi-anéciques, comme *L.terrestris*, sont particulièrement sensibles à la richesse trophique du milieu et sont capables de moduler leur activité de fouissage en conséquence (Peres, 2003; Peres et al., 2010). La disponibilité des ressources trophiques expliquerait alors la moindre activité de création de porosité par les vers dans le cas du sol cultivé avec apport de fumier. Une telle modification du comportement des vers endogés et anéciques dans le sens d'une diminution de leur activité de création de galeries en réponse aux apports de fumier a en effet été mise en évidence dans les horizons travaillés (Vedere, 2016).

IV.2b) Bioturbation : intensités et redistributions

Quel que soit le profil considéré, la bioturbation par les vers de terre concerne environ 60% des horizons E, 60% à 20% des horizons BT en fonction de la profondeur considérée et finalement 30 à 20% des horizons C pour une masse totale de sol déplacée au moins une fois de l'ordre de 5 500 à 6 500 t.ha⁻¹ entre 30 et 140 cm de profondeur (Tableaux IV-2, V-3 et V-4).

Cette intensité semblable de la bioturbation entre les profils FOR, CULT et FUM peut paraître étonnante étant donné les effets significatifs de la mise en culture ou des apports de matières organiques exogènes sur les communautés lombriciennes en termes de diversité spécifique, de densité ou encore de biomasse (Fig. I-7). Toutefois, plusieurs caractéristiques inhérentes à l'approche utilisée pour quantifier la bioturbation sont peu favorables à la détection d'une modification de l'intensité de la bioturbation en réponse à un siècle de mise en culture et moins encore à une dizaine d'années d'apports répétés de matières organiques.

Tout d'abord, si les travaux de Jongmans et al. (2001) ou Fernandez et al. (2010) ont clairement mis en évidence l'impact d'une modification de l'occupation des sols sur le volume de sol bioturbé, ces auteurs ont également démontré que les différences entre modes d'occupation étaient principalement localisées dans les horizons de surface des sols et s'estompaient très rapidement avec la profondeur. Or, nos quantifications du volume bioturbé sont inféodées à la présence de papules qui ne s'observent pas ou peu, avant 40 cm de profondeur, c'est-à-dire pour des profondeurs pour lesquelles les variations du volume bioturbé quantifiées par Fernandez et al. (2010) ne dépassent pas quelques pourcents et deviennent donc difficiles à quantifier.

De plus, la quantification des remplissages biologiques qui représentent l'essentiel du volume bioturbé (Tableaux IV-2, V-3 et V-4) repose sur la quantité de revêtements fragmentés et redistribués sous forme de papules. Comme nous avons déjà eu l'occasion de le souligner il s'agit donc d'une quantification de la bioturbation cumulée depuis la formation des premiers revêtements soit depuis environ 10 000 à 15 000 ans. Il est donc possible que les variations d'intensité de la bioturbation depuis la mise en culture et plus encore depuis les premiers apports de fumier soient restées d'amplitude insuffisante pour modifier significativement la masse totale de sol déplacée par la bioturbation depuis près de 15 000 ans. Cela est d'autant plus probable que notre approche ne permet pas de quantifier les phénomènes de *re-bioturbation* alors même que les lombriciens sont en mesure de consommer d'anciennes déjections. Pour améliorer notre compréhension de la bioturbation et de sa dynamique, il paraît donc important de caractériser et quantifier ce phénomène de *re-bioturbation*. La micromorphologie qualitative peut apporter des informations

déterminantes à ce sujet grâce à la mise en évidence de traits spécifiques de la *re-bioturbation* tels que les *maculae* (Humphreys, 1994). La détection systématique de ces traits pour une analyse quantitative reste toutefois un objectif ardu étant donné la complexité et la diversité morphologique de ces traits.

Enfin, la mise en culture des sols ou les apports de matières organiques sont respectivement à l'origine d'une disparition des épigés et d'une augmentation de la densité et de la biomasse des vers endogés. Ces changements d'occupation des sols ou de pratiques agricoles concernent donc essentiellement les catégories écologiques de vers de terre qui vivent à faible profondeur dans les sols. A l'inverse, les variations de densité ou de biomasse des vers anéciques plus particulièrement impliqués dans la bioturbation des horizons profonds sont d'amplitudes très limitées (Fig. I-7).

Pour autant, plusieurs caractéristiques de la bioturbation semblent sensibles à la mise en culture des sols et/ou aux apports répétés de fumier. Tout d'abord, les pores d'origine lombricienne représentent 5%, 11% et 4% du volume total de sol remanié par l'activité biologique respectivement pour les profils FOR, CULT et FUM soit une masse de sol déplacée de 300, 700 et 250 t.ha⁻¹ (Tableaux IV-2, V-3 et V-4). Ainsi, les galeries, respectivement les remplissages biologiques, représentent une fraction plus importante du volume total de sol remanié par l'activité lombricienne dans le profil CULT, respectivement dans les profils FOR et FUM (Fig. I-7). Or, l'abondance des galeries renseigne principalement l'activité des vers anéciques qui ont tendance à déposer le sol extrait de leur galerie sous forme de turricules à la surface des sols. Si la plus grande proportion de galeries par rapport au volume total de sol remanié dans le profil CULT par rapport aux deux autres profils peut alors s'expliquer par i) la biomasse plus élevée de vers anéciques dans le profil CULT que dans les profils FOR et FUM, et ii) le comportement particulier de l'espèce épi-anécique *L. terrestris* en termes d'entretien de son réseau de galeries, ce résultat souligne surtout une modification de la direction et de la distance de déplacement du sol remanié. En effet, alors que l'entretien des galeries par *L. terrestris* s'accompagne d'un dépôt des turricules à la surface des sols et de ce fait un mouvement majoritairement ascendant, les remplissages sont associés à des déplacements de matières plutôt horizontaux et/ou sur de courtes distances. Ainsi, la mise en culture des sols sans apport de fumier impliquerait une augmentation des déplacements verticaux ascendants inter-horizons d'environ 400 à 450 t.ha⁻¹ ce qui ne représente toutefois qu'à peine 10% des flux totaux associés à la bioturbation.

Enfin, la masse de sol présente sous forme de remplissages est plutôt plus élevée dans les profils cultivés entre 30 et 50 cm de profondeur par rapport au sol forestier alors que l'inverse est observé plus en profondeur (Tableaux IV-2, V-3 et V-4). Cette redistribution de l'activité de bioturbation vers la surface des sols est cohérente avec i) les conditions plus

sèches sous forêt qui poussent les vers de terre à se réfugier dans les horizons profonds des sols pour rechercher des conditions hydriques plus favorables, et ii) l'augmentation de la densité et de la biomasse des vers endogés en réponse aux apports de fumier. Si les vers de terre assurent une même bioturbation dans les trois modalités, les différences dans la composition spécifique des lombriciens et dans leur localisation dans le profil de sol induisent de légères redistributions en fonction de la profondeur du volume et des masses de sol remaniés entre les profils cultivés et le profil sous forêt.

Le volume cumulé de la drilosphère semble donc peu sensible à une modification récente du mode d'occupation des sols et/ou des pratiques agricoles. La mise en culture et les apports répétés modifient toutefois sa structure, c'est-à-dire le partage entre galeries et remplissages, et sa distribution en fonction de la profondeur. Si ces modifications sont marginales en comparaison du volume total de sol bioturbé, elles peuvent malgré tout avoir des impacts considérables sur d'autres processus et notamment sur l'illuviation dans le profil CULT du fait de l'apparition d'un réseau de galeries typique de l'activité de *L. terrestris* connectant la surface des sols aux horizons profonds.

IV.2c) Effet sur l'illuviation et ses différentes phases

Les flux de fraction $< 2 \mu\text{m}$ par le processus d'éluviation/illuviation représentent 700, 1100 et 820 t.ha⁻¹ respectivement dans les profils FOR, CULT et FUM (Tableaux IV-2, V-3 et V-4). La mise en culture sans apports de matières organiques exogènes est ainsi à l'origine d'une augmentation significative de l'intensité de l'illuviation par rapport au sol forestier (Fig. V-6) confirmant ainsi les résultats semi-quantitatifs obtenus par Thompson et al. (1990) dans un contexte pédoclimatique très similaire. A l'inverse, les apports répétés de fumier semblent en mesure de limiter, sinon stopper, l'augmentation de l'intensité du processus d'illuviation en réponse à la mise en culture. Ces résultats confirment et surtout précisent les tendances déjà observées par Sauzet (2012) à partir d'une approche par comptage au point et présentées dans le chapitre II pour les deux seules modalités CULT et FOR. Toutefois, alors que l'analyse de faisabilité par comptage au point n'avait pas permis de mettre en évidence la significativité de l'impact de la mise en culture sur l'augmentation de l'intensité du processus d'illuviation, le traitement systématique de près de 30 lames par profil rendu possible par le développement et la mise en œuvre d'une approche par analyse d'images partiellement automatisée, a permis d'augmenter la puissance des tests statistiques et *in fine* de mettre en évidence la significativité de l'impact de la mise en culture. Afin d'identifier et de hiérarchiser les différents effets directs ou indirects de la mise en culture d'une part et des apports de fumier d'autre part sur l'intensité du processus d'éluviation/illuviation, nous nous

intéresserons successivement aux différentes phases de ce processus à savoir : la phase de mobilisation, de transport et de dépôt des particules.

IV.2.c.1 Mobilisation des particules

La suppression d'un couvert végétal permanent est le premier effet susceptible de favoriser la mobilisation des particules à la surface des sols du fait d'une plus grande sensibilité des sols, temporairement nus, à l'impact des gouttes de pluies et à l'effet splash qui en découle (Fedoroff, 1997). De même, la suppression avec la mise en culture d'un système racinaire dense et surtout pérenne caractéristique des sols forestiers (Granier, 2007) pourrait également favoriser la mobilisation des particules. Pour autant, si de tels effets participent très vraisemblablement à l'augmentation de l'intensité du processus d'éluviation/illuviation dans le profil CULT, ils ne sont pas suffisants pour induire à eux seuls une augmentation de ce même processus dans le profil FUM malgré un même itinéraire technique, et donc les mêmes périodes de sols nus, et une même diminution de l'abondance des racines (des pores racinaires) que dans le profil CULT.

L'augmentation du pH par les pratiques de chaulage préalables au démarrage de l'essai QualiAgro et leur entretien par les apports de fumier dont le pH voisin de 9 est particulièrement élevé (Mercier et al., 2010) est un autre des facteurs susceptibles d'influencer l'intensité du processus d'éluviation. Les pH acides (5,3 à 6) des sols de certaines parcelles de l'essai dit des « 42 parcelles » a ainsi été considéré comme un des facteurs responsables de l'augmentation de l'intensité de l'éluviation par rapport aux parcelles recevant des amendements basiques ou du fumier et présentant des pH proches de la neutralité (van Oort et al., 2016). Il est en effet classiquement considéré que la gamme de pH favorable à la mobilisation des particules est comprise entre 5 et 6,5 alors que pour des pH inférieurs à 5, respectivement supérieurs à 6,5, la présence en solution d'ions Al^{3+} , respectivement d'ions Ca^{2+} ou d'autres cations divalents, favorise la floculation des argiles et limite leur mobilisation (Quénard et al., 2011; Van Breemen and Buurman, 2002). Ainsi seul le sol forestier avec un pH juste au-dessus de 5 dans les horizons A et E présenterait des pH favorables au processus d'éluviation quand le profil CULT, avec un pH de 6,6 et plus encore le profil FUM avec un pH supérieur à 7, présenteraient des pH trop élevés (Tableau I-1). De plus, si l'on considère que le pH des horizons éluviés du profil FOR est proche de 5 et donc proche des conditions de floculation des minéraux argileux par Al^{3+} et que le pH des horizons éluviés du profil CULT est proche de 6,5, et donc favorable au processus d'éluviation, le complexe d'échange des trois profils FOR, CULT et FUM est toutefois systématiquement très largement saturé par les ions Ca^{2+} et, dans une moindre mesure, Mg^{2+} (Tableau I-1 ; Jagercikova, 2014). Les variations de pH en lien avec la mise en culture et/ou les apports répétés de fumier ne semblent donc pas être le principal facteur contrôlant l'intensité du

processus d'éluviation ou, pour le moins, la gamme de pH favorable au processus d'éluviation doit être précisée. Un tel impact, relativement limité, des variations du pH sur l'intensité du processus d'éluviation a en effet déjà été observé par Cornu et al. (2014) qui n'avaient détecté aucune différence significative sur les quantités de particules exportées de colonnes de sol présentant des pH compris ou non dans la gamme des pH favorables au processus d'éluviation. De même, dans sa synthèse des expérimentations d'éluviation sur colonnes de sol, Quénard et al. (2011) a souligné que la grande majorité de ces expérimentations ont été réalisées pour des pH supérieurs à 6,5 sans que cela apparaisse comme un facteur particulièrement limitant et sans qu'il soit possible d'identifier un effet pH sur les quantités de particules éluviées. Enfin, ces résultats sont par ailleurs cohérents avec les travaux de Van Den Bogaert et al. (2015) ayant mis en évidence que la mobilisation des particules était davantage liée à des mécanismes physiques (p.ex. effet splash) qu'à des mécanismes physico-chimiques liés au pH des sols.

La baisse des concentrations en matières organiques et ses conséquences sur la diminution de la stabilité structurale (Chenu et al., 2011) est un autre facteur susceptible de favoriser la mobilisation des particules de sol, très largement étudié dans le cadre de travaux portant sur le processus d'érosion. Or, étant donné que le sol forestier présente les teneurs en carbone organique de surface les plus élevées (Tableau I-1) en même temps qu'une couverture permanente par la végétation, il paraît logique que ce soit le sol présentant l'intensité du processus d'éluviation la plus faible. Le profil CULT se distingue alors du profil FUM tout à la fois par des concentrations en matières organiques plus faibles (Tableau I-1), une stabilité structurale plus faible (Annabi et al. 2011) et par une intensité du processus de lessivage plus élevée (Tableaux IV-2 et V-4). Il est ainsi fort probable que : i) la diminution des concentrations en matières organiques dans le profil cultivé sans apports de matières organiques exogènes soit une des causes principales, sinon la cause essentielle, de l'augmentation de l'intensité du processus d'éluviation avec la mise en culture, et que ii) les concentrations en matières organiques de l'horizon de surface du profil FUM, proches de celles mesurées dans les horizons éluviés du profil sous forêt, expliquent, au contraire, l'absence d'augmentation significative de l'intensité du processus d'éluviation en cas d'apports répétés de fumier. La baisse des concentrations en matières organiques est en effet une des principales causes invoquées par van Oort et al. (2016) pour expliquer la différenciation rapide de NEOLUVISOLS nus depuis 85 ans sous l'effet d'apports d'engrais chimiques et d'amendements basiques ou organiques.

IV.2.c.2 Transport des particules mobilisées

Si la mise en culture avec ou sans apports de matières organiques exogènes modifie très vraisemblablement l'intensité du processus d'éluviation, il est également possible qu'elle

modifie le transport des particules mobilisées. En effet, comme cela a été démontré par Rockefeller et al. (2004), l'absence d'un couvert forestier implique une augmentation des quantités d'eau mesurées dans les sols du fait i) de l'interception d'une partie des pluies par le couvert végétal forestier, et ii) d'une plus grande évapotranspiration. Les flux d'eau susceptibles de transporter des particules dans les sols cultivés seront alors d'autant plus importants que les concentrations en matières organiques et la rétention hydrique seront faibles. De plus, alors que les conditions sèches sont plutôt favorables à la rétention des particules en solution, les conditions plus humides sont au contraire plutôt favorables au transport des particules (Van den Bogaert et al., 2016). Enfin, l'augmentation de la porosité totale et plus particulièrement de la porosité associée aux vers anéciques, connue pour connecter la surface des sols aux horizons profonds et pour servir de voie d'écoulement préférentiel au transport particulaire (Oygarden et al., 1997; Petersen et al., 2004) pourrait également favoriser le transport des particules mobilisées dans le profil CULT par rapport aux deux profils FOR et FUM. Le processus de bioturbation pourrait en ce sens être considéré comme facilitateur du processus d'éluviation/illuviation (Phillips, 2004, 2007).

Finalement, i) en créant indirectement un réseau poral à l'architecture spécifique par la sélection d'espèces de vers de terre au comportement particulier, ii) en favorisant directement les infiltrations au détriment de l'évapotranspiration, et finalement iii) en diminuant la capacité de rétention hydrique des sols par diminution des concentrations en matières organiques, la mise en culture des sols sans apport de matières organiques va favoriser le transport des particules mobilisées par rapport à une occupation forestière d'une part et par rapport à la mise en culture avec apports de fumier d'autre part.

IV.2.c.3 Dépôt des particules

Les trois profils FOR, CULT et FUM présentent des horizons profonds dont les conditions de pH supérieures à 7 et de saturation du complexe d'échange par les ions Ca^{2+} et/ou Mg^{2+} sont favorables à la floculation (Van Den Bogaert et al., 2015) et à la rétention (Quénard et al., 2011) des particules mobilisées et transportées. De plus, l'augmentation de l'abondance (en surface et en nombre) des traits illuviaux sur la totalité du profil CULT plutôt que sur une ou plusieurs profondeurs particulières suggère que la mise en culture, si elle favorise la mobilisation et le transport des particules, n'a que peu d'impact sur la phase de dépôt des particules. Un tel résultat justifie finalement *a posteriori* de quantifier l'intensité du processus d'éluviation/illuviation à partir de la seule quantification du dépôt de particules, ou illuviation.

Il n'est toutefois pas impossible que le plus grand nombre de pores racinaires de petite taille sous forêt favorise l'illuviation des particules dans la mesure où nous avons pu quantifier une sélectivité du processus d'illuviation vis-à-vis des pores racinaires. Au

contraire, dans le profil CULT, les conditions particulièrement favorables au transport des particules mobilisées associées à l'absence d'horizon profond carbonaté pourrait entraîner une partie des particules mobilisées à plus grande profondeur voire pourquoi pas, au-delà des profondeurs échantillonnées. La quantification de traits illuviaux à 160 cm de profondeur dans le profil CULT alors que seuls de très rares revêtements sont détectés en dessous de 140 cm de profondeur dans le profil FOR va dans le sens de cette hypothèse d'un entraînement plus profond et/ou d'une exportation complète du profil de sol (Fig. V-2). Si exportation il y avait, cela impliquerait une sous-estimation, sans doute limitée, de l'intensité de l'illuviation dans le profil CULT et par voie de conséquence une sous-estimation de l'effet de la mise en culture sans apport de matières organiques exogènes sur l'intensité du processus d'illuviation.

IV.3. Dynamique des processus de structuration, de bioturbation et d'éluviation/illuviation

IV.3a) Une réponse rapide du réseau poral

La structuration des sols est classiquement considérée comme un processus « rapide » dont le temps caractéristique de réponse aux variations des conditions environnementales, ou facteur de pédogenèse, est compris entre la dizaine et la centaine d'années (Targulian and Krasilnikov, 2007).

Cent à deux cent ans de suppression de la végétation forestière ont ainsi été suffisants pour voir disparaître une part significative de la porosité associée à l'activité racinaire au moins sur le premier mètre de sol. La différenciation des profils CULT et FUM suggère toutefois que, loin de nécessiter une ou plusieurs centaines d'années, une dizaine d'années d'apports de matières organiques exogènes a été suffisante pour induire la disparition d'une partie de la porosité associée aux vers anéciques sur le premier mètre de sol. La création de porosité dans les horizons BT du profil CULT est le double résultat i) de la sélection de l'espèce épi-anécique *L. terrestris* au détriment des anéciques stricts *A. longa* et *A. giardi* observés sous forêt, et ii) de la diminution de la disponibilité des ressources conduisant les vers à intensifier leur activité de création de galeries. La création d'une porosité typique de l'activité des vers anéciques dans les horizons BT du profil CULT remonterait ainsi au maximum à la diminution des concentrations en matières organiques dans les sols cultivés. Or, la diminution des concentrations en matières organiques dans les sols agricoles est très largement liée à l'intensification des pratiques agricoles à partir des années 1960, soit il y a tout au plus cinquante ans, et notamment à la généralisation en grandes cultures de l'usage des fertilisants minéraux en remplacement des pratiques traditionnelles de fertilisation organique ainsi qu'à l'approfondissement du travail du sol

(Richter and Markewitz, 2001). Dans la mesure où cette création de porosité par l'activité lombricienne concerne déjà le premier mètre de sol, la vitesse moyenne de propagation du processus de création de porosité par l'activité biologique est au minimum de 2 cm par an. Il serait donc intéressant de caractériser plus finement cette dynamique passée et de suivre son éventuelle propagation vers les horizons plus profonds dans le double objectif de préciser sa vitesse instantanée et surtout de vérifier dans quelle mesure un état d'équilibre est d'ores et déjà atteint ou si au contraire la création de porosité va se propager sur l'ensemble de l'épaisseur du profil CULT. Quoi qu'il en soit, dans la mesure où dix années d'apports de fumier ont été suffisantes pour voir disparaître la porosité créée tout au long des cinquante dernières années, la dynamique de disparition de la porosité semble plus rapide que la dynamique de création.

Enfin, les dynamiques d'évolution du réseau poral des sols sont encore plus rapides, pour ne pas dire instantanées, dès lors qu'elles sont le résultat de contraintes directes et notamment de contraintes d'origine anthropique. Ainsi, la compaction des horizons E sous l'effet du tassement par le travail du sol ne nécessite sans doute qu'au plus quelques années, comme le suggère le fait que la semelle de labour actuelle soit localisée dans un ancien horizon labouré (horizon LE2 – Tableau I-1), voire un seul et unique labour en conditions d'humidité particulièrement défavorables. Dans ce cas, si les effets sont très rapides, leurs conséquences restent cependant localisées dans l'espace puisqu'elles ne concernent qu'au plus 10 à 20 cm de sol. Finalement, le temps de réponse caractéristique du processus de structuration des sols apparaît plutôt de l'ordre de la dizaine d'années, tout au plus de quelques dizaines d'années, que de la centaine d'années, c'est-à-dire dans la fourchette basse proposée par Targulian et Krasilnikov (2007).

Finalement, la disparition de la porosité racinaire et lombricienne sur au moins un mètre de profondeur souligne que la porosité n'est pas conservée indéfiniment sans une activité minimale de création et/ou d'entretien de porosité venant remplacer celle en cours de disparition et/ou de comblement. Ce résultat souligne ainsi combien le réseau poral des sols n'est pas une propriété figée mais est tout au contraire le produit d'un perpétuel renouvellement dans le temps, et par voie de conséquence dans l'espace, d'un équilibre dynamique entre création et disparition de porosité et ce i) sous l'effet d'une grande diversité de processus physiques et/ou biologiques, et ii) au-delà des seuls horizons de surface. Cependant, les horizons C des trois modalités étudiées ne présentent pas de différences marquées en termes de porosité totale et en particulier de porosité racinaire ce qui signifie que la dynamique du réseau poral au-delà d'un mètre de profondeur est plus lente et se joue sur plus d'un siècle.

IV.3b) Bioturbation « long terme » et bioturbation « court terme »

La bioturbation est, à l'image de la structuration des sols, considérée comme un processus « rapide » susceptible d'induire une évolution des propriétés des sols sur des pas de temps compris entre la dizaine et la centaine d'années (Targulian and Krasilnikov 2007). Comme discuté dans le paragraphe précédent consacré à la structuration biologique des sols, les évolutions d'abondance et de distribution en fonction de la profondeur des galeries lombriciennes mais aussi des remplissages confirment la sensibilité du processus de bioturbation à la mise en culture des sols et/ou aux apports de matières organiques exogènes ainsi que sa réactivité sur des pas de temps compris entre la dizaine (diminution de l'abondance des galeries avec les apports répétés de fumier) et quelques centaines d'années (redistribution de l'activité de brassage vers les horizons de faible profondeur au détriment des horizons plus profonds suite à la mise en culture). Toutefois, les conséquences d'un changement d'occupation des sols ou des pratiques agricoles sur des durées comprises entre la centaine d'années et la dizaine d'années ne sont pas d'amplitudes suffisantes pour modifier de manière significative le volume total de sol remanié par l'activité biologique, au moins pour des profondeurs supérieures à 30 cm. Ainsi, et comme nous avons eu l'occasion de le discuter dans le paragraphe IV.2b, la quantification de la bioturbation à partir non seulement des galeries mais aussi des remplissages biologiques donne accès à la bioturbation cumulée sur de longues périodes, ici au moins 10 000 ans. Il s'agit donc d'un indicateur long terme particulièrement utile pour comparer les intensités de la bioturbation pour différents types de sol matures. Cet indicateur s'avère en revanche trop peu sensible pour détecter des variations d'intensité du processus de bioturbation sous l'influence d'un changement récent des conditions environnementales. A partir du volume moyen de sol nouvellement bioturbé compris entre 0,001% et 0,006% du volume total de sol (chapitre IV), 1 000 ans sont en effet nécessaires pour obtenir une augmentation du volume total de sol remanié par l'activité biologique d'amplitude comprise entre 1 et 6% et donc difficile à détecter.

La quantification de l'abondance et de la distribution des galeries dont la conservation dans les sols est plus courte (Daniel et al., 1997) peut à l'inverse permettre d'estimer les variations d'intensité de la bioturbation à court terme. Malheureusement, dans la double mesure où i) les galeries ne représentent qu'en moyenne 5%, 11% et 4% du volume total de sol remanié par l'activité biologique dans les profils FOR, CULT et FUM, et où ii) l'abondance des galeries dépend non seulement de l'activité de création de galeries par les vers de terre mais aussi de leur dynamique de disparition sous l'effet de multiples processus compétiteurs tels que les processus de retrait/gonflement, de gel/dégel ou encore de tassement, une approche basée sur la quantification des galeries sera tout au plus semi-quantitative.

