



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

UNIVERSITE DE LORRAINE

Ecole Doctorale : Sciences et Ingénierie
des Ressources, Procédés, Produits, Environnement
RP2E

Laboratoire Sols et Environnement
UMR 1120, Université de Lorraine-INRA

Thèse

Présentée en vue de l'obtention du grade de
Docteur en Sciences Agronomiques
de l'Université de Lorraine

Par

Nouhou Salifou JANGORZO

Quantification du processus d'agrégation dans les Technosols

Soutenue le 12 Février 2013 devant le Jury composé de :

Jérôme CORTET	Maître de Conférences, Université de Montpellier 3	Invité
Isabelle COUSIN	Directeure de Recherches, INRA, Orléans	Rapporteur
Vincent HALLAIRE	Chargé de Recherches, HDR/INRA, Rennes	Rapporteur
Yves LE BISSONNAIS	Directeur de Recherches, INRA, Montpellier	Examineur
Christophe SCHWARTZ	Professeur, Université de Lorraine	Directeur de Thèse
Christian WALTER	Professeur, Agrocampus-ouest, Rennes	Examineur
Françoise WATTEAU	Ingénieure de Recherches, HDR/CNRS, Nancy	Codirectrice de Thèse

Remerciements

Chaque doctorant fuse d'imagination pour faire une thèse personnelle, propre et unique en son genre. En parcourant la plupart de leurs travaux, on lira aisément que dans la thèse il y a des moments d'incertitudes. Au début, à défaut de ne pas y croire, je me posais la question : en quoi une thèse peut contenir des moments d'incertitudes. Il fallut que je sois confronté aux réalités de la thèse pour que je m'en rende compte. Et à chaque fois, il y a des personnes autour de moi qui me soutiennent pour dépasser ces moments difficiles. Alors comment ne pas remercier toutes et tous ceux qui ont contribué, scientifiquement, socialement, moralement, psychologiquement et financièrement à lever ces incertitudes ? Si je tente de les nommer et de surcroît tenter de dire sur quel plan chacun m'a soutenu, j'en oublierai certainement. Alors par précaution, qu'ils trouvent ici l'expression de mes plus sincères remerciements.

A

Table des matières

Remerciements	A
Table des matières	a
Table des figures	i
Table des tableaux	I
Table des équations.....	B
Introduction générale	1
Chapitre I. Méthodes d'étude de l'agrégation	5
I. Introduction	6
II. Les processus d'agrégation	7
2.1. Définition de l'agrégation	7
2.2. Les différents types d'agrégats	8
2.3. Mécanismes d'agrégation	9
2.3.1. Formation des microagrégats : théorie de l'association organominérale élémentaire	9
2.3.2. Formation des macroagrégats	10
III. Les méthodes d'étude de l'agrégation	11
3.1. Les différentes techniques d'étude de la stabilité des agrégats..	11
3.1.1. Test de stabilité des macroagrégats	12
3.1.2. Tests de stabilité des microagrégats	13
3.2. Expression des résultats	15
IV. Rôles des facteurs d'agrégation dans la stabilité des agrégats.....	15
4.1. Rôle des facteurs internes.....	16
4.2. Rôle des facteurs externes	18
4.2.1. Les variables environnementales	18

4.2.2.	Les variables biologiques	18
4.2.3.	Les variables anthropiques.....	22
V.	Quantification de l'agrégation.....	23
5.1.	Définition de la quantification.....	23
5.2.	Pourquoi quantifier : intérêt de la quantification ?	23
5.3.	Quantification en sciences du sol	23
5.4.	Quantification de la stabilité des agrégats.....	24
5.5.	Quantification par analyse d'image.....	25
5.5.1.	Acquisition des images	26
5.5.2.	Traitement des images	26
5.5.3.	Correction statistique/préparation de l'analyse.....	28
5.5.4.	Mesure des paramètres d'intérêt	29
VI.	Analyse des manques et nouvelles hypothèses pour l'étude de l'agrégation des Technosols	29
6.1.	Limites des méthodes actuelles d'étude de l'agrégation	29
6.2.	Questions et hypothèses de la thèse.....	30
	Chapitre II. Caractérisation de Technosols construits.....	31
I.	Introduction	32
II.	Matériel et méthode	32
2.1.	Site expérimental	32
2.2.	Echantillonnage.....	33
2.3.	Opération d'homogénéisation des échantillons	34
2.4.	Fractionnement granulodensimétrique à l'eau.....	36
2.5.	Analyse texturale	38
2.6.	Réalisation et description de lames minces de sol	38
III.	Résultats et discussions	39
3.1.	Diversité des amalgames identifiés par quartage	39
3.1.1.	Campagne de 2008, T0	40
3.1.2.	Campagne de 2009	40

3.2.	Évolution des amalgames de 2008 à 2009	41
3.3.	Diversité des amalgames identifiés sur lames minces	42
3.4.	Evolution de la stabilité structurale au cours du temps.....	44
3.4.1.	Effet du temps sur la stabilité structurale	44
3.4.2.	Effet des modalités sur la stabilité structurale	46
IV.	Conclusion.....	49
Chapitre III. Premiers stades d'évolution de la porosité de Technosols construits		50
I.	Introduction	51
II.	Matériels et méthodes.....	51
2.1.	Echantillonnage.....	51
2.2.	Fabrication de lames minces	51
2.3.	Acquisition d'images	52
2.4.	Protocole d'analyse d'images de lames minces.....	52
2.4.1.	Filtrage	52
2.4.2.	Segmentation/ Texture	52
2.4.3.	Transformation de niveau de gris	53
2.4.4.	Classification	53
2.4.5.	Seuillage : Binarisation	54
2.4.6.	Point opération : arithmétique	54
2.4.7.	Morphologie : d-opening (ouverture par un disque)	54
2.4.8.	Analyse	54
2.5.	Correction d'erreurs d'analyse	57
2.6.	Analyse statistique	57
III.	Résultats et discussions	58
3.1.	Ordinogramme du protocole d'analyse d'images	58
3.2.	Exemple de résultats obtenus	60
3.3.	Évolution de la porosité au cours du temps.....	61
3.3.1.	Dynamique de la porosité	61
3.3.2.	Choix de paramètres comme indicateurs d'évolution de la porosité. 67	

IV.	Conclusion.....	74
 Chapitre IV. Genèse de l'agrégation dans de Technosols construits.....		
75		
I.	Introduction	76
II.	Matériels et méthode	76
2.1.	Echantillonnage.....	76
2.2.	Définition de l'agrégat en analyse d'images.....	78
2.3.	Acquisition d'images	78
2.4.	Protocole de quantification des agrégats	78
2.4.1.	Miscellaneous : convert	79
2.4.2.	Color dilation	79
2.4.3.	Morphology : hole-fill	79
2.4.4.	Point detection : interior point	80
2.4.5.	Fast morphology: separation	80
2.4.6.	Analysis	81
2.4.7.	Morphology: d-dilation.....	81
2.4.8.	Analysis	81
2.5.	Détermination de l'incertitude	81
III.	Résultats et discussions	82
3.1.	Ordinogramme du protocole	82
3.2.	Validation du protocole.....	84
3.3.	Evolution des macroagrégats dans un Technosol construit.....	86
3.3.1.	Effet du temps sur l'évolution de l'agrégation	86
3.3.2.	Effet des modalités sur l'évolution de l'agrégation	88
3.3.3.	Choix des paramètres comme indicateurs de l'agrégation.....	90
3.4.	Relation entre l'agrégation et la porosité.....	91
IV.	Conclusion.....	93
 Chapitre V. Dynamique d'agrégation dans de Technosols ..		
95		
I.	Introduction	96
II.	Matériels et méthode	96

2.1.	Agrégatron : dispositif de suivi <i>in situ</i> de l'agrégation	96
2.1.1.	Présentation générale de l'agrégatron	96
2.1.2.	Les cosmes	97
2.1.3.	Les scanners.....	99
2.1.4.	Les ordinateurs	99
2.1.5.	Le programme « agrégatron ».....	99
2.1.6.	Description de l'opération de scan.....	100
2.2.	Constitution et choix du mélange de sol	100
2.2.1.	Caractéristiques des matériaux parents du mélange	100
2.2.2.	Préparation et choix du mélange	101
2.2.3.	Préparation du sol construit	103
2.3.	Choix de facteurs d'agrégation	103
2.3.1.	Modalité plante	103
2.3.2.	Modalité faune et plante	104
2.3.3.	Modalité humectation-dessiccation	105
2.3.4.	Modalités témoin	105
2.4.	Plan et conditions de l'expérience	105
2.5.	Exploitation des images	107
2.5.1.	Montage de films	107
2.5.2.	Choix des images à analyser	107
2.5.3.	Analyse d'images.....	108
III.	Résultats et discussion	111
3.1.	Suivi des paramètres de l'expérience	111
3.1.1.	Germination, croissance des plantes et survie des vers .	111
3.1.2.	Dynamique de l'eau dans les cosmes	114
3.1.3.	Description globale des comportements des agents	115
3.2.	Dynamique de la structure du Technosol construit	120
3.2.1.	Les images choisies pour analyse.....	121
3.2.2.	Dynamique de la porosité et de l'agrégation dans la modalité « T ».....	121
3.2.3.	Dynamique de la porosité et de l'agrégation dans la modalité « HD ».....	122
3.2.4.	Dynamique de la porosité et de l'agrégation dans la modalité « P ».....	122
3.2.5.	Dynamique de la porosité et de l'agrégation dans la modalité « FP ».....	122
3.3.	Effets des agents sur les paramètres de structure	123
3.3.1.	Etude de l'homogénéité du système à D0	123
3.3.2.	Effets des agents sur la porosité au cours du temps	124
3.3.3.	Effet des agents sur l'agrégation au cours du temps	126
3.4.	Dynamique de structure en fonction de l'intensité des agents	129
3.4.1.	Effet de l'âge des racines sur la porosité et l'agrégation	130

3.4.2.	Effet de l'intensité des actions de vers sur la porosité ...	131
IV.	Conclusion.....	132
	Chapitre VI. Discussion générale.....	134
I.	Introduction	135
II.	Etude qualitatives <i>vs</i> quantitatives de la structure .	135
2.1.	Etudes qualitatives de la structure	135
2.2.	Etudes quantitatives de la structure	136
III.	Etude indirectes <i>vs</i> directes de la structure	136
3.1.	Etudes indirectes de la structure	136
3.2.	Etudes directes de la structure	137
IV.	Etudes instantanées <i>vs</i> dynamiques de la structure	139
4.1.	Les études instantanées de la structure	139
4.2.	Etudes dynamiques de la structure.....	139
V.	Vers la modélisation de la pédogénèse au sein des Technosols	140
5.1.	Modèle conceptuel de l'agrégation du Technosol	140
5.2.	Contribution à la création d'un module « agrégation » dans les modèles intégrés de fonctionnement et d'évolution de sols	142
	Conclusion générale	143
	Perspectives.....	146
	Annexe1. Données quantifiées de porosité et agrégation..	148
	Annexe2. Takaitau (Hausa abstract)	151
	Références bibliographiques	152

Table des figures

Figure 1. Rôle de l'agrégation dans la pédogenèse des sols	3
Figure 2. Interactions et rétroactions multiples entre les cinq facteurs majeurs influençant la formation et la stabilité des agrégats (d'après Six <i>et al.</i> , 2004)	7
Figure 3. Scénarios possibles d'agrégation (Lal et Bronick, 2005) ; MO : matière organique ; POM : matière organique élémentaire ; Ar : argiles ; P : particule	9
Figure 4. Différentes méthodes d'étude de la stabilité des macroagrégats	12
Figure 5. Différentes méthodes d'étude de la stabilité des microagrégats.	14
Figure 6. Illustration simple de la segmentation, inspiré de Dupas (2009)	27
Figure 7. Site expérimental du GISFI, (a) : vue générale du site, (b) : maillage de la parcelle d'un hectare montrant les deux modalités de construction de sol.....	33
Figure 8. Prélèvement d'échantillons non perturbés	34
Figure 9. Echantillon de la maille L4 sur le quartier pour description. 35	
Figure 10. Schéma général d'homogénéisation et séparation des échantillons.....	36
Figure 11. Fractions récupérées par tamisage.....	37
Figure 12. Décantation des échantillons avant prélèvement (photo, Adeline Bouchar)	37
Figure 13. Exemples d'amalgames rencontrés lors du quartage. a) TIT/SPP avec noyau de SPP ; b) TIT/SPP avec un noyau noir.....	39
Figure 14. Amalgame de racines enchevêtrées	41
Figure 15. Évolution du nombre d'amalgames au cours du temps. Ah- SPP : amalgame homogène de SPP pur ; Ah-TIT/SPP : amalgame homogène de TIT/SPP ; Ah-SPP avec des substances brunes ; Ahe- TIT/SPP_sb : amalgame hétérogène de TIT/SPP avec substances brunes ; N-SPP_no-tit : nodule de SPP avec un noyau de TIT ; N- TIT/SPP_no-sp ; nodule de TIT/SPP avec noyau de substances brunes ; N-TIT/SPP_no-SPP : nodule de TIT/SPP avec noyau de SPP.....	41
Figure 16. Deux amalgames homogènes de TIT/SPP. (a) extraits d'image de la maille 17 en 2008 (b). (c) est sa correspondante en 2010. TIT: terre industrielle traitée, SPP : sous-produit papetier, CDV : compost déchet vert.....	43
Figure 17. Amalgames observés sur les lames minces : a) TIT/SPP avec un noyau de TIT ; b) TIT/SPP avec un noyau de SPP et c) TIT/SPP avec un caillou.....	43
Figure 18. Rôle de la matière organique et des carbonates sur la formation de macroagrégats à T0 (a) et T2 (b). T0 : 2008, T2 : 2010, AvDc : avant décarbonatation, ApDc : après décarbonatation, Gra : granulodensimétrie. Mp : matériaux parents (TIT/SPP). Les points entourés de cercle vert indiquent les fractions significativement différentes entre Gra et AvDc.	45