Dans tous les cas, il resterait intéressant de vérifier si les tendances identifiées à partir de l'indicateur « galerie » ou de la localisation en fonction de la profondeur des remplissages vont s'amplifier ou non avec le temps et induire à terme une différence significative de l'intensité de la bioturbation cumulée.

IV.3c) Un effet quantitatif sur l'intensité de l'illuviation perceptible à l'échelle décennale

Contrairement aux deux processus précédents, le processus d'éluviation/illuviation est considéré comme un processus moyennement rapide dont le temps caractéristique de réponse aux évolutions des conditions environnementales est d'au moins 1 000 ans (Targulian and Krasilnikov 2007). De plus, nombre d'auteurs décrivent la formation des luvisols comme résultant de processus anciens ayant eu lieu sous des climats plus chauds et humides (Gutierrez-Castorena et al., 2007; Jamagne, 1978; Payton, 1993; Van Vliet-Lanoë, 1990) alors que d'autres affirment que ces processus sont encore actifs (Fedoroff, 1997). Or, la comparaison de l'intensité du processus d'illuviation dans les trois profils FOR, CULT et FUM a permis de démontrer que 100 à 200 ans de mise en culture des sols sont suffisants pour générer une augmentation significative de l'intensité du processus d'illuviation quand une dizaine d'années d'apports répétés de fumier ont permis de limiter très fortement sinon de stopper complètement l'accélération du processus d'illuviation observée dans le profil CULT. Le processus d'éluviation/illuviation est donc non seulement actuellement actif mais aussi dix à cent fois plus rapide que ce qui est couramment admis (p.ex. Fedoroff (1986), Targulian and Krasilnikov (2007)).

De plus, si on admet les deux hypothèses suivantes selon lesquelles i) le processus d'illuviation est largement irréversible ce que semble confirmer la faible capacité du processus de bioturbation à compenser le processus d'illuviation (cf. IV.3b du chapitre IV), et ii) le flux de fraction < 2 µm associé au processus d'illuviation dans le profil FUM est plus proche du flux mesuré dans le profil FOR que de celui mesuré dans le profil CULT, alors l'essentiel de l'augmentation du flux de particules illuviées associé à la mise en culture des sols daterait de la dernière dizaine d'années. Dans tous les cas, le principal facteur responsable de cette augmentation de l'intensité du processus d'illuviation étant la diminution des concentrations en matières organiques, l'illuviation supplémentaire associée à la mise en culture remonterait alors aux cinquante dernières années. Finalement, selon que l'on considère que la différenciation des profils CULT et FOR s'est déroulée sur les 10 dernières années, sur les 50 dernières années en réponse à l'intensification de l'agriculture ou finalement sur les 200 dernières années en réponse à la dernière modification du mode d'occupation des sols, le flux supplémentaire annuel moyen de fraction < 2 µm associé à la

mise en culture serait respectivement de $40 \text{ t.ha}^{-1}\text{an}^{-1}$, $8 \text{ t.ha}^{-1}\text{an}^{-1}$ ou $2 \text{ t.ha}^{-1}\text{an}^{-1}$. Seule la vitesse calculée sur une durée d'illuviation de 200 ans est compatible, bien que près de deux fois plus élevée, avec la vitesse moyenne du processus d'illuviation estimée dans le paragraphe IV.3a du chapitre IV ou avec les vitesses publiées dans la littérature (Quénard et al., 2011 ; Jagercikova et al. 2014). Les vitesses d'illuviation estimées pour des durées d'illuviation de 10 et 50 sont en revanche 10 à 100 fois plus élevées et sont donc potentiellement sur-estimées. Quelle que soit la durée d'illuviation considérée, les vitesses estimées du processus d'illuviation en réponse à la dernière mise en culture sont systématiquement supérieures à la vitesse « long terme » estimée au paragraphe IV.3a du chapitre IV. Cette vitesse « long terme » serait ainsi la résultante de périodes de « basse intensité » et de périodes de « haute intensité » du processus d'illuviation. La mise en culture et ses conséquences directes ou indirectes, à savoir i) la chute des concentrations en matières organiques et par voie de conséquence de la stabilité structurale des horizons de surface des sols, et ii) la création par l'activité biologique de voies d'écoulements préférentiels favorables au transport particulaire semblent ainsi responsables d'une nouvelle phase d'illuviation de « haute intensité ».

V. Conclusion

La quantification comparée des processus de structuration, de bioturbation et d'éluviation/illuviation pour trois luvisols constituant une anthropo-chrono-séquence a permis de démontrer la sensibilité de ces processus à un changement du mode d'occupation ou des pratiques agricoles. La mise en culture s'est alors traduite :

- 1- par une modification de la taille et de la structure du réseau poral d'origine biologique avec une diminution de l'abondance des pores racinaires de petite taille et au contraire une augmentation des pores de grande taille, d'orientation verticale, et connectant la surface des sols aux horizons profonds typiques de l'activité des vers anéciques ;
- 2- par une relocalisation de la bioturbation à faible profondeur, i.e. entre 30 et 50 cm, au détriment des profondeurs plus importantes, i.e. entre 50 et 90 cm de profondeur, ainsi que par une augmentation de la proportion des flux de matière remontés à la surface des sols, c'est-à-dire des flux verticaux ascendants et longue distance, par rapport aux flux horizontaux et courtes distances ;
- 3- par une augmentation de l'intensité du processus d'illuviation distribuée sur la totalité des 160 cm du profil de sol cultivé.

L'introduction d'apports répétés et relativement massifs de matières organiques exogènes (quantités deux fois plus élevées que les pratiques réelles) a un effet tampon puissant sur les évolutions induites par la mise en culture des sols selon un itinéraire

technique conventionnel pour les grandes cultures céréalières. Le processus d'illuviation est ainsi ralenti sinon stoppé et les effets sur le réseau poral et la bioturbation sont grandement limités par une diminution de l'activité de création de galeries des lombriciens en réponse à la plus grande disponibilité des ressources organiques.

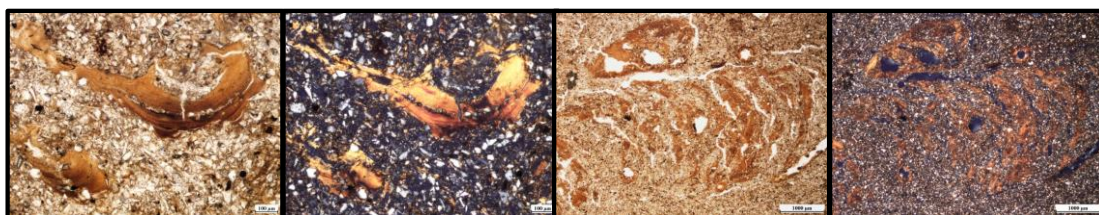
L'approche comparative développée dans ce travail a également permis d'identifier et de hiérarchiser les facteurs à l'origine de ces variations d'intensité des processus de structuration, de bioturbation et d'illuviation. Ainsi, dans l'anthropo-chrono-séquence étudiée, construite à partir de sols naturellement pauvres en matières organiques et marquée par d'importantes variations de l'abondance et de la distribution des ressources organiques, l'abondance des matières organiques est apparue être le principal facteur contrôlant l'intensité des processus de structuration, de bioturbation et d'illuviation. De ce fait, la mécanisation et l'intensification de l'agriculture à partir des années 60 pourrait être la cause essentielle à l'origine des effets de l'agriculture sur l'évolution récente des sols étudiés. Quoi qu'il en soit, les variations d'intensité des processus étudiés sont le résultat de la combinaison i) d'effets directs de la mise en culture comme la suppression de la végétation forestière, le tassement des sols et plus particulièrement l'apparition d'une semelle de labour ou encore la diminution et/ou la dilution des stocks de matières organiques, et ii) d'effets indirects liés aux conséquences de la mise en culture sur la diversité spécifique, l'abondance (densité et/ou biomasse) ou sur le comportement des lombriciens.

Enfin, il nous a été possible de démontrer qu'une dizaine, tout au plus quelques dizaines d'années étaient suffisantes pour que les variations d'intensité des processus de structuration, de bioturbation ou d'illuviation se traduisent par des modifications quantifiables de l'intensité ou de la direction des flux de matières et notamment des flux de fraction $< 2 \mu\text{m}$. Les vitesses réelles des processus de structuration, de bioturbation sont ainsi dans la gamme basse des vitesses communément admises alors que celle du processus d'illuviation est au moins dix fois plus rapide que les vitesses classiquement rapportées dans la littérature. Cette réactivité particulièrement rapide du processus d'illuviation pourrait trouver son origine dans un phénomène de rétroaction positive en lien avec la bioturbation comme déjà suggéré par Montagne et al. (2013). En effet, l'activité biologique constitue un acteur majeur de la structuration des sols marquée par l'apparition de galeries verticales connectant la surface des sols avec les horizons profonds et qui constituent *in fine* autant de chemins préférentiels d'écoulement et de transfert de particules.

De nombreuses questions restent toutefois en suspens. Une quantification précise de la dynamique instantanée des processus étudiés pourrait permettre de statuer sur la linéarité dans le temps des évolutions observées ou au contraire sur l'existence d'effets seuils (Chadwick and Chorover, 2001). Cela pourrait en particulier permettre d'identifier et de quantifier un éventuel seuil de concentrations en matières organiques en-dessous duquel la

diminution de la stabilité structurale serait tout particulièrement favorable au processus d'illuviation ou au contraire au-dessus duquel l'activité de bioturbation serait réduite. De telles informations sont en effet indispensables à la traduction des résultats fondamentaux présentés ici en conseils opérationnels pour une gestion durable des sols. Une autre question essentielle consiste à déterminer dans quelle mesure les sols étudiés sont actuellement dans un état de pseudo-équilibre ou au contraire si leurs évolutions respectives vont continuer de diverger et leur différenciation s'amplifier avec le temps (Montagne et al., 2013; Phillips et al., 1996).

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES



I. La micromorphologie couplée à l'analyse d'images pour une approche quantitative de la pédogenèse

Dans ce travail de recherche, nous avons élaboré et validé une méthode d'analyse d'images permettant d'identifier, de caractériser et finalement de quantifier de manière exhaustive les traits pédologiques diagnostics des deux processus principaux de transfert de matière particulaire dans les sols de climat tempéré : la bioturbation et l'éluviation/illuviation.

Le développement d'une telle approche de micromorphologie quantitative assistée par analyse d'images a été possible du fait i) d'une connaissance précise des objets analysés, qu'il s'agisse de la variabilité naturelle et/ou opératoire des échantillons analysés (lames minces) ou de la diversité interne des revêtements ou des traits biologiques, soulignant l'intérêt d'une approche descriptive préalable ; ii) de l'analyse de surfaces de sol suffisamment grandes, ici de l'ordre de $5\,500\text{ cm}^2$, pour être représentatives des processus étudiés tout en conservant une résolution suffisamment fine, ici de $5,3\text{ }\mu\text{m} \times 5,3\text{ }\mu\text{m}$, permettant de détecter des objets tels que les papules ou les pores racinaires dont la taille n'excède pas quelques centaines de μm , et finalement iii) de la prise en compte scrupuleuse des différents niveaux d'organisation des sols et notamment de la « texture » des traits pédologiques.

L'ensemble de ces précautions prises et la méthode validée, notre approche de micromorphologie quantitative assistée par analyse d'images s'est révélée particulièrement fructueuse. Tout d'abord, les mesures d'abondance surfacique des revêtements argileux d'une part et des pores d'autre part ont permis de quantifier les variations d'intensité des processus d'éluviation/illuviation et de bioturbation en fonction non seulement de la profondeur mais aussi de forçages anthropiques, et ce indépendamment de l'intervention d'une multitude de processus synergiques ou antagoniques. Le processus d'illuviation est ainsi à l'origine d'un transfert de fraction $< 2\text{ }\mu\text{m}$ compris entre 700 t.ha^{-1} et $1\,100\text{ t.ha}^{-1}$ en fonction du profil considéré ce qui représente, pour les sols étudiés environ 80% du contraste textural entre les horizons éluviés et les horizons illuviés. Le volume total de sol bioturbé représente, quant à lui, environ deux tiers du volume total de sol à 30 cm de profondeur et encore 20 à 30 % du volume total de sol à 150 cm de profondeur ce qui correspond finalement à des masses de sol déplacées au moins une fois de respectivement $5\,500$ à $6\,500\text{ t.ha}^{-1}$ soit environ $1\,500\text{ t.ha}^{-1}$ de fraction $< 2\text{ }\mu\text{m}$.

Ensuite, la caractérisation de la taille, de la forme ou de la distribution spatiale des traits pédologiques a permis de construire des classifications morphologiques des pores ou des revêtements et finalement d'améliorer notre connaissance des processus étudiés. Il nous a par exemple été possible de démontrer la sélectivité du processus d'illuviation vis-à-vis des pores de petite taille de même que l'existence de zones de dépôt préférentiel. Enfin,

à partir du traitement largement automatisé d'un grand nombre d'échantillons, il a été possible d'assurer la représentativité statistique et spatiale de nos quantifications et d'assurer les changements d'échelle échantillon/horizon, horizon/profil et finalement profil/mode d'occupation nécessaires à la quantification des effets d'un changement du mode d'occupation des sols ou des pratiques agricoles.

L'utilisation et la généralisation d'approches de micromorphologie quantitative assistée par analyse d'images se heurte cependant encore à plusieurs difficultés méthodologiques ou interprétatives. D'un point de vue méthodologique, certains paramètres tels que les critères de taille et de forme utilisés pour différencier les pores en fonction de leur origine dépendent étroitement de conditions locales (type de végétation et ses conséquences sur la taille des racines, diversité spécifique des vers de terre, etc.). Ces paramètres sont difficilement généralisables et restent à adapter à chaque contexte pédoclimatique particulier. La seconde difficulté réside dans la disponibilité et l'interprétation d'indicateurs micromorphométriques dont la sensibilité à une modification récente des conditions environnementales varie en fonction de la durée pendant laquelle le trait pédologique est créé, conservé et accumulé dans les sols. Ainsi, le volume total de sol bioturbé déduit de l'abondance relative de papules particulièrement stables dans le temps est l'indicateur idéal pour comparer l'intensité de la bioturbation dans des sols d'âge équivalents. Il est cependant peu sensible à un changement récent du mode d'occupation des sols ou des pratiques agricoles. A l'inverse, l'abondance des galeries, dont la durée de conservation dans les sols est beaucoup plus courte, est mieux adaptée à la caractérisation d'évolutions récentes. Cette diversité des durées de conservation des traits pédologiques pourrait permettre de quantifier les réponses des sols pour différents pas de temps à l'image de l'approche multi-isotopique récemment développée par Jagercikova (2014). Toutefois, la mise en œuvre d'une approche micromorphométrique multi-indicateurs est aujourd'hui limitée par le manque de caractérisation précise de la dynamique des multiples traits pédologiques. Cette question est d'autant plus prégnante que nous avons pu montrer que la dynamique des traits pédologiques et des galeries de lombriciens notamment, variait en fonction des horizons et très probablement en fonction des contextes pédoclimatiques.

II. Les sols: des systèmes (très) dynamiques

II.1. Des processus actifs et sensibles aux forçages anthropiques

Nos travaux de recherche ont permis de distinguer différents effets du facteur anthropique sur la formation des sols. L'observation dans le profil forestier, considéré comme référence, de revêtements argileux dits « poussiéreux » et typiques d'une mise en culture

des sols a souligné l'existence d'impacts "historiques" (Richter, 2007) hérités de forçages anthropiques antérieurs au dernier changement du mode d'occupation des sols. Des impacts "contemporains" sont par la suite venus se superposer à ces impacts « historiques » en réponse aux modifications récentes des modes d'occupation et/ou des pratiques agricoles liées notamment à l'intensification de l'agriculture à partir des années 60. Parmi ces impacts "contemporains", nos travaux ont permis de démontrer que les 100 à 200 dernières années de mise en culture étaient à l'origine : i) d'évolutions de la taille et de l'architecture du réseau poral, ii) d'une augmentation des flux verticaux ascendants longue distance (inter-horizons) au détriment des flux sub-horizontaux à courte distance (intra-horizons) et plus globalement d'une modification de l'architecture du volume bioturbé avec en particulier une augmentation des vides (galeries) par rapport aux pleins (remplissages), et finalement iii) d'une augmentation de l'intensité du processus d'illuviation et des flux de matière associés. A l'inverse, dix années d'apports répétés de matières organiques exogènes ont permis de très largement limiter l'amplitude des évolutions induites par la mise en culture des sols.

Parmi l'ensemble des évolutions des sols cultivés sous contraintes anthropiques "contemporaines", certaines sont, tout ou partiellement, réversibles alors que d'autres sont au contraire largement irréversibles. Ainsi, les évolutions du réseau poral en réponse aux modifications de la diversité spécifique et de l'abondance des vers de terre sous l'effet de la mise en culture ont été compensées par une modification de leur comportement sous l'effet des apports répétés de matières organiques exogènes. A l'inverse, l'augmentation de l'intensité du processus d'illuviation en réponse à la mise en culture apparaît d'autant plus irréversible que le processus de bioturbation ne permet pas de compenser le processus d'éluviation/illuviation. Il est alors tout au plus possible de contrôler l'amplitude de ces évolutions irréversibles via l'introduction de pratiques agricoles adéquates telles que les apports répétés de matières organiques exogènes.

Quoi qu'il en soit, loin d'être insensibles aux forçages anthropiques, voire inactifs comme cela est supposé pour le processus de lessivage, les trois processus de structuration biologique, de bioturbation et de lessivage se sont révélés non seulement actifs dans les sols étudiés mais également sensibles tant aux forçages anthropiques "historiques" qu'aux forçages anthropiques "contemporains". Les évolutions des sols sous contraintes anthropiques doivent donc être prises en compte dans la gestion durable de la ressource en sol, et ce d'autant plus que, s'il semble possible de limiter préventivement l'amplitude des évolutions des sols en réponse à ces perturbations anthropiques, l'irréversibilité de certaines de ces évolutions suggère que les possibilités de gestion curative sont limitées.

II.2. Des sols inscrits dans le temps court

La maîtrise du facteur temps à partir d'approche par chrono-séquence, et par voie de conséquence la mesure des temps de réponse et des vitesses des processus pédologiques, est limitée par i) la difficulté de reconstituer un historique précis des interventions humaines exercées sur les sols et de leurs conséquences sur les facteurs qui contrôlent l'intensité des processus étudiés tels que les stocks de matières organiques ou la diversité spécifique et l'abondance des vers de terre, et ii) les incertitudes sur la dynamique réelle des processus entre deux états datés des sols (Cornu et al., 2009; Montagne, 2006). Toutefois, l'ensemble des précautions prises tant en amont (validation scrupuleuse des méthodes d'analyse d'images) qu'en aval (analyse statistique des résultats) permettent d'affirmer que les temps de réponse des trois processus de structuration, de bioturbation et d'éluviation/illuviation sont plus rapides que ce qui est couramment admis dans la littérature. Cent à deux cents ans de mise en culture des sols ont par exemple été suffisantes pour induire une augmentation de l'intensité du processus d'éluviation/illuviation quand dix années d'apports répétés de matières exogènes ont permis de la limiter.

Différents facteurs sont susceptibles d'être à l'origine de cette réactivité extrêmement rapide des processus d'évolution des sols aux forçages anthropiques. Le premier est lié à la nature même des luvisols. Ces sols se développent en effet dans des matériaux drainants. Ils sont par ailleurs pauvres en matières organiques, en minéraux argileux et rapidement dépourvus de carbonates, c'est-à-dire en l'ensemble des constituants connus pour tamponner l'évolution des sols, y compris en conditions naturelles. Or, les interventions anthropiques vont justement d'une part avoir un effet sur le bilan hydrique des sols cultivés, véritable moteur de l'évolution des luvisols, et d'autre part être à l'origine d'une diminution/dilution des stocks de matières organiques d'où une réactivité potentiellement plus élevée des luvisols par rapport à d'autres types de sols dans lesquels les minéraux argileux, les matières organiques ou les carbonates sont plus abondants. Le second facteur susceptible de participer à cette réactivité des luvisols est l'existence de rétroactions positives entre processus comme cela a déjà été rapportés pour d'autres contextes pédoclimatiques (Montagne et al., 2013; Phillips et al., 1996). Ainsi, l'augmentation de l'activité des vers anéciques sous culture et la création d'un réseau poral particulièrement favorable au transfert particulaire a été identifiée comme l'un des principaux facteurs à l'origine de l'augmentation de l'intensité du processus d'illuviation.

Toutefois, loin de constituer un cas particulier, les résultats faisant état d'évolutions rapides des sols sous contraintes anthropiques concernent désormais i) les différents niveaux d'organisation des sols du minéral (Cornu et al., 2012b) au profil de sol (Montagne et al., 2013, 2016) ainsi qu'une grande diversité de processus incluant la podzolisation

(Cornu et al., 2012b), l'oxydo-réduction (Montagne et al., 2013, 2016) et avec ce travail, la structuration, la bioturbation et l'éluviation/illuviation. L'accumulation et la cohérence de ces résultats soulignent combien la formation et l'évolution des sols s'inscrivent non seulement dans les temps longs de la pédogenèse classique mais aussi dans les temps courts des perturbations anthropiques.

III. S'intéresser à la pédogenèse...dans quel but ?

En s'intéressant aux forçages anthropiques vus comme un des facteurs susceptibles de modifier la direction ou la vitesse des principaux processus pédogénétiques, et ce pour des durées comprises entre la dizaine et quelques centaines d'années, ce travail de recherche vise en premier lieu à améliorer nos connaissances générales sur le fonctionnement des sols. Pour autant, les résultats fondamentaux obtenus dans le cadre de ce travail répondent aux grands enjeux scientifiques ou pratiques relatifs aux sols.

Un des principaux enjeux scientifiques en sciences du sol est en effet de pouvoir modéliser le fonctionnement et l'évolution des sols avec entre autres objectifs d'assurer la durabilité des services rendus par les sols ou encore d'améliorer nos prédictions des changements climatiques et de ses effets (Samouëlian and Cornu, 2008; Vereecken et al., 2016). Or, par rapport à cet objectif, nos travaux de recherche démontrent que l'évolution des sols est le résultat de l'impact cumulé d'une très grande diversité de processus physiques, chimiques ou biologiques. Ainsi, la dynamique observée du réseau poral est le résultat de la combinaison de processus physiques tels que les processus de retrait/gonflement, de tassement, d'effondrement de la structure ou biologiques tels que la création de porosité par les racines ou l'activité des vers de terre. De plus, chacun de ces processus agit sur des échelles de temps et d'espace spécifiques. Le tassement des sols lors des opérations de labour est par exemple quasi-immédiat et limité aux 10 à 20 centimètres de sol situés immédiatement sous l'horizon labouré. La création de la porosité lombricienne, ou sa disparition faute d'un renouvellement permanent, concerne quant à elle principalement le premier mètre de sol avec une vitesse moyenne de propagation en profondeur comprise entre 2 et 10 cm par an. Enfin, si un à deux siècles sont nécessaires pour induire une modification significative des flux de matière liés au processus d'illuviation, ces flux se distribuent sur la totalité de l'épaisseur des sols soit ici pas moins de 150 cm. Nos travaux soulignent également l'existence de boucles de rétroactions positives ou négatives entre différents processus dont l'effet sur la vitesse et l'amplitude d'évolution des sols est majeur. Ainsi, alors que dynamiques de création et de disparition de porosité s'opposent, les processus de bioturbation sont au contraire susceptibles de favoriser le processus de lessivage. Dans tous les cas, l'intensité des processus et leurs variations sous l'effet des

contraintes anthropiques sont autant de données susceptibles de permettre la calibration et la validation des modèles de pédogenèse existants ou à venir.

D'un point de vue opérationnel, il s'agit d'orienter, par les pratiques agricoles, les processus pédologiques et les inévitables évolutions des sols qui en découlent, afin d'en minimiser les effets « négatifs » ou, dans le meilleur des cas, d'en maximiser les effets « positifs » d'un point de vue agronomique ou environnemental. Dans le cas étudié ici, il s'agit surtout de contrôler l'intensité du processus d'éluviation/illuviation responsable tout à la fois d'un transfert de polluants mais aussi d'un appauvrissement des horizons de surface en fraction $< 2 \mu\text{m}$ dont les conséquences sur la sensibilité des sols au tassement et à l'érosion ne sont plus à démontrer. Les résultats obtenus dans le cadre de ce travail démontrent de ce point de vue i) qu'une gestion préventive du processus d'éluviation/illuviation est d'autant plus indispensable qu'une gestion curative à l'aide du processus de bioturbation semble difficile sinon impossible, ii) que le seul maintien du pH autour de la neutralité, n'est pas suffisant, à lui seul, pour contrôler l'intensité du processus d'éluviation, mais iii) que le maintien de concentrations en carbone organique dans les horizons de surface autour de 15 g.kg^{-1} peut suffire à limiter significativement voire à stopper le processus d'éluviation/illuviation.

Contrairement au pilotage du processus d'u lessivage dont il a été relativement aisé d'identifier les leviers, le pilotage du processus de bioturbation semble beaucoup plus complexe dans la mesure où l'intensité de la bioturbation dépend de la diversité spécifique, de l'abondance et du comportement des vers de terre. Or, si certaines pratiques agricoles, comme les apports de matières organiques, sont favorables au moins à certaines espèces de vers de terre, elles modifient également leur comportement pour un résultat sur le réseau poral ou le flux de matières par bioturbation qui reste jusqu'à aujourd'hui difficile à prévoir.