Figure 19. Influence des carbonates sur la distribution granulométrique. T0 : 2008, T2 : 2010, AvDc : avant décarbonatation (a), ApDc : après décarbonatation (b), Mp : matériau parent (TIT/SPP). Les points entourés de cercle vert indiquent les fractions significativement différentes entre T0 et T2.	46
Figure 20. Evolution de la distribution pondérale des fractions granulodensimétriques en fonction du temps et des modalités de construction de sol. T0 : 2008, T2 : 2010, Wb : modalité éponge, Co : modalité confinement. SG : sable grossier, LG : limon grossier, LF : limon fin.	47
Figure 21. Plan d'échantillonnage sur la parcelle de 1 hectare. Modalités de construction de sol : Co : confinement, Wb : éponge végétale. .	51
Figure 22. Mode d'expression du diamètre équivalent : (a) image extraite avec Visilog. (b) image équivalente en surface et en diamètre calculée.	55
Figure 23. Illustration de l'expression de l'Intercept et du périmètre de Crofton.....	55
Figure 24. Illustration de l'expression de la distance au plus proche voisin. $d_1 < d_3 < d_2$, mais le plus proche voisin de a est c ; le plus proche voisin de b est c	56
Figure 25. Illustration de l'excentricité de certaines particules extraites avec Visilog. (c) est plus allongée que (b) elle-même plus allongée que (a), ce qui lui donne une excentricité plus grande.....	56
Figure 26. Ordinogramme du protocole de quantification de la porosité par analyse d'images de lames minces.	59
Figure 27. Trois étapes de l'application du protocole sur l'image de la maille 19 du dispositif expérimental (2008). (a) : image originale, (b) : image classée et (c) : image binarisée, (d) : image analysée. La porosité correspond à la couleur blanche (a) et (c), couleur bleu (b) et toutes les sauf le noir (d).	60
Figure 28. Principales étapes de l'application du protocole sur des images agrandies (X20) de la maille 19. (a) : image originale, (b) : image classée, (c) image binarisée, (d) : image analysée. La porosité correspond à la couleur blanche (a) et (c), couleur bleu (b), toutes les couleurs sauf noire (d).	61
Figure 29. Evolution des paramètres de porosité nombre et pourcentage de porosité (a), volume et surface moyenne d'un pore (b) en fonction du temps (A) (T0 : 2008 et T2 : 2010) et en fonction des modalités de construction de sol calculés à partir des données non classées. N : nombre total des pores, A : % de porosité, V : volume des pores, Ap : surface des pores.	62
Figure 30. Evolution des paramètres de porosité, nombre et diamètre (a), surface et nombre (b) sur données classées en fonction des modalités de construction de sol en 2008 et 2010. Wb : modalité éponge végétale, Co : modalité confinement. N : nombre, Ed : diamètre équivalent, A : surface. VCM : very coarse macropores ($>2000 \mu\text{m}$), CM : coarse macropores ($500-2000 \mu\text{m}$), MM : medium macropores ($50-500 \mu\text{m}$).....	64
Figure 31. Evolution de la distance des CM ($500-200 \mu\text{m}$) et volume des VCM ($>2000 \mu\text{m}$) en fonction du temps et des modalités de	

constructions de sol. le volume est exprimé en fonction de l'intensité de pixels par mm ² . V : volume, D : distance, Wb : modalité éponge végétale, Co : modalité confinement, pour respectivement VCM : very coarse macropores (>2000 µm), CM : coarse macropores (500-2000 µm).	64
Figure 32. Concept d'évolution de l'architecture de la macroporosité (>25 µm). En gris : les pores, en blanc : la matrice du sol, T0 : 2008, T2 : 2010, N : nombre des pores, A : surface, V : volume, Ed : diamètre équivalent des VCM (>2000 µm).	65
Figure 33. Distribution de la porosité d'un Technosol construit exprimée en pourcentage de la surface moyenne en fonction du diamètre équivalent et de l'état de l'eau. (Ed : diamètre équivalent, Pf : point de flétrissement, Mp : micropores, FM : fine micropores, Cc : capacité au champ, MM : medium macropores, CM : coarse macropores, VCM : very coarse macropores, T0 : 2008, T2 : 2010).	66
Figure 34. Projection des paramètres de porosité non classés dans un plan défini par les facteurs 1 (F1) et 2 (F2).	68
Figure 35. Distribution des échantillons de 2008 (T0) et 2010 (T2) en fonction des paramètres de porosité non classés dans un plan défini par les facteurs 1 (F1) et 2 (F2) de l'ACP. En noir : échantillons de 2008, en gris : les échantillons de 2010.	69
Figure 36. Projection des variables de porosité en fonction des données classées dans un plan défini par les facteurs 1 et 2 (a), 1 et 3 (b) de l'ACP. N : nombre, A : surface, P : périmètre, D : distance, V : volume, Ec : excentricité, Sf : forme, Ed : diamètre équivalent, Ic : indice de connectivité. VCM : very coarse macropores (>2000 µm), CM : coarse macropores (500-2000 µm), MM : medium macropores (50-500 µm), FM : fine macropores (25-50 µm).	70
Figure 37. Distribution des échantillons de 2008 (T0) et 2010 (T2) en fonction des paramètres de porosité quantifiés sur les données classées, dans un plan défini par les facteurs 1 et 2 de l'ACP. En noir : les échantillons de 2008, en gris : échantillons de 2010.	71
Figure 38. Distribution des individus en 2008 (T0) et 2010 (T2) sur les facteurs 1 (F1) et 3 (F3) après une ACP sur les variables classées. En noir : échantillons de 2008 ; en gris : échantillons de 2010.	71
Figure 39. Modèle conceptuel de l'évolution général d'un sol (d'après Leguedois <i>et al.</i> (2012) soumis), adapté de Lin (2011). L'axe vertical est une représentation monodimensionnelle des multiples variables qu'on peut suivre pour étudier l'évolution d'un sol.	73
Figure 40. Maillage et plan d'échantillonnage de la parcelle. Modalités de construction de sol : (Wb) « éponge végétale » ; (Co) : « confinement ».	77
Figure 41. Ordinogramme du protocole de quantification des agrégats par analyse d'images de lames minces d'un Technosol.	83
Figure 42. Exemple de l'application du protocole sur des images d'un mélange artificiel (a), d'un sol agricole bien agrégé (c), d'un sol forestier bien agrégé (d) et les résultats correspondants (b), (d) et (f) respectivement en vue de détermination de l'incertitude. ...	84
Figure 43. Matrice de corrélation entre le nombre d'agrégats artificiels (a), des agrégats de sol agricole (b), d'agrégats d'un sol forestier	

(c) détectés par analyse d'images et ceux comptabilisés à l'œil nu.	85
Figure 44. Evolution du nombre total des agrégats classés en fonction du diamètre équivalent (a) et de la surface totale des agrégats (b) en fonction du temps. T0 : 2008, T2 : 2010. CM : coarse macroaggregates, MM : Medium macroaggregates.	87
Figure 45. Evolution du nombre des agrégats (a), de la surface totale des agrégats (b) et de l'indice de forme des agrégats (c) en fonction des modalités de construction de sol et du temps sur les données non classées. Wb : modalité « éponge végétale », Co : modalité « confinement ». T0 : 2008, T2 : 2010.	88
Figure 46. Evolution du nombre des agrégats (a), de la surface des agrégats (b et c), de l'indice de forme et de l'excentricité des agrégats (d) en fonction des modalités de construction de sol sur les données classées. N : nombre, Wb : modalité éponge végétale, Co : modalité confinement. T0 : 2008, T2 : 2010. CM : coarse macroaggregates (200 – 2000 µm), MM : medium macroaggregates (50 – 200 µm).	89
Figure 47. Projection des variables (a) et distribution des échantillons (b) dans le plan défini par les facteurs 1 (F1) et 2 (F2) d'une ACP sur les données non classées. N : nombre, A : surface totale d'agrégats en pourcentage, P : périmètre, Ed : diamètre, Ec : excentricité, Sf : forme. T0 : 2008, T2 : 2010, M : maille, en noir : échantillons de 2008, en gris : échantillons de 2010.	90
Figure 48. Projection des variables (a) et distribution des échantillons (b) dans le plan défini par les facteurs 1 (F1) et 2 (F2) d'une ACP sur les données classées. N : nombre, A : surface totale d'agrégats en %, P : périmètre, Ed : diamètre, Ec : excentricité, Sf : forme. T0 : 2008, T2 : 2010, M : maille, en noir : échantillons de 2008, en gris : échantillons de 2010.	91
Figure 49. Relations entre la porosité et les paramètres d'agrégation quantifiés par l'analyse d'images de lames minces d'un Technosol construit en 2008 (a, c) et 2010 (b, d). MIAia : Mean Index of Aggregation,, A : surface totale des agrégats en %, P : surface totale de la porosité en %.	92
Figure 50. Relations entre les paramètres d'agrégation quantifiés par l'analyse d'images de lames minces d'un Technosol construit et par test de granulodensimétrie à l'eau en 2008 (a, c) et 2010 (b, d). MIAia : Mean Index of Aggregation, MWDst : diamètre moyen pondéral.	94
Figure 51. Schéma général du dispositif Agrégatron. 1) couche de gravier ; 2) Mélange TIT/SPP ; 3) couche de compost dans le cosme, A : agrégation.	97
Figure 52. Disposition des matériaux dans le cosme et montage sur scanner.	98
Figure 53. Vue générale de l'application « Agrégatron » montrant les différentes options et paramètres du scan.	100
Figure 54. Exemples d'images des mélanges de TIT/SPP. (a) : Mélange M6 du procédé 1 ; (b) : Mélange M6 du procédé 2. TIT : Terre industrielle traitée ; SPP : Sous-produits papetiers	102

Figure 55. Photo du plan général de l'expérimentation suivant deux blocs (a et b). Modalités étudiées, HD : humectation dessiccation, FP : faune et plante, T : témoin, P : plante, m : indique les modalités « faux témoins » utilisés pour la mesure de l'humidité dans les cosmes.	106
Figure 56. Différents modes d'exploitation et dédiassions des images.	108
Figure 57. Photos du FP_R2 à D43 (a) et D57 (b) montrant le début de fanaison de plantes. FP : faune et plante, R : répétition, D : date.	112
Figure 58. Dynamique de croissance des racines au cours du temps et en fonction des modalités. FP : faune et plante, P : plante, D0 : premier jour de l'expérience, D1 : 92 jours, D2 : 148 jours, D3 : 231 jours.....	113
Figure 59. Dynamique de l'eau dans les cosmes en fonction du temps. T : témoin, HD : humectation dessiccation, P : plante, FP : faune-plante. CC : capacité au champ. a) : fluctuation d'humidité dans les cosmes «témoins de mesure» montrant les cycles d'arrosage ; b) : vitesse moyenne de dessiccation des cosmes en fonction des modalités au cours du temps.	114
Figure 60. Comportement de racines de lupin dans un Technosol construit mis en évidence sur une image PR3 capturée le 17/06/2012 à 23h. RR : réseau racinaire, RP : racine protéoïdes, P : pores, a) jeunes racines formant un réseau dense, b) racines vieillissantes montrant la formation de la porosité.	116
Figure 61. Processus de création (a) et de fermeture (b) de galerie (G) montrant des pores formés et imparfaitement bouchés entre deux dates : D224 à 9h (a) et D231 à 11h. Modalité FPR1.....	118
Figure 62. Impact des racines (a : PR3, D231) et de vers de terre (b : FPR1, D238) sur la structure d'un Technosol construit. Ar : agrégats racinaires formés par l'enchevêtrement des racines primaires, secondaires, tertiaires et protéoïdes ; Ps : particules de sols isolées par de la porosité suite à plusieurs passage de vers ; T : turricules de vers écrasés contre la vitre.....	118
Figure 63. Vers de terre adulte (a) et juvénile (b) dans le cosme de la modalité FPR1, à D249 et D233 respectivement.....	119
Figure 64. Évolution de la porosité au cours des cycles humectation-dessiccation. Fo : fissure ouverte lors du premier cycle humectation-dessiccation (a : HDR3, D52) ; Fb : fissure bouchée par du compost transporté lors du second cycle d'humectation-dessiccation (b : HDR3, D94).	120
Figure 65. Dynamique globale de la porosité (a) et de l'agrégation (b) d'un Technosol construit au cours du temps soumis à l'action des agents. T : témoin, HD : humectation-dessiccation, P : plante, FP : faune-plante.	120
Figure 66. Etat de la porosité et de l'agrégation du système à D0 en fonction des modalités. FP, Faune et plante, P : plante, HD : humectation-dessiccation, T : témoin.....	124
Figure 67. Evolution de la porosité en fonction des agents au cours du temps. T : témoin, HD : humectation-dessiccation, P : plante, FP : faune et plante, F : faune.	124

Figure 68. Influence des racines sur la porosité d'un Technosol construit soumis à l'action des agents plante (a) et faune-plante (b).....	126
Figure 69. Evolution de l'agrégation d'un Technosol construit soumis à l'influence des agents au cours du temps. T : Témoin, HD : humectation-dessiccation, P : plante, FP : faune-plante.	127
Figure 70. Effet de la porosité sur l'évolution de l'agrégation d'un Technosol construit en fonction des agents : plante (a) et faune-plante (b).	128
Figure 71. Influence du système racinaire sur l'agrégation d'un Technosol construit soumis à l'action des agents plantes (a) et faune-plante (b).	128
Figure 72. Extrait de la cartographie globale de l'intensité de l'agent faune indiquant la fréquence des zones prospectées par les vers. Les chiffres indiquent le nombre de fois qu'une zone est prospectée par un ver. Cette carte a été réalisée en subdivisant l'image entière (22 X 29 cm) en de carrés de 5,61 X 5,61 mm et en comptabilisant le nombre de fois qu'un vers est passé dans un carré. Chaque carré a une coordonnée (x, y) en projetant l'abscisse et l'ordonnée sur l'image.	130
Figure 73. Effet de l'âge des racines sur l'évolution de la porosité. D0 : sans racine, RJ : racine jeune, RA : racine âgée, RV : racine vieille, RM : racine morte.	131
Figure 74. Effet de l'intensité de l'activité de vers sur l'évolution de la porosité au cours du temps. Y7 : 19 actions, échantillon de coordonnées (25, 7), A6: 14 actions, échantillon de coordonnées (19,1), S10 : 9 actions, échantillon de coordonnées (1,6), (c)	132
Figure 75. Modèle conceptuel de la dynamique d'agrégation de Technosols construits au cours du temps, soumis à l'action des agents pédogénétiques.	141

Table des tableaux

Tableau 1. Quelques caractéristiques des matériaux parents (d'après Séré <i>et al.</i> , 2008)	32
Tableau 2. Détermination du temps de sédimentation des fractions en fonction de leur diamètre et de la température. PS : profondeur de siphonage ; LG : limon grossier ; LF : limon fin ; A : argile, (h : mn : s) : heure, minute, seconde.	37
Tableau 3. Distributions pondérales en pourcentage (moyenne $\pm$ écart type) des fractions granulométriques obtenues après fractionnement à l'eau et analyse texturale après décarbonatation (en gras entre parenthèses) au cours du temps. T0 : 2008, T2 : 2010.....	44
Tableau 4. Texture en fonction du temps et des modalités de construction de sol (moyenne, $\pm$ écart type). T0 : 2008, T2 : 2010, Wb : modalité éponge, Co : modalité confinement. Les lettres minuscules différentes indiquent une différence significative au sein d'une même année ; les lettres majuscules différentes indiquent une différence significative entre année (Mann-Whitney, $p=0,05$). Les valeurs entre parenthèse en gras sont les résultats de l'analyse granulométrique avant décarbonatation. Ces analyses ont été faites uniquement en 2010.....	48
Tableau 5. Pourcentage de la surface des macropores ($>50 \mu\text{m}$) en 2008 (T0) et 2010 (T2), (moyenne, $\pm$ écart type). A_VCM : surface des VCM ($>2000 \mu\text{m}$), A_CM : surface des CM ($500-2000 \mu\text{m}$), A_MM : surface des MM ($50-500 \mu\text{m}$), A : surface totale de la macroporosité ($>50 \mu\text{m}$). Les valeurs accompagnées d'une même lettre dans une même ligne ne sont pas significativement différentes.	66
Tableau 6. Paramètres non classés des agrégats en fonction du temps et des modalités de construction de sol (moyenne, $\pm$ écart type). T0 : 2008, T2 : 2010. N : nombre total d'agrégats, A : surface des agrégats, P : périmètre, Ed : diamètre, Ec : excentricité, Sf : forme. Les valeurs accompagnées d'une même lettre dans une même colonne ne sont pas significativement différentes.	86
Tableau 7. Atouts et contraintes (non exhaustifs) des méthodes directes et indirectes de quantification de l'agrégation dans un sol.	94
Tableau 8. Quelques caractéristiques des matériaux parents (d'après Séré <i>et al.</i> , 2008)	101
Tableau 9. Proportion des matériaux parents utilisés dans la constitution des mélanges. (a) : Procédé 1 ; (b) : Procédé 2. TIT : terre industrielle traitée ; SPP : sous-produits papetier.....	102
Tableau 10. Récapitulatif des paramètres d'expérience. HD : cycle humectation-dessiccation.	106
Tableau 11. Masse et taux de germination des graines dans les différents cosmes : FP : faune et plante, P : plante, R : répétition, m : répétition de mesure, Moy1 : masse moyenne de graines de lupin, les valeurs entre parenthèse sont celles de la deuxième série.	111

Table des tableaux

Tableau 12. Nombre de plantes, biomasse aérienne des plantes respectivement à D205 (moyenne, $\pm$ écart type). FP : faune et plante, F : faune, R : répétition, m : répétition de mesure, Moy1 : nombre moyen de plante par modalité, Moy2 : biomasse moyenne par modalité. Les valeurs entre parenthèse sont le nombre total de plantes germées par cosme.....	112
Tableau 13. Evolution de la surface racinaire dans les modalités plantes (P) et faune-plante (FP) au cours du temps (moyenne, $\pm$ écart type). Les lettres différentes au sein d'une même colonne indiquent des différences significatives entre modalités.	113
Tableau 14. Chronologie des modifications intervenues sur les racines en fonction des modalités et des répétitions.	117
Tableau 15. Chronologie des différentes modifications observables occasionnées par les vers en fonction des répétitions dans la modalité « faune et plante ».	117

II

Table des équations

$dMdt = ftU - btM$	1	25
$LF = LF + A - A$	2.....	38
$LG = LG + LF + A - LF + A$	3	38
$d2u, v = j - 1p(uj - vj)2 = u - v2$	4.....	53
$Sxi; vi = xi; vixi; xi + vi; vi - xi; vi$	5	53
$xi, vi = k(xik \times vik)$	6	53
$d2xj, vi = Fi1n \times (xj - vi)T \times Fi - 1 \times xj - vi$	7	53
$Fi = 1Ni \times j = 1Nixj - vi \times xj - viT$	8	54
$AX = i, jg(xi, yj)$	9	55
$Ed = (4 \times Area/4)$	10.....	55
$VX = i, jI(xi, yj)$	11.....	56
$Ixi, yj = gxi, yj = 1$	12	56
$Ec x = 4\pi2 (I1 - I2)2A2(x)$	13	56
$Ic = 1 - NcNu$	14.....	56
$Sf(x) = P(x)24\pi A(x)$	15	57
$MWDst = i = 1nxi . wi$	16	76
$MIAia = i = 1nwi /mi$	17	77
$hm = h1m1 + h2m2m1 + m2$	18.....	101
$he = hf - hm$	19.....	101
$he = (m1 + m2)100 \times hf - hm$	20	101
$he = 1100(m1 + m2) \times hf - h1m1 + h2m2m1 + m2$	21	101
$Po = fr \Rightarrow d(Po)dt = dfrdt > 0$	22	141
$Ag = fr \Rightarrow d(Ag)dt = dfrdt > 0$	23	141
$Ag = fPo \Rightarrow dAgdt = dfPodt > 0$	24.....	141
$d(Mo)dt = -kMo$	25.....	141
$dHudt = -vHu$	26	141

$dIvdt = -vHu - kMoEwt$	27	142
$d(Po)dt = dIvdt = -vHu - kMoEwt$	28	142
$Po = fFafHu, Mo$	29.....	142
$Por + Fa > Por + PoFa]$	30	142

Introduction générale

La question principale posée par cette étude est « comment quantifier l'agrégation dans un Technosol ». Cette quantification est recherchée dans un but de modélisation des processus d'agrégation et par là-même du biofonctionnement du sol. La spécificité de l'étude tient ici à son objet : le Technosol. Pour préciser la définition et les enjeux que représentent les Technosols, nous avons opté pour une approche historique. D'abord à commencer par la définition du sol lui-même. En effet, la couverture pédologique, communément appelée sol (Baize et Girard, 2008) est une notion qui a considérablement évolué au cours du temps (Séré, 2007). Les premières définitions présentent le sol comme un élément à part entière et distinct (Joffe, 1936; Rossiter, 2007) ce qui veut dire qu'il peut faire l'objet d'une science distincte de la géologie. D'autres auteurs (Aubert et Boulaine, 1972; Duchaufour *et al.*, 1977; Ramann, 1928) définissent le sol en référence à sa genèse, c'est-à-dire son mécanisme de formation et en particulier les facteurs impliqués.

Le sol est défini comme un ensemble provenant de l'altération de la roche mère sous l'action du climat, des êtres vivants, du relief et du temps (Jenny, 1941). Compte tenu de la diversité des substrats lithologiques, de la variabilité des facteurs pédogénétiques, le sol peut donc être d'une très grande hétérogénéité. Dans d'autres écrits, on retrouve des définitions du sol en lien avec sa fonction de support et de réserve nutritive pour des organismes vivants (Hilgard, 1914; Hollis, 1991). L'une des grandes révolutions dans l'intérêt qu'on accorde au sol, c'est de considérer qu'il est un milieu vivant (Gobat *et al.*, 1998) et donc qu'il peut se dégrader et même « mourir », c'est-à-dire perdre ses principales fonctions, en particulier sous l'influence de l'activité humaine. Les activités humaines varient en fonction des cultures, des régions et des pratiques, ce qui accroît le niveau d'hétérogénéité et de diversité des sols.

En dépit de cette hétérogénéité, les sols ont pu être classés et regroupés, afin de les reconnaître facilement et en avoir une vision d'ensemble. Mais ces travaux de typologie et classification ont concerné principalement les sols dits « naturels » comme les sols agricoles ou forestiers.

Au fil des années plusieurs classifications ont été produites. Ainsi, en France, une typologie des sols a été proposée sur la base de la morphologie des solums, des propriétés et des processus pédogénétiques,

ce qui a abouti au Référentiel Pédologique Français (RPF) (Baize et Girard, 2008). Dans ce référentiel, une nouveauté a été introduite : les sols fortement anthropisés ou Anthrosols. Ils ont été définis comme des sols construits, reconstitués ou considérablement modifiés par l'homme sur au moins 50 cm de profondeur (Baize et Girard, 2008). Mais il faut savoir que les sols anthropisés ont été déjà définis auparavant.

La première fois qu'on a fait référence à des sols anthropisés dans la classification des sols date de 1980 dans la « *soil classification for England and Wales* » de Avery (1980) à Harpenden. C'est depuis ce travail de pionnier que d'autres travaux ont été réalisés pour qualifier et caractériser les sols anthropisés. C'est le cas notamment d'Anthrosols en Australie (Isbell, 2002) qui désignent des sols scellés et fortement modifiés sur 30 cm de profondeur. En France aussi, sont qualifiés d'Anthrosols des sols modifiés ou fabriqués par l'homme, en milieu rural ou urbain (Baize et Girard, 1992).

Outre la France et l'Angleterre, d'autres pays comme les USA, le Canada ou l'URSS, disposent de leurs propres référentiels ou système de classification des sols. Dans le but de corrélérer et harmoniser les systèmes de classification de sols existants dans différents pays et dans une perspective de facilitation et standardisation des échanges d'informations dans le domaine des sciences du sol, la FAO, Food and Agriculture Organisation (IUSS_Working_Group_WRB) a proposé d'établir un système de classification international des sols. Ceci a abouti à la World Reference Base for Soil Resources (WRB) établie sur la base des propriétés du sol définies en termes d'horizons et de caractéristiques diagnostiques (IUSS_Working_Group_WRB, 2006). Dans cette classification, les sols fortement anthropisés sont définis comme des Technosols. Tels que définis dans ce référentiel, ce sont des sols composés à plus de 20% d'artefacts (matériaux technogéniques), en volume ou en masse, ou sols imperméabilisés à plus de 95% en surface ou dans les 100 cm de profondeurs par une roche dure technique ou une géomembrane (IUSS_Working_Group_WRB, 2006). C'est ainsi que, pour la première fois, le terme Technosol est apparu dans le système de classification des sols.

Compte tenu de leurs compositions et de leur processus de formation (sous influence anthropique), les Technosols peuvent être différents des sols dits « naturels ». En effet, les Technosols diffèrent des autres sols de par leur caractéristiques physico-chimiques (e.g. granulométrie), leur potentiel agronomique (e.g. teneurs en éléments fertilisants mais aussi potentiellement des polluants comme Cd, Cu, Pb et Zn) ou des

paramètres liés à leur anthropisation (e.g. présence de matériaux technogéniques) (Lefort, 2009). Vu qu'ils n'ont été répertoriés que récemment (2006), les Technosols et, dans une moindre mesure les sols anthropisés, n'ont pas été beaucoup étudiés. Les différences qu'il y a entre les sols « naturels » et les Technosols suggèrent un fonctionnement et une évolution de ces derniers différents, ce qui peut nécessiter une adaptation des méthodes d'étude ou un développement de nouvelles méthodes spécifiques pour l'étude des Technosols.

Un des points d'entrée pour l'étude du fonctionnement et de l'évolution des sols en général, est l'agrégation. En effet, l'agrégation peut être considérée comme un indicateur du fonctionnement d'un sol et fait partie des trois processus prépondérants de la pédogénèse, les deux autres étant l'altération de la roche mère et les mouvements des matières (Duchaufour et Souchier, 1983) (Figure 1). Les agrégats, unités de base du sol (Henao Valencia, 2008), peuvent être considérés comme l'intégrateur de l'histoire du sol et révélateur de son fonctionnement actuel (Bechet *et al.*, 2009). L'étude des processus d'agrégation est de ce

fait une bonne entrée pour comprendre le fonctionnement des Technosols et les stades vers lesquels ils peuvent évoluer.

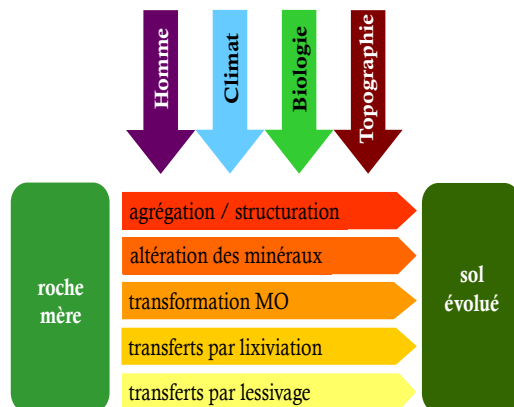


Figure 1. Rôle de l'agrégation dans la pédogénèse des sols

La plupart des techniques utilisées aujourd'hui pour apprécier l'agrégation sont qualitatives et basées essentiellement sur la description de l'organisation structurale des pores et des particules organiques et/ou

minérales du sol. Les estimations quantitatives jusque-là réalisées sont des mesures indirectes de l'agrégation (Niewczas et Witkowka-Walczak, 2005), puisqu'établies à partir de résultats de tests de stabilité structurale ayant pour principe de désagréger la structure (De Gryze *et al.*, 2005; Plante *et al.*, 2002). A partir de ces résultats, plusieurs modèles montrant la dynamique de l'agrégation dans les sols ont été proposés (ex (Edwards et Bremner, 1967; Tisdall et Oades, 1982). Par exemple, dans le cadre d'une étude sur des red-brownearths australiens (Chromosols ou Sodosols selon la classification australienne de sols), Tisdall et Oades (1982) ont proposé un modèle hiérarchique de l'agrégation. Selon eux, les particules de diamètre $< 0,2 \mu\text{m}$ s'associent entre elles pour former des agrégats plus grands ($0,2\text{-}2 \mu\text{m}$), qui eux-mêmes s'agrègent en d'autres plus grands et ainsi de suite. Ce modèle a posé une idée

originale sur le mécanisme de formation des agrégats et continue à être citée comme référence dans ce domaine (Jarvis *et al.*, 2012). Mais, il faut néanmoins mentionner que ce modèle, pour ne citer que celui-ci, se base sur les résultats de tests de stabilité structurale.

Le but de nos travaux est de mettre au point une méthode de quantification directe de l'agrégation dans un Technosol construit dans un but de modélisation. Cette quantification se fera à partir d'échantillons de Technosols construits prélevés *in situ* et du suivi en mésocosmes de la dynamique de l'agrégation de ces mêmes sols en fonction de facteurs hydriques et biologiques. Les résultats obtenus permettront d'avancer dans la compréhension du fonctionnement des sols fortement anthropisés, que sont les Technosols construits.

Ces travaux se subdivisent en trois grands axes :

1- Premièrement, une étude bibliographique présentant en particulier une analyse des méthodes existantes d'études de l'agrégation, ainsi que la mise en évidence de leurs limites. Les processus d'agréations ainsi que les facteurs qui influencent l'agrégation y sont décrits. A partir de là, nous avons posé des questions sous-jacentes à la thèse et des hypothèses qui nous permettront de combler toutes les lacunes relevées.

2- L'axe deux sera consacré à la caractérisation de la structure du Technosol construit. Tout en tenant compte de l'hétérogénéité spatiale du Technosol induite lors de sa mise en place, une méthode directe de quantification des paramètres de la structure (porosité et agrégation) par analyse d'images de lames minces a été mise au point. Cette méthode a été appliquée sur des échantillons de Technosols prélevés à deux ans d'intervalle afin de préciser l'évolution de la structure dans les stades précoces de la pédogenèse.

3- Enfin l'axe trois portera sur l'étude en cosme de la dynamique de l'agrégation en fonction des facteurs d'agrégation dans un but de hiérarchisation de ces facteurs et de modélisation du processus d'agrégation. Ceci est rendu possible à l'aide d'un dispositif expérimental original qui permet d'observer et mesurer ce phénomène *in situ* au cours d'un temps relativement long. L'agrégation, la porosité et le système racinaire ont été étudiés à partir des images du dispositif. A partir de ces résultats, un modèle d'évolution de l'agrégation d'un Technosol construit sous l'influence des facteurs de pédogenèse a été proposé.