IV. Perspectives

Les résultats obtenus dans le cadre de ce travail de recherche offrent de nombreuses perspectives tant méthodologiques que scientifiques.

D'un point de vue méthodologique il s'agirait de poursuivre le développement de la méthode d'identification et de quantification des traits diagnostics des processus de bioturbation et d'éluviation/illuviation. Plusieurs axes de développement complémentaires sont envisageables. Il s'agirait dans un premier temps d'améliorer la classification morphologique des pores afin de limiter certaines des confusions identifiées entre fentes et pores lombriciens notamment. La caractérisation de la forme des pores à partir d'un paramètre d'irrégularité en plus du paramètre d'élongation utilisé dans ce travail apparaît être une piste possible et pertinente (Hubert et al., 2007; Ringrose-Voase, 1996). Une fois

cette première amélioration effectuée, il s'agirait de poursuivre les efforts de validation dans la mesure où, pour l'instant, notre méthode d'analyse d'images a été validée essentiellement en surface mais pas en termes de nombre, de taille ou de forme des traits diagnostics. Le développement à plus long terme de notre méthode d'analyse pourrait alors chercher à i) quantifier sélectivement les revêtements « poussiéreux » et les revêtements « limpides » dans l'objectif de mieux quantifier l'héritage des forçages anthropiques « historiques » par rapport aux effets des forçages anthropiques « contemporains », et ii) quantifier directement les remplissages biologiques dans l'objectif de ne plus dépendre de la présence de papules pour quantifier la bioturbation ce qui permettrait alors de généraliser la quantification de la bioturbation aux horizons de surface d'une part et aux sols non illuviés d'autre part. Enfin, il serait intéressant de compléter nos données morphologiques avec des caractérisations chimiques et/ou minéralogiques des traits pédologiques ce qui permettraient *in fine* de transformer les flux de fraction $< 2 \mu\text{m}$ en flux d'éléments chimiques voire d'espèces minéralogiques (Montagne et al., 2008, 2013). Une autre piste consisterait à développer des approches de morphologie quantitative en 3 dimensions sur la base d'images de tomographies aux rayons X additionnées ou non d'une cartographie 3D de la chimie des sols (Hapca et al., 2015). Un tel objectif nécessiterait toutefois un travail de longue haleine. Si les revêtements argileux sont en effet relativement faciles à détecter sur la base de leurs propriétés optiques rien ne permet d'affirmer qu'il en soit de même sur la base de leur masse volumique et/ou de leur chimie. De plus, il n'est pas évident que le difficile équilibre entre grand volume et résolution fine puisse être obtenu avec les outils actuellement disponibles. Pourtant de telles approches pourraient permettre de détecter et caractériser les propriétés des pores (taille, connectivité, tortuosité, etc.) impliqués dans le transfert particulaire et notamment ceux impliqués dans la genèse des dépôts préférentiels comme cela a pu être récemment développé pour détecter la macroporosité impliquée dans les flux préférentiels d'eau (Sammartino et al., 2015).

D'un point de vue scientifique, il s'agirait dans un premier temps d'appliquer notre méthode à une ou plusieurs autres anthropo-chrono-séquences construites sur la base des mêmes contraintes anthropiques et des mêmes sols afin i) de valider les résultats obtenus sur l'anthropo-chrono-séquence étudiée dans ce travail, et ii) d'explorer des temps de réponse plus courts mais aussi plus longs dans l'objectif de préciser la dynamique inter-annuelle des processus pédologiques et de déterminer dans quelle mesure les sols étudiés sont en état de pseudo-équilibre ou vont au contraire continuer à se différencier. Une telle application ne devrait pas nécessiter de phase de développement méthodologique conséquente dans la mesure où elle reposerait sur un type de sol et des indicateurs morphologiques identiques. A moyen terme, il serait intéressant de généraliser l'application de la méthode de quantification de l'intensité des processus de transfert à d'autres facteurs

de la pédogenèse et notamment au climat dans l'objectif de pouvoir prédire les effets des changements climatiques ou à d'autres occupation des sols (prairies) et pratiques agricoles (réduction du travail du sol, etc.). A plus long terme, il serait intéressant d'adapter la méthode à d'autres types de sol et d'autres processus (podzolisation, décarbonatation, etc.). Enfin, au-delà de la généralisation de la méthode développée dans ce travail, la confrontation de nos quantifications de l'intensité des processus étudiés et de leurs variations en réponse aux forçages anthropiques avec des approches de modélisation de l'évolution des sols permettrait d'une part de valider la sensibilité et la dynamique des processus sous contraintes anthropiques et/ou d'améliorer certains points de la représentation des processus et de leurs interactions dans les modèles.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adderley, W.P., Simpson, I.A., Davidson, D.A., 2006. Historic landscape management: a validation of quantitative soil thin-section analyses. *J. Archaeol. Sci.* 33, 320–334. doi:10.1016/j.jas.2005.07.016
- Adderley, W.P., Simpson, I.A., Davidson, D.A., 2002. Colour description and quantification in mosaic images of soil thin sections. *Geoderma* 108, 181–195. doi:10.1016/S0016-7061(02)00123-4
- Adderley, W.P., Wilson, C.A., Simpson, I.A., Davidson, D.A., 2010. Anthropogenic Features, in: *Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths*. Elsevier, pp. 569–588.
- AFES, 2009. *Référentiel pédologique 2008*, 3e ed. ed. Baize D., Girard M.-C. (coord.) Savoir Faire. Éditions Quae.
- Agbenin, J.O., Felix-Henningsen, P., 2001. The status and dynamics of some trace elements in a savanna soil under long-term cultivation. *Sci. Total Environ.* 277, 57–68. doi:10.1016/S0048-9697(00)00859-7
- Amonette, J.E., 1994. Quantitative methods in soil mineralogy: proceedings of a symposium sponsored by Division S-9 of the Soil Science Society of America : symposium held in San Antonio, Texas on October 23-24, 1990. Soil Science Society of America.
- Anderson, D.M., Binnie, R.R., 1961. Modal Analysis of Soils¹. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 25, 499. doi:10.2136/sssaj1961.03615995002500060025x
- Annabi, M., Le Bissonnais, Y., Le Villio-Poitrenaud, M., Houot, S., 2011. Improvement of soil aggregate stability by repeated applications of organic amendments to a cultivated silty loam soil. *Agric. Ecosyst. Environ.* 144, 382–389. doi:10.1016/j.agee.2011.07.005
- Antoine, P., Catt, J., Lautridou, J.-P., Sommé, J., 2003. The loess and coversands of northern France and southern England. *J. Quat. Sci.* 18, 309–318. doi:10.1002/jqs.750
- Aydemir, S., Keskin, S., Drees, L.R., 2004. Quantification of soil features using digital image processing (DIP) techniques. *Geoderma* 119, 1–8.
- Bajard, M., 2013. Quantification de l'intensité de l'activité biologique dans les sols par analyse d'images de lames minces de sol. Mise au point méthodologique et quantification de l'impact de 250 ans de mise en culture (Rapport de stage INRA). Grignon.
- Balabane, M., Bureau, F., Decaens, T., Akpa, M., Hedde, M., Laval, K., Pawlak, B., Barrays, C., Cluzeau, D., Labreuche, J., Bodet, J.M., Le Bissonnais, Y., Saulas, P., Bertrand,

- M., Guichard, L., Picard, D., Houot, S., Arrouays, D., Brygoo, Y., Chenu, C., 2005. Restauration de fonctions et propriétés des sols de grandes cultures intensives. Effets de systèmes de culture alternatif sur les matières organiques et la structure des sols limoneux et approche du rôle fonctionnel de la diversité biologique des sols. Rapport du programme de recherche Gessol. INRA, Versailles.
- Bastardie, F., Capowiez, Y., de Dreuz, J.R., Cluzeau, D., 2003. X-ray tomographic and hydraulic characterization of burrowing by three earthworm species in repacked soil cores. *Appl. Soil Ecol.* 24, 3–16. doi:10.1016/S0929-1393(03)00071-4
- Baveye, P., Rogasik, H., Wendroth, O., Onasch, I., Crawford, J.W., 2002. Effect of sampling volume on the measurement of soil physical properties: simulation with x-ray tomography data. *Meas. Sci. Technol.* 13, 775–784. doi:10.1088/0957-0233/13/5/316
- Baveye, P.C., Laba, M., Otten, W., Bouckaert, L., Dello Sterpaio, P., Goswami, R.R., Grinev, D., Houston, A., Hu, Y., Liu, J., Mooney, S., Pajor, R., Sleutel, S., Tarquis, A., Wang, W., Wei, Q., Sezgin, M., 2010. Observer-dependent variability of the thresholding step in the quantitative analysis of soil images and X-ray microtomography data. *Geoderma* 157, 51–63. doi:10.1016/j.geoderma.2010.03.015
- Bear, J., 1972. *Dynamics of Fluids in Porous Media*. Elsevier, New York, NY.
- Bielders, C.L., Baveye, P., Wilding, L.P., Drees, L.R., Valentin, C., 1996. Tillage-induced spatial distribution of surface crusts on a sandy paleustult from Togo. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60, 843–855.
- Blouin, M., Hodson, M.E., Delgado, E.A., Baker, G., Brussaard, L., Butt, K.R., Dai, J., Dendooven, L., Peres, G., Tondoh, J.E., Cluzeau, D., Brun, J.-J., 2013. A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services. *Eur. J. Soil Sci.* 64, 161–182. doi:10.1111/ejss.12025
- Bockheim, J.G., Gennadiyev, A.N., 2009. The value of controlled experiments in studying soil-forming processes: A review. *Geoderma* 152, 208–217. doi:10.1016/j.geoderma.2009.06.019
- Bockheim, J.G., Gennadiyev, A.N., Hammer, R.D., Tandarich, J.P., 2005. Historical development of key concepts in pedology. *Geoderma* 124, 23–36. doi:10.1016/j.geoderma.2004.03.004
- Bonneau, M., Souchier, B., Duchaufour, P., 1994. *Pédologie, tome 2, Constituants et propriétés du sol.*, 2e édition, Paris : Masson (éditeur). ed.
- Bottinelli, N., Jouquet, P., Tran, T.D., Hallaire, V., 2012. Morphological characterisation of weathered earthworm casts by 2D-image analysis. *Biol. Fertil. Soils* 48, 845–849. doi:10.1007/s00374-012-0674-5
- Bouché, M.B., 1972. *Lombriciens de France-Ecologie et systématique*, Ann. Zool. Ecol. Anim. Inra.
- Bouché, M.B., Lavelle, P., Sirven, B., 2014. Des vers de terre et des hommes : Découvrir nos écosystèmes fonctionnant à l'énergie solaire. Actes Sud Editions, Arles.
- Boulaine, J., 1978. Les sols calfersiques. *Cah. ORSTOM Série Pédologie* 16, 265–291.
- Boulet, R., Chauvel, A., Humbel, F.X., Lucas, Y., 1982. Structural analysis and soil mapping. 1. The bidimensional organization of the soil cover: the studies of toposequences and their main contribution to the knowledge of soils. *Cah. ORSTOM Ser. Pedol. Fr.* 19, 309–321.
- Bradford, S.A., Bettahar, M., Simunek, J., van Genuchten, M.T., 2004. Straining and Attachment of Colloids in Physically Heterogeneous Porous Media. *Vadose Zone J.* 3, 384. doi:10.2136/vzj2004.0384
- Brammer, H., 1971. Coatings in seasonally flooded soils. *Geoderma* 6, 5–16. doi:10.1016/0016-7061(71)90047-4
- Brewer, R., 1964. *Fabric and mineral analysis of soils*. Wiley.
- Brimhall, G., Lewis, C., Ford, C., Bratt, J., Taylor, G., Warin, O., 1991. Quantitative Geochemical Approach to Pedogenesis - Importance of Parent Material Reduction, Volumetric Expansion, and Eolian Influx in Lateritization. *Geoderma* 51, 51–91. doi:10.1016/0016-7061(91)90066-3

- Brinkman, R., Sombroek, W.G., 1996. The effects of global change on soil conditions in relation to plant growth and food production, in: *Global Climate Change and Agricultural Production. Direct and Indirect Effects of Changing Hydrological, Pedological and Plant Physiological Processes*. FAO, Rome, Italy.
- Bruand, A., Cousin, I., Nicoullaud, B., Duval, O., Bégon, J.C., 1996. Backscattered Electron Scanning Images of Soil Porosity for Analyzing Soil Compaction around Roots. *Soil Sci Soc Am J* 60, 895–901.
- Bruneau, P.M., Davidson, D.A., Grieve, I.C., 2004. An evaluation of image analysis for measuring changes in void space and excremental features on soil thin sections in an upland grassland soil. *Geoderma* 120, 165–175. doi:10.1016/j.geoderma.2003.08.012
- Bryant, R.G., Davidson, D.A., 1996. The use of image analysis in the micromorphological study of old cultivated soils: an evaluation based on soils from the island of Papa Stour, Shetland. *J. Archaeol. Sci.* 23, 811–822.
- Bryk, M., 2016. Macrostructure of diagnostic B horizons relative to underlying BC and C horizons in Podzols, Luvisol, Cambisol, and Arenosol evaluated by image analysis. *Geoderma* 263, 86–103. doi:10.1016/j.geoderma.2015.09.014
- Bullock, P., Fédoroff, N., Jongerius, A., Stoops, G., Tursina, T., 1985. *Handbook for Soil Thin Section Description*. Wolverhampton, UK. Waine Research Publications.
- Capowiez, Y., Bottinelli, N., Jouquet, P., 2014a. Quantitative estimates of burrow construction and destruction, by anecic and endogeic earthworms in repacked soil cores. *Appl. Soil Ecol.* 74, 46–50. doi:10.1016/j.apsoil.2013.09.009
- Capowiez, Y., Rault, M., Mazzia, C., Lhoutellier, C., Houot, S., 2009. Étude des effets des apports de produits résiduels organiques sur la macrofaune lombricienne en conditions de grandes cultures. *Étude Gest. Sols* 16, 175–185.
- Capowiez, Y., Sammartino, S., Michel, E., 2014b. Burrow systems of endogeic earthworms: Effects of earthworm abundance and consequences for soil water infiltration. *Pedobiologia* 57, 303–309. doi:10.1016/j.pedobi.2014.04.001
- Carrayrou, C., 2014. Effets des produits résiduels organiques sur les annélides du sol et l'infiltration de l'eau (Rapport de stage INRA). Grignon.
- Carter, S.P., Davidson, D.A., 1998. An evaluation of the contribution of soil micromorphology to the study of ancient arable agriculture. *Geoarchaeology* 13, 535–547. doi:10.1002/(SICI)1520-6548(199808)13:6<535::AID-GEA1>3.0.CO;2-#
- Cassagne, N., Spiegelberger, T., Cecillon, L., Juvy, B., Brun, J.-J., 2008. The impact of soil temperature increase on organic matter and faunal properties in a frozen calcareous scree in the French Alps. *Geoderma* 146, 239–247. doi:10.1016/j.geoderma.2008.05.028
- Chadwick, O.A., Chorover, J., 2001. The chemistry of pedogenic thresholds. *Geoderma* 100, 321–353. doi:10.1016/S0016-7061(01)00027-1
- Chan, K.Y., 2001. An overview of some tillage impacts on earthworm population abundance and diversity - implications for functioning in soils. *Soil Tillage Res.* 57, 179–191. doi:10.1016/S0167-1987(00)00173-2
- Chenu, C., Abiven, S., Annabi, M., Barray, S., Bertrand, M., Bureau, F., Cosentino, D., Darboux, F., Duval, O., Fourrié, L., Francou, C., Houot, S., Jolivet, C., Laval, K., Le Bissonnais, Y., Lemée, L., Menasseri, S., Pétraud, J.P., Verbègue, B., 2011. Mise au point d'outils de prévision de l'évolution de la stabilité de la structure de sols sous l'effet de la gestion organique des sols. *Etude Gest. Sols* 18, 161–174.
- Cooper, M., Vidal-Torrado, P., Chaplot, V., 2005. Origin of microaggregates in soils with ferralic horizons. *Sci. Agric.* 62, 256–263.
- Cornu, S., Montagne, D., Daroussin, J., Cousin, I., 2012a. Image-analytically derived conceptual model of Albeluvisol morphological degradation induced by artificial drainage in France. *Geoderma* 189, 296–303. doi:10.1016/j.geoderma.2012.05.024
- Cornu, S., Montagne, D., Hubert, F., Barre, P., Caner, L., 2012b. Evidence of short-term clay evolution in soils under human impact. *Comptes Rendus Geosci.* 344, 747–757. doi:10.1016/j.crte.2012.09.005

- Cornu, S., Montagne, D., Vasconcelos, P.M., 2009. Dating constituent formation in soils to determine rates of soil processes: A review. *Geoderma* 153, 293–303. doi:10.1016/j.geoderma.2009.08.006
- Cornu, S., Quenard, L., Cousin, I., Samouelian, A., 2014. Experimental approach of leaching: Quantification and mechanisms. *Geoderma* 213, 357–370. doi:10.1016/j.geoderma.2013.08.012
- Costantini, E.A.C., Pellegrini, S., Vignozzi, N., Barbetti, R., 2006. Micromorphological characterization and monitoring of internal drainage in soils of vineyards and olive groves in central Italy. *Geoderma* 131, 388–403. doi:10.1016/j.geoderma.2005.03.029
- Cremaschi, M., Fedoroff, N., Guerreschi, A., Huxtable, J., Colombi, N., Castelletti, L., Maspero, A., 1990. Sedimentary and pedological processes in the Upper Pleistocene loess of northern Italy. The Bagaggera sequence. *Quat. Int.* 5, 23–38. doi:10.1016/1040-6182(90)90022-V
- Dalrymple, J., Theodoropoulos, S., 1987. Intrapedal Cutans - Lateral Differences in Their Properties and Their Spatial Clustering. *Geoderma* 41, 149–180. doi:10.1016/0016-7061(87)90033-4
- Daniel, O., Kretzschmar, A., Capowiez, Y., Kohli, L., Zeyer, J., 1997. Computer-assisted tomography of macroporosity and its application to study the activity of the earthworm *Aporrectodea nocturna*. *Eur. J. Soil Sci.* 48, 727–737. doi:10.1046/j.1365-2389.1997.00111.x
- Davidson, D.A., 2002. Bioturbation in old arable soils: Quantitative evidence from soil micromorphology. *J. Archaeol. Sci.* 29, 1237–1253.
- Davidson, D.A., Grieve, I.C., 2006. Relationships between biodiversity and soil structure and function: Evidence from laboratory and field experiments. *Appl. Soil Ecol.* 33, 176–185. doi:10.1016/j.apsoil.2005.11.002
- Do Nascimento, N.R., Bueno, G.T., Fritsch, E., Herbillon, A.J., Allard, T., Melfi, A.J., Astolfo, R., Boucher, H., Li, Y., 2004. Podzolization as a deferralization process: a study of an Acrisol-Podzol sequence derived from Palaeozoic sandstones in the northern upper Amazon Basin. *Eur. J. Soil Sci.* 55, 523–538. doi:10.1111/j.1365-2389.2004.00616.x
- Dominati, E., Patterson, M., Mackay, A., 2010. A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecol. Econ.* 69, 1858–1868. doi:10.1016/j.ecolecon.2010.05.002
- Dümig, A., Häusler, W., Steffens, M., Kögel-Knabner, I., 2012. Clay fractions from a soil chronosequence after glacier retreat reveal the initial evolution of organo–mineral associations. *Geochim. Cosmochim. Acta* 85, 1–18. doi:10.1016/j.gca.2012.01.046
- Edwards, C.A., 2004. *Earthworm Ecology*, 2nd edition. ed. CRC Press.
- Egli, M., Fitze, P., 2000. Formulation of pedologic mass balance based on immobile elements: A revision. *Soil Sci.* 165, 437–443. doi:10.1097/00010694-200005000-00008
- Faivre, P., Chamarro, C., 1995. Facteurs biotiques et mécanismes de lessivage particulière dans les sols. L'exemple des toposéquences caractéristiques des Andes de Colombie. *Etude Gest. Sols* 1, 25–42.
- Fedoroff, N., 1997. Clay illuviation in Red Mediterranean soils. *Catena* 28, 171–189.
- Fedoroff, N., 1986. Un plaidoyer en faveur de la paléopédologie. *Bull. Assoc. Fr. Pour l'étude Quat.* 23, 195–204. doi:10.3406/quate.1986.1815
- Fedoroff, N., Courty, M.A., 1994. Organisation du sol aux échelles microscopiques, in: M. Bonneau and B. Souchier (Editors), *Pédologie*. 2, 2eme Edition. Constituants et Propriétés Du Sol. Masson, Paris, pp. 349–375.
- Fedoroff, N., Goldberg, P., 1982. Comparative micromorphology of two late Pleistocene paleosols (in the Paris Basin). *CATENA* 9, 227–251. doi:10.1016/0341-8162(82)90003-0
- Fernandez, C., Labanowski, J., Jongmans, T., Bermond, A., Cambier, P., Lamy, I., van Oort, F., 2010. Fate of airborne metal pollution in soils as related to agricultural

- management: 2. Assessing the role of biological activity in micro-scale Zn and Pb distributions in A, B and C horizons. *Eur. J. Soil Sci.* 61, 514–524. doi:10.1111/j.1365-2389.2010.01256.x
- Ferreira, T.R., Borges, J.A.R., Pires, L.F., 2015. Representative elementary area for soil bulk density measurements of samples collected in volumetric rings by CT image analyses. *Soil Tillage Res.* 152, 74–84. doi:10.1016/j.still.2015.03.007
- FitzPatrick, E.A., 1984. *Micromorphology of Soils*. Springer Science & Business Media.
- Fritsch, E., Fitzpatrick, R., 1994. Interpretation of soil features produced by ancient and modern processes in degraded landscapes .1. A new method for constructing conceptual soil-water-landscape models. *Aust. J. Soil Res.* 32, 889. doi:10.1071/SR9940889
- Fritsch, E., Herbillon, A.J., do Nascimento, N.R., Grimaldi, M., Melfi, A.J., 2007. From Plinthic Acrisols to Plinthosols and Gleysols: iron and groundwater dynamics in the tertiary sediments of the upper Amazon basin. *Eur. J. Soil Sci.* 58, 989–1006. doi:10.1111/j.1365-2389.2006.00877.x
- Fritsch, E., Peterschmitt, E., Herbillon, A.J., 1992. A structural approach to the regolith: Identification of structures, analysis of structural relationships and interpretations. *Sci. Géologiques* 45, 77–97.
- Gargiulo, L., Mele, G., Buscemi, G., Soppelsa, O., Terribile, F., 2014. Interactions between Soil Structure and Soil Organic Matter: Contribution of Pedofauna Activity [WWW Document]. 한국토양비료학회 학술발표회 초록집. URL <http://www.dbpia.co.kr> (accessed 9.13.16).
- Gargiulo, L., Mele, G., Terribile, F., 2013. Image analysis and soil micromorphology applied to study physical mechanisms of soil pore development: An experiment using iron oxides and calcium carbonate. *Geoderma* 197–198, 151–160. doi:10.1016/j.geoderma.2013.01.008
- Gebhardt, A., 1988. Evolution du paysage agricole au cours du Sub-atlantique dans la région de Redon (Morbihan, France). Apport de la micromorphologie. *Bull. Assoc. Fr. Pour l'étude Quat.* 25, 197–203. doi:10.3406/quate.1988.1882
- Gobat, J.M., Aragno, M., Matthey, W., 2004. *The living soil: fundamentals of soil science and soil biology.*, Science Publishers Inc, Enfield NH USA. ed.
- Goldberg, P., Macphail, R.I., 2006. *Practical and Theoretical Geoarchaeology*. Wiley.
- Granier, A., 2007. Rôle des prairies dans le cycle de l'eau. Comparaison avec la forêt. *Fourrages* 399–408.
- Grove, C., Jerram, D.A., 2011. jPOR: An ImageJ macro to quantify total optical porosity from blue-stained thin sections. *Comput. Geosci.* 37, 1850–1859. doi:10.1016/j.cageo.2011.03.002
- Guilloré, P., 1985. Méthode de fabrication mécanique et en série des lames minces. I.N.A.-P.G. Grignon, France.
- Gunal, H., Ransom, M.D., 2006. Clay illuviation and calcium carbonate accumulation along a precipitation gradient in Kansas. *CATENA* 68, 59–69. doi:10.1016/j.catena.2006.04.027
- Gutierrez-Castorena, M. del C., Ortiz-Solorio, C.A., Sanchez-Guzman, P., 2007. Clay coatings formation in tepetates from Texcoco, Mexico. *Catena* 71, 411–424. doi:10.1016/j.catena.2007.03.017
- Hallaire, V., Curmi, P., Widiatmaka, 1997. Morphologie de la porosité et circulations préférentielles en saturé. Cas des horizons d'un système pédologique armoricain. *Etude Gest. Sols* 4, 115–126.
- Hallaire, V., Lamandé, M., Heddadj, D., 2004. Effet de l'activité biologique sur la structure des sols soumis à différentes pratiques culturales. *Impacts Sur Leurs Propr. Transf. EGS* 11, 47–58.
- Hapca, S., Baveye, P.C., Wilson, C., Lark, R.M., Otten, W., 2015. Three-Dimensional Mapping of Soil Chemical Characteristics at Micrometric Scale by Combining 2D SEM-EDX Data and 3D X-Ray CT Images. *PLOS ONE* 10, e0137205. doi:10.1371/journal.pone.0137205