Chapitre I. Méthodes d'étude de l'agrégation

I. Introduction

Les Technosols sont des sols composés à plus de 20% d'artefacts (matériaux technogéniques), en volume ou en masse, ou sols imperméabilisés à plus de 95% en surface ou dans les 100 cm de profondeurs par une roche dure technique ou une géomembrane (IUSS_Working_Group_WRB, 2006). A cause de leurs particularités (origine et composition), les Technosols sont peu étudiés d'où le peu de connaissance sur leur fonctionnement. En effet, partant d'un principe de la pédogenèse « milieu-processus-caractères » (Duchaufour *et al.*, 1977) on déduit que chaque milieu, sous l'action du temps et des facteurs environnementaux, portera un type spécifique de sol. Le fonctionnement d'un sol recouvre l'ensemble des flux d'eau et de solutés, des flux de matière, des flux d'énergie (Camuzard, 2001) ainsi que l'ensemble des fonctions assurées par les organismes vivants du sol (Ruellan *et al.*, 2008). Tous ces éléments varient en fonction des caractéristiques physiques et chimiques des sols. Les technosols peuvent avoir un fonctionnement spécifique puisque les matériaux technogéniques présents qui influencent fortement ce fonctionnement sont d'origines diverses. Peu de travaux ont été consacrés à l'étude du fonctionnement des Technosols (Monsérié, 2009; Pey, 2010; Scalenghe et Ferraris, 2009; Séré *et al.*, 2012). Les résultats des précédentes études s'accordent à dire que ces sols ont une pédogénèse rapide (différentiation des horizons au bout de quelques années) et un fonctionnement hydrique qui peut être proche de celui des sols sableux ou argileux. La faune et un couvert végétal se développent assez bien sur ce type de sol, qui, combinés à un bon fonctionnement hydrique engendrerait une forte agrégation. Sur la base de ces conclusions, des tentatives de modélisation ont été effectuées. En effet, inspiré par les travaux de Jenny (1941), Séré (2007) a proposé un formalisme simple qui caractérise le sol construit.

Ce modèle est basé sur un certain nombre d'hypothèses émises à la suite d'une série d'expérimentations réalisée sur trois ans à partir de quatre modalités de construction de sol (Séré, 2007).

Ce modèle est resté à l'état d'hypothèses théoriques puisqu'il n'a pas été vérifié. Il constitue une base de réflexion pour la construction d'un modèle plus abouti de formation des sols fortement anthropisés. Par contre, aucun travail de quantification de ses paramètres n'a été réalisé. L'une des entrées pertinentes pour formaliser ce modèle par des paramètres quantifiés, c'est d'étudier et quantifier le processus d'agrégation.

II. Les processus d'agrégation

L'étude des processus d'agrégation est une entrée pertinente pour comprendre le fonctionnement et l'évolution des Technosols. Pour ce faire, nous allons voir comment se fait l'agrégation et par quelles approches et méthodes ce processus pédogénétique est étudié.

2.1. Définition de l'agrégation

L'agrégation est le processus par lequel les particules minérales et organiques s'assemblent (réarrangement, floculation, cimentation) et se maintiennent stables au sein d'un sol (Amezket, 1999). Ce processus conduit à la formation des agrégats qui correspondent à des objets naturels individualisés autour desquels s'organisent la macroporosité du sol (Bechet *et al.*, 2009). La dynamique du complexe d'agrégation résulte des interactions de plusieurs facteurs dont principalement l'environnement, le travail du sol, les organismes vivants, le taux de carbone organique, les ions échangeables, les réserves nutritives, l'humidité (Kay, 1998). Selon Six *et al.* (2004), il est acquis depuis les années 1900, que cinq facteurs majeurs influencent l'agrégation. Il s'agit de i) la faune du sol, ii) les microorganismes, iii) les racines, iv) les agents de liaisons inorganiques et v) les variables environnementales (Figure 2).

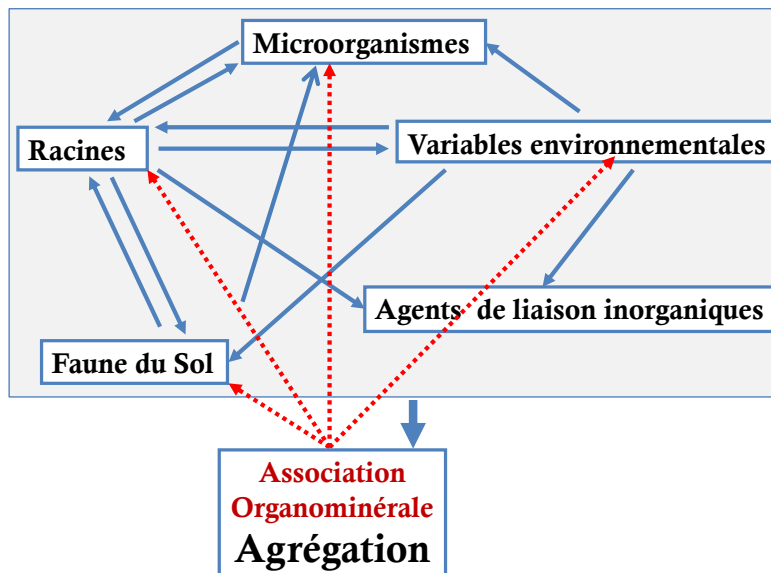


Figure 2. Interactions et rétroactions multiples entre les cinq facteurs majeurs influençant la formation et la stabilité des agrégats (d'après Six *et al.*, 2004)

Certains agents de liaison organiques dérivent de l'activité des microorganismes, des racines et de la faune du sol.

La stabilité des agrégats est conditionnée par le type de liaisons entre les particules organiques et minérales. Il est par exemple démontré que le

mucilage racinaire et les polysaccharides bactériens sont des bons agents liant la matière organique aux minéraux, sans pour autant que les mécanismes impliqués dans ces liaisons soient précisés. Ils vont sans doute dépendre des caractéristiques de l'interface «minéral - matière organique » (Kögel-Knabner *et al.*, 2007).

On distingue trois types de surfaces fonctionnelles au sein des particules minérales, ce qui donne plusieurs possibilités de liaisons avec la matière organique (Kögel-Knabner *et al.*, 2007) :

- les surfaces présentant des groupes hydroxyles, comme ceux du fer, de l'aluminium, d'allophane et les bordures des couches d'alumines ;
- des siloxanes présents dans le sol, au niveau des couches des phyllosilicates comme les illites et vermiculites. Ces surfaces ont en permanence des charges électrostatiques ;
- des siloxanes sans charge au niveau de minéraux argileux de types 1:1 ou 1:2 comme les pyrophyllites et kaolinite. Les échanges cationiques sont par conséquent le mécanisme dominant les liaisons au sein des associations organominérales.

8

En résumé, les particules organiques s'associent essentiellement aux particules minérales par des liaisons électrostatiques permises par des radicaux hydroxydes et des couches d'argiles, pour former des agrégats.

2.2. Les différents types d'agrégats

Selon leur taille, les structures agrégées se divisent en quatre types, reflétant des propriétés physiques ou chimiques différentes (Wilson, 1991) :

- microagrégats de 2 à 20 μm , très stables, formés de matières organiques aromatiques liées aux argiles et aux limons fins, de polysaccharides bactériens et de matières organiques figurées (bactéries, restes végétaux);
- microagrégats de 20 à 250 μm , formés des agrégats précédents et contenant des limons grossiers et des sables, agrégés par des polysaccharides bactériens ;
- macroagrégats de 250 à 2000 μm , formés des agrégats précédents et de sables grossiers reliés par des polysaccharides, des cellules bactériennes et du mycélium ;
- macroagrégats supérieurs à 2000 μm , composés des agrégats précédents associés à des particules de matières organiques libres, des racines et du mycélium, ces derniers consolidant le tout.

2.3. Mécanismes d'agrégation

Plusieurs hypothèses ont été émises sur les mécanismes par lesquels se forment les agrégats. Ces mécanismes concernent les théories de formation des macroagrégats et des microagrégats. Bronick et Lal (2005) proposent trois scénarios : la théorie hiérarchique de l'agrégation, la théorie concentrique de l'agrégation et l'association de particules organominérales élémentaires (Figure 3).

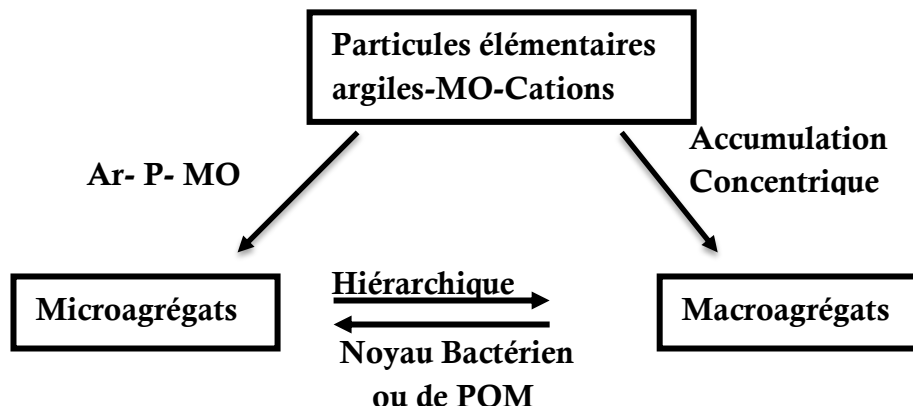


Figure 3. Scénarios possibles d'agrégation (Lal et Bronick, 2005) ; MO : matière organique ; POM : matière organique élémentaire ; Ar : argiles ; P : particule

Les mécanismes d'agrégation sont regroupés suivant des courants de pensée scientifique. La théorie biologique de l'agrégation considère ainsi que la formation des agrégats est surtout l'œuvre d'agents biologiques vivants (*e.g.* champignons, bactéries, vers de terre) via leur production de polysaccharides et leur activité de décomposition de la matière organique.

2.3.1. Formation des microagrégats : théorie de l'association organominérale élémentaire

Les microagrégats sont des structures de taille comprise entre 2 μm et 250 μm (Field et Minasny, 1999). Ils renferment donc des particules de taille granulométrique allant des argiles aux limons.

Théorie physicochimique de l'agrégation.

Les unités de base de la formation des microagrégats selon Emerson (1959) sont des cristaux de quartz, un domaine argileux et la matière organique, qui sert d'agent de liaison. Cette matière organique et les domaines argileux sont liés entre eux par des liaisons hydrogène ou des cations tels que Fe ou Al. Edwards et Bremner (1967) sont de la même école mais divergent du modèle d'Emerson sur un point. Selon eux, les cristaux de quartz ne sont pas l'élément précurseur de l'agrégation. En effet, les microagrégats se forment à partir des particules organiques qui s'associent aux argiles et aux cations polyvalents pour former des

composés plus agrégés. Ces associations sont consolidées grâce à différents types de liaisons : des liaisons entre les particules d'argile, des liaisons entre les quasi cristaux et les domaines argileux, les liaisons entre les domaines argileux et d'autres particules minérales, des liaisons entre la matière organique et les sesquioxydes métalliques (Calvet, 2003).

Les liaisons entre les particules d'argile et d'autres minéraux sont assurées grâce aux forces de Van der Waals d'une part et des interactions électrostatiques d'autre part. Les substances humiques et les colloïdes contribuent à ces liaisons en créant des ponts entre les particules (Calvet, 2003).

Théorie biologique de l'agrégation

Cette théorie décrit à la fois la formation des microagrégats et des macroagrégats. Initialement, des particules élémentaires et des minéraux de granulométrie $< 20 \mu\text{m}$ sont liés fortement entre eux par des agents de liaison (*e.g.*, matière organique humifiée, cations polyvalents, oxydes) pour former des microagrégats de diamètre compris entre 20 et 250 μm (Tisdall et Oades, 1982). Ces microagrégats évolueront vers des macroagrégats, mais dès que les forces de liaison temporaires (Six *et al.*, 2004) (comme celles créées par exemple par les hyphes mycéliens, les racines, les polysaccharides microbiens) se rompent, les macroagrégats se désagrègent et forment à nouveau plusieurs microagrégats plus stables (Oades, 1984; Oades, 1993).

Shipitalo et Protz (1989), quant à eux décrivent comment les vers de terre contribuent à la formation des microagrégats. En effet, lors de leurs activités de retournement du sol, les vers de terre détruisent des structures (micro et macroagrégats) existantes. Lors du transit intestinal, des particules minérales argileuses et de la matière organique sont liées entre elles par du mucus intestinal pour former des microagrégats qui deviennent stables lors du processus de dessiccation une fois excrétés sous forme de turricules.

2.3.2. Formation des macroagrégats

Comme pour les microagrégats, deux approches apparaissent. Le courant biologique stipule que les microagrégats formés selon la théorie hiérarchique de Tisdall et Oades (1982) s'associent entre eux via des liaisons moins fortes que les liaisons persistantes (Six *et al.*, 2004) pour former des macroagrégats. Des macroagrégats peuvent aussi se former autour de la matière organique particulaire, les agents de liaison étant les polysaccharides microbiens produits lors de la décomposition de cette matière organique (Bronick et Lal, 2005).

La théorie physicochimique considère quant à elle que les macroagrégats se forment par des dépôts concentriques et successifs de matière organique autour de la surface extérieure des particules primaires (Figure 3). C'est la théorie concentrique de l'agrégation (Santos, 1997).

III. Les méthodes d'étude de l'agrégation

L'agrégation est un phénomène complexe qui a attiré l'attention des scientifiques depuis des décennies. Il n'existe pas une méthode universellement admise, connue et harmonisée pour son étude, même si un grand nombre de travaux étaient et sont encore orientés vers l'étude de la stabilité structurale.

La structure est définie par l'arrangement spatial des constituants minéraux et organiques qui conduit à une hétérogénéité spatiale de ces constituants et propriétés du sol (Dexter, 1988). Elle est considérée comme un facteur majeur dans le fonctionnement du sol et influence ses différentes fonctions (Bronick et Lal, 2005). Il y a trois types principaux de structures pour un sol : particulaire, massive et agrégée. C'est cette dernière qui a fait l'objet de beaucoup de travaux dans l'étude de la stabilité structurale, compte tenu de son importance agronomique, en particulier en lien avec l'activité biologique (Niewczas et Witkowka-Walczak, 2005).

La stabilité structurale, qu'on peut ici confondre avec la stabilité des agrégats, est la capacité d'un sol à conserver son organisation spatiale (solide/vides/agrégats), lorsqu'il est exposé à différentes contraintes (Cosentino, 2006). Plusieurs méthodes sont alors utilisées pour étudier la stabilité des agrégats (Amezketta, 1999; Le Bissonnais et Le Souder, 1995). On distingue les grands groupes suivants: le tamisage à l'eau, le tamisage à l'alcool, l'ultra sonication, les pluies simulées, et l'immersion directe. Certaines techniques peuvent être appliquées en série, comme une immersion dans l'eau puis un tamisage à l'eau et enfin l'application des ultrasons pour une désagrégation complète des associations organo-minérales.

3.1. Les différentes techniques d'étude de la stabilité des agrégats

Le but des tests de stabilité est ainsi de vérifier la capacité des agrégats à résister à des contraintes (*e.g.*, compaction, précipitations). Les protocoles appliqués permettent de briser successivement des liaisons en fonction de leur intensité : d'abord les liaisons entre les macroagrégats, puis celles entre microagrégats et finalement celles intra-microagrégats.

3.1.1. Test de stabilité des macroagrégats

Il existe deux grands groupes de méthodes, selon qu'il y ait un traitement préalable de la terre ou pas. Pour le premier groupe, c'est un échantillon de terre non remanié qui est utilisé pour les étapes de tamisage à l'eau (De Leenheer et De Boodt, 1959) ou sur lequel on va simuler une pluie (Loch, 1989). Le deuxième grand groupe concerne les méthodes qui utilisent de la terre tamisée à sec selon une gamme de diamètres allant de 1 mm jusqu'à 9 mm (Figure 4).

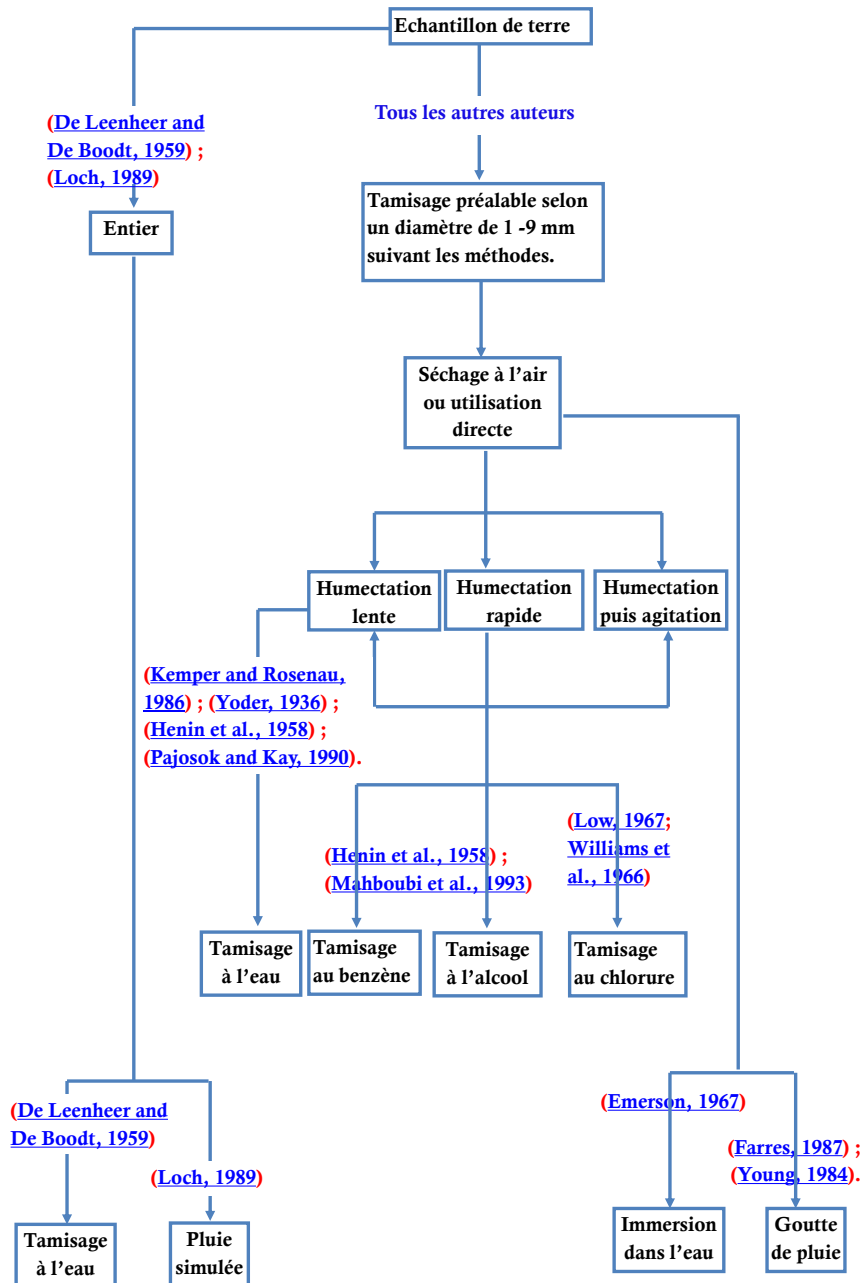


Figure 4. Différentes méthodes d'étude de la stabilité des macroagrégats

Certains échantillons sont par la suite tamisés dans l'eau (Churchman et Take, 1987; Henin *et al.*, 1958; Kemper et Rosenau, 1986; Le Bissonnais

et Le Souder, 1995; Pojasok et Kay, 1990; Yoder, 1936) ou directement immergés dans l'eau pendant un laps de temps (Emerson, 1967). D'autres échantillons, par contre, sont déposés sur un tamis millimétrique et humidifiés afin de simuler une pluie pour étudier leur résistance (Farres, 1987; Low, 1967; Young, 1984), tandis que certaines méthodes poursuivent avec un traitement aux ultrasons (Edwards et Bremner, 1967; Grieve, 1980). Le fait d'immerger les échantillons dans de l'eau provoque une extinction des agrégats c'est-à-dire qu'ils éclatent, ce qui fait que lors du tamisage à l'eau on mesure non seulement l'effet de l'action de l'eau mais aussi l'effet de l'énergie apportée lors du tamisage. Pour y remédier, certains auteurs font un tamisage à l'éthanol (Amezket, 1999; Henin *et al.*, 1958; Le Bissonnais et Le Souder, 1995) ou avec d'autres composés comme le chlorure de sodium (Williams *et al.*, 1966) ou le benzène (Henin *et al.*, 1958; Mahboubi *et al.*, 1993), ce qui permet de conserver la structure des agrégats.

3.1.2. Tests de stabilité des microagrégats

Les liaisons au sein des microagrégats (force de liaisons permanentes) sont plus fortes que celles formant les macroagrégats (transitoires et temporaires) (Tisdall et Oades, 1982). Pour étudier la stabilité des microagrégats, il faut appliquer des forces supérieures en intensité à celles utilisées pour désagréger les macroagrégats (Figure 5). L'objectif de l'application de ces forces est de provoquer la dispersion des argiles (Amezket, 1999). Cependant, il est possible d'étudier déjà la stabilité des microagrégats à partir des tests de stabilité des macroagrégats en analysant les quantités de particules de la taille des argiles dispersées (Le Bissonnais et Le Souder, 1995).

On peut noter trois principaux groupes de méthodes utilisées pour analyser la stabilité des microagrégats (Amezket, 1999). Certaines méthodes sont basées sur l'étude des propriétés optiques (turbidimètre) et densimétriques d'une suspension de sol (Pojasok et Kay, 1990). Les particules de sol en suspension peuvent, également, être quantifiées à l'aide de la pipette de Robinson basée sur la technique de la densimétrie qui suit la Loi de Stokes (Gee et Bauder, 1986; Watteau *et al.*, 2006). Une autre méthode utilisant les rayons laser est parfois mise en œuvre (Levy, 1993). Elle est basée sur la technique de diffraction de la lumière selon laquelle, l'angle de diffraction est inversement proportionnel à la taille de la particule en suspension.

Pour mettre le sol en suspension dans une solution avant l'analyse des particules, plusieurs traitements sont possibles, outre les techniques d'humectation des agrégats (immersion) (Amezket, 1999). On peut appliquer différents niveaux d'énergie par vibration, par agitation

mécanique, par action de billes de verre, ou même par des ultrasons (Bartoli *et al.*, 1991; Field et Minasny, 1999). Soumettre un échantillon du sol à un traitement utilisant des résines échangeuses d'ions, telles que par exemple des résines sodiques (Na-résine) (Bartoli *et al.*, 1991) ou des traitements à l'eau avec des compositions chimiques différentes (*e.g.*, pH, conductivité électrique) (Abu-Sharar, 1988) sont aussi des techniques utilisées pour casser les liaisons intra-agrégats et mettre les argiles en suspension.

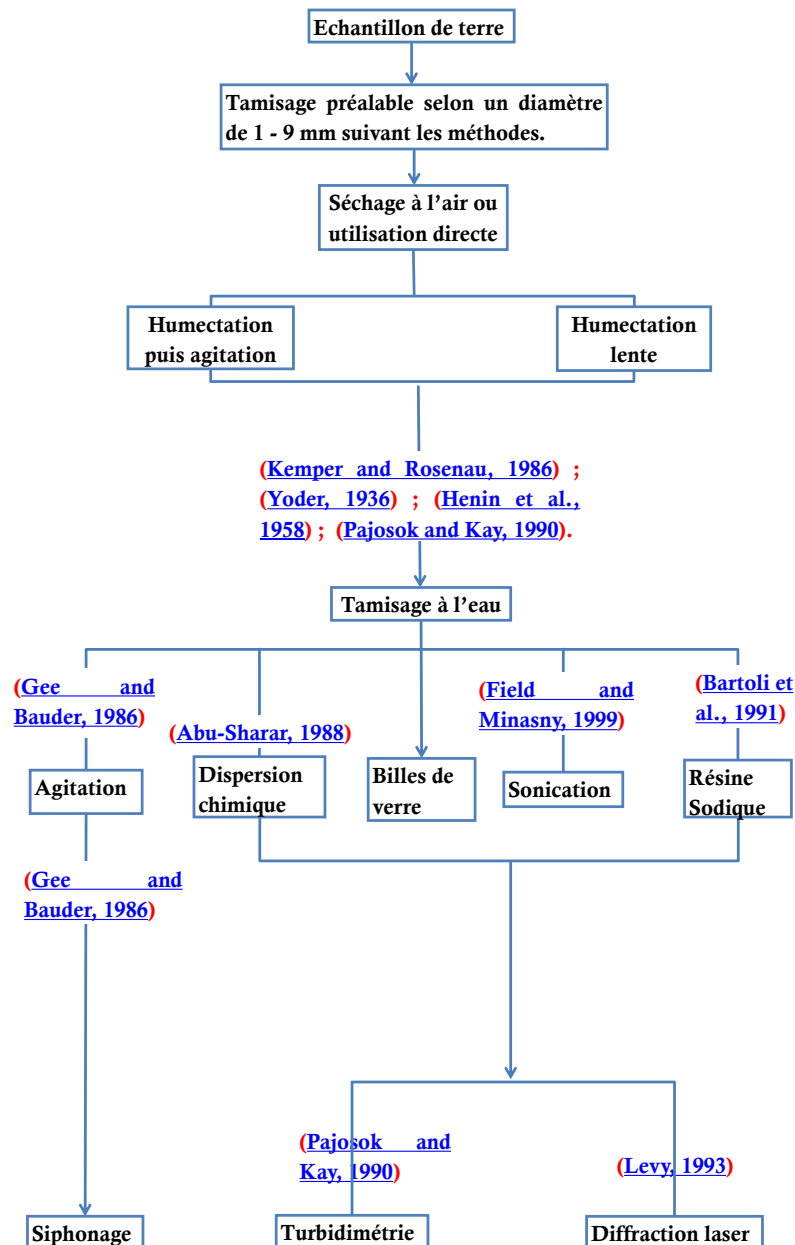


Figure 5. Différentes méthodes d'étude de la stabilité des microagrégats.

Si certains de ces traitements sont plus destructeurs que d'autres, voire très critiqués, il y a dans l'ensemble une hétérogénéité et une grande diversité dans les méthodes d'étude de la stabilité des agrégats. Cette

diversité rend difficile une harmonisation des méthodes (Amezket, 1999), ce qui ne facilite pas la comparaison des résultats obtenus.

3.2. Expression des résultats

Certains résultats (*e.g.* dire structure grumeleuse ; anguleuse, polyédrique ...) sont obtenus par simple observation du phénomène d'agrégation, rendant leur expression purement qualitative. D'autres par contre, sont plus aboutis et s'expriment par des grandeurs quantitatives. Ces grandeurs sont très diverses compte tenu de la diversité des méthodes qui ont permis de les obtenir (Amezket, 1999; Kemper et Rosenau, 1986; Le Bissonnais et Le Souder, 1995). Nous déclinons ici les principales approches.

Le Water Stable Aggregate (WSA) ou le pourcentage d'agrégats stables à l'eau est une grandeur utilisée pour exprimer les résultats issus de la plupart des tests de stabilité des macroagrégats, après un tamisage à l'eau ou après une pluie simulée. Certains résultats s'expriment sous forme d'indices comme l'Indice de la Stabilité de l'Agrégat (ASI), le Diamètre Moyen Pondéral (DMP) ou le Diamètre Géométrique Moyen (DGM). Suite à des tests d'immersion, le résultat peut s'exprimer en temps nécessaire à la rupture ou à l'extinction de l'agrégat ou en nombre de gouttes s'il s'agit d'une méthode d'application des gouttes de pluie sur un agrégat. Les résultats des tests utilisant les ultrasons ou mesurant les tailles d'agrégats par rayon laser s'expriment respectivement en taux de dispersion des agrégats et en angle de diffraction.

15

IV. Rôles des facteurs d'agrégation dans la stabilité des agrégats

Il existe une multitude de facteurs qui entrent dans la formation des agrégats. Les actions de ces facteurs ne sont pas unidirectionnelles, puisque soumis à des interactions et rétroactions. Devant la difficulté de considérer simultanément tous les facteurs, il y a lieu de choisir les plus influents et de les hiérarchiser. Amezket (1999) classe ces facteurs en deux grands groupes : un groupe de facteurs internes (*e.g.*, conductivité électrique, pH, nature des argiles, matière organique, oxydes) et un autre groupe de facteurs externes au sol (*e.g.*, climat, temps, activités biologiques). Ces facteurs, en plus de contribuer à la formation des agrégats, ont des effets sur leur stabilité et leur dynamique.

Quel que soit le type de facteur, interne ou externe, organique ou non, il peut avoir des effets ambivalents selon le cas (nature du sol, conditions expérimentales). En effet, certains paramètres réputés avoir des effets

positifs sur la stabilité des agrégats pour certains auteurs, peuvent avoir des effets négatifs dans d'autres cas.

4.1. Rôle des facteurs internes

La conductivité électrique, le pH et le taux d'adsorption du sodium sont des facteurs de dispersion et de floculation des argiles (Amezketta *et al.*, 2004). En l'occurrence, ce sont les faibles valeurs de conductivité électrique, les fortes valeurs de pH et de taux d'adsorption de sodium qui induisent cette floculation. L'élévation des valeurs de pH induit une dominance des charges négatives (répulsives), ce qui conduit à la dispersion ou désagrégation. Sous l'action de l'eau, les particules dispersées flocculent, notamment les argiles. Cette floculation conduit à une fragilité de la structure (diminution de nombre de macroagrégats et augmentation des microagrégats) et réduit le taux d'infiltration de l'eau dans le sol (Abu-Sharar, 1996; Amezketta *et al.*, 2004). Par contre, l'augmentation de la concentration d'électrolytes au-delà de la valeur de floculation et une diminution des valeurs de pH et de la sodicité du sol augmentent la stabilité structurale (Abu-Sharar, 1996).