- Hayes, W.A., Vepraskas, M.J., 2000. Morphological Changes in Soils Produced When Hydrology Is Altered by Ditching. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 1893. doi:10.2136/sssaj2000.6451893x
- Howarth, R.J., 1998. Improved estimators of uncertainty in proportions, point-counting, and pass-fail test results. *Am. J. Sci.* 298, 594–607. doi:10.2475/ajs.298.7.594
- Hubert, F., Hallaire, V., Sardini, P., Caner, L., Heddadj, D., 2007. Pore morphology changes under tillage and no-tillage practices. *Geoderma* 142, 226–236. doi:10.1016/j.geoderma.2007.08.017
- Humphreys, G.S., 1994. Bioturbation, biofabrics and the biomantle: an example from the Sydney Basin, in: *Developments in Soil Science*. Elsevier, pp. 421–436.
- IGN/EHESS, 2015. Carte de Cassini (XVIII^e siècle) - Géoportail [WWW Document]. URL <http://www.geoportail.gouv.fr/> (accessed 8.6.15).
- IPCC, 2001. Climate change 2001: the scientific basis. Presented at the Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, Cambridge.
- Jabiol, B., 2013. La structure des sols forestiers : spécificités, état, conséquences et enjeux, in: *Les Sols et Leurs Structures*. INRA-Quae.
- Jagercikova, M., 2014. Kinetic quantification of vertical solid matter transfers in soils by a multi-isotopic approach. Aix-Marseille.
- Jagercikova, M., Cornu, S., Bourles, D., Antoine, P., Mayor, M., Guillou, V., 2015. Understanding long-term soil processes using meteoric Be-10: A first attempt on loessic deposits. *Quat. Geochronol.* 27, 11–21. doi:10.1016/j.quageo.2014.12.003
- Jagercikova, M., Evrard, O., Balesdent, J., Lefèvre, I., Cornu, S., 2014. Modeling the migration of fallout radionuclides to quantify the contemporary transfer of fine particles in Luvisol profiles under different land uses and farming practices. *Soil Tillage Res.* 140, 82–97. doi:10.1016/j.still.2014.02.013
- Jamagne, M., 2011. Grands paysages pédologiques de France. Editions Quae.
- Jamagne, M., 1978. Soil-forming processes in a progressive evolutionary sequence on loessial silty formation in a cold and humid temperate zone. *Comptes Rendus Hebd. Séances Académie Sci. Paris* 286(1), 25–27.
- Jamagne, M., 1973. Contribution à l'étude pédologique des formations loessiques du Nord de la France (thèse doctorale en Sciences Agronomiques). Fac. Sci. Agro., Gembloux.
- Jamagne, M., De Coninck, F., Robert, M., Maucorps, J., 1984. Mineralogy of clay fractions of some soils on loess in northern France. *Geoderma* 33, 319–342. doi:10.1016/0016-7061(84)90032-6
- Jamagne, M., Jeanson, C., Eimberck, M., 1987. Données sur la composition des argilanes en régions tempérées et continentales, in: Fedoroff, N., Bresson, L.M., Courty, M.A. (Eds.), *Micromorphologie de Sols/Soil Micromorphology*. Proceedings of the VIIth International Working Meeting on Soil Micromorphology. Paris, pp. 279–285.
- Jangorzo, N.S., Watteau, F., Hajos, D., Schwartz, C., 2015. Nondestructive monitoring of the effect of biological activity on the pedogenesis of a Technosol. *J. Soils Sediments* 15, 1705–1715. doi:10.1007/s11368-014-1008-z
- Jangorzo, N.S., Watteau, F., Schwartz, C., 2013. Evolution of the pore structure of constructed Technosols during early pedogenesis quantified by image analysis. *Geoderma* 207–208, 180–192. doi:10.1016/j.geoderma.2013.05.016
- Jarvis, N.J., 2007. A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: principles, controlling factors and consequences for water quality. *Eur. J. Soil Sci.* 58, 523–546. doi:10.1111/j.1365-2389.2007.00915.x
- Jeanson, C., 1964. Micromorphologie et pedozoologie experimentale Contribution a l'etude sur plaques minces de grandes dimensions d'un sol artificiel structure par les Lombricides. *Soil Micromorphol.*
- Jegou, D., Hallaire, V., Cluzeau, D., Trehen, P., 1999. Characterization of the burrow system of the earthworms *Lumbricus terrestris* and *Aporrectodea giardi* using X-ray

- computed tomography and image analysis. *Biol. Fertil. Soils* 29, 314–318. doi:10.1007/s003740050558
- Jiao, L., Liu, Y., 2012. Analyzing the shape characteristics of land use classes in remote sensing imagery. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 1-7, 135–140. doi:10.5194/isprsannals-1-7-135-2012
- Johnson, M.O., Mudd, S.M., Pillans, B., Spooner, N.A., Keith Fifield, L., Kirkby, M.J., Gloor, M., 2014. Quantifying the rate and depth dependence of bioturbation based on optically-stimulated luminescence (OSL) dates and meteoric ¹⁰ Be. *Earth Surf. Process. Landf.* 39, 1188–1196. doi:10.1002/esp.3520
- Jones, C.G., Lawton, J.H., Shachak, M., 1994. Organisms as Ecosystem Engineers. *Oikos* 69, 373. doi:10.2307/3545850
- Jongerijs, A., 1970. Some morphological aspects of regrouping phenomena in Dutch soils. *Geoderma* 4, 311–331. doi:10.1016/0016-7061(70)90008-X
- Jongmans, A., Pulleman, M., Balabane, M., van Oort, F., Marinissen, J.C., 2003. Soil structure and characteristics of organic matter in two orchards differing in earthworm activity. *Appl. Soil Ecol.* 24, 219–232. doi:10.1016/S0929-1393(03)00072-6
- Jongmans, A.G., Feijtel, T.C.J., Miedema, R., van Breemen, N., Veldkamp, A., 1991. Soil formation in a Quaternary terrace sequence of the Allier, Limagne, France. Macro- and micromorphology, particle size distribution, chemistry. *Geoderma* 49, 215–239. doi:10.1016/0016-7061(91)90077-7
- Jongmans, A.G., Pulleman, M.M., Marinissen, J.C.Y., 2001. Soil structure and earthworm activity in a marine silt loam under pasture versus arable land. *Biol. Fertil. Soils* 33, 279–285.
- Jouquet, P., Zangerle, A., Rumpel, C., Brunet, D., Bottinelli, N., Tran Duc, T., 2009. Relevance and limitations of biogenic and physiocogenic classification: a comparison of approaches for differentiating the origin of soil aggregates. *Eur. J. Soil Sci.* 60, 1117–1125. doi:10.1111/j.1365-2389.2009.01168.x
- Kemp, R.A., 1998. Role of micromorphology in paleopedological research. *Quat. Int., Revisitation of Concepts in Paleopedology* 51–52, 133–141. doi:10.1016/S1040-6182(97)00040-2
- Kooistra, M.J., Pulleman, M.M., 2010. 18 - Features Related to Faunal Activity, in: Stoops, G., Marcelino, V., Mees, F. (Eds.), *Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths*. Elsevier, Amsterdam, pp. 397–418.
- Kooistra, M.J., Schoonderbeek, D., Boone, F.R., Veen, B.W., Van Noordwijk, M., 1992. Root-soil contact of maize, as measured by a thin-section technique: II. Effects of soil compaction. *Plant Soil* 139, 119–129. doi:10.1007/BF00012849
- Kozlovskii, F.I., Ruhlmann, J., Travnikova, L.S., Kuzyakov, Y.V., 2001. Clay differentiation in initially homogeneous substrates upon long-term field experiments. *Eurasian Soil Sci.* 34, 130–138.
- Kühn, P., Aguilar, J., Miedema, R., 2010. 11 - Textural Pedofeatures and Related Horizons, in: Stoops, G., Marcelino, V., Mees, F. (Eds.), *Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths*. Elsevier, Amsterdam, pp. 217–250.
- Laba, M., Downs, R., Smith, S., Welsh, S., Neider, C., White, S., Richmond, M., Philpot, W., Baveye, P., 2008. Mapping invasive wetland plants in the Hudson River National Estuarine Research Reserve using quickbird satellite imagery. *Remote Sens. Environ.* 112, 286–300. doi:10.1016/j.rse.2007.05.003
- Lamandé, M., Hallaire, V., Curmi, P., Pérès, G., Cluzeau, D., 2003. Changes of pore morphology, infiltration and earthworm community in a loamy soil under different agricultural managements. *Catena* 54, 637–649.
- Lamandé, M., Labouriau, R., Holmstrup, M., Torp, S.B., Greve, M.H., Heckrath, G., Iversen, B.V., de Jonge, L.W., Moldrup, P., Jacobsen, O.H., 2011. Density of macropores as related to soil and earthworm community parameters in cultivated grasslands. *Geoderma* 162, 319–326. doi:10.1016/j.geoderma.2011.03.004
- Langohr, R., 2001. L'anthropisation du paysage pédologique agricole de la Belgique depuis le Néolithique ancien: apports de l'archéopédologie. *ETUDE Gest. SOLS* 8, 103–118.

- Lavelle, P., Bignell, D., Lepage, M., Wolters, V., Roger, P., Ineson, P., Heal, O.W., Dhillon, S., 1997. Soil function in a changing world: the role of invertebrate ecosystem engineers. *Eur. J. Soil Biol.* 33, 159–193.
- Lavelle, P., Spain, A., 2007. *Soil Ecology*. Springer Science & Business Media.
- Le Couteulx, A., Wolf, C., Hallaire, V., Pérès, G., 2015. Burrowing and casting activities of three endogeic earthworm species affected by organic matter location. *Pedobiologia* 58, 97–103. doi:10.1016/j.pedobi.2015.04.004
- Lee, K.E., 1985. *Earthworms: their ecology and relationships with soils and land use*. Academic Press, Sydney; Orlando.
- Lin, H., 2011. Three Principles of Soil Change and Pedogenesis in Time and Space. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75, 2049–2070. doi:10.2136/sssaj2011.0130
- Macphail, R.J., Romans, J.C.C., Robertson, L., 1987. The application of micromorphology to the understanding of Holocene soil development in the British Isles; with special reference to early cultivation, in: *Micromorphologie Des Sols—Soil Micromorphology*. Plaisir: AFES, pp. 647–656.
- Marschallinger, R., 1997. Automatic mineral classification in the macroscopic scale. *Comput. Geosci.* 23, 119–126. doi:10.1016/S0098-3004(96)00074-X
- McCarthy, P.J., Martini, I.P., Leckie, D.A., 1999. Pedogenic and diagenetic influences on void coating formation in Lower Cretaceous paleosols of the Mill Creek Formation, southwestern Alberta, Canada. *Geoderma* 87, 209–237. doi:10.1016/S0016-7061(98)00058-5
- McKeague, J., Guertin, R., Valentine, K., Belisle, J., Bourbeau, G., Howell, A., Michalyna, W., Hopkins, L., Page, F., Bresson, L., 1980. Estimating Illuvial Clay in Soils by Micro-Morphology. *Soil Sci.* 129, 386–388. doi:10.1097/00010694-198006000-00009
- McKeague, J.A., Guertin, R.K., Page, F., Valentine, K.W.G., 1978. Micromorphological evidence of illuvial clay in horizons designated Bt in the field. *Can. J. Soil Sci.* 58, 179–186.
- Mercier, V., Cambier, P., Benoit P., Deschamps M., Michaud A., Rampon J.N., Etievant V., Houot S., 2010. Etude de la valeur agronomique et des impacts environnementaux de composts d'origine urbaine. Synthèse des principaux résultats 2009 de l'essai Qualiagro.
- Meysman, F.J.R., Middelburg, J.J., Heip, C.H.R., 2006. Bioturbation: a fresh look at Darwin's last idea. *Trends Ecol. Evol.* 21, 688–695. doi:10.1016/j.tree.2006.08.002
- Miedema, R., Koulechova, I.N., Gerasimova, M.I., 1999. Soil formation in Greyzems in Moscow district: micromorphology, chemistry, clay mineralogy and particle size distribution. *CATENA* 34, 315–347. doi:10.1016/S0341-8162(98)00105-2
- Miedema, R., Slager, S., 1972. Micromorphological Quantification of Clay Illuviation. *J. Soil Sci.* 23, 309–314. doi:10.1111/j.1365-2389.1972.tb01662.x
- Miedema, R., Slager, S., Jongmans, A.G., Pape, T., 1983. Amount, characteristics and significance of clay illuviation features in Late-Weichselian Meuse terraces, in: Bullock P. and Murphy C.P. (Eds.), *Soil Micromorphology: Proceedings of the International Working-Meeting on Soil Micromorphology*. A.B. Academic Publishers, Berkhamsted, pp. 519–530.
- Minasny, B., McBratney, A.B., Salvador-Blanes, S., 2008. Quantitative models for pedogenesis — A review. *Geoderma* 144, 140–157. doi:10.1016/j.geoderma.2007.12.013
- Monnier, G., Stengel, P., Fies, J.C., 1973. Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux - application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. *ANN AGRON* 24.
- Montagne, D., 2006. Impact de la mise en culture et du drainage sur l'évolution récente des sols : cas des luvisols dégradés de l'Yonne. Orléans.
- Montagne, D., Cornu, S., 2010. Do we need to include soil evolution module in models for prediction of future climate change? *Clim. Change* 98, 75–86. doi:10.1007/s10584-009-9666-3

- Montagne, D., Cornu, S., Le Forestier, L., Hardy, M., Josière, O., Caner, L., Cousin, I., 2008. Impact of drainage on soil-forming mechanisms in a French Albeluvisol: Input of mineralogical data in mass-balance modelling. *Geoderma* 145, 426–438. doi:10.1016/j.geoderma.2008.02.005
- Montagne, D., Cousin, I., Cornu, S., 2016. Changes in the pathway and the intensity of albic material genesis: Role of agricultural practices. *Geoderma* 268, 156–164. doi:10.1016/j.geoderma.2016.01.019
- Montagne, D., Cousin, I., Josiere, O., Cornu, S., 2013. Agricultural drainage-induced Albeluvisol evolution: A source of deterministic chaos. *Geoderma* 193, 109–116. doi:10.1016/j.geoderma.2012.10.019
- Montagne, D., Cousin, I., Le Forestier, L., Daroussi, J., Cornu, S., 2007. Quantification of soil volumes in the Eg & Bt-horizon of an Albeluvisol using image analysis. *Can. J. Soil Sci.* 87, 51–59.
- Moran, C.J., Koppi, A.J., Murphy, B.W., McBratney, A.B., 1988. Comparison of the macropore structure of a sandy loam surface soil horizon subjected to two tillage treatments. *Soil Use Manag.* 4, 96–102. doi:10.1111/j.1475-2743.1988.tb00743.x
- Müller-Lemans, H., van Dorp, F., 1996. Bioturbation as a mechanism for radionuclide transport in soil: Relevance of earthworms. *J. Environ. Radioact.* 31, 7–20. doi:10.1016/0265-931X(95)00029-A
- Munoz-Ortega, F.J., San Jose Martinez, F., Caniego Monreal, F.J., 2015. Volume, Surface, Connectivity and Size Distribution of Soil Pore Space in CT Images: Comparison of Samples at Different Depths from Nearby Natural and Tillage Areas. *Pure Appl. Geophys.* 172, 167–179. doi:10.1007/s00024-014-0897-5
- Murphy, C.P., 1983. Point counting pores and illuvial clay in thin section. *Geoderma* 31, 133–150. doi:10.1016/0016-7061(83)90004-6
- Murphy, C.P., Kemp, R.A., 1987. Micromorphology and the argillic horizon - a reappraisal., in: Fedoroff, N., Bresson, L.M., Courty, M.A. (Eds.), *Micromorphologie de Sols/Soil Micromorphology*. Proceedings of the VIIth International Working Meeting on Soil Micromorphology. pp. 257–261.
- Murphy, C.P., Kemp, R.A., 1984. The over-estimation of clay and the under-estimation of pores in soil thin sections. *J. Soil Sci.* 35, 481–495. doi:10.1111/j.1365-2389.1984.tb00305.x
- Nicole, J., Coquet, Y., Vachier, P., Michelin, J., Dever, L., 2003. Fonctionnement hydrodynamique et différenciation pédologique d'une couverture de sol limoneux hydromorphe en Bassin Parisien. *Etude Gest Sols* 10, 173–190.
- Nicoullaud, B., Darthout, R., Duval, O., 1995. Etude de l'enracinement du blé tendre d'hiver et du maïs dans les sols argilo-limoneux de Petite Beauce. *Etude Gest. Sols* 2, 183–200.
- Nordt, L.C., Wilding, L.P., Lynn, W.C., Crawford, C.C., 2004. Vertisol genesis in a humid climate of the coastal plain of Texas, USA. *Geoderma* 122, 83–102. doi:10.1016/j.geoderma.2004.01.020
- O'Donnell, T.K., Goyne, K.W., Miles, R.J., Baffaut, C., Anderson, S.H., Sudduth, K.A., 2011. Determination of representative elementary areas for soil redoximorphic features identified by digital image processing. *Geoderma* 161, 138–146. doi:10.1016/j.geoderma.2010.12.011
- Oh, N.H., Richter, D.D., 2005. Elemental translocation and loss from three highly weathered soil-bedrock profiles in the southeastern United States. *Geoderma* 126, 5–25. doi:10.1016/j.geoderma.2004.11.005
- ONF, CG78, 2003. *FORET DEPARTEMENTALE DES FLAMBERTINS*. Révision d'aménagement forestier (2003 – 2022).
- Oygarden, L., Kvaerner, J., Jenssen, P.D., 1997. Soil erosion via preferential flow to drainage systems in clay soils. *Geoderma* 76, 65–86.
- Pagliai, M., La Marca, M., Lucamante, G., Genovese, L., 1984. Effects of zero and conventional tillage on the length and irregularity of elongated pores in a clay loam

- soil under viticulture. *Soil Tillage Res.* 4, 433–444. doi:10.1016/0167-1987(84)90051-5
- Pastre, J.-F., Leroyer, C., Le Jeune, Y., Bensaadoun, S., 2015. L'évolution de l'environnement dans le centre du Bassin parisien du Néolithique ancien à la période moderne: les apports de l'étude morphosédimentaire et palynologique des fonds de vallées. *RAIF Supplément* 3 23–42.
- Paton, T.R., Humphreys, G.S., Mitchell, P.B., 1995. *Soils: a new global view*. CRC Press.
- Payton, R.W., 1993. Fragipan formation in argillic brown earths (Fragiudalfs) of the Milfield Plain, north-east England. II. Post Devensian developmental processes and the origin of fragipan consistence. *J. Soil Sci.* 44(4), 703–723.
- Pedro, G., Jamagne, M., Begon, J.C., 1978. Two routes in genesis of strongly differentiated acid soils under humid, cool-temperate conditions. *Geoderma* 20, 173–189. doi:10.1016/0016-7061(78)90008-3
- Pelosi, C., 2008. Modélisation de la dynamique d'une population de vers de terre *Lumbricus terrestris* au champ : contribution à l'étude de l'impact des systèmes de culture sur les communautés lombriciennes. Institut national agronomique Paris-Grignon.
- Peltre, C., Christensen, B.T., Dragon, S., Icard, C., Kätterer, T., Houot, S., 2012. RothC simulation of carbon accumulation in soil after repeated application of widely different organic amendments. *Soil Biol. Biochem.* 52, 49–60. doi:10.1016/j.soilbio.2012.03.023
- Peres, G., 2003. Identification et quantification in situ des interactions entre la diversité lombricienne et la macro-bioporosité dans le contexte polyculture breton. Influence sur le fonctionnement hydrique du sol (Thèse). Université Rennes 1.
- Peres, G., Bellido, A., Curmi, P., Marmonier, P., Cluzeau, D., 2010. Relationships between earthworm communities and burrow numbers under different land use systems. *Pedobiologia* 54, 37–44.
- Peres, G., Guernion, M., Mercier, V., Rougé, L., Piron, D., Cluzeau, D., 2009. PROGRAMME ADEME BIOINDICATEUR – PHASE II Développement et validation du bioindicateur lombricien Rapport Intermédiaire – Campagne 2009. Université de Rennes.
- Petersen, C.T., Hansen, S., Jensen, H.E., Holm, J., Koch, C.B., 2004. Movement of suspended matter and a bromide tracer to field drains in tilled and untilled soil. *Soil Use Manag.* 20, 271–280. doi:10.1111/j.1475-2743.2004.tb00368.x
- Phillips, J.D., 2007. Development of texture contrast soils by a combination of bioturbation and translocation. *Catena* 70, 92–104.
- Phillips, J.D., 2004. Geogenesis, pedogenesis, and multiple causality in the formation of texture-contrast soils. *CATENA* 58, 275–295. doi:10.1016/j.catena.2004.04.002
- Phillips, J.D., Perry, D., Garbee, A.R., Carey, K., Stein, D., Morde, M.B., Sheehy, J.A., 1996. Deterministic uncertainty and complex pedogenesis in some Pleistocene dune soils. *Geoderma* 73, 147–164. doi:10.1016/0016-7061(96)00038-9
- Pietsch, D., 2013. Krotovinas - soil archives of steppe landscape history. *Catena* 104, 257–264. doi:10.1016/j.catena.2012.12.003
- Piron, D., 2008. Distribution de la drilosphère lombricienne et caractérisation bio-physique des faciès de bioturbation sous gradient de désintensification du travail mécanique des sols (phdthesis). Université Rennes 1.
- Piron, D., Pérès, G., Hallaire, V., Cluzeau, D., 2012. Morphological description of soil structure patterns produced by earthworm bioturbation at the profile scale. *Eur. J. Soil Biol.* 50, 83–90. doi:10.1016/j.ejsobi.2011.12.006
- Protz, R., Sweeney, S., Fox, C., 1992. AN APPLICATION OF SPECTRAL IMAGE-ANALYSIS TO SOIL MICROMORPHOLOGY .1. METHODS OF ANALYSIS. *Geoderma* 53, 275–287. doi:10.1016/0016-7061(92)90059-G
- Protz, R., VandenBygaert, A.J., 1998. Towards systematic image analysis in the study of soil micromorphology. *Sci. Soils* 3, 34–44. doi:10.1007/s10112-998-0004-0
- Puentes, R., Wilding, L., Drees, L., 1992. Microspatial Variability and Sampling Concepts in Soil Porosity Studies of Vertisols. *Geoderma* 53, 373–385. doi:10.1016/0016-7061(92)90065-F

- Pulleman, M., Six, J., Uyl, A., Marinissen, J.C.Y., Jongmans, A.G., 2005. Earthworms and management affect organic matter incorporation and microaggregate formation in agricultural soils. *Appl. Soil Ecol.* 29, 1–15. doi:10.1016/j.apsoil.2004.10.003
- Quénard, L., Samouëlian, A., Laroche, B., Cornu, S., 2011. Lessivage as a major process of soil formation: A revisitation of existing data. *Geoderma* 167–168, 135–147. doi:10.1016/j.geoderma.2011.07.031
- R Core Team, 2013. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Rasa, K., Eickhorst, T., Tippkoetter, R., Yli-Halla, M., 2012. Structure and pore system in differently managed clayey surface soil as described by micromorphology and image analysis. *Geoderma* 173, 10–18. doi:10.1016/j.geoderma.2011.12.017
- Ricci, F., Bentze, L., Montagne, D., Houot, S., Bertrand, M., Pelosi, C., 2015. Positive effects of alternative cropping systems on terrestrial Oligochaeta (Clitellata, Annelida). *Soil Org.* 87 (2), 71–83.
- Richter, D.D., Jr., Markewitz, D., 2001. Understanding Soil Change: Soil Sustainability over Millennia, Centuries, and Decades.
- Richter, D. deB., 2007. Humanity's transformation of Earth's soil: Pedology's new frontier. *Soil Sci.* 172, 957–967. doi:10.1097/ss.0b013e3181586bb7
- Ringrose-Voase, A.J., 1996. Measurement of soil macropore geometry by image analysis of sections through impregnated soil. *Plant Soil* 183, 27–47.
- Ringrose-Voase, A.J., Bullock, P., 1984. The automatic recognition and measurement of soil pore types by image analysis and computer programs. *J. Soil Sci.* 35, 673–684. doi:10.1111/j.1365-2389.1984.tb00624.x
- Rockefeller, S.L., McDaniel, P.A., Falen, A.L., 2004. Perched Water Table Responses to Forest Clearing in Northern Idaho. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68, 168. doi:10.2136/sssaj2004.1680
- Rounsevell, M.D.A., Evans, S.P., Bullock, P., 1999. Climate change and agricultural soils: Impacts and adaptation. *Clim. Change* 43, 683–709. doi:10.1023/A:1005597216804
- Russ, J.C., 2011. *The Image Processing Handbook*, Sixth Edition. ed. CRC Press, Boca Raton FL.
- Sammartino, S., Lissy, A.-S., Bogner, C., Van Den Bogaert, R., Capowiez, Y., Ruy, S., Cornu, S., 2015. Identifying the Functional Macropore Network Related to Preferential Flow in Structured Soils. *Vadose Zone J.* 14, 0. doi:10.2136/vzj2015.05.0070
- Samouëlian, A., Cornu, S., 2008. Modelling the formation and evolution of soils, towards an initial synthesis. *Geoderma, Modelling Pedogenesis* 145, 401–409. doi:10.1016/j.geoderma.2008.01.016
- Sauzet, O., 2012. Quantification de la dynamique sous contrainte anthropique du lessivage et de la bioturbation à l'échelle pluri-décennale. Apport de la micromorphologie. (Rapport de stage INRA). Grignon.
- Sauzet, O., Cammas, C., Barbillon, P., Étienne, M.-P., Montagne, D., 2016. Illuviation intensity and land use change: Quantification via micromorphological analysis. *Geoderma* 266, 46–57. doi:10.1016/j.geoderma.2015.11.035
- Schindelin, J., Arganda-Carreras, I., Frise, E., Kaynig, V., Longair, M., Pietzsch, T., Preibisch, S., Rueden, C., Saalfeld, S., Schmid, B., Tinevez, J.-Y., White, D.J., Hartenstein, V., Eliceiri, K., Tomancak, P., Cardona, A., 2012. Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. *Nat. Methods* 9, 676–682. doi:10.1038/nmeth.2019
- Schuylenborgh, J.V., Slager, S., Jongmans, A.G., 1970. On soil genesis in temperate humid climate. VIII. The formation of a "udalfic" eutrochrepí. *Neth. J. Agric. Sci.* 18, 207–214.
- Simpson, I.A., 1997. Relict Properties of Anthropogenic Deep Top Soils as Indicators of Infield Management in Marwick, West Mainland, Orkney. *J. Archaeol. Sci.* 24, 365–380. doi:10.1006/jasc.1996.0121
- Simpson, I.A., Vésteinsson, O., Adderley, W.P., McGovern, T.H., 2003. Fuel resource utilisation in landscapes of settlement. *J. Archaeol. Sci.* 30, 1401–1420. doi:10.1016/S0305-4403(03)00035-9