Les oxydes, quant à eux, sont reconnus pour être les principaux agents de liaison des microagrégats et même dans une certaine mesure des macroagrégats (Six *et al.*, 2004), dans les sols oxydés comme les Oxisols, grâce aux cations polyvalents (Al^{3+} et Fe^{3+}). Ces liaisons se font sous trois formes : (i) les particules organiques sont fixées sur les surfaces des oxydes, (ii) des liaisons électrostatiques se créent entre les oxydes et les minéraux argileux et enfin (iii) les oxydes sont capables de former une couche sur la surface des minéraux qui peut servir de pont entre les particules (Six *et al.*, 2004). En fonction des valeurs de pH, notamment quand elles sont basses, les cations Al^{3+} et Fe^{3+} favorisent l'adsorption du carbone organique, ce qui augmente la stabilité structurale. En dépit de ces résultats, le rôle des oxydes dans la stabilité des agrégats est sujet à questions. En effet, Bartoli *et al.* (1991) pensent que l'effet des oxydes, notamment les oxydes de fer et d'aluminium sur la stabilité est négligeable. Néanmoins, ils ont un effet sur la diminution de la dispersion et du gonflement des argiles.

Les cations bivalents (Ca^{2+} et Mg^{2+}) entrent aussi dans le processus de stabilité des agrégats par leur capacité à s'échanger avec d'autres ions présents sur la surface des particules organiques ou minérales comme Na^+ . Le calcium (Ca) a un effet assez proche de celui des oxydes car il agit essentiellement au niveau des microagrégats et sa présence dans le sol est susceptible de réduire la dispersion des particules d'argiles. Il entre dans la formation des complexes entre les particules organiques et les minéraux argileux ; cet effet n'étant observable que si la présence

d'argile dans le sol est notable (Amezket, 1999). Le cation Mg^{2+} par contre a un effet inverse puisqu'il favorise la dispersion et le gonflement des argiles (Zhang et Norton, 2002). Par conséquent, il réduit la stabilité structurale des sols dans lesquels il est présent. L'ion Na^+ peut quant à lui présenter une forte capacité de dispersion des particules d'argiles s'il n'est pas échangé avec Ca^{2+} (Bronick et Lal, 2005).

Un autre facteur, primordial dans la formation des agrégats, est la matière organique. Son rôle dans la stabilité des agrégats est très controversé. Plusieurs études ont montré que l'apport de matières organiques dans un sol augmente la stabilité structurale (De Gryze *et al.*, 2005; Fristensky et Grismer, 2009; Pikul *et al.*, 2009). L'effet positif de la matière organique sur la stabilité des agrégats se fait de deux manières : elle augmente la cohésion entre les particules au sein des agrégats et augmente l'hydrophobicité des agrégats ce qui les protège contre la dispersion par l'eau (Abiven *et al.*, 2009). Cette forte hydrophobicité protège le carbone organique contre l'action dégradante des microorganismes et augmente la stabilité des agrégats (Bachmann *et al.*, 2007). Néanmoins, ce n'est pas toute la matière organique présente dans le sol qui contribue à cette stabilité ; c'est surtout le carbone organique complexé avec la matière minérale, notamment les argiles, qui agit en faveur de la stabilité des agrégats (Dexter *et al.*, 2008). Cette stabilité est la résultante de trois types de forces : les forces de liaison passagères/transitoires créées par les polysaccharides sur les microagrégats, les forces de liaison temporaires liant les macroagrégats créées par les racines et les hyphes mycéliens et enfin les forces de liaison permanentes au sein de microagrégats créées par les composés et polymères aromatiques (Tisdall et Oades, 1982).

Par ailleurs, certaines études soulignent l'effet inverse de la matière organique sur la stabilité structurale. En effet, l'ajout des substances organiques sur des suspensions de sol est susceptible de provoquer une extinction des macroagrégats et une dispersion des argiles, ce qui par conséquent réduit la stabilité structurale (Itami et Kyuma, 1995). Cette dispersion est provoquée par un défaut de charges positives lors des échanges ioniques, ce qui provoque une répulsion stérique (Amezket, 1999). Pour comprendre les effets ambivalents de la matière organique sur la stabilité des agrégats, Amezket (1999) propose de séparer les tests de stabilité des macroagrégats (WSA) de ceux des microagrégats basés sur la dispersion des argiles (DC). Cependant, la matière organique augmente la stabilité des macroagrégats et une fois ces derniers désagrégés, les substances organiques favorisent la dispersion des argiles (Amezket, 1999). Faire les deux tests simultanément ne permet pas de voir cette différence.

4.2. Rôle des facteurs externes

Les agents externes qui contribuent à la stabilité des agrégats sont essentiellement les variables environnementales (cycles gel-dégel ; humectation-dessiccation), les organismes biologiques (racines, microorganismes et macrofaune) et les variables anthropiques, notamment les pratiques agricoles.

4.2.1. Les variables environnementales

Les variables climatiques comme les cycles gel-dégel, humectation-dessiccation sont des phénomènes qui influent considérablement sur la formation et la stabilité des agrégats (Amezket, 1999). Ces phénomènes font appel aux variations de température et d'humidité dont l'effet sur les facteurs agrégeants (agents biologiques, matières organiques) est connu (Bronick et Lal, 2005). En effet, les cycles d'humectation-dessiccation peuvent réduire la stabilité des agrégats dans un sol à argiles gonflantes et l'accroître lorsque les argiles sont non gonflantes. Dans ce dernier cas, lors de l'humectation, les argiles se dispersent et flocculent. Quand le milieu se dessèche, les particules d'argiles servent de ponts et/ou forment des revêtements sur les autres particules, ce qui accroît la stabilité des associations (Attou et Bruand, 1998; Denef *et al.*, 2001a). Lorsque les argiles sont gonflantes, par contre, des fissures séparant les particules apparaissent lors de la dessiccation, réduisant ainsi leur stabilité (Singer, 1992). La dessiccation peut être provoquée par une succion des racines des plantes ou une élévation de la température. Quand la température baisse fortement, (cycle gel-dégel), la stabilité des agrégats s'accroît ou diminue en fonction de leur teneur en eau (Six *et al.*, 2004). Plus la teneur en eau est élevée, moins les agrégats sont stables et la stabilité s'accroît avec la teneur en matière organique et le taux d'argile (Lehrsch, 1991, 1993). L'eau contenue dans les agrégats augmente de volume en gelant et détruit les liaisons entre les particules, produisant ainsi des agrégats plus petits (Lehrsch, 1993). Inversement, dans un sol compacté (argileux notamment), le phénomène de gel a un effet positif sur la stabilité structurale. En gelant, les microcristaux de glace fissurent les amas en les rendant plus poreux, ceci améliorant leur structure (Lehrsch, 1991).

4.2.2. Les variables biologiques

Les facteurs biologiques (racines, microorganismes et faune) jouent un rôle considérable dans la stabilité de la structure au travers de leurs activités, leurs sous-produits et leur présence au sein d'un sol (Jastrow, 1991).

Les racines agissent sur la stabilité des agrégats suivant cinq mécanismes (Angers et Caron, 1998; Six *et al.*, 2004) : action mécanique lors de leur

pénétration dans le sol, en changeant le régime hydrique dans la rhizosphère, par la sécrétion des exsudats, en servant de matière organique décomposable par les microorganismes et par l'enchevêtrement des différentes particules qu'elles provoquent.

Lors de la pénétration, les racines exercent une pression sur le sol aux alentours, ce qui compacte le sol et réduit la porosité. Ce phénomène peut engendrer une difficulté dans la circulation de l'eau ce qui réduit le taux d'infiltration. Mais en croissant, les racines des plantes créent une nouvelle porosité à leur proximité immédiate. Pour certaines plantes comme la luzerne (*Medicago sativa* L.) qui ont un système racinaire long avec des racines de gros diamètre, on peut observer une augmentation de la macroporosité des sols (Caron *et al.*, 1996). La pénétration peut aussi fragmenter le sol, le rendre plus meuble et contribue à la formation de nouveaux agrégats (Angers et Caron, 1998).

La structure du sol, en fonction de la quantité et du type d'argile, est affectée par l'état hydrique. En effet, les variations dans le taux d'humidité peuvent conduire à un rétrécissement ou à un gonflement du sol, faisant apparaître des fissures. Les racines exercent le même rôle en prélevant de l'eau dans le sol, créant ainsi des zones sèches. Cet état desséché engendre une différence de tension hydrique au sein de la rhizosphère et crée de la macroporosité observable sous forme de fissures. La distribution de cette macroporosité varie en fonction du type de plante présente. En effet, plus la biomasse racinaire est élevée, ce qui est corrélé à la quantité d'eau prélevée, plus développée est la macroporosité (Angers et Caron, 1998). Oades (1993) a montré que les monocotylédones et les espèces herbacées contribuent mieux à la stabilité des agrégats du fait de leur biomasse racinaire généralement supérieure à celle des dicotylédones et des céréales.

En présence d'une forte biomasse racinaire, il se crée un véritable réseau qui lie les particules de sol entre elles et aux racines. Des agrégats plus stables se forment alors. Néanmoins, compte tenu du fait que les racines produisent des polysaccharides lors de leur croissance et qu'elles sont associées aux microorganismes rhizosphériques, il est difficile de séparer le rôle physique de l'enchevêtrement des racines, des effets des exsudats racinaires et des mycètes ou autres organismes dans la stabilité des agrégats ainsi formés (Bronick et Lal, 2005; Six *et al.*, 2004). Des études (Bethlenfalvay *et al.*, 1999) ont toutefois tenté de séparer le rôle de ces facteurs dans la stabilité des agrégats, concluant que tous ces facteurs ont une influence, sans pour autant les hiérarchiser. Bearden et Petersen (2000) ont montré que le rôle stabilisant des réseaux racinaires sur les agrégats est fonction de la taille des racines et que ces dernières sont

surtout impliquées dans la formation et la stabilisation des agrégats de taille supérieure à 2 mm. Par ailleurs, Bethlenfalvay *et al.* (1999) et Rillig *et al.* (2002) ont montré que la stabilité des agrégats résulte surtout de la présence d'une glycoprotéine du sol secrétée par les champignons mycorhiziens, la *glomaline*.

La quantité d'exsudats secrétés par les racines varie en fonction du régime hydrique, de la plante considérée, de l'âge des racines et de la profondeur du sol (Six *et al.*, 2004). En effet, le cycle de dessiccation – humectation accroît l'agrégation et augmente avec la densité racinaire (Angers et Caron, 1998). De même, les Fabacées contribuent plus à la formation des agrégats stables que les autres espèces végétales. Parmi les Fabacées, les assolements associant du lupin présentent plus d'agrégats stables à l'eau qu'en présence de trèfle blanc (Haynes et Beare, 1997). Hütsch *et al.* (2002) ont montré que les racines de maïs produisent plus d'exsudats que celles du blé, ce qui implique une capacité accrue du maïs à former des agrégats stables. Ceci s'explique par le fait que les exsudats ont un effet cimentant qui accroît les forces de liaison entre particules agrégées.

Au fil du temps, les racines vieillissent ou périssent et servent de biomasse pour les microorganismes du sol se trouvant dans la rhizosphère. Pendant la phase de décomposition des tissus racinaires, une forte quantité de matière organique est incorporée aux particules minérales jouant un rôle significatif dans la stabilité de la structure (Six *et al.*, 2004).

Dans les sols, la décomposition des matières organiques est assurée principalement par la faune et les microorganismes. En agissant sur l'évolution des matières organiques, ces organismes contribuent donc à la formation et à la stabilisation des agrégats. De plus, les microorganismes et essentiellement les bactéries, sécrètent des polysaccharides qui s'associent aux particules du sol et les rendent plus stables (Amezketta, 1999). Cette activité est fonction de plusieurs paramètres comme par exemple le type de sol, la qualité et la quantité de la matière organique ou la saison (Schutter et Dick, 2002). Tous les microorganismes du sol n'agissent pas de la même manière sur la stabilité des agrégats (Six *et al.*, 2004). Les mycéliums fongiques ont des propriétés adhésives (collantes) et agissent plutôt dans la formation et la stabilisation des macroagrégats (Bossuyt *et al.*, 2001; Schutter et Dick, 2002) tandis que le mucilage bactérien a surtout un effet sur la formation des microagrégats (Oades, 1993). Dans un sol sableux, seul le réseau d'hyphes mycéliens est susceptible de créer des macroagrégats, alors que

dans un sol argileux, les mycètes et les bactéries agissent en faveur de la formation et la stabilisation des macroagrégats (Six *et al.*, 2004).

La faune du sol (micro-, méso- et macrofaune) regroupe des organismes allant par exemple des arthropodes, nématodes, acariens, termites à des vers de terre, qui agissent tous dans la formation et la stabilisation des agrégats (Bronick et Lal, 2005). Parmi eux, le rôle des vers de terre sur la stabilité de la structure a été largement documenté (Amezketta, 1999; Bronick et Lal, 2005; D. Cluzeau *et al.*, 2009; Pey, 2010; Pulleman *et al.*, 2005; Six *et al.*, 2004).

Les vers de terre agissent de deux manières sur la formation des micro- et des macroagrégats : en créant des galeries et en produisant des turricules (Brown *et al.*, 2000). Leur activité a un effet direct sur la structure comme l'amélioration de la porosité du sol (Bottinelli *et al.*, 2010). Lors de la formation des galeries, une pression est exercée sur toute la drilosphère (terre ayant transité par le tube digestif des vers de terre et constituant le volume du sol bioturbé) et du mucus organique y est déposé, formant ainsi des structures stables. Les particules organiques et minérales ingérées par les organismes sont mélangées lors du transit intestinal à du mucus intestinal. L'évacuation de ce mélange est faite sous forme de turricules. Les turricules sont constitués d'agrégats plus stables que ceux des autres parties du sol non explorées par les vers (Marashi et Scullion, 2003). Cette stabilité n'est observable que (i) si de la matière organique est incorporée, (ii) si les turricules sont âgés et (iii) s'ils sont secs (Amezketta, 1999). L'effet positif des vers de terre sur la stabilité des agrégats s'explique ainsi par les forces de liaison mécaniques exercées sur les particules de sol, par l'activité des microorganismes (du sol et microflore intestinale) (Brown *et al.*, 2000) et par l'effet cimentant des acides humiques issus de la décomposition de la matière organique (Satchell, 1983). Il existe toutefois plusieurs types de vers de terre (épigés, anéciques et endogés (Bouché, 1977) et tous n'agissent pas de la même manière sur l'agrégation (Six *et al.*, 2004). Plusieurs espèces de ces différents types peuvent être présentes simultanément dans un sol avec des conséquences diverses sur la structuration du sol. La combinaison la plus favorable à la formation d'agrégats est le mélange « anécique + endogé » (Lee et Foster, 1991).