- Skvortsova, E.B., Rozhkov, V.A., Shchepot'ev, V.N., Dmitrenko, V.N., Tyugai, Z.N., Khokhlov, S.F., 2015. Variation in the micromorphological indices of pore space in loamy soils of the southern taiga and forest-steppe of European Russia. *Eurasian Soil Sci.* 48, 934–945. doi:10.1134/S1064229315090094
- Slager, S., van de Wetering, H.T.J., 1977. Soil formation in archaeological pits and adjacent loess soils in Southern Germany. *J. Archaeol. Sci.* 4, 259–267. doi:10.1016/0305-4403(77)90093-0
- Smith, P., House, J.I., Bustamante, M., Sobočká, J., Harper, R., Pan, G., West, P.C., Clark, J.M., Adhya, T., Rumpel, C., Paustian, K., Kuikman, P., Cotrufo, M.F., Elliott, J.A., McDowell, R., Griffiths, R.I., Asakawa, S., Bondeau, A., Jain, A.K., Meersmans, J., Pugh, T.A.M., 2016. Global change pressures on soils from land use and management. *Glob. Change Biol.* 22, 1008–1028. doi:10.1111/gcb.13068
- Stockmann, U., Minasny, B., McBratney, A.B., 2011. Quantifying Processes of Pedogenesis, in: Sparks, D.L. (Ed.), *Advances in Agronomy*, Vol 113. Elsevier Academic Press Inc, San Diego, pp. 1–71.
- Stoops, G., Vepraskas, M.J., 2003. Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections. Soil Science Society of America.
- Sveistrup, T.E., Haraldsen, T.K., Engelstad, F., 1997. Earthworm channels in cultivated clayey and loamy Norwegian soils. *Soil Tillage Res.* 43, 251–262.
- Taina, I.A., Heck, R.J., 2010. Utilization of Object-Oriented Software in the Image Analysis of Soil Thin Sections. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74, 1670–1681. doi:10.2136/sssaj2008.0359
- Targulian, V.O., 2005. Elementary pedogenic processes. *Eurasian Soil Sci.* 38, 1255–1264.
- Targulian, V.O., Krasilnikov, P.V., 2007. Soil system and pedogenic processes: Self-organization, time scales, and environmental significance. *CATENA* 71, 373–381. doi:10.1016/j.catena.2007.03.007
- Terribile, F., Fitzpatrick, E., 1995. The Application of Some Image-Analysis Techniques to Recognition of Soil Micromorphological Features. *Eur. J. Soil Sci.* 46, 29–45. doi:10.1111/j.1365-2389.1995.tb01810.x
- Terribile, F., Fitzpatrick, E., 1992. The Application of Multilayer Digital Image-Processing Techniques to the Description of Soil Thin-Sections. *Geoderma* 55, 159–174. doi:10.1016/0016-7061(92)90011-U
- Thompson, M., Singh, P., Corak, S., Straszheim, W., 1992. Cautionary Notes for the Automated-Analysis of Soil Pore-Space Images. *Geoderma* 53, 399–415. doi:10.1016/0016-7061(92)90067-H
- Thompson, M.L., Fedoroff, N., Fournier, B., 1990. Morphological features related to agriculture and faunal activity in three loess-derived soils in France. *Geoderma* 46, 329–349. doi:10.1016/0016-7061(90)90023-3
- Tonneijck, F.H., Jongmans, A.G., 2008. The influence of bioturbation on the vertical distribution of soil organic matter in volcanic ash soils: a case study in northern Ecuador. *Eur. J. Soil Sci.* 59, 1063–1075. doi:10.1111/j.1365-2389.2008.01061.x
- Tugel, A.J., Herrick, J.E., Brown, J.R., Mausbach, M.J., Puckett, W., Hipple, K., 2005. Soil Change, Soil Survey, and Natural Resources Decision Making. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69, 738. doi:10.2136/sssaj2004.0163
- Ufnar, D.F., 2007. Clay coatings from a modern soil chronosequence: A tool for estimating the relative age of well-drained paleosols. *Geoderma* 141, 181–200. doi:10.1016/j.geoderma.2007.05.017
- Ulery, A., Drees, L.R., 2008. *Methods of Soil Analysis: Mineralogical Methods*. ASACSSA-SSSA.
- Usai, M.R., 2001. Textural Pedofeatures and Pre-Hadrian's Wall Ploughed Paleosols at Stanwix, Carlisle, Cumbria, U.K. *J. Archaeol. Sci.* 28, 541–553. doi:10.1006/jasc.2001.0609
- Van Breemen, N., Buurman, P., 2002. *Soil Formation*, 2nd ed. ed. Springer Netherlands, Dordrecht.
- Van Den Bogaert, R., 2015. Analyse des mécanismes du lessivage des argiles dans les sols par des approches expérimentales (Thèse). Aix-Marseille.

- Van den Bogaert, R., Cornu, S., Michel, E., 2016. To which extent do rain interruption periods affect colloid retention in macroporous soils? *Geoderma* 275, 40–47. doi:10.1016/j.geoderma.2016.04.010
- Van Den Bogaert, R., Labille, J., Cornu, S., 2015. Aggregation and Dispersion Behavior in the 0- to 2- μm Fraction of Luvisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 79, 43. doi:10.2136/sssaj2013.12.0538
- Van der Plas, L., Tobi, A.C., 1965. A chart for judging the reliability of point counting results. *Am. J. Sci.* 263, 87–90. doi:10.2475/ajs.263.1.87
- van Oort, F., Proix, N., Paradelo, R., Delarue, G., Breuil, S., Baize, D., Richard, A., 2016. Dernières nouvelles de 42 vieilles parcelles Indicateurs d'évolutions pédologiques infra-centenaires en Néoluvisol de loess nu, sous contrainte d'applications continues de matières fertilisantes. *Étude Gest. Sols* 23, 143–162.
- Van Vliet-Lanoë, B., 2010. Frost action, in: *Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths*. pp. 81–108.
- Van Vliet-Lanoë, B., 1990. The genesis and age of the argillic horizon in Weichselian loess of northwestern Europe. *Quat. Int.* 5, 49–56. doi:10.1016/1040-6182(90)90024-X
- VandenBygaart, A.J., Fox, C.A., Fallow, D.J., Protz, R., 2000. Estimating earthworm-influenced soil structure by morphometric image analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 982–988.
- VandenBygaart, A.J., Protz, R., 1999. The representative elementary area (REA) in studies of quantitative soil micromorphology. *Geoderma* 89, 333–346.
- VandenBygaart, A.J., Protz, R., Tomlin, A.D., 1999. Changes in pore structure in a no-till chronosequence of silt loam soils, southern Ontario. *Can. J. Soil Sci.* 79, 149–160.
- Vedere, C., 2016. Impact of 16 years repeated organic matter on earthworm burrowing activity: quantification by X-Ray computed tomography imaging and digital processing (Rapport de stage INRA). Grignon.
- Vereecken, H., Schnepf, A., Hopmans, J.W., Javaux, M., Or, D., Roose, T., Vanderborght, J., Young, M.H., Amelung, W., Aitkenhead, M., Allison, S.D., Assouline, S., Baveye, P., Berli, M., Brüggemann, N., Finke, P., Flury, M., Gaiser, T., Govers, G., Ghezzehei, T., Hallett, P., Hendricks Franssen, H.J., Heppell, J., Horn, R., Huisman, J.A., Jacques, D., Jonard, F., Kollet, S., Lafolie, F., Lamorski, K., Leitner, D., McBratney, A., Minasny, B., Montzka, C., Nowak, W., Pachepsky, Y., Padarian, J., Romano, N., Roth, K., Rothfuss, Y., Rowe, E.C., Schwen, A., Šimůnek, J., Tiktak, A., Van Dam, J., van der Zee, S.E.A.T.M., Vogel, H.J., Vrugt, J.A., Wöhling, T., Young, I.M., 2016. Modeling Soil Processes: Review, Key Challenges, and New Perspectives. *Vadose Zone J.* 15, 0. doi:10.2136/vzj2015.09.0131
- Walkington, H., 2010. Soil science applications in archaeological contexts: A review of key challenges. *Earth-Sci. Rev.* 103, 122–134. doi:10.1016/j.earscirev.2010.09.002
- Weibel, E.R., Kistler, G.S., Scherle, W.F., 1966. Practical Stereological Methods for Morphometric Cytology. *J. Cell Biol.* 30, 23–38. doi:10.1083/jcb.30.1.23
- Wilkinson, M.T., Humphreys, G.S., 2005. Exploring pedogenesis via nuclide-based soil production rates and OSL-based bioturbation rates. *Aust. J. Soil Res.* 43, 767–779. doi:10.1071/SR04158
- Wilkinson, M.T., Richards, P.J., Humphreys, G.S., 2009. Breaking ground: Pedological, geological, and ecological implications of soil bioturbation. *Earth-Sci. Rev.* 97, 257–272. doi:10.1016/j.earscirev.2009.09.005
- WRB, I.W.G., 2014. World Reference Base for soil resources 2014: international soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. *World Soil Resour. Rep.* 106 FAO ISRIC IUSS Rome 191 pp.
- Yaalon, D.H., Yaron, B., 1966. Framework for man-made soil changes-an outline of metapedogenesis. *Soil Sci.* 171, S154.
- Zack, G.W., Rogers, W.E., Latt, S.A., 1977. Automatic measurement of sister chromatid exchange frequency. *J. Histochem. Cytochem.* 25, 741–753. doi:10.1177/25.7.70454

- Zhang, D., Zhang, R., Chen, S., Soll, W.E., 2000. Pore scale study of flow in porous media: Scale dependency, REV, and statistical REV. *Geophys. Res. Lett.* 27, 1195–1198. doi:10.1029/1999GL011101
- Zhang, X., Liu, B., Wang, J., Zhang, Z., Shi, K., Wu, S., 2014. Adobe photoshop quantification (PSQ) rather than point-counting: A rapid and precise method for quantifying rock textural data and porosities. *Comput. Geosci.* 69, 62–71. doi:10.1016/j.cageo.2014.04.003

ANNEXES

ANNEXE I : Interventions culturales sur les parcelles de QualiAgro

Date	Intervention	Matériel	Produit	Dose
31/10/2008	Labour Semis du blé	Charrue 7 socs (profondeur 25cm-26cm) Combiné 4m Covercrop + planche niveleuse Semoir à disques + herse de semis	Caphorn	130 kg/ha (45g/1000grains)
07/03/2009	Herbicide	Pulvérisateur 24m	Celio huile	0.5L/ha 1.0 L/ha
26/03/2009	Apport d'azote	Pulvérisateur 24m	Solution 39	110 et 55 kg/ha
31/03/2009	Herbicide	Pulvérisateur 24m	Matin EL (Isoproturon 0.5kg/L) Fox pro D+	2,0L/ha 0.7 L/ha
10/04/2009	Apport d'azote	Pulvérisateur 24m	Solution 39	63.5 et 31 kg/Ha
05/05/2009	Raccourcisseur de pailles	Pulvérisateur 24m	Moddus	0.5L/ha
05/05/2009	Fongicide	Pulvérisateur 24m	Bell	1.0 L/ha
20-21/07/2009	Récolte manuelle des grains			
30/07/2009	Récolte mécanique des grains	Moissonneuse-batteuse		
01/08/2009	Ramassage paille	Ferme AgroParistech		
14-15 et16/09/2009	Epannage des MO sur chaumes de blé	Epanneur de Mr Bignon « Rolland » avec hérissons horizontaux et table de répartition à 2 disques	3 types de composts + fumier de bovins	
17/09/2009	Enfouissement des MO et déchaumage	Déchaumeur « Smarag » 4m (1 passage)		

Résumé de l'itinéraire technique pratiqué sur le blé en 2009 - Issu du rapport « Etude de la valeur agronomique et des impacts environnementaux de composts d'origine urbaine. Synthèse des principaux résultats 2009 de l'essai Qualiagro » (Mercier et al., 2010)

Date	Intervention	Matériel	Produit	Dose
14-15 et 16/09/2009	Epandage des MO sur chaumes de blé	Epandeur de Mr Bignon « Rolland » avec hérissons horizontaux et table de répartition à 2 disques	3 types de composts + fumier de bovins	
17/09/2009	Enfouissement des MO et déchaumage	Déchaumeur « Smarag » 4m (1 passage)		
22/10/2009	Labour	Charrue 7 socs (profondeur 26-27cm)		
24/11/2009	Reliquats azotés	Tarière gouge hydraulique (Geonor) 0-30cm ; 30-60cm ; 60-90cm		
03/02/2010				
29/03/2010				
16/04/2010	Apport d'azote	Pulvérisateur 24m	Solution 39 (en pourcentage massique : 7.2% de N(NO3), 7.2% de N(NH4) et 15% de CO(NH2)2)	136 kg N /Ha sur Té+N(sauf 102) 50 Kg N/Ha sur OMR+N
20/04/2010	Reprise de labour	Vibroculteur 6m et crosskill		
27/04/2010				
27/04/2010	Semis du maïs	Combiné herse alternative- semoir 6 rangs, écartement 0.8m	Troubadour	95 000 grains /ha
30/04/2010	Herbicide	Pulvérisateur 24m	-Harness (acétochlore) -Lagon (isoxaflutole + acclonifen)	3.0 l/ha 0.75 l/ha
17/06/2010	Herbicide	Pulvérisateur 24m	Basamais (bentazone)	2.5 l/ha
12-13 et 14/10/2010	Prélèvement manuel du maïs (épis et tiges)			
19/10/2010	Récolte mécanique du maïs en grains + broyage	Moissonneuse-batteuse, 6 rangs avec broyeur sous cueilleurs		
21/10/2010	Reliquats azotés	Tarière gouge hydraulique (Geonor) 0-30cm ; 30-60cm ; 60-90cm		

Résumé de l'itinéraire technique pratiqué sur le maïs en 2010 - Issu du rapport « Etude de la valeur agronomique et des impacts environnementaux de composts d'origine urbaine. Synthèse des principaux résultats 2010 de l'essai Qualiagro » (Mercier et al., 2011)

ANNEXE II : Données de recomptage

Supplementary data file

Table A : Mean frequencies and standard deviation of porosity and illuvial clay in % of the total number of point counts for repetitive counts of a set of selected thin sections from both sites (CULT and FOR) and from different depths in order to assess the operator consistency. The point count procedure is presented in section *Materials and Methods*. Point counts were realised by the same micromorphologist between May 2012 and December 2013

Sample	Point Count n°	Porosity (%)	Illuvial clay (%)
FOR 30-40	1	10,5	1,0
	2	16,2	0,2
	3	14,5	0,0
	Mean	13,7	0,4
	Standard deviation	2,9	0,5
FOR 90-100	1	7,1	9,1
	2	6,0	7,7
	3	6,3	10,5
	Mean	6,5	9,1
	Standard deviation	0,6	1,4
CULT 50-60	1	14,9	2,9
	2	11,9	1,4
	3	15,3	3,7
	Mean	14,0	2,6
	Standard deviation	1,9	1,2

ANNEXE III : Tableaux récapitulatifs des données brutes et résultats des tests statistiques par profil de sol (abondance surfacique, densité, taille, forme des pores et traits illuviaux)

Notes : Le test de Kruskal-Wallis est utilisé comme une alternative à l'ANOVA 1 facteur dans le cas où l'hypothèse de normalité n'est pas acceptable.

Abondance surfacique (%) - CULT

Horizon	Lames	Macroporosité						Argile illuviale		
		Racines	Assemblage	Fentes	Endogés	Anéciques	Total	Papules	Revêtements	Total
E	CULT_30_40_R1	2.00%	1.88%	1.28%	1.35%	2.11%	8.63%	0.11%	0.04%	0.15%
	CULT_30_40_R2	2.19%	1.99%	1.34%	1.52%	0.37%	7.41%	0.13%	0.04%	0.18%
	CULT_30_40_R3	2.30%	1.60%	1.06%	1.08%	0.44%	6.48%	0.06%	0.03%	0.09%
	CULT_40_50_R1	2.70%	1.80%	1.33%	0.52%	1.96%	8.32%	0.96%	0.47%	1.43%
	CULT_40_50_R2	2.43%	1.46%	0.91%	0.42%	1.32%	6.55%	0.98%	0.61%	1.59%
	CULT_40_50_R3	3.14%	1.97%	1.50%	0.67%	0.45%	7.73%	0.61%	0.41%	1.02%
	Moyenne E (n=6)	2.46%a	1.78%a	1.24%a	0.93%ab	1.11%a	7.52%ab	0.48%	0.27%	0.74%
	Médiane E (n=6)	2.37%	1.84%	1.31%	0.88%	0.89%	7.57%	0.37%b	0.23%b	0.60%b
	Ecart type E (n=6)	0.41%	0.21%	0.21%	0.46%	0.80%	0.89%	0.43%	0.26%	0.69%
BT	CULT_50_60_R1	2.54%	1.91%	1.47%	1.56%	6.18%	13.67%	0.74%	0.45%	1.19%
	CULT_50_60_R2	1.93%	1.27%	1.23%	1.42%	1.38%	7.23%	2.86%	2.11%	4.97%
	CULT_50_60_R3	2.14%	1.69%	1.65%	1.04%	2.05%	8.57%	1.00%	0.57%	1.57%
	CULT_60_70_R1	1.46%	1.24%	1.35%	0.84%	2.56%	7.45%	2.73%	3.03%	5.75%
	CULT_60_70_R2	1.94%	1.46%	1.75%	2.36%	1.16%	8.66%	2.48%	2.88%	5.36%
	CULT_60_70_R3	1.65%	1.30%	1.26%	1.93%	3.03%	9.17%	2.14%	2.36%	4.50%
	CULT_70_80_R2	1.71%	1.33%	1.95%	2.15%	5.25%	12.39%	2.91%	5.90%	8.81%
	CULT_90_100_R1	1.24%	1.18%	1.56%	0.78%	8.07%	12.83%	1.26%	8.40%	9.66%
	CULT_90_100_R2	1.31%	0.93%	1.05%	1.04%	1.40%	5.73%	1.32%	7.50%	8.82%
	CULT_90_100_R3	1.37%	1.24%	1.44%	2.18%	5.53%	11.75%	1.37%	6.50%	7.87%
	Moyenne BT (n=10)	1.73%b	1.35%b	1.47%a	1.53%a	3.66%a	9.74%a	1.88%	3.97%	5.85%
	Médiane BT (n=10)	1.68%	1.28%	1.45%	1.49%	2.79%	8.92%	1.75%a	2.95%a	5.56%a
	Ecart type BT (n=10)	0.41%	0.28%	0.27%	0.60%	2.42%	2.72%	0.83%	2.87%	2.96%

C	CULT_120_130_R1	1.44%	1.15%	1.49%	0.64%	0.33%	5.04%	1.15%	4.69%	5.84%
	CULT_120_130_R2	1.61%	1.03%	1.22%	0.52%	0.00%	4.38%	0.79%	3.77%	4.56%
	CULT_120_130_R3	1.46%	1.04%	1.42%	1.00%	5.22%	10.13%	0.92%	3.08%	4.01%
	CULT_150_160_R1	2.04%	1.37%	1.11%	0.33%	0.00%	4.85%	0.89%	1.64%	2.53%
	CULT_150_160_R2	2.50%	1.38%	1.13%	0.21%	2.11%	7.33%	0.80%	1.87%	2.67%
	CULT_150_160_R3	2.54%	1.69%	1.28%	0.25%	0.62%	6.38%	0.48%	1.08%	1.56%
	<i>Moyenne C (n=6)</i>	1.93%<i>ab</i>	1.28%<i>b</i>	1.27%<i>a</i>	0.49%<i>b</i>	1.38%<i>a</i>	6.35%<i>b</i>	<i>0.84%</i>	<i>2.69%</i>	<i>3.53%</i>
	<i>Médiane C (n=6)</i>	<i>1.83%</i>	<i>1.26%</i>	<i>1.25%</i>	<i>0.43%</i>	<i>0.47%</i>	<i>5.71%</i>	0.84%<i>b</i>	2.48%<i>a</i>	3.34%<i>a</i>
	<i>Ecart type C (n=6)</i>	<i>0.50%</i>	<i>0.25%</i>	<i>0.15%</i>	<i>0.30%</i>	<i>2.04%</i>	<i>2.15%</i>	<i>0.22%</i>	<i>1.39%</i>	<i>1.56%</i>

Nombre par cm² - CULT

Nombre par cm2	Lames	Macroporosit�						Argile illuviale		
		Racines	Assemblage	Fentes	Endog�s	An�ciques	Total	Papules	Rev�tements	Total
E	CULT_30_40_R1	56.26	22.57	6.13	0.39	0.02	85.36	12.51	1.39	13.91
	CULT_30_40_R2	62.39	22.80	6.79	0.35	0.02	92.36	14.45	1.79	16.25
	CULT_30_40_R3	61.71	21.72	5.02	0.32	0.02	88.79	6.51	1.16	7.67
	CULT_40_50_R1	68.61	22.51	5.52	0.26	0.05	96.95	97.17	17.92	115.09
	CULT_40_50_R2	58.70	20.59	4.88	0.27	0.02	84.46	98.35	21.44	119.79
	CULT_40_50_R3	75.78	24.39	6.93	0.20	0.02	107.31	58.88	11.18	70.06
	Moyenne E (n=6)	63.91a	22.43a	5.88	0.30a	0.02	92.54a	47.98	9.15	57.13
	Médiane E (n=6)	62.05	22.54	5.82b	0.30	0.02b	90.58	36.67b	6.49b	43.15b
	Ecart type E (n=6)	7.15	1.26	0.88	0.07	0.02	8.59	42.84	9.06	51.84
BT	CULT_50_60_R1	66.74	23.82	7.95	0.31	0.02	98.84	73.50	15.80	89.30
	CULT_50_60_R2	49.38	19.56	6.44	0.24	0.04	75.66	270.28	46.02	316.29
	CULT_50_60_R3	49.91	20.13	7.54	0.24	0.06	77.87	102.58	18.40	120.98
	CULT_60_70_R1	37.92	14.50	5.74	0.16	0.05	58.37	256.44	68.35	324.78
	CULT_60_70_R2	53.81	21.04	8.86	0.33	0.04	84.07	229.11	64.04	293.15
	CULT_60_70_R3	46.70	20.22	7.09	0.37	0.05	74.43	202.67	58.78	261.44
	CULT_70_80_R2	48.88	19.71	10.34	0.29	0.05	79.27	270.99	119.16	390.15
	CULT_90_100_R1	38.58	17.31	8.67	0.14	0.03	64.72	112.68	78.90	191.57
	CULT_90_100_R2	39.36	16.73	6.74	0.13	0.04	62.99	119.07	77.83	196.89
	CULT_90_100_R3	40.83	17.92	8.01	0.26	0.14	67.16	128.96	80.94	209.90
	Moyenne BT (n=10)	47.21b	19.09b	7.74	0.25a	0.05	74.34b	176.63	62.82	239.45
	M�diane BT (n=10)	47.79	19.63	7.74a	0.25	0.05a	75.04	165.81a	66.19a	235.67a
	Ecart type BT (n=10)	8.84	2.59	1.34	0.08	0.03	11.84	76.94	30.73	94.76

C	CULT_120_130_R1	43.51	17.35	6.53	0.11	0.02	67.51	107.06	68.78	175.83
	CULT_120_130_R2	47.63	17.27	5.99	0.12	0.00	71.01	76.06	65.81	141.87
	CULT_120_130_R3	43.31	17.31	6.62	0.17	0.08	67.50	91.62	56.64	148.26
	CULT_150_160_R1	57.11	19.80	5.99	0.09	0.00	82.99	90.98	56.18	147.16
	CULT_150_160_R2	65.51	20.91	6.58	0.06	0.03	93.10	77.12	55.27	132.39
	CULT_150_160_R3	65.99	23.32	6.52	0.10	0.03	95.95	48.56	37.99	86.55
	<i>Moyenne C (n=6)</i>	53.85ab	19.33ab	6.37	0.11b	<i>0.03</i>	79.68ab	<i>81.90</i>	<i>56.78</i>	<i>138.68</i>
	<i>Médiane C (n=6)</i>	<i>52.37</i>	<i>18.57</i>	6.52b	<i>0.10</i>	0.02b	<i>77.00</i>	84.05b	56.41a	144.51a
	<i>Ecart type C (n=6)</i>	<i>10.49</i>	<i>2.49</i>	<i>0.30</i>	<i>0.04</i>	<i>0.03</i>	<i>12.87</i>	<i>19.89</i>	<i>10.78</i>	<i>29.37</i>