Les vers de terre n'ont pas que des effets positifs sur la stabilité structurale. Beaucoup d'espèces endogées sont aussi qualifiées d'espèces compactantes car elles produisent des turricules de grande taille et compacts. La seule activité de ces espèces sur un sol pauvre en matière organique peut décroître la stabilité de la structure en rendant le sol, dont la biodiversité est déséquilibrée, imperméable et compact (Barros *et*

al., 2001). En outre, à court terme, l'activité des vers de terre est susceptible de réduire le taux de carbone organique dans un sol. En effet, McCartney *et al.* (1997) ont trouvé une corrélation positive entre la réduction du nombre des vers de terre et l'augmentation de la concentration en carbone du sol. En présence de vers de terre, la concentration en carbone du sol diminue à cause de sa décomposition (Martin, 1991).

4.2.3. Les variables anthropiques

Les pratiques agricoles (*e.g.*, labour, irrigation, rotations, amendements) ont un effet avéré sur la stabilité de la structure (Amezketta, 1999) et la dynamique de la matière organique du sol (Pulleman *et al.*, 2005).

Le rôle des techniques de travail du sol avec ou sans labour sur la stabilité structurale est controversé (Amezketta, 1999). De l'avis de beaucoup de chercheurs, le labour est une technique qui permet d'améliorer la stabilité structurale en augmentant la porosité et l'infiltration de l'eau dans le sol (Carter, 1994). *A contrario*, le labour peut diminuer le taux de macroagrégats dans un sol en le compactant, en exposant la matière organique du sol aux microorganismes ce qui accélère sa dégradation (Carter, 1994), en perturbant les habitats des microorganismes et leur nombre (Oades, 1993) et en diminuant la capacité d'échange cationique (CEC) (Plante et McGill, 2002). Par conséquent, toute technique qui tend à réduire la perturbation du sol, comme le semis direct, peut améliorer la stabilité structurale (Beare, 1994).

Les différents systèmes de production jouent aussi un rôle dans le maintien et l'amélioration de la stabilité des agrégats. Amezketta (1999) classe cinq types de systèmes de production par ordre décroissant de niveau de stabilité structurale : terres vierges >> prairies et cultures fourragères > cultures sur terres arables avec rotations > monocultures sur terres arables > jachères. Certains de ces systèmes sont propices à l'activité des vers de terre et améliorent la stabilité des agrégats (Pulleman *et al.*, 2005). Les effets des amendements organiques sur la stabilité des agrégats suivent la même logique qu'un apport de matières organiques dans un sol si on fait abstraction des hétérogénéités de résultats qu'on observe en fonction du type d'amendement, de la dose etc...

V. Quantification de l'agrégation

5.1. Définition de la quantification

La quantification est une démarche méthodologique qui consiste à attribuer un chiffre, un quantum à une valeur mesurée. Vue sous cet angle, la quantification a commencé depuis l'Antiquité, lorsqu'on donnait des valeurs chiffrées aux mesures de distances, d'angles, de surfaces ou de volumes. Au fil du temps, des disciplines comme les mathématiques ont vu le jour, ainsi que des écoles de pensée associées à ces disciplines (Veltman, 2000). Très vite, le besoin de mesures quantifiées s'est fait sentir dans tous les domaines de la vie et des activités humaines (*e.g.*, agriculture, urbanisme, production industrielle, commerce).

5.2. Pourquoi quantifier : intérêt de la quantification ?

De plus en plus, les chiffres sont considérés comme des outils d'aide à la décision et la quantification est une méthode d'obtention de ces chiffres. Une description qualitative des phénomènes étudiés n'est pas toujours suffisante. Aujourd'hui, la quantification est considérée comme un signe d'objectivité, de rigueur et d'impartialité (Desrosières, 2008) ce qui fait qu'elle est présente dans presque tous les domaines scientifiques, allant des sciences sociales aux sciences exactes. L'introduction de l'informatique, de la conceptualisation, des statistiques et de la modélisation dans divers domaines rime avec le besoin de données quantitatives. Le désir de simplifier et de rendre les phénomènes les plus génériques possibles par la modélisation, a conduit les chercheurs à quantifier même dans des domaines jusque-là reconnus comme étant théoriques et qualitatifs. Pour donner une idée de l'intérêt qu'on accorde à la quantification, il faut noter que de nos jours, il est même possible de quantifier le nombre de téléspectateurs d'une émission choisie pour mesurer sa cote de popularité (Méadel, 1998). On peut aussi quantifier le nombre de fois qu'un mot est prononcé dans un discours en analyse de discours ou en sémantique pour dégager des significations (Gross, 1981). Il convient ici de remarquer que la tendance est à tout quantifier et l'étendue du champ des quantifiables est vaste et elle-même difficilement quantifiable. Il n'est pas aisé de réaliser un historique complet des démarches et outils de quantification ainsi que des raisons de leurs applications dans de nombreuses disciplines. Nous nous focaliserons alors sur quelques cas de quantification par analyse d'images et/ou en lien avec les sciences du sol.

5.3. Quantification en sciences du sol

Initialement, le sol était observé et décrit qualitativement en termes de structure, d'aspect, de couleur ou d'odeur (Ruellan et Dosso, 1993). Très

vite, l'étude de la nature des constituants du sol, de sa texture, de l'organisation des vides et du fonctionnement global du sol a conduit à l'acquisition de données quantitatives. En effet, la détermination de la composition granulométrique (taux d'argile, de limon et de sable) (Bonneau et Souchier, 1994), la caractérisation du taux de matière organique ou du nombre de vers de terre dans un volume de sol donné (Peres, 2003), sont des aspects quantitatifs en sciences du sol. En s'intéressant à l'aménagement et l'utilisation du sol comme ressource (agronomie), d'autres besoins en termes de données quantitatives sont apparus. Des mesures analytiques concernant le sol, fournissant des données quantitatives, se sont mises en place pour déterminer les aptitudes des sols à remplir des fonctions (*e.g.*, support de végétation, support de biodiversité, filtre et échanges) (Mathieu et Pielain, 2003). Aujourd'hui, le nombre d'études quantitatives sur le sol ou ses propriétés est tellement élevé qu'on ne peut tous les citer. Nous donnerons ici quelques exemples de quantification de l'agrégation car il est utile de la quantifier afin de modéliser son processus.

5.4. Quantification de la stabilité des agrégats

L'étude de l'agrégation a débuté avec les travaux sur la structure du système sol. Depuis, l'agrégat est essentiellement considéré comme un indicateur de la stabilité structurale. Initialement, cette propriété était appréciée qualitativement en observant les formes des mottes de terre de taille centimétrique et leurs comportements vis-à-vis de l'action de l'eau. Ensuite, les agrégats de plus petite taille, millimétriques, ont été pris en compte.

Ces méthodes quantifient uniquement la stabilité des agrégats et par conséquent ne peuvent être considérées comme des techniques de quantification de l'agrégation à proprement dit. Sur la base de ces méthodes, deux tentatives ont été faites pour quantifier la dynamique d'agrégation. La première a utilisé la modélisation pour quantifier la dynamique des macroagrégats à partir des résultats de tests de stabilité structurale (Plante *et al.*, 2002). Ce modèle est basé sur la théorie hiérarchique de l'agrégation, en considérant que ce sont les macroagrégats qui se forment en premier et en se désagrégeant, donnent des microagrégats. Les auteurs ont proposé une équation qui formalise cette désagrégation après une série de tests de tamisage à l'eau. La deuxième tentative est aussi une démarche de modélisation combinée à des analyses statistiques pour étudier l'effet d'un apport de matière organique sur la dynamique à court terme des macroagrégats (De Gryze *et al.*, 2005). Cette approche est aussi basée sur le test de stabilité des macroagrégats (> 2 mm) dont les données ont été calibrées à l'aide de quatre modèles différents de formation des agrégats préalablement

construits. Par exemple, deux de ces modèles, basés sur la théorie de conservation de la masse, considèrent que le nombre d'agrégats est proportionnel à la quantité de sol non agrégé, ce qui peut se formaliser comme suit :

$$\frac{dM}{dt} = f_t U - b_t M \quad 1$$

avec M le pourcentage d'agrégats stables à l'eau ; U le pourcentage de sol non agrégé ; f_t le taux d'agrégation ; b_t le taux de désagrégation.

Toutes ces méthodes sont « destructrices », c'est-à-dire qu'elles quantifient les propriétés du sol, directement ou indirectement, après destruction des structures. Ces méthodes sont tributaires des prétraitements des échantillons du sol, traitements qui peuvent influencer considérablement les résultats (Amezketta, 1999). D'autres techniques, qui tentent d'analyser les structures et formes pédologiques sans la moindre destruction, en tout cas lors de l'analyse des échantillons, sont prospectées. C'est le cas notamment des techniques de quantification des structures du sol par analyse d'image.

5.5. Quantification par analyse d'image

L'analyse d'image est une technique développée depuis plus de deux décennies (Chermant et Serra, 1996; Matheron et Serra, 2002) qui permet de décrire quantitativement une image et de reconnaître les formes des objets. Aujourd'hui, grâce aux progrès informatiques et au développement des modèles de morphologie mathématique, l'analyse d'image connaît un réel essor et tend à devenir entièrement automatisée (Chermant et Serra, 1996). Elle trouve une application dans de nombreuses disciplines. Les domaines dans lesquels cette technique est beaucoup développée sont surtout l'imagerie médicale (Van Der Geest, 1999), les systèmes d'information géographique (SIG) et la télédétection.

L'analyse d'image est aussi très développée dans les domaines de la prospection et de l'extraction minière, car les méthodes manuelles anciennement utilisées sont très fastidieuses (tamisage, comptage), coûteuses (Outal, 2006) et très risquées (accident par chute de roches ou effondrement des carrières) (Hadjigeorgiou et Lemy, 2005).

Dans le domaine des sciences du sol, la quantification des traits pédologiques (appelés *pedofeatures* en anglais) comme la structure et la porosité par analyse d'images a fait l'objet de nombreuses études depuis les années 1970 (Aydemir *et al.*, 2004). Ces méthodes sont développées pour minimiser le coût et le temps de traitement d'informations collectées. On peut définir quatre principales étapes dans une méthode de quantification par analyse d'images (Mermillod-blondin, 2003; Outal,

2006) : (i) acquisition des images, (ii) traitement des images, (iii) corrections statistiques et calibrages (préparation de la mesure sur l'image binaire) et (iv) mesure du paramètre d'intérêt/recherché.

5.5.1. Acquisition des images

Il existe plusieurs manières d'acquérir des images en fonction des objectifs fixés (usage et domaine d'application). Il en résulte plusieurs types d'images (Mermillod-blondin, 2003). Dans le domaine minier, le mode d'acquisition est le plus souvent automatique à l'aide de caméras numériques embarquées par des engins adaptés (Oual, 2006), lors des opérations de tir à l'explosif, du concassage et du broyage des minerais. Dans le secteur industriel, de sciences du sol et médical, l'acquisition des images se fait surtout par tomographie non destructrice (Elmoutaouakkil *et al.*, 2001; Pierret *et al.*, 2002; Piñuela *et al.*, 2010) ; par utilisation des rayons électromagnétiques (Elmoutaouakkil *et al.*, 2001; San José Martínez *et al.*, 2010) ou même à l'aide de l'imagerie par résonance magnétique (IRM), technique très performante utilisée dans le cadre de diagnostic cardiovasculaire ou cérébral (Bellenger *et al.*, 2000). L'utilisation de ces techniques ne s'arrête pas uniquement aux domaines pour lesquels elles ont été développées. Elles trouvent aussi d'autres applications dans des domaines divers comme celui des sciences du sol. Dans le domaine des SIG et de la télédétection, l'acquisition des images se fait grâce à des caméras (Griselin et Nageleisen, 2008) ou même des scanners à résolutions variables embarqués dans des avions ou des satellites (Amundson *et al.*, 2003). Il existe aussi des scanner simples qui permettent de produire des images à partir des petits échantillons de sol comme des lames minces (Aydemir *et al.*, 2004; VandenBygaert et Protz, 1999) ou des sections polies d'échantillons de sols ou de roches (Ledru *et al.*, 2009). En fonction des niveaux de détail désirés, certains échantillons sont observés à l'aide de microscopes électroniques à balayage ou à transmission (Ledru *et al.*, 2009; Mermillod-blondin, 2003; Prakongkep *et al.*, 2010; Ryszkowska, 2007), les images numérisées servant alors à la quantification des paramètres d'intérêt.

5.5.2. Traitement des images

Les techniques de traitement des images diffèrent en fonction des types d'images acquises et des outils utilisés. Aujourd'hui il existe une large gamme de logiciels pour le traitement d'images, spécialisés en fonction des domaines d'application (Centre des Sciences des Processus Industriels et Naturels, 2000). Dans le domaine des sciences du sol aussi, des techniques et outils ont été développés. Nous en montrerons quelques exemples.

Le traitement d'image consiste à appliquer une série d'opérations (filtrage, segmentation) qui conduisent à l'obtention d'une image de meilleure qualité (Mermillod-blondin, 2003) en enlevant les bruits et en faisant ressortir l'objet d'intérêt. Selon les domaines, on peut trouver des dénominations différentes, l'objectif étant toujours le même. En télédétection par exemple, le délignage et le géoréférencement ou l'orthorectification géométrique permettent d'éliminer des bruits induits par les déformations du capteur lors de prises de vue. Toutes ces techniques qui permettent de nettoyer les bruits dans les images peuvent être regroupées sous le vocable de filtrage. Après nettoyage, les images suivent une opération de seuillage qui permet de séparer la zone d'intérêt à analyser ultérieurement du reste de l'image. Le seuillage conduit à une image binaire où la zone d'intérêt est codée (1) et le reste (0) (VandenBygaart et Protz, 1999). La segmentation, quant à elle, consiste à partitionner l'image en regroupant les pixels en régions, qui correspondent aux différents objets de l'image (Condat, 2010). C'est une étape primordiale pour pouvoir effectuer des mesures car elle permet de délimiter les contours des objets (Outil, 2006). Nous pouvons l'illustrer comme suit (Figure 6):

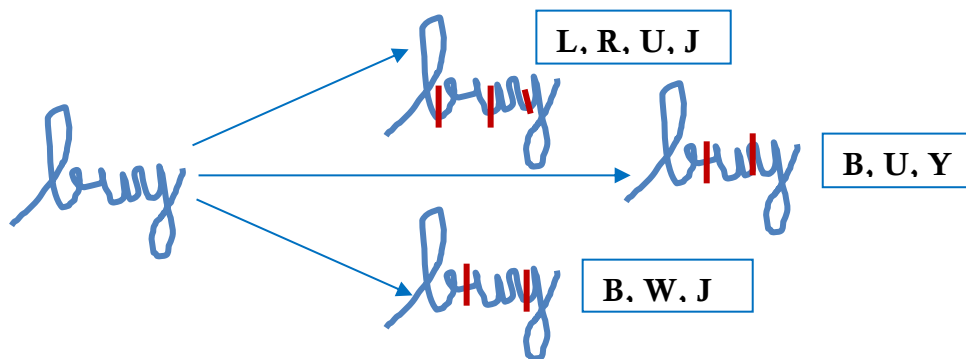


Figure 6. Illustration simple de la segmentation, inspiré de Dupas (2009)

Parfois le seuillage est utilisé comme un moyen, le plus simple d'ailleurs, de segmenter une image (Chermant et Serra, 1996; Ringrose-Voase, 1991). Le nombre d'objets à obtenir après application d'une segmentation peut varier ; soit on obtient trop de fragments par rapport à la réalité (sur-segmentation), soit pas assez (sous-segmentation) (Outil, 2006; Ringrose-Voase, 1991), ce qui conditionne les résultats des mesures.