Taille en diamètre équivalent (µm) - CULT

Horizon	Lames	Macroporosité						Argile illuviale		
		Racines	Assemblage	Fentes	Endogés	Anéciques	Total	Papules	Revêtements	Total
E	CULT_30_40									
	Min.	100.0	100.0	103.2	1 007.0	5 284.0	100.0	78.2	79.3	78.2
	1er Qu.	116.1	138.1	215.7	1 198.0	5 650.0	121.6	85.5	97.7	85.9
	Médiane	143.6	191.5	332.7	1 723.0	6 015.0	160.4	95.6	137.9	97.3
	Moyenne	184.8	256.7	422.8	1 967.0	7 804.0	227.3	104.9	162.7	111.6
	3eme Qu.	210.8	303.2	547.2	2 300.0	9 065.0	252.7	114.9	218.5	121.6
	Max.	992.7	1 971.0	1 968.0	4 732.0	12 110.0	12 110.0	199.6	447.7	447.7
	CULT_40_50									
	Min.	100.0	100.0	100.0	1 001.0	5 646.0	100.0	78.2	78.0	78.0
	1er Qu.	119.8	139.4	214.2	1 074.0	5 682.0	125.1	87.3	97.6	88.2
	Médiane	153.8	198.1	337.3	1 197.0	6 912.0	168.5	99.8	144.2	102.7
	Moyenne	196.5	257.6	431.4	1 541.0	7 034.0	230.4	109.3	172.6	119.8
	3eme Qu.	229.9	310.6	565.8	1 860.0	7 544.0	262.6	123.9	227.6	132.5
	Max.	977.8	1 917.0	1 884.0	4 542.0	9 388.0	9 388.0	199.9	891.0	891.0
	<i>Horizon E Min.</i>	<i>100.0</i>	<i>100.0</i>	<i>100.0</i>	<i>1001.0</i>	<i>5284.0</i>	<i>100.0</i>	<i>78.2</i>	<i>78.0</i>	<i>78.0</i>
	<i>Horizon E 1er Qu.</i>	<i>117.7</i>	<i>138.7</i>	<i>215.2</i>	<i>1130.0</i>	<i>5673.0</i>	<i>123.2</i>	<i>87.1</i>	<i>97.6</i>	<i>87.7</i>
	<i>Horizon E Médiane</i>	148.7b	194.9a	334.7a	1490.0c	6464.0a	164.4c	99.1c	143.5c	102.0c
	<i>Horizon E Moyenne</i>	<i>190.7</i>	<i>257.1</i>	<i>426.9</i>	<i>1804.0</i>	<i>7323.0</i>	<i>228.8</i>	<i>108.8</i>	<i>171.7</i>	<i>118.8</i>
	<i>Horizon E 3eme Qu.</i>	<i>220.3</i>	<i>307.4</i>	<i>557.4</i>	<i>2145.0</i>	<i>8005.0</i>	<i>258.2</i>	<i>122.9</i>	<i>226.9</i>	<i>131.1</i>
	<i>Horizon E Max.</i>	<i>992.7</i>	<i>1971.0</i>	<i>1968.0</i>	<i>4732.0</i>	<i>12110.0</i>	<i>12110.0</i>	<i>199.9</i>	<i>891.0</i>	<i>891.0</i>
BT	CULT_50_60									
	Min.	100.0	100.0	109.0	1 005.0	5 276.0	100.0	78.2	78.2	78.2

	1er Qu.	120.8	138.7	210.6	1 488.0	5 839.0	127.4	87.7	109.8	88.8
	Médiane	155.2	192.6	313.7	2 405.0	7 015.0	172.1	101.1	204.8	104.8
	Moyenne	195.3	253.3	407.1	2 347.0	8 947.0	239.0	110.7	199.0	124.2
	3eme Qu.	225.7	297.1	497.6	2 774.0	7 876.0	265.6	126.5	249.4	138.1
	Max.	991.7	1 843.0	1 932.0	4 679.0	20 770.0	20 770.0	199.9	730.5	730.5
	CULT_60_70									
	Min.	100.0	100.1	101.4	1 012.0	5 288.0	100.0	78.2	78.2	78.2
	1er Qu.	117.1	131.0	205.4	2 082.0	5 499.0	123.1	88.2	121.0	90.4
	Médiane	147.8	174.8	304.3	2 352.0	6 808.0	163.1	103.0	209.0	109.6
	Moyenne	186.3	237.6	401.9	2 584.0	7 397.0	235.4	112.6	210.0	133.8
	3eme Qu.	210.4	265.8	479.7	3 066.0	8 946.0	251.7	130.0	260.6	151.0
	Max.	997.0	1 776.0	1 988.0	4 970.0	11 030.0	11 030.0	199.9	1 471.0	1 471.0
	CULT_70_80									
	Min.	100.0	100.0	106.6	1 376.0	8 994.0	100.0	78.2	78.2	78.2
	1er Qu.	117.5	130.5	208.3	2 250.0	10 030.0	124.4	88.4	118.1	91.6
	Médiane	148.2	178.7	308.4	2 859.0	11 070.0	168.3	102.8	203.7	114.0
	Moyenne	183.7	237.9	397.4	2 891.0	10 940.0	242.5	112.9	217.3	144.8
	3eme Qu.	209.9	283.2	473.0	3 469.0	11 910.0	256.6	130.4	268.4	162.8
	Max.	954.9	1 796.0	1 929.0	4 942.0	12 750.0	12 750.0	199.9	1 201.0	1 201.0
	CULT_90_100									
	Min.	100.0	100.0	100.2	1 031.0	5 287.0	100.0	78.2	77.7	77.7
	1er Qu.	119.4	133.6	197.1	1 650.0	6 327.0	126.1	88.8	138.1	94.1
	Médiane	150.9	183.3	293.2	2 751.0	7 065.0	168.9	103.7	230.5	124.5
	Moyenne	181.6	235.6	377.5	2 826.0	8 799.0	235.6	114.0	282.4	181.0
	3eme Qu.	209.4	274.6	462.2	3 596.0	8 367.0	251.4	132.8	347.4	199.4

	Max.	961.8	1 904.0	1 996.0	4 967.0	24 020.0	24 020.0	199.9	2 161.0	2 161.0
	<i>Horizon BT Min.</i>	<i>100.0</i>	<i>100.0</i>	<i>100.2</i>	<i>1005.0</i>	<i>5276.0</i>	<i>100.0</i>	<i>78.2</i>	<i>77.7</i>	<i>77.7</i>
	<i>Horizon BT 1er Qu.</i>	<i>118.9</i>	<i>133.7</i>	<i>204.2</i>	<i>2052.0</i>	<i>6127.0</i>	<i>125.2</i>	<i>88.2</i>	<i>124.7</i>	<i>91.0</i>
	<i>Horizon BT Médiane</i>	151.1b	182.6c	302.0b	2448.0a	7115.0a	168.2b	102.7a	213.7a	112.2b
	<i>Horizon BT Moyenne</i>	<i>187.7</i>	<i>241.9</i>	<i>394.6</i>	<i>2606.0</i>	<i>8664.0</i>	<i>237.3</i>	<i>112.5</i>	<i>239.7</i>	<i>146.7</i>
	<i>Horizon BT 3eme Qu.</i>	<i>215.0</i>	<i>278.3</i>	<i>478.8</i>	<i>3203.0</i>	<i>9625.0</i>	<i>256.2</i>	<i>129.9</i>	<i>286.9</i>	<i>160.0</i>
	<i>Horizon BT Max.</i>	<i>997.0</i>	<i>1904.0</i>	<i>1996.0</i>	<i>4970.0</i>	<i>24020.0</i>	<i>24020.0</i>	<i>199.9</i>	<i>2161.0</i>	<i>2161.0</i>
C	CULT_120_130									
	Min.	100.0	100.0	100.7	1 012.0	5 165.0	100.0	78.2	78.2	78.2
	1er Qu.	122.0	135.2	225.1	1 693.0	5 839.0	127.5	87.5	113.6	91.8
	Médiane	157.4	185.2	342.9	2 251.0	8 059.0	172.5	101.4	192.3	116.5
	Moyenne	185.2	233.7	429.4	2 426.0	8 225.0	228.7	111.4	228.8	159.1
	3eme Qu.	216.6	275.6	520.2	3 315.0	9 852.0	250.4	127.8	281.5	175.4
	Max.	987.3	1 887.0	1 976.0	4 801.0	12 520.0	12 520.0	199.9	2 253.0	2 253.0
	CULT_150_160									
	Min.	100.0	100.0	114.4	1 024.0	5 617.0	100.0	78.2	78.0	78.0
	1er Qu.	124.4	141.7	227.5	1 118.0	7 229.0	130.3	86.9	98.9	89.6
	Médiane	163.3	198.1	329.0	2 071.0	8 842.0	176.1	99.3	136.4	108.5
	Moyenne	194.2	246.1	404.4	1 874.0	7 966.0	224.3	109.4	171.2	134.5
	3eme Qu.	228.5	293.2	491.5	2 430.0	9 141.0	259.0	124.5	214.8	149.6
	Max.	997.0	1 999.0	1 792.0	3 201.0	9 440.0	9 440.0	199.9	1 272.0	1 272.0
	<i>Horizon C Min.</i>	<i>100.0</i>	<i>100.0</i>	<i>100.7</i>	<i>1012.0</i>	<i>5165.0</i>	<i>100.0</i>	<i>78.2</i>	<i>78.0</i>	<i>78.0</i>
	<i>Horizon C 1er Qu.</i>	<i>123.1</i>	<i>138.5</i>	<i>225.9</i>	<i>1240.0</i>	<i>5617.0</i>	<i>128.9</i>	<i>87.3</i>	<i>105.4</i>	<i>90.8</i>
	<i>Horizon C Médiane</i>	160.6a	191.0b	336.6a	2209.0b	8501.0a	174.6a	100.5b	162.5b	112.7a
	<i>Horizon C Moyenne</i>	<i>190.2</i>	<i>240.1</i>	<i>417.8</i>	<i>2232.0</i>	<i>8139.0</i>	<i>226.3</i>	<i>110.5</i>	<i>205.0</i>	<i>148.9</i>

	<i>Horizon C 3eme Qu.</i>	223.2	285.6	505.4	2497.0	9440.0	255.4	126.5	252.8	163.1
	<i>Horizon C Max.</i>	997.0	1999.0	1976.0	4801.0	12520.0	12520.0	199.9	2253.0	2253.0

Facteur de forme - CULT

Horizon	Lames	Macroporosité						Argile illuviale		
		Racines	Assemblage	Fentes	Endogés	Anéciques	Total	Papules	Revêtements	Total
E	CULT_30_40									
	Min.	1.118	2.500	4.001	1.321	2.225	1.118	1.253	1.342	1.253
	1er Qu.	1.621	2.701	4.327	2.039	3.541	1.724	1.757	1.876	1.766
	Médiane	1.849	2.947	4.896	2.404	4.857	2.098	2.009	2.255	2.032
	Moyenne	1.870	3.038	5.654	6.483	4.581	2.435	2.118	2.522	2.165
	3eme Qu.	2.115	3.321	5.992	4.454	5.759	2.723	2.358	2.832	2.402
	Max.	2.499	3.999	42.620	95.370	6.662	95.370	5.248	9.287	9.287
	CULT_40_50									
	Min.	1.093	2.500	4.000	1.411	2.650	1.093	1.264	1.308	1.264
	1er Qu.	1.591	2.684	4.320	1.851	6.008	1.689	1.775	1.925	1.793
	Médiane	1.828	2.942	4.827	2.202	6.929	2.055	2.048	2.351	2.082
	Moyenne	1.852	3.033	5.427	2.603	8.564	2.347	2.160	2.590	2.231
	3eme Qu.	2.106	3.319	5.811	2.430	7.733	2.633	2.413	2.959	2.490
	Max.	2.499	3.999	22.920	7.252	19.500	22.920	6.039	17.360	17.360
	<i>Horizon E Min.</i>	<i>1.093</i>	<i>2.5</i>	<i>4</i>	<i>1.321</i>	<i>2.225</i>	<i>1.093</i>	<i>1.253</i>	<i>1.308</i>	<i>1.253</i>
	<i>Horizon E 1er Qu.</i>	<i>1.606</i>	<i>2.693</i>	<i>4.323</i>	<i>1.967</i>	<i>4.305</i>	<i>1.708</i>	<i>1.771</i>	<i>1.918</i>	<i>1.789</i>
	<i>Horizon E Médiane</i>	1.838a	2.944b	4.848c	2.332b	6.335a	2.077c	2.043c	2.339c	2.077c
	<i>Horizon E Moyenne</i>	<i>1.861</i>	<i>3.036</i>	<i>5.547</i>	<i>4.999</i>	<i>7.071</i>	<i>2.391</i>	<i>2.155</i>	<i>2.584</i>	<i>2.223</i>
	<i>Horizon E 3eme Qu.</i>	<i>2.111</i>	<i>3.32</i>	<i>5.916</i>	<i>3.355</i>	<i>7.13</i>	<i>2.681</i>	<i>2.405</i>	<i>2.952</i>	<i>2.477</i>
	<i>Horizon E Max.</i>	<i>2.499</i>	<i>3.999</i>	<i>42.62</i>	<i>95.37</i>	<i>19.5</i>	<i>95.37</i>	<i>6.039</i>	<i>17.36</i>	<i>17.36</i>
BT	CULT_50_60									
	Min.	1.175	2.500	4.001	1.350	3.595	1.175	1.249	1.284	1.249

	1er Qu.	1.603	2.704	4.427	2.443	4.018	1.726	1.791	2.036	1.815
	Médiane	1.843	2.966	5.056	4.284	4.718	2.133	2.071	2.508	2.116
	Moyenne	1.865	3.048	5.942	6.395	11.100	2.535	2.196	2.740	2.279
	3eme Qu.	2.124	3.334	6.209	7.840	17.190	2.815	2.460	3.174	2.552
	Max.	2.500	3.999	57.980	30.680	28.440	57.980	7.790	10.610	10.610
	CULT_60_70									
	Min.	1.168	2.500	4.000	1.827	1.893	1.168	1.250	1.298	1.250
	1er Qu.	1.611	2.694	4.387	2.543	3.593	1.752	1.786	2.089	1.824
	Médiane	1.853	2.969	5.039	4.335	4.385	2.165	2.071	2.591	2.147
	Moyenne	1.870	3.047	6.077	6.311	5.672	2.613	2.199	2.880	2.347
	3eme Qu.	2.122	3.345	6.410	7.373	7.637	2.882	2.462	3.357	2.626
	Max.	2.500	3.999	44.070	35.280	12.230	44.070	9.109	15.030	15.030
	CULT_70_80									
	Min.	1.094	2.501	4.002	1.910	7.170	1.094	1.297	1.291	1.291
	1er Qu.	1.575	2.716	4.434	4.440	7.199	1.728	1.805	2.111	1.864
	Médiane	1.824	3.013	5.331	7.176	7.228	2.202	2.101	2.626	2.218
	Moyenne	1.850	3.080	6.169	11.870	7.619	2.760	2.241	2.925	2.450
	3eme Qu.	2.119	3.391	6.664	16.070	7.843	3.057	2.513	3.405	2.762
	Max.	2.496	3.993	23.650	38.510	8.458	38.510	6.869	13.370	13.370
	CULT_90_100									
	Min.	1.163	2.500	4.000	1.617	2.144	1.163	1.245	1.247	1.245
	1er Qu.	1.600	2.717	4.468	2.319	3.759	1.755	1.779	2.150	1.869
	Médiane	1.849	3.003	5.183	4.237	5.167	2.226	2.063	2.718	2.250
	Moyenne	1.871	3.076	6.113	5.243	6.555	2.721	2.192	3.022	2.522

	3eme Qu.	2.132	3.391	6.715	5.947	8.266	3.038	2.456	3.534	2.850
	Max.	2.500	3.998	138.700	15.550	15.210	138.700	8.195	22.150	22.150
	<i>Horizon BT Min.</i>	<i>1.094</i>	<i>2.5</i>	<i>4</i>	<i>1.35</i>	<i>1.893</i>	<i>1.094</i>	<i>1.245</i>	<i>1.247</i>	<i>1.245</i>
	<i>Horizon BT 1er Qu.</i>	<i>1.601</i>	<i>2.706</i>	<i>4.432</i>	<i>2.418</i>	<i>3.862</i>	<i>1.743</i>	<i>1.789</i>	<i>2.109</i>	<i>1.84</i>
	<i>Horizon BT Médiane</i>	1.846a	2.981a	5.122a	4.414a	4.733a	2.174a	2.074a	2.634a	2.177b
	<i>Horizon BT Moyenne</i>	<i>1.867</i>	<i>3.059</i>	<i>6.065</i>	<i>6.739</i>	<i>7.362</i>	<i>2.635</i>	<i>2.203</i>	<i>2.93</i>	<i>2.399</i>
	<i>Horizon BT 3eme Qu.</i>	<i>2.125</i>	<i>3.359</i>	<i>6.509</i>	<i>7.934</i>	<i>8.458</i>	<i>2.915</i>	<i>2.468</i>	<i>3.422</i>	<i>2.688</i>
	<i>Horizon BT Max.</i>	<i>2.5</i>	<i>3.999</i>	<i>138.7</i>	<i>38.51</i>	<i>28.44</i>	<i>138.7</i>	<i>9.109</i>	<i>22.15</i>	<i>22.15</i>
C	CULT_120_130									
	Min.	1.102	2.500	4.002	1.626	2.149	1.102	1.238	1.304	1.238
	1er Qu.	1.608	2.712	4.436	2.349	2.914	1.723	1.785	2.121	1.875
	Médiane	1.833	2.980	5.107	4.471	3.729	2.125	2.067	2.668	2.246
	Moyenne	1.859	3.061	5.894	6.114	3.762	2.550	2.200	3.022	2.534
	3eme Qu.	2.103	3.367	6.383	8.163	4.607	2.839	2.457	3.516	2.844
	Max.	2.500	3.999	60.800	23.210	5.424	60.800	7.419	35.090	35.090
	CULT_150_160									
	Min.	1.167	2.501	4.000	1.275	2.538	1.167	1.243	1.281	1.243
	1er Qu.	1.579	2.695	4.397	2.161	2.984	1.674	1.783	1.995	1.848
	Médiane	1.811	2.948	4.950	4.523	3.429	2.052	2.071	2.461	2.192
	Moyenne	1.840	3.030	5.569	6.738	4.318	2.386	2.198	2.752	2.423
	3eme Qu.	2.092	3.309	5.987	6.389	5.207	2.681	2.458	3.150	2.703
	Max.	2.500	4.000	32.070	25.700	6.985	32.070	6.818	14.040	14.040
	<i>Horizon C Min.</i>	<i>1.102</i>	<i>2.5</i>	<i>4</i>	<i>1.275</i>	<i>2.149</i>	<i>1.102</i>	<i>1.238</i>	<i>1.281</i>	<i>1.238</i>
	<i>Horizon C 1er Qu.</i>	<i>1.593</i>	<i>2.702</i>	<i>4.414</i>	<i>2.18</i>	<i>2.807</i>	<i>1.698</i>	<i>1.784</i>	<i>2.064</i>	<i>1.863</i>

	<i>Horizon C Médiane</i>	1.822b	2.964ab	5.035b	4.523a	3.429a	2.086b	2.069b	2.576b	2.223a
	<i>Horizon C Moyenne</i>	1.848	3.045	5.743	6.333	3.947	2.462	2.199	2.911	2.488
	<i>Horizon C 3eme Qu.</i>	2.097	3.335	6.177	8.077	4.735	2.756	2.457	3.359	2.781
	<i>Horizon C Max.</i>	2.5	4	60.8	25.7	6.985	60.8	7.419	35.09	35.09

Abondance surfacique (%) - FOR

Horizon	Lames	Macroporosité						Argile illuviale		
		Racines	Assemblage	Fentes	Endogés	Anéciques	Total	Papules	Revêtements	Total
E	FOR_10_20_R1	1.99%	1.47%	1.32%	1.44%	0.96%	7.18%	0.10%	0.09%	0.19%
	FOR_10_20_R2	2.50%	1.33%	0.80%	1.59%	0.54%	6.76%	0.06%	0.07%	0.13%
	FOR_10_20_R3	2.73%	1.70%	0.90%	0.38%	0.43%	6.14%	0.36%	0.20%	0.55%
	FOR_20_30_R1	1.95%	1.27%	1.12%	1.19%	0.00%	5.53%	0.12%	0.07%	0.20%
	FOR_20_30_R2	2.68%	1.90%	0.84%	0.76%	3.49%	9.68%	0.03%	0.03%	0.06%
	FOR_20_30_R3	2.08%	1.44%	0.79%	0.91%	1.26%	6.48%	0.04%	0.04%	0.08%
	FOR_30_40_R1	2.59%	2.41%	1.65%	1.85%	4.62%	13.12%	0.16%	0.13%	0.28%
	FOR_30_40_R2	2.61%	2.99%	2.51%	2.88%	4.68%	15.66%	0.07%	0.13%	0.20%
	FOR_30_40_R3	3.09%	3.36%	2.29%	2.26%	2.26%	13.27%	0.15%	0.14%	0.28%
	FOR_40_50_R1	3.08%	2.55%	2.03%	3.17%	2.43%	13.26%	0.37%	0.25%	0.63%
	FOR_40_50_R2	1.98%	2.39%	1.32%	1.85%	3.80%	11.36%	0.71%	0.43%	1.14%
	FOR_40_50_R3	3.02%	2.84%	1.95%	1.62%	0.00%	9.43%	0.43%	0.30%	0.73%
	Moyenne E (n=12)	2.53%	2.14%	1.46%	1.66%	2.04%	9.82%	0.22%	0.16%	0.37%
	Médiane E (n=12)	2.60%a	2.15%a	1.32%a	1.61%a	1.76%a	9.55%a	0.13%b	0.13%b	0.24%b
	Ecart type E (n=12)	0.43%	0.71%	0.61%	0.83%	1.76%	3.45%	0.21%	0.12%	0.32%
BT	FOR_50_60_R1	2.74%	1.63%	1.31%	0.54%	0.00%	6.22%	1.37%	1.25%	2.61%
	FOR_50_60_R2	2.04%	1.41%	0.99%	0.85%	0.00%	5.28%	0.86%	0.52%	1.38%
	FOR_50_60_R3	2.30%	1.37%	1.02%	1.05%	1.47%	7.21%	0.62%	0.38%	1.00%
	FOR_50_60_R4	2.37%	1.62%	0.87%	1.53%	1.46%	7.85%	0.77%	0.50%	1.27%
	FOR_60_70_R1	2.16%	1.19%	1.13%	0.74%	0.60%	5.83%	2.20%	2.13%	4.33%
	FOR_60_70_R2	2.22%	1.32%	1.05%	0.53%	0.91%	6.02%	1.74%	1.28%	3.02%
	FOR_60_70_R3	1.85%	1.24%	0.90%	0.78%	1.18%	5.95%	1.72%	1.25%	2.98%

	FOR_70_80_R1	1.84%	1.14%	1.13%	0.46%	0.00%	4.57%	1.64%	1.59%	3.23%
	FOR_70_80_R2	1.91%	0.99%	0.75%	0.29%	0.00%	3.94%	2.09%	2.05%	4.14%
	FOR_70_80_R3	2.00%	1.27%	0.98%	0.76%	0.00%	5.00%	1.62%	1.59%	3.21%
	FOR_80_90_R1	2.47%	1.54%	1.06%	0.98%	0.00%	6.06%	2.98%	3.30%	6.27%
	FOR_80_90_R2	2.12%	1.14%	1.26%	0.66%	4.37%	9.55%	2.11%	2.92%	5.03%
	FOR_80_90_R3	2.01%	1.24%	1.08%	0.55%	1.73%	6.61%	2.53%	3.19%	5.73%
	FOR_90_100_R1	1.70%	1.26%	0.97%	0.69%	0.00%	4.62%	1.69%	2.55%	4.25%
	FOR_90_100_R2	2.16%	1.31%	1.18%	1.25%	0.00%	5.90%	1.10%	1.95%	3.06%
	FOR_90_100_R3	1.88%	1.21%	1.41%	0.42%	0.00%	4.93%	2.10%	5.12%	7.22%
	FOR_100_110_R1	1.94%	1.46%	1.76%	0.75%	0.91%	6.81%	1.76%	7.87%	9.63%
	FOR_100_110_R2	1.77%	1.30%	1.70%	0.53%	0.00%	5.30%	1.35%	5.92%	7.28%
	FOR_100_110_R3	1.84%	1.13%	1.70%	0.26%	1.30%	6.22%	1.49%	8.47%	9.96%
	FOR_100_110_R4	1.62%	1.32%	1.22%	0.83%	1.10%	6.10%	2.07%	8.07%	10.13%
	Moyenne BT (n=20)	2.05%	1.30%	1.17%	0.72%	0.75%	6.00%	1.69%	3.09%	4.79%
	Médiane BT (n=20)	2.00%<i>b</i>	1.28%<i>b</i>	1.11%<i>a</i>	0.71%<i>b</i>	0.30%<i>b</i>	5.99%<i>b</i>	1.71%<i>a</i>	2.09%<i>a</i>	4.19%<i>a</i>
	Ecart type BT (n=20)	0.28%	0.17%	0.28%	0.31%	1.06%	1.26%	0.59%	2.59%	2.83%
c	FOR_120_130_R1	1.76%	1.40%	0.89%	0.27%	0.00%	4.33%	0.41%	2.76%	3.16%
	FOR_120_130_R2	1.76%	1.34%	1.07%	0.32%	0.57%	5.07%	0.63%	3.22%	3.84%
	FOR_120_130_R3	1.76%	1.11%	1.03%	0.67%	0.00%	4.57%	0.28%	1.66%	1.95%
	FOR_120_130_R4	1.82%	1.14%	0.72%	0.37%	0.00%	4.05%	0.56%	2.55%	3.11%
	FOR_140_150_R1	1.96%	1.12%	0.58%	0.29%	0.72%	4.67%	0.01%	0.01%	0.02%
	FOR_140_150_R2	2.05%	1.06%	0.57%	0.19%	0.00%	3.86%	0.01%	0.00%	0.01%
	FOR_140_150_R3	2.04%	1.24%	0.68%	0.17%	0.81%	4.94%	0.03%	0.02%	0.05%
	FOR_140_150_R4	2.04%	1.08%	0.57%	0.62%	0.00%	4.31%	0.04%	0.01%	0.05%

	Moyenne C (n=8)	1.90%	1.19%	0.76%	0.36%	0.26%	4.47%	0.25%	1.28%	1.52%
	Médiane C (n=8)	1.89%<i>b</i>	1.13%<i>b</i>	0.70%<i>b</i>	0.30%<i>c</i>	0.00%<i>b</i>	4.45%<i>c</i>	0.16%<i>b</i>	0.84%<i>b</i>	1.00%<i>b</i>
	Ecart type C (n=8)	0.14%	0.13%	0.21%	0.19%	0.37%	0.42%	0.26%	1.42%	1.68%

Nombre par cm² - FOR

Nombre par cm2	Lames	Macroporosité						Argile illuviale		
		Racines	Assemblage	Fentes	Endogés	Anéciques	Total	Papules	Revêtements	Total
E	FOR_10_20_R1	80.06	27.44	6.83	0.27	0.03	114.62	12.31	3.90	16.21
	FOR_10_20_R2	100.14	28.29	5.09	0.32	0.02	133.85	6.97	3.66	10.62
	FOR_10_20_R3	111.79	33.82	6.00	0.14	0.02	151.76	44.52	10.29	54.81
	FOR_20_30_R1	82.24	25.32	5.85	0.18	0.00	113.59	14.64	3.25	17.88
	FOR_20_30_R2	100.78	29.43	5.23	0.22	0.07	135.74	3.56	2.10	5.66
	FOR_20_30_R3	82.28	22.24	3.91	0.22	0.05	108.69	4.62	1.79	6.41
	FOR_30_40_R1	95.56	38.45	10.06	0.33	0.09	144.49	18.21	7.20	25.41
	FOR_30_40_R2	93.74	41.84	12.40	0.34	0.05	148.38	7.63	6.25	13.88
	FOR_30_40_R3	108.33	42.12	10.32	0.41	0.03	161.21	15.36	6.69	22.05
	FOR_40_50_R1	103.73	36.46	10.71	0.51	0.08	151.49	37.98	13.04	51.02
	FOR_40_50_R2	59.58	29.56	7.22	0.35	0.07	96.78	75.90	16.95	92.85
	FOR_40_50_R3	99.54	37.27	10.06	0.38	0.00	147.25	43.56	15.60	59.16
	Moyenne E (n=12)	93.15a	32.69	7.81	0.31	0.04	133.99a	23.77	7.56	31.33
	Médiane E (n=12)	97.55	31.69a	7.02a	0.32a	0.04a	140.12	15.00b	6.47b	19.97b
	Ecart type E (n=12)	14.71	6.56	2.76	0.10	0.03	20.62	22.11	5.25	27.04
BT	FOR_50_60_R1	86.71	25.07	7.66	0.25	0.00	119.68	135.20	39.94	175.14
	FOR_50_60_R2	63.11	19.45	5.99	0.22	0.00	88.78	88.33	19.91	108.24
	FOR_50_60_R3	77.20	23.39	6.40	0.16	0.03	107.17	64.86	17.64	82.50
	FOR_50_60_R4	79.14	24.54	6.59	0.34	0.03	110.64	80.04	19.60	99.64
	FOR_60_70_R1	74.96	21.95	7.10	0.16	0.02	104.20	210.61	55.69	266.30
	FOR_60_70_R2	71.52	21.07	6.91	0.19	0.02	99.71	171.06	40.16	211.22
	FOR_60_70_R3	58.05	17.03	4.62	0.21	0.02	79.93	170.54	39.02	209.55

	FOR_70_80_R1	62.08	19.50	7.68	0.15	0.00	89.41	161.43	44.65	206.08
	FOR_70_80_R2	61.92	18.25	5.17	0.12	0.00	85.47	203.93	58.33	262.26
	FOR_70_80_R3	68.39	22.00	7.26	0.12	0.00	97.78	159.31	47.54	206.85
	FOR_80_90_R1	77.08	25.22	7.63	0.18	0.00	110.12	284.97	95.69	380.65
	FOR_80_90_R2	66.61	19.94	7.52	0.19	0.02	94.28	199.77	68.48	268.25
	FOR_80_90_R3	70.04	22.68	7.24	0.16	0.03	100.15	241.92	76.13	318.05
	FOR_90_100_R1	56.21	19.47	6.95	0.15	0.00	82.78	162.70	68.90	231.61
	FOR_90_100_R2	72.15	27.07	9.39	0.22	0.00	108.83	106.65	64.35	171.00
	FOR_90_100_R3	57.21	19.94	7.17	0.17	0.00	84.49	196.48	108.64	305.12
	FOR_100_110_R1	54.96	23.32	10.26	0.22	0.03	88.78	167.25	120.12	287.37
	FOR_100_110_R2	53.84	21.96	10.46	0.12	0.00	86.38	126.52	107.66	234.18
	FOR_100_110_R3	53.93	20.24	9.96	0.11	0.02	84.26	137.26	107.92	245.18
	FOR_100_110_R4	47.74	19.35	7.51	0.17	0.03	74.80	194.34	124.29	318.63
	Moyenne BT (n=20)	65.64b	21.57	7.47	0.18	0.01	94.88b	163.16	66.23	229.39
	Médiane BT (n=20)	64.86	21.51b	7.25a	0.17b	0.01b	91.85	164.98a	61.34a	232.90a
	Ecart type BT (n=20)	10.37	2.61	1.54	0.05	0.01	12.24	54.62	34.25	77.20
C	FOR_120_130_R1	43.84	14.86	4.38	0.14	0.00	63.22	38.13	47.76	85.88
	FOR_120_130_R2	44.01	18.28	5.54	0.15	0.02	68.02	62.41	60.92	123.33
	FOR_120_130_R3	43.50	15.64	4.68	0.20	0.00	64.02	25.70	30.79	56.49
	FOR_120_130_R4	43.43	14.44	3.70	0.19	0.00	61.77	58.78	51.92	110.70
	FOR_140_150_R1	64.90	20.56	4.30	0.16	0.02	89.93	1.39	0.39	1.78
	FOR_140_150_R2	69.13	22.78	4.51	0.05	0.00	96.47	1.13	0.16	1.29
	FOR_140_150_R3	70.67	23.59	4.46	0.08	0.02	98.82	4.07	1.19	5.26
	FOR_140_150_R4	75.02	24.08	4.99	0.11	0.00	104.21	4.97	0.99	5.97

	Moyenne C (n=8)	56.81b	19.28	4.57	0.14	0.01	80.81b	24.57	24.26	48.84
	Médiane C (n=8)	54.46	19.42b	4.48b	0.15b	0.00b	78.97	15.34b	15.99b	31.23b
	Ecart type C (n=8)	14.29	4.01	0.54	0.05	0.01	18.20	25.85	26.53	52.13

Taille en diamètre équivalent (µm) - FOR

Horizon	Lames	Macroporosité						Argile illuviale		
		Racines	Assemblage	Fentes	Endogés	Anéciques	Total	Papules	Revêtements	Total
E	FOR_10_20									
	Min.	100.0	100.0	101.1	1 004.0	5 602.0	100.0	78.2	78.0	78.0
	1er Qu.	112.9	129.8	200.4	1 187.0	5 957.0	116.2	83.8	90.6	84.6
	Médiane	132.2	167.9	288.6	2 141.0	6 320.0	141.7	91.6	113.2	93.9
	Moyenne	158.9	212.1	376.9	2 250.0	6 244.0	185.6	99.4	141.8	108.8
	3eme Qu.	173.8	242.1	450.6	3 026.0	6 608.0	196.5	105.9	169.7	114.1
	Max.	992.7	1 857.0	1 985.0	4 510.0	6 734.0	6 734.0	199.9	635.7	635.7
	FOR_20_30									
	Min.	100.0	100.0	105.4	1 013.0	5 291.0	100.0	78.2	78.2	78.2
	1er Qu.	112.6	129.3	201.8	1 563.0	5 556.0	115.5	84.2	90.4	85.3
	Médiane	131.7	172.4	296.6	2 077.0	6 637.0	140.1	91.8	120.4	94.7
	Moyenne	159.7	224.7	386.5	2 239.0	6 879.0	189.0	101.3	145.1	112.0
	3eme Qu.	171.0	259.0	456.7	2 726.0	8 001.0	198.0	109.6	168.6	121.0
	Max.	975.8	1 996.0	1 962.0	4 077.0	9 109.0	9 109.0	199.5	562.2	562.2
	FOR_30_40									
	Min.	100.0	100.0	100.9	1 042.0	5 243.0	100.0	77.1	76.3	76.3
	1er Qu.	114.6	138.3	215.7	1 810.0	5 888.0	120.3	85.0	91.9	86.5
	Médiane	137.2	190.4	319.0	2 366.0	7 778.0	154.0	95.3	115.8	99.8
	Moyenne	167.4	245.6	406.1	2 644.0	8 595.0	214.9	104.6	141.5	116.7
	3eme Qu.	185.4	284.3	484.0	3 547.0	11 440.0	229.5	116.5	168.4	128.6
	Max.	984.7	1 965.0	2 000.0	4 974.0	13 270.0	13 270.0	199.5	590.9	590.9
	FOR_40_50									

	Min.	100.0	100.0	101.0	1 025.0	5 312.0	100.0	78.2	78.2	78.2
	1er Qu.	116.2	136.0	208.7	1 472.0	6 389.0	121.7	86.1	92.7	87.1
	Médiane	141.8	190.8	309.8	2 260.0	6 785.0	158.4	97.6	120.7	100.4
	Moyenne	174.7	250.8	398.4	2 382.0	7 308.0	220.2	106.9	149.3	116.3
	3eme Qu.	196.5	292.9	487.2	2 978.0	8 548.0	237.0	119.8	200.0	128.4
	Max.	992.4	1 914.0	1 998.0	4 874.0	9 187.0	9 187.0	199.7	672.5	672.5
	<i>Horizon E Min.</i>	<i>100.0</i>	<i>100.0</i>	<i>100.9</i>	<i>1 004.0</i>	<i>5 243.0</i>	<i>100.0</i>	<i>77.1</i>	<i>76.3</i>	<i>76.3</i>
	<i>Horizon E 1er Qu.</i>	<i>113.8</i>	<i>133.7</i>	<i>207.5</i>	<i>1 520.0</i>	<i>5 628.0</i>	<i>118.1</i>	<i>85.0</i>	<i>91.8</i>	<i>86.1</i>
	<i>Horizon E Médiane</i>	135.1c	180.3b	305.3b	2 232.0a	6 760.0a	147.5c	95.0c	117.7c	98.0c
	<i>Horizon E Moyenne</i>	<i>164.5</i>	<i>234.0</i>	<i>394.5</i>	<i>2 406.0</i>	<i>7 508.0</i>	<i>202.0</i>	<i>104.3</i>	<i>145.5</i>	<i>114.2</i>
	<i>Horizon E 3eme Qu.</i>	<i>180.7</i>	<i>270.6</i>	<i>472.1</i>	<i>3 134.0</i>	<i>8 544.0</i>	<i>214.3</i>	<i>115.1</i>	<i>179.1</i>	<i>124.7</i>
	<i>Horizon E Max.</i>	<i>992.7</i>	<i>1 996.0</i>	<i>2 000.0</i>	<i>4 974.0</i>	<i>13 270.0</i>	<i>13 270.0</i>	<i>199.9</i>	<i>672.5</i>	<i>672.5</i>
BT	FOR_50_60									
	Min.	100.0	100.0	101.6	1 018.0	7 019.0	100.0	78.2	78.0	78.0
	1er Qu.	115.4	133.6	203.0	1 131.0	7 049.0	119.8	86.7	97.5	88.0
	Médiane	139.9	180.6	294.5	1 632.0	7 625.0	151.6	98.9	134.9	102.5
	Moyenne	173.9	235.8	371.2	2 039.0	7 661.0	205.0	108.4	165.0	120.2
	3eme Qu.	194.3	275.4	462.7	2 628.0	8 237.0	226.9	122.3	215.8	133.0
	Max.	991.7	1 898.0	1 880.0	4 991.0	8 375.0	8 375.0	199.9	931.6	931.6
	FOR_60_70									
	Min.	100.0	100.0	100.1	1 029.0	6 467.0	100.0	78.2	78.0	78.0
	1er Qu.	114.6	131.1	194.3	1 213.0	7 309.0	118.6	87.3	107.2	88.8
	Médiane	136.7	176.7	289.4	1 522.0	8 152.0	148.0	100.7	179.7	105.6
	Moyenne	171.8	231.5	375.3	1 921.0	8 103.0	202.7	110.4	188.4	125.7

	3eme Qu.	190.1	271.5	463.3	2 092.0	8 920.0	220.6	125.7	240.4	140.7
	Max.	993.9	1 748.0	1 861.0	4 993.0	9 689.0	9 689.0	199.9	1 166.0	1 166.0
	FOR_70_80									
	Min.	100.0	100.0	107.6	1 038.0	-	100.0	78.2	77.5	77.5
	1er Qu.	114.4	130.9	199.7	1 256.0	-	118.8	87.3	104.9	89.0
	Médiane	137.2	172.6	283.5	1 436.0	-	148.9	100.4	163.1	105.4
	Moyenne	171.0	223.5	353.3	1 964.0	-	198.7	110.2	184.9	126.8
	3eme Qu.	189.2	260.1	428.3	2 470.0	-	222.1	125.7	233.6	141.0
	Max.	976.5	1 658.0	1 977.0	4 805.0	-	4 805.0	199.9	1 675.0	1 675.0
	FOR_80_90									
	Min.	100.0	100.0	105.3	1 005.0	7 308.0	100.0	78.2	77.7	77.7
	1er Qu.	114.3	128.1	191.0	1 146.0	7 905.0	118.5	88.0	110.6	90.2
	Médiane	138.7	170.0	273.0	2 079.0	8 502.0	150.2	102.0	184.9	109.0
	Moyenne	173.0	223.3	361.1	2 115.0	10 910.0	203.3	111.7	196.8	132.8
	3eme Qu.	192.4	260.2	441.1	2 743.0	12 700.0	221.7	128.4	246.4	148.6
	Max.	993.5	1 569.0	1 746.0	3 913.0	16 910.0	16 910.0	199.9	1 599.0	1 599.0
	FOR_90_100									
	Min.	100.0	100.0	105.6	1 004.0	-	100.0	78.2	78.2	78.2
	1er Qu.	115.8	129.1	189.5	1 226.0	-	120.1	88.2	108.0	91.2
	Médiane	140.4	170.9	275.4	1 631.0	-	152.9	102.1	165.1	112.1
	Moyenne	174.4	223.8	357.9	2 074.0	-	205.6	111.8	194.4	139.9
	3eme Qu.	196.0	258.5	438.3	2 404.0	-	228.5	128.6	242.2	156.3
	Max.	967.8	1 654.0	1 978.0	4 676.0	-	4 676.0	199.9	1 484.0	1 484.0
	FOR_100_110									

	Min.	100.0	100.0	102.0	1 002.0	5 673.0	100.0	78.2	77.5	77.5
	1er Qu.	119.4	133.0	205.0	1 078.0	6 232.0	125.9	88.2	121.0	93.3
	Médiane	152.0	183.0	303.3	2 034.0	7 267.0	169.5	102.7	203.2	120.7
	Moyenne	183.8	233.8	381.0	2 015.0	7 424.0	223.8	112.6	238.5	165.7
	3eme Qu.	214.1	283.1	467.3	2 571.0	8 459.0	253.3	130.0	292.1	184.6
	Max.	974.3	1 916.0	1 993.0	4 600.0	9 488.0	9 488.0	199.9	2 172.0	2 172.0
	<i>Horizon BT Min.</i>	<i>100.0</i>	<i>100.0</i>	<i>100.1</i>	<i>1 002.0</i>	<i>5 673.0</i>	<i>100.0</i>	<i>78.2</i>	<i>77.5</i>	<i>77.5</i>
	<i>Horizon BT 1er Qu.</i>	<i>115.5</i>	<i>131.1</i>	<i>198.1</i>	<i>1 146.0</i>	<i>7 029.0</i>	<i>120.0</i>	<i>87.5</i>	<i>110.1</i>	<i>90.2</i>
	<i>Horizon BT Médiane</i>	140.3b	175.9c	288.5c	1 705.0b	8 134.0a	153.3b	101.3a	178.7a	109.5b
	<i>Horizon BT Moyenne</i>	<i>174.6</i>	<i>229.4</i>	<i>367.9</i>	<i>2 025.0</i>	<i>8 383.0</i>	<i>206.7</i>	<i>111.0</i>	<i>205.3</i>	<i>138.0</i>
	<i>Horizon BT 3eme Qu.</i>	<i>196.2</i>	<i>270.0</i>	<i>451.3</i>	<i>2 575.0</i>	<i>8 470.0</i>	<i>229.4</i>	<i>127.1</i>	<i>252.1</i>	<i>151.7</i>
	<i>Horizon BT Max.</i>	<i>993.9</i>	<i>1 916.0</i>	<i>1 993.0</i>	<i>4 993.0</i>	<i>16 910.0</i>	<i>16 910.0</i>	<i>199.9</i>	<i>2 172.0</i>	<i>2 172.0</i>
C	FOR_120_130									
	Min.	100.0	100.0	112.9	1 001.0	6 174.0	100.0	78.2	77.7	77.7
	1er Qu.	121.6	139.1	224.7	1 110.0	6 174.0	127.5	86.9	104.4	91.4
	Médiane	158.9	196.8	349.3	1 295.0	6 174.0	174.9	99.5	159.7	116.8
	Moyenne	197.2	258.7	422.7	1 570.0	6 174.0	232.4	109.9	209.2	160.4
	3eme Qu.	230.3	314.0	515.8	1 583.0	6 174.0	266.5	125.4	256.1	177.6
	Max.	999.8	1 771.0	1 979.0	3 945.0	6 174.0	6 174.0	199.9	2 053.0	2 053.0
	FOR_140_150									
	Min.	100.0	100.0	100.9	1 002.0	6 835.0	100.0	78.4	78.7	78.4
	1er Qu.	116.3	133.0	203.9	1 182.0	7 087.0	120.0	82.8	87.4	83.2
	Médiane	142.5	173.4	289.0	1 553.0	7 339.0	151.9	89.2	103.5	90.4
	Moyenne	171.5	215.1	352.9	1 816.0	7 339.0	192.6	95.7	125.1	101.4

	3eme Qu.	197.3	255.4	434.1	2 204.0	7 591.0	218.2	100.2	136.7	104.8
	Max.	957.5	1 957.0	1 454.0	4 613.0	7 842.0	7 842.0	199.4	401.6	401.6
	<i>Horizon C Min.</i>	<i>100.0</i>	<i>100.0</i>	<i>100.9</i>	<i>1 001.0</i>	<i>6 174.0</i>	<i>100.0</i>	<i>78.2</i>	<i>77.7</i>	<i>77.7</i>
	<i>Horizon C 1er Qu.</i>	<i>118.0</i>	<i>134.9</i>	<i>214.8</i>	<i>1 132.0</i>	<i>6 505.0</i>	<i>122.6</i>	<i>86.5</i>	<i>103.9</i>	<i>90.8</i>
	<i>Horizon C Médiane</i>	148.0a	181.3a	318.7a	1 308.0c	6 835.0a	160.4a	98.6b	158.6b	114.9a
	<i>Horizon C Moyenne</i>	<i>181.8</i>	<i>233.7</i>	<i>389.0</i>	<i>1 657.0</i>	<i>6 951.0</i>	<i>209.1</i>	<i>109.1</i>	<i>208.0</i>	<i>158.3</i>
	<i>Horizon C 3eme Qu.</i>	<i>209.7</i>	<i>278.1</i>	<i>481.4</i>	<i>2 036.0</i>	<i>7 339.0</i>	<i>237.7</i>	<i>123.9</i>	<i>254.9</i>	<i>174.4</i>
	<i>Horizon C Max.</i>	<i>999.8</i>	<i>1 957.0</i>	<i>1 979.0</i>	<i>4 613.0</i>	<i>7 842.0</i>	<i>7 842.0</i>	<i>199.9</i>	<i>2 053.0</i>	<i>2 053.0</i>

Facteur de forme - FOR

Horizon	Lames	Macroporosité						Argile illuviale		
		Racines	Assemblage	Fentes	Endogés	Anéciques	Total	Papules	Revêtements	Total
	Horizon E Min.	1.052	2.500	4.000	1.309	1.252	1.052	1.211	1.244	1.211
	Horizon E 1er Qu.	1.614	2.687	4.307	1.975	4.041	1.713	1.744	1.821	1.757
	Horizon E Médiane	1.845	2.932	4.787	2.784	5.869	2.078	2.002	2.212	2.039
	Horizon E Moyenne	1.869	3.023	5.473	4.498	6.369	2.364	2.124	2.525	2.220
	Horizon E 3eme Qu.	2.118	3.298	5.709	5.443	7.137	2.657	2.371	2.826	2.456
	Horizon E Max.	2.500	4.000	57.300	28.390	15.900	57.300	6.625	38.800	38.800
	Horizon BT Min.	1.108	2.500	4.000	1.232	1.866	1.108	1.222	1.214	1.214
	Horizon BT 1er Qu.	1.575	2.694	4.381	1.956	2.616	1.674	1.790	2.070	1.840
	Horizon BT Médiane	1.806	2.959	4.991	2.379	3.623	2.050	2.075	2.578	2.177
	Horizon BT Moyenne	1.837	3.043	5.961	5.141	5.399	2.439	2.211	2.908	2.410
	Horizon BT 3eme Qu.	2.088	3.340	6.278	4.339	7.494	2.690	2.476	3.372	2.692
	Horizon BT Max.	2.500	4.000	70.180	48.080	12.250	70.180	8.495	22.140	22.140
	Horizon C Min.	1.126	2.500	4.001	1.325	1.465	1.126	1.279	1.276	1.276
	Horizon C 1er Qu.	1.585	2.683	4.319	1.774	3.722	1.685	1.767	2.041	1.865
	Horizon C Médiane	1.824	2.938	4.799	2.198	5.979	2.056	2.042	2.550	2.233
	Horizon C Moyenne	1.850	3.025	5.366	3.088	6.262	2.332	2.166	2.917	2.539
	Horizon C 3eme Qu.	2.106	3.304	5.716	2.727	8.661	2.640	2.411	3.370	2.832
	Horizon C Max.	2.500	3.999	33.400	12.630	11.340	33.400	6.540	19.230	19.230

Abondance surfacique (%) - FUM

Horizon	Lames	Macroporosité						Argile illuviale		
		Racines	Assemblage	Fentes	Endogés	Anéciques	Total	Papules	Revêtements	Total
E	FUM_20_30_R1	1.63%	1.41%	0.70%	1.17%	0.54%	5.43%	0.18%	0.05%	0.23%
	FUM_20_30_R2	1.54%	1.44%	0.95%	0.91%	0.00%	4.85%	0.30%	0.08%	0.38%
	FUM_20_30_R3	1.70%	1.51%	0.87%	1.56%	1.65%	7.28%	0.19%	0.04%	0.23%
	FUM_30_40_R1	1.84%	1.31%	0.86%	1.05%	0.63%	5.69%	0.40%	0.13%	0.53%
	FUM_30_40_R2	2.55%	1.85%	0.90%	1.17%	0.00%	6.47%	0.21%	0.10%	0.31%
	FUM_30_40_R3	2.53%	1.53%	1.11%	2.25%	0.00%	7.42%	0.54%	0.26%	0.80%
	FUM_40_50_R1	2.69%	2.04%	1.29%	1.00%	4.21%	11.23%	1.20%	0.70%	1.90%
	FUM_40_50_R2	3.10%	1.77%	1.37%	0.91%	1.45%	8.60%	0.84%	0.44%	1.28%
	FUM_40_50_R3	2.74%	1.69%	1.37%	1.09%	0.00%	6.89%	1.16%	0.81%	1.96%
	Moyenne E (n=9)	2.26%	1.62%a	1.05%b	1.23%	0.94%	7.10%	0.56%b	0.29%	0.85%
	Médiane E (n=9)	2.53%a	1.53%	0.95%	1.09%a	0.54%a	6.89%a	0.40%	0.13%c	0.53%b
	Ecart type E (n=9)	0.58%	0.24%	0.25%	0.43%	1.38%	1.93%	0.41%	0.29%	0.70%
BT	FUM_50_60_R1	2.04%	1.22%	1.41%	0.49%	0.42%	5.58%	2.67%	3.39%	6.06%
	FUM_50_60_R2	2.31%	1.26%	1.43%	0.72%	0.00%	5.72%	1.91%	1.60%	3.51%
	FUM_50_60_R3	2.27%	1.50%	1.54%	2.06%	1.28%	8.65%	2.65%	2.31%	4.96%
	FUM_60_70_R1	1.82%	1.06%	1.62%	1.10%	1.38%	6.97%	1.84%	1.70%	3.54%
	FUM_60_70_R2	1.84%	1.09%	1.76%	0.93%	0.00%	5.62%	1.75%	4.78%	6.53%
	FUM_60_70_R3	2.12%	1.55%	1.68%	0.75%	0.43%	6.53%	3.03%	3.87%	6.90%
	FUM_70_80_R1	1.83%	1.16%	1.79%	1.40%	0.00%	6.18%	2.37%	5.90%	8.27%
	FUM_70_80_R2	1.77%	1.36%	1.90%	0.74%	1.77%	7.53%	2.46%	8.05%	10.51%
	FUM_70_80_R3	1.61%	1.28%	1.62%	0.33%	1.59%	6.44%	3.02%	10.55%	13.57%
	FUM_80_90_R1	1.88%	1.05%	1.49%	0.94%	0.00%	5.36%	1.79%	3.37%	5.16%

	FUM_80_90_R2	2.23%	1.54%	1.55%	0.42%	0.00%	5.75%	2.38%	2.43%	4.81%
	FUM_80_90_R3	1.78%	0.98%	1.39%	1.06%	0.00%	5.21%	2.58%	6.14%	8.72%
	FUM_90_100_R1	2.02%	1.27%	1.49%	0.59%	3.43%	8.81%	0.97%	5.16%	6.13%
	FUM_90_100_R2	2.22%	1.25%	1.74%	1.09%	0.00%	6.30%	0.51%	1.80%	2.31%
	Moyenne BT (n=14)	1.98%	1.25%<i>b</i>	1.60%<i>a</i>	0.90%	0.74%	6.47%	2.14%<i>a</i>	4.36%	6.50%
	Médiane BT (n=14)	1.95%<i>a</i>	1.26%	1.59%	0.84%<i>a</i>	0.21%<i>a</i>	6.24%<i>a</i>	2.37%	3.63%<i>a</i>	6.09%<i>a</i>
	Ecart type BT (n=14)	0.22%	0.18%	0.16%	0.45%	1.03%	1.15%	0.73%	2.63%	3.00%
C	FUM_110_120_R1	2.18%	1.32%	0.89%	0.06%	0.00%	4.45%	0.74%	2.26%	2.99%
	FUM_110_120_R2	2.41%	1.29%	1.09%	0.15%	0.00%	4.94%	0.42%	1.89%	2.31%
	FUM_110_120_R3	2.18%	1.24%	1.19%	0.32%	0.00%	4.93%	0.81%	3.24%	4.04%
	FUM_140_150_R1	2.32%	1.45%	1.16%	0.27%	0.62%	5.82%	0.55%	1.04%	1.59%
	FUM_140_150_R2	2.75%	1.61%	0.95%	0.39%	0.64%	6.34%	0.07%	0.11%	0.18%
	Moyenne C (n=5)	2.37%	1.38%<i>ab</i>	1.06%<i>b</i>	0.24%	0.25%	5.29%	0.52%<i>b</i>	1.71%	2.22%
	Médiane C (n=5)	2.32%<i>a</i>	1.32%	1.09%	0.27%<i>b</i>	0.00%<i>a</i>	4.94%<i>a</i>	0.55%	1.89%<i>b</i>	2.31%<i>b</i>
	Ecart type C (n=5)	0.23%	0.15%	0.13%	0.13%	0.35%	0.76%	0.29%	1.19%	1.46%

Nombre par cm² - FUM

Horizon	Lames	Macroporosité						Argile illuviale		
		Racines	Assemblage	Fentes	Endogés	Anéciques	Total	Papules	Revêtements	Total
E	FUM_20_30_R1	44.64	16.74	3.86	0.33	0.02	65.58	21.21	2.68	23.89
	FUM_20_30_R2	48.08	15.92	3.63	0.29	0.00	67.93	35.27	4.07	39.34
	FUM_20_30_R3	45.77	15.19	3.61	0.46	0.03	65.06	21.79	2.63	24.42
	FUM_30_40_R1	41.23	15.78	3.37	0.24	0.02	60.64	43.21	4.97	48.18
	FUM_30_40_R2	58.08	20.44	5.03	0.24	0.00	83.80	22.11	3.33	25.44
	FUM_30_40_R3	60.59	20.96	5.79	0.30	0.00	87.64	57.51	9.92	67.43
	FUM_40_50_R1	65.52	24.63	7.28	0.29	0.04	97.77	120.15	24.63	144.78
	FUM_40_50_R2	67.72	22.39	5.83	0.28	0.03	96.25	84.33	15.09	99.42
	FUM_40_50_R3	62.50	20.26	5.46	0.24	0.00	88.46	116.45	25.78	142.23
	Moyenne E (n=9)	54.90a	19.15	4.87b	0.30	0.02	79.24a	58.00b	10.34	68.35b
	Médiane E (n=9)	58.08	20.26a	5.03	0.29a	0.02a	83.80	43.21	4.97b	48.18
	Ecart type E (n=9)	10.00	3.35	1.34	0.07	0.02	14.45	39.78	9.36	49.07
BT	FUM_50_60_R1	52.67	20.12	8.25	0.10	0.02	81.16	247.81	73.23	321.05
	FUM_50_60_R2	55.18	19.67	8.05	0.15	0.00	83.05	185.73	43.86	229.59
	FUM_50_60_R3	58.57	21.91	9.19	0.38	0.02	90.07	254.84	67.05	321.89
	FUM_60_70_R1	48.84	17.13	7.93	0.22	0.04	74.15	174.70	43.32	218.03
	FUM_60_70_R2	45.34	17.76	9.58	0.30	0.00	72.98	157.48	74.90	232.38
	FUM_60_70_R3	66.11	29.56	8.88	0.22	0.02	104.79	289.17	93.52	382.69
	FUM_70_80_R1	49.92	19.16	9.50	0.27	0.00	78.84	214.65	91.58	306.23
	FUM_70_80_R2	51.46	20.66	11.24	0.21	0.05	83.61	220.87	112.69	333.56
	FUM_70_80_R3	48.62	20.70	9.63	0.10	0.03	79.08	275.64	136.73	412.37
	FUM_80_90_R1	47.24	16.83	8.02	0.25	0.00	72.34	165.30	63.83	229.13

	FUM_80_90_R2	56.93	20.92	8.47	0.18	0.00	86.50	223.80	61.75	285.56
	FUM_80_90_R3	42.40	15.81	8.85	0.19	0.00	67.25	238.46	98.66	337.12
	FUM_90_100_R1	48.07	18.52	8.09	0.18	0.02	74.87	90.17	79.51	169.68
	FUM_90_100_R2	53.30	19.55	8.51	0.24	0.00	81.60	45.76	37.73	83.49
	<i>Moyenne BT (n=14)</i>	51.76a	19.88	8.87a	0.21	0.01	80.74a	198.89a	77.03	275.91a
	<i>Médiane BT (n=14)</i>	50.69	19.61a	8.68	0.21b	0.01a	80.12	217.76	74.07a	295.89
	<i>Ecart type BT (n=14)</i>	6.07	3.29	0.91	0.08	0.02	9.24	68.70	27.87	87.77
C	FUM_110_120_R1	50.78	17.28	5.02	0.06	0.00	73.13	69.27	51.56	120.83
	FUM_110_120_R2	56.73	18.10	5.97	0.03	0.00	80.83	39.00	34.61	73.61
	FUM_110_120_R3	51.36	17.82	6.32	0.05	0.00	75.55	78.55	56.38	134.93
	FUM_140_150_R1	69.05	23.03	5.38	0.09	0.02	97.57	58.25	41.16	99.40
	FUM_140_150_R2	83.09	30.97	5.79	0.06	0.02	119.93	7.51	6.25	13.76
	<i>Moyenne C (n=5)</i>	62.20a	21.44	5.70b	0.06	0.01	89.40a	50.51b	37.99	88.50b
	<i>Médiane C (n=5)</i>	56.73	18.10a	5.79	0.06c	0.00a	80.83	58.25	41.16b	99.40
	<i>Ecart type C (n=5)</i>	13.79	5.81	0.51	0.02	0.01	19.55	28.19	19.69	47.77

Taille en diamètre équivalent (µm) - FUM

Horizon	Lames	Macroporosité						Argile illuviale		
		Racines	Assemblage	Fentes	Endogés	Anéciques	Total	Papules	Revêtements	Total
E	FUM_20_30									
	Min.	100.0	100.0	104.0	1 019.0	6 584.0	100.0	78.2	78.4	78.2
	1er Qu.	115.1	136.3	208.8	1 189.0	6 805.0	119.8	84.8	87.5	85.0
	Médiane	140.3	189.7	322.7	1 555.0	7 026.0	154.1	93.6	104.2	94.1
	Moyenne	180.6	265.1	427.5	1 888.0	7 552.0	225.9	101.9	137.7	105.8
	3eme Qu.	199.1	310.0	521.4	2 485.0	8 036.0	239.1	110.8	170.7	113.6
	Max.	988.5	1 971.0	1 975.0	3 748.0	9 046.0	9 046.0	199.1	677.7	677.7
	FUM_30_40									
	Min.	100.0	100.0	100.9	1 020.0	6 821.0	100.0	78.2	78.2	78.2
	1er Qu.	119.4	135.2	209.0	1 392.0	6 821.0	124.8	85.9	91.7	86.3
	Médiane	154.6	185.6	304.7	2 479.0	6 821.0	168.7	96.7	125.7	98.0
	Moyenne	200.9	257.2	407.4	2 484.0	6 821.0	235.7	105.9	164.3	113.5
	3eme Qu.	238.2	305.5	495.3	3 186.0	6 821.0	268.7	117.5	223.2	123.2
	Max.	998.3	1 984.0	1 976.0	4 895.0	6 821.0	6 821.0	199.9	603.0	603.0
	FUM_40_50									
	Min.	100.0	100.0	102.7	1 033.0	5 950.0	100.0	78.2	78.2	78.2
	1er Qu.	121.4	136.3	219.9	1 213.0	6 889.0	126.7	86.9	98.6	88.0
	Médiane	159.7	188.7	352.6	2 056.0	8 130.0	172.8	99.3	148.1	102.7
	Moyenne	203.9	258.4	436.9	2 005.0	8 967.0	239.3	109.0	173.9	120.0
	3eme Qu.	243.1	305.0	533.9	2 492.0	10 210.0	274.9	123.4	226.6	132.8
	Max.	992.5	1 839.0	1 987.0	4 684.0	13 660.0	13 660.0	199.9	865.3	865.3
	<i>Horizon E Min.</i>	<i>100.0</i>	<i>100.0</i>	<i>100.9</i>	<i>1 019.0</i>	<i>5 950.0</i>	<i>100.0</i>	<i>78.2</i>	<i>78.2</i>	<i>78.2</i>

	<i>Horizon E 1er Qu.</i>	118.4	135.9	213.3	1 206.0	6 762.0	123.8	86.3	94.7	86.9
	<i>Horizon E Médiane</i>	151.5c	187.9a	326.2a	2 008.0a	7 114.0a	165.8c	97.6c	136.0c	99.8c
	<i>Horizon E Moyenne</i>	196.0	260.0	424.7	2 096.0	8 168.0	234.2	107.1	167.9	116.2
	<i>Horizon E 3eme Qu.</i>	228.4	307.0	522.2	2 773.0	9 049.0	263.3	120.0	222.7	127.4
	<i>Horizon E Max.</i>	998.3	1 984.0	1 987.0	4 895.0	13 660.0	13 660.0	199.9	865.3	865.3
BT	FUM_50_60									
	Min.	100.0	100.0	104.0	1 004.0	5 763.0	100.0	78.2	78.2	78.2
	1er Qu.	119.4	130.2	193.2	1 258.0	6 856.0	124.7	88.0	112.1	89.8
	Médiane	154.5	177.6	285.9	2 161.0	7 949.0	168.8	102.1	201.4	108.0
	Moyenne	194.9	234.8	379.5	2 334.0	7 949.0	229.4	111.8	200.0	130.4
	3eme Qu.	227.8	278.0	466.8	3 048.0	9 042.0	260.7	128.2	251.7	146.3
	Max.	991.3	1 983.0	1 899.0	4 876.0	10 140.0	10 140.0	199.9	1 181.0	1 181.0
	FUM_60_70									
	Min.	100.0	100.0	101.1	1 023.0	5 063.0	100.0	78.2	77.7	77.7
	1er Qu.	117.9	126.7	194.9	1 152.0	5 446.0	122.6	88.4	116.0	90.8
	Médiane	147.7	166.5	292.8	2 115.0	5 830.0	161.3	103.0	206.0	110.9
	Moyenne	186.3	221.1	392.9	2 023.0	6 427.0	223.5	112.6	216.8	139.3
	3eme Qu.	214.6	252.6	480.5	2 633.0	7 109.0	246.3	129.8	268.6	154.9
	Max.	996.1	1 880.0	1 996.0	3 520.0	8 389.0	8 389.0	199.9	1 211.0	1 211.0
	FUM_70_80									
	Min.	100.0	100.0	100.0	1 005.0	5 026.0	100.0	78.2	78.0	78.0
	1er Qu.	120.0	131.1	198.9	1 297.0	5 524.0	126.5	89.0	138.4	92.9
	Médiane	152.3	176.9	294.5	2 231.0	7 470.0	168.5	104.6	224.3	119.4
	Moyenne	185.8	232.5	383.1	2 168.0	7 160.0	229.2	114.4	256.1	160.2

	3eme Qu.	215.0	274.6	472.1	2 739.0	8 499.0	255.6	133.4	311.4	178.6
	Max.	996.0	1 989.0	1 963.0	4 992.0	9 279.0	9 279.0	200.0	1 918.0	1 918.0
	FUM_80_90									
	Min.	100.0	100.0	100.9	1 015.0	-	100.0	78.2	77.5	77.5
	1er Qu.	121.0	132.2	194.6	1 169.0	-	126.9	88.4	124.5	91.0
	Médiane	157.0	180.5	285.9	2 041.0	-	172.0	103.2	212.1	112.4
	Moyenne	196.7	239.8	376.3	2 022.0	-	232.0	113.0	226.6	142.7
	3eme Qu.	227.7	285.5	455.1	2 487.0	-	266.1	130.7	278.2	159.3
	Max.	990.5	1 817.0	1 938.0	4 460.0	-	4 460.0	199.9	1 735.0	1 735.0
	FUM_90_100									
	Min.	100.0	100.0	105.8	1 023.0	16 330.0	100.0	78.2	78.0	78.0
	1er Qu.	123.2	131.9	196.0	1 060.0	16 330.0	129.1	88.2	112.4	93.1
	Médiane	165.2	183.0	303.7	1 452.0	16 330.0	178.9	103.4	187.9	121.7
	Moyenne	202.4	241.6	402.7	1 965.0	16 330.0	239.7	113.5	226.3	165.8
	3eme Qu.	243.0	295.0	509.3	2 310.0	16 330.0	274.8	132.0	279.0	185.7
	Max.	874.4	1 561.0	1 911.0	4 926.0	16 330.0	16 330.0	199.9	1 461.0	1 461.0
	<i>Horizon BT Min.</i>	<i>100.0</i>	<i>100.0</i>	<i>100.0</i>	<i>1 004.0</i>	<i>5 026.0</i>	<i>100.0</i>	<i>78.2</i>	<i>77.5</i>	<i>77.5</i>
	<i>Horizon BT 1er Qu.</i>	<i>119.7</i>	<i>129.9</i>	<i>195.6</i>	<i>1 159.0</i>	<i>5 644.0</i>	<i>125.5</i>	<i>88.4</i>	<i>122.0</i>	<i>91.2</i>
	<i>Horizon BT Médiane</i>	154.2b	175.7c	292.4b	2 093.0a	7 470.0a	168.8b	103.2a	210.6a	113.1a
	<i>Horizon BT Moyenne</i>	<i>192.3</i>	<i>232.8</i>	<i>385.7</i>	<i>2 113.0</i>	<i>7 937.0</i>	<i>229.9</i>	<i>113.0</i>	<i>229.9</i>	<i>145.7</i>
	<i>Horizon BT 3eme Qu.</i>	<i>223.8</i>	<i>274.0</i>	<i>475.6</i>	<i>2 721.0</i>	<i>8 889.0</i>	<i>259.4</i>	<i>130.7</i>	<i>280.9</i>	<i>161.3</i>
	<i>Horizon BT Max.</i>	<i>996.1</i>	<i>1 989.0</i>	<i>1 996.0</i>	<i>4 992.0</i>	<i>16 330.0</i>	<i>16 330.0</i>	<i>200.0</i>	<i>1 918.0</i>	<i>1 918.0</i>
C	FUM_110_120									
	Min.	100.0	100.0	101.8	1 031.0	-	100.0	78.2	77.5	77.5

	1er Qu.	125.0	138.0	209.5	1 191.0	-	130.6	87.5	106.1	91.4
	Médiane	169.2	191.8	313.1	1 274.0	-	180.8	101.6	165.1	115.2
	Moyenne	204.4	252.1	401.0	1 880.0	-	231.3	111.7	209.2	153.8
	3eme Qu.	243.4	305.4	499.3	2 355.0	-	272.8	128.9	258.0	170.1
	Max.	993.0	1 695.0	1 766.0	3 751.0	-	3 751.0	199.9	2 210.0	2 210.0
	FUM_140_150									
	Min.	100.0	100.0	102.2	1 093.0	6 442.0	100.0	78.2	77.7	77.7
	1er Qu.	118.6	135.4	237.1	1 222.0	6 507.0	123.6	86.1	95.0	88.2
	Médiane	154.1	182.2	349.3	2 075.0	6 571.0	165.7	96.9	125.4	104.1
	Moyenne	183.8	227.2	418.3	2 130.0	6 571.0	209.1	106.1	154.7	126.4
	3eme Qu.	217.5	267.6	516.5	2 442.0	6 636.0	240.9	118.8	193.8	139.6
	Max.	984.6	1 622.0	1 779.0	4 529.0	6 700.0	6 700.0	199.9	1 151.0	1 151.0
	<i>Horizon C Min.</i>	<i>100.0</i>	<i>100.0</i>	<i>101.8</i>	<i>1 031.0</i>	<i>6 442.0</i>	<i>100.0</i>	<i>78.2</i>	<i>77.5</i>	<i>77.5</i>
	<i>Horizon C 1er Qu.</i>	<i>121.7</i>	<i>136.7</i>	<i>217.1</i>	<i>1 191.0</i>	<i>6 507.0</i>	<i>127.1</i>	<i>87.1</i>	<i>102.1</i>	<i>90.6</i>
	<i>Horizon C Médiane</i>	161.9a	187.4b	332.2a	1 879.0a	6 571.0a	173.6a	100.4b	151.9b	112.0b
	<i>Horizon C Moyenne</i>	<i>195.0</i>	<i>240.4</i>	<i>407.3</i>	<i>1 998.0</i>	<i>6 571.0</i>	<i>221.2</i>	<i>110.3</i>	<i>196.5</i>	<i>147.3</i>
	<i>Horizon C 3eme Qu.</i>	<i>231.7</i>	<i>285.1</i>	<i>506.6</i>	<i>2 430.0</i>	<i>6 636.0</i>	<i>257.1</i>	<i>126.2</i>	<i>242.9</i>	<i>161.5</i>
	<i>Horizon C Max.</i>	<i>993.0</i>	<i>1 695.0</i>	<i>1 779.0</i>	<i>4 529.0</i>	<i>6 700.0</i>	<i>6 700.0</i>	<i>199.9</i>	<i>2 210.0</i>	<i>2 210.0</i>

Facteur de forme - FUM

Horizon	Lames	Macroporosité						Argile illuviale		
		Racines	Assemblage	Fentes	Endogés	Anéciques	Total	Papules	Revêtements	Total
	Horizon E Min.	1.075	2.500	4.000	1.480	2.208	1.075	1.260	1.282	1.260
	Horizon E 1er Qu.	1.593	2.693	4.333	2.077	2.779	1.695	1.769	1.930	1.786
	Horizon E Médiane	1.830	2.933	4.804	2.393	3.583	2.070	2.032	2.336	2.067
	Horizon E Moyenne	1.855	3.028	5.425	3.144	4.392	2.361	2.151	2.599	2.218
	Horizon E 3eme Qu.	2.109	3.302	5.786	3.450	5.407	2.670	2.401	2.943	2.468
	Horizon E Max.	2.500	4.000	26.820	13.530	9.005	26.820	7.640	10.990	10.990
	Horizon BT Min.	1.060	2.500	4.000	1.436	4.481	1.060	1.213	1.262	1.213
	Horizon BT 1er Qu.	1.576	2.712	4.473	2.101	8.500	1.711	1.797	2.114	1.852
	Horizon BT Médiane	1.816	2.985	5.280	3.272	23.290	2.141	2.085	2.656	2.195
	Horizon BT Moyenne	1.843	3.066	6.486	9.206	21.800	2.678	2.224	2.962	2.431
	Horizon BT 3eme Qu.	2.101	3.373	6.852	11.970	33.980	2.910	2.491	3.463	2.727
	Horizon BT Max.	2.500	4.000	46.700	85.260	41.340	85.260	8.308	18.630	18.630
	Horizon C Min.	1.125	2.500	4.000	1.613	3.709	1.125	1.236	1.241	1.236
	Horizon C 1er Qu.	1.584	2.682	4.328	1.918	7.067	1.688	1.783	2.042	1.862
	Horizon C Médiane	1.826	2.929	4.837	2.039	10.430	2.069	2.071	2.540	2.222
	Horizon C Moyenne	1.849	3.025	5.460	7.403	10.430	2.367	2.197	2.877	2.489
	Horizon C 3eme Qu.	2.111	3.297	5.842	5.475	13.780	2.659	2.458	3.299	2.781
	Horizon C Max.	2.500	3.999	22.350	34.120	17.140	34.120	6.879	22.670	22.670

Titre : Quantification par approche micromorphologique couplée à de l'analyse d'images de l'effet de la mise en culture et de l'apport de matières organiques sur l'intensité et la dynamique des processus de lessivage et de bioturbation à l'échelle pluri décennale

Mots clés : agriculture, analyse d'images, bioturbation, illuviation, micromorphologie, pédogénèse

Résumé : La capacité du sol à fournir de nombreux services écosystémiques dépend de propriétés qui évoluent en permanence sous l'effet de multiples processus. Or, malgré leur importance, les dynamiques des processus de lessivage et de bioturbation de la fraction $< 2 \mu\text{m}$ sont peu connues. Nous nous sommes alors fixés pour objectifs de i) développer et valider une méthode de quantification par analyse d'images de l'intensité de ces deux processus, ii) quantifier l'effet d'un à deux siècles de mise en culture et d'une dizaine d'années d'apports répétés de fumier sur leur intensité, et iii) d'en déduire des informations sur leur dynamique. Notre procédure d'analyse d'images repose sur une approche colorimétrique et texturale permettant de prendre en compte les différents niveaux d'organisation des sols. Le volume de sol bioturbé depuis 10 000 à 15 000 ans, est compris entre 65% du volume total à 40 cm de profondeur et 20 à 30% du volume total à 150

cm de profondeur soit une masse de sol déplacée de l'ordre de 6 500 $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ou 1 700 $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$ de fraction fine. Le processus d'illuviation est, quant à lui, à l'origine d'un flux de fraction fine de 1 100 $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$. Les processus étudiés se sont montrés sensibles et étonnement réactifs aux forçages anthropiques. Deux cents ans de mise en culture ont eu pour résultats : i) une évolution de la structuration des sols sur au moins un mètre de profondeur, ii) une modification de l'architecture du volume de sol remanié par les vers de terre, et iii) une intensification du processus de lessivage. Une dizaine d'années d'apports répétés de fumier ont à l'inverse été en mesure de tamponner la plupart de ces évolutions. Cette réactivité inattendue des sols représente une opportunité en ce qu'il est possible d'orienter ces évolutions en fonction d'un objectif d'atténuation des effets du changement climatique notamment.

Title : Quantification by a combination of a micromorphological approach with image analysis of lessivage and bioturbation rates in soils in response to land use and agricultural practices changes at a pluri-decennial time scale

Keywords : agriculture, image analysis, bioturbation, illuviation, micromorphology, pedogenesis

Abstract : The intensity at which soils provide ecosystem services are function of soil properties that permanently evolved according to numerous processes. Lessivage and bioturbation are of crucial importance as they imply the clay size fraction but are still poorly characterized. This study aims at i) developing a digital 2D image analysis method to quantify both processes intensity, ii) quantifying the effect of two centuries of continuous cultivation and of a decade of organic amendments spreading on their intensity, and iii) characterizing their dynamics. We succeeded in quantifying those processes by carefully considering different levels of soil organization while combining a colorimetric and a textural approach. The percentage volume of worm-worked soil since 10 000 to

15 000 years is 65% at 40 cm depth and between 20 and 30% at 150 cm depth that corresponds to a soil mass flow of 6 500 $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$, i.e. 1 700 $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$ of clay size fraction. Illuviation is responsible for a clay size fraction mass flow of 1 100 $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$. On a time scale as short as two centuries, cultivation was found to induce i) a change of the soil poral network characteristics until 1 meter depth, ii) a modification of the structure of the worm-worked soil volume, and finally iii) an increase of the lessivage intensity. A decade of organic matter spreading tended to lower the intensity of lessivage. Finally, our study points out the fact that soils are highly reactive and that our method may be particularly helpful to predict soil evolution while facing climate change among others.