Si les opérations réalisées dans les étapes de traitement d'image n'ont pas fondamentalement changé depuis des décennies, les outils utilisés pour effectuer les opérations (logiciels de programmation surtout) ont évolué. Toutes les étapes ne sont pas forcément utilisées dans le cas d'un traitement d'image. Parfois il faut des astuces et plusieurs tentatives

(calibration) pour décider des opérations ou étapes à suivre. Le seuillage demeure un passage obligatoire (Centre des Sciences des Processus Industriels et Naturels, 2000) quel que soient le type d'image, l'outil ou le domaine d'application. Différents outils peuvent être utilisés dans le traitement d'image pour analyser les traits pédologiques ou des structures dans une section de sol. L'outil de programmation Matlab (Mathworks, INC) peut par exemple être mis en œuvre. C'est le cas par exemple d'une étude de quantification de la porosité d'un sol (San José Martínez *et al.*, 2010; Zhou *et al.*, 2009) ou de sa pédodiversité (Petersen *et al.*, 2010). La porosité (taille et nombre des pores, densité) peut aussi être quantifiée à l'aide d'autres logiciels génériques comme analySIS (Mooney *et al.*, 2007), GE Medical Microview (Piñuela *et al.*, 2010), ou un logiciel de télédétection EASI/PACE (VandenBygaart et Protz, 1999) pour ne citer que ceux-ci. Il faut noter que, bien qu'il existe des outils qui permettent d'effectuer des opérations génériques et automatiques (Chermant et Serra, 1996), ce n'est pas pour autant qu'ils sont applicables directement à tous types d'échantillons ou de propriétés à quantifier. Parfois il faut développer des techniques spécifiques pour détecter une propriété donnée (Mooney *et al.*, 2007).

5.5.3. Correction statistique/préparation de l'analyse

Cette étape consiste à effectuer des corrections supplémentaires sur une image traitée avant d'effectuer les mesures (Mermillod-blondin, 2003). En cas d'une sur-segmentation non corrigée (Outal, 2006) (Figure 5), il peut apparaître un biais dans les formes ou le nombre d'objets à détecter. Des corrections peuvent alors s'effectuer par simplification morphologique, en appliquant des opérateurs mathématiques comme la fermeture (en cas de sur-segmentation) ou l'ouverture (en cas de sous-segmentation) pour bien délimiter les contours (Centre des Sciences des Processus Industriels et Naturels, 2000). Il peut aussi y avoir de nouveaux bruits qui apparaissent sur l'image ou d'autres qui n'ont pas été nettoyés lors des étapes précédentes du traitement de l'image. L'utilisation des nouveaux filtres binaires permet de corriger ces erreurs (Centre des Sciences des Processus Industriels et Naturels, 2000; Mermillod-blondin, 2003; Mooney *et al.*, 2007; VandenBygaart et Protz, 1999).

D'autres erreurs inhérentes aux techniques de quantification utilisées et au type d'échantillon analysé peuvent apparaître. En effet, sur une lame mince qui est un échantillon en 2D, des fragments peuvent être recouverts, d'autres se chevauchent, ce qui ne permet pas d'accéder à toute l'information (Outal, 2006). Les corrections statistiques permettent de combler ces insuffisances (Outal, 2006).

5.5.4. Mesure des paramètres d'intérêt

C'est la dernière étape dans un processus d'analyse d'image. Il existe d'innombrables manières d'exprimer les quantités mesurées. Les grandeurs habituellement retenues sont le nombre, la surface, la taille, le diamètre, le volume. Le choix de ces paramètres de mesure dépend le plus souvent de l'objet d'intérêt et de l'objectif de l'étude.

Aujourd'hui, mis à part quelques rares cas en biologie et pathologie qui utilisent des techniques manuelles de comptage à cause de la complexité des images (Chermant et Serra, 1996), les mesures de paramètres d'intérêt se font de manière automatique grâce à une large gamme de logiciels de traitement d'images disponibles sur le marché (Mermillod-blondin, 2003) et parfois spécialisés en fonction des domaines d'applications. Pour la quantification de la granulométrie par exemple, les logiciels principalement utilisés sont FragScan, Split et WipFrag (Outal, 2006). Il faut également citer des logiciels de traitement d'images comme Visilog (Noesis, 2006), logiciel s'appliquant à de nombreux domaines.

VI. Analyse des manques et nouvelles hypothèses pour l'étude de l'agrégation des Technosols

29

6.1. Limites des méthodes actuelles d'étude de l'agrégation

Si une définition des Technosols est proposée depuis quelques années (IUSS_Working_Group_WRB, 2006), peu d'études leur ont été consacrées dans l'objectif de décrire leur fonctionnement et leur évolution. En effet la plupart des études sur les sols fortement anthropisés se concentrent sur leur classification (Hollis, 1991; Lefort, 2009; Rossiter, 2007), sur la description de leur composition (Badin *et al.*, 2009; Rennert *et al.*, 2011; Uzarowicz *et al.*, 2011) et plus rares sont les travaux sur leur pédogenèse (Monsérié *et al.*, 2009; Scalenghe et Ferraris, 2009; Séré, 2007). De ce fait, il n'existe pratiquement que quelques cas d'études sur l'évolution de la structure (porosité et agrégation) des Technosols (Monsérié, 2009; Pey, 2010; Séré *et al.*, 2012). Cependant, la plupart des travaux sur l'étude de la structure sont réalisés sur des sols « naturels ». Eux-mêmes présentent un certain nombre d'insuffisances. En effet, les méthodes utilisées sont (i) descriptives et qualitatives, (ii) quand elles sont quantitatives, elles sont destructives (car basées sur des tests de stabilité structurale), (iii) quand elles sont directes, elles sont locales par exemple comptage d'un type d'agrégats sur une lame mince, (iv) quand elles sont globales, elles concernent uniquement la porosité et (v) elles ne sont pas dynamiques.

6.2. Questions et hypothèses de la thèse

Pour acquérir des connaissances supplémentaires par rapport aux besoins énumérés ci-dessus, nous nous sommes fixés comme objectif global de quantifier directement les paramètres de la structure, porosité et état d'agrégation, d'un Technosol construit et de suivre *in situ* sa dynamique d'évolution au cours du temps en fonction de facteurs climatiques et biologiques, suivant l'action d'agents choisis. Les données quantifiées obtenues devront servir à la modélisation des stades précoces de la pédogenèse d'un Technosol construit.

Pour ce faire nous posons les questions et faisons les hypothèses suivantes :

Q1 : Sait-on quantifier les agrégats par analyse d'images ?

H1 : *Il est possible de quantifier l'agrégation dans un Technosol construit à partir d'analyse d'images de lames minces.*

En effet, la porosité des sols naturels a été largement quantifiée par analyse d'image dans différents travaux, il suffit donc de faire des adaptations; par contre il n'existe aucune étude de quantification directe des agrégats dans une matrice de sol par analyse d'images.

Q2 : Comment les processus pédogénétiques affectent l'agrégation d'un Technosol construit ?

Nous partons d'un matériau modèle (Technosol construit) pour mimer le vieillissement de ce sol via des paramètres de forçage pour proposer des scénarios d'évolution.

H2 : *Il est possible de suivre la dynamique d'agrégation dans un Technosol construit au cours du temps en fonction des effets de facteurs pédogénétiques.*

H3 : *Les facteurs climatiques (agent humectation-dessiccation) et biologiques (agent plante et faune) impactent à court terme l'agrégation d'un Technosol construit.*

H4 : *Il est possible de hiérarchiser les facteurs pédogénétiques en fonction de leur impact sur l'agrégation d'un Technosol construit.*

H5 : *Il existe des corrélations entre les paramètres de porosité et d'agrégation et les paramètres de croissance du système racinaire.*

Q3 : Quel modèle d'agrégation pour les Technosols construits ?

H6 : *Il est possible de conceptualiser l'agrégation d'un Technosol construit à partir des résultats de suivi de sa dynamique.*

Chapitre II. Caractérisation de Technosols construits

I. Introduction

Afin d'étudier les processus pédogénétiques d'un sol fortement anthropisé pendant ses premiers stades d'évolution, un Technosol a été construit sur le site expérimental du Groupe d'Intérêt Scientifique sur les Friches Industrielles (GISFI). Ce sol est constitué à partir de divers matériaux, en se basant sur un procédé du génie pédologique (Séré *et al.*, 2008). Compte tenu de la taille de la parcelle (1 ha) et des moyens techniques utilisés (engins lourds de travaux publics), la mise en place du Technosol n'est pas forcément homogène, comme elle pourrait l'être dans une expérimentation de laboratoire en conditions contrôlées. Il est donc nécessaire de caractériser l'hétérogénéité structurale initiale du Technosol, afin de préciser si les différences d'évolution du sol observées au cours du temps sont dues aux mécanismes impliqués dans la pédogenèse ou à l'hétérogénéité spatiale induite par les modalités de mise en œuvre de terrain.

II. Matériel et méthode

2.1. Site expérimental

Le sol a été construit sur la station expérimentale du GISFI située à Homécourt, à 90 km au Nord Est de Nancy (Figure 7 a). C'est une parcelle d'un hectare (1ha) sur laquelle un procédé de construction de sol a été appliqué (Séré *et al.*, 2008). Trois types de matériaux ont été utilisés pour la construction de ce sol : un Compost de Déchet Vert (CDV), une Terre Industrielle Traitée (TIT) et un Sous-Produit Papetier (SPP) (Tableau 1).

Tableau 1. Quelques caractéristiques des matériaux parents (d'après Séré *et al.*, 2008)

Paramètres	Unité	CDV	SPP	TIT
Argile	g.kg ⁻¹	254	244	49
MO	g.kg ⁻¹	376	251	94
CEC	Cmol.kg ⁻¹	42,3	4,6	6,7
pHeau		8,6	7,9	9

Le sol est construit selon deux modalités (Séré *et al.*, 2008) :

- Modalité « Eponge Végétale ». C'est un profil comprenant une réserve en eau pour les végétaux. Il est constitué, du haut vers le bas, d'un horizon dit de croissance composé de compost (15 cm d'épaisseur), d'un horizon dit de développement formé d'un mélange de TIT/SPP (2/3, 1/3, 60 cm) et d'un horizon dit hydrique fait de SPP pur (30 cm).

- Modalité « Confinement ». C'est un profil constitué, du haut vers le bas, d'un horizon de compost (15 cm), d'un horizon de mélange de

TIT/SPP (2/3, 1/3, 60 cm) et d'un horizon dit de confinement constitué de SPP chaulé (5% en volume) et compacté (25 cm). Cet horizon compacté a pour objectif de retenir l'eau dans le profil et de limiter très fortement des départs vers la nappe phréatique.

Dans le but de procéder à un échantillonnage exploitable statistiquement (programme Gessol « BioTechnosol » 2008-2012), la parcelle est subdivisée en 24 mailles de 20 m X 20 m elles-mêmes divisées en quatre mailles plus petites de 5 m X 5 m (Figure 7 b).

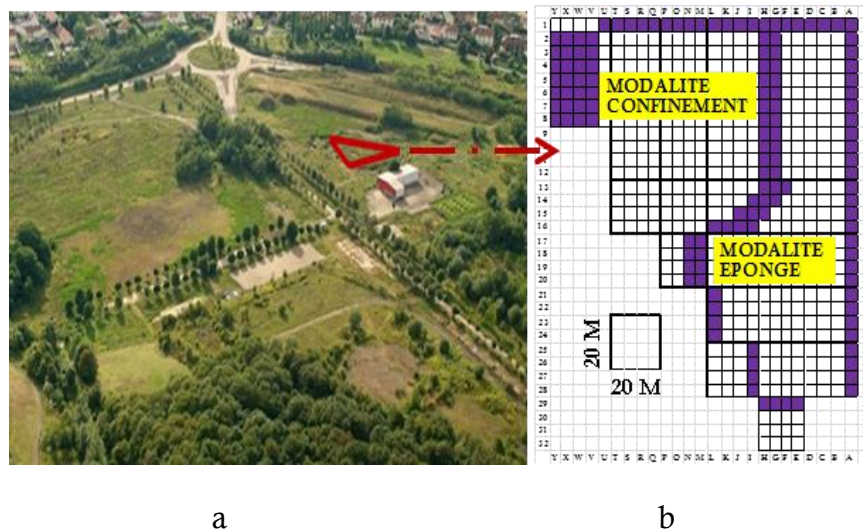


Figure 7. Site expérimental du GISFI, (a) : vue générale du site, (b) : maillage de la parcelle d'un hectare montrant les deux modalités de construction de sol.

2.2. Echantillonnage

Des campagnes d'échantillonnage ont été conduites chaque année depuis la mise en place des parcelles, de 2008 à 2010. Les campagnes sont alors désignées ainsi : T0 le 04/11/2008, T1 en 2009 et T2 le 04/04/2010. Chaque année, les modalités d'échantillonnage sont reproduites de manière identique sauf en 2009 où les échantillons non perturbés n'ont pas été prélevés. Deux types d'échantillons sont prélevés en T0 et T2: des échantillons perturbés et des échantillons non perturbés. Il faut noter que les mailles de 5 m X 5 m sont divisées en cinq mailles plus petites de 1 m X 1 m chacune. Ces mailles ont été définies afin de permettre des échantillonnages annuels sur des zones non impactées par les échantillonnages précédents.

- **Echantillons perturbés :** deux prélèvements sont effectués aléatoirement sur la petite parcelle (1 m X 1 m). L'épaisseur de la couche de compost est mesurée préalablement. Puis, on décape cet horizon de surface jusqu'à l'horizon de mélange TIT/SPP et on prélève à l'interface entre la couche de TIT/SPP et CDV un échantillon de sol (720 ± 52 g en T0, 1312 ± 66 g en T1, 630 ± 70 g en T2) que l'on

conserve dans des sachets plastiques. Ce même prélèvement est réalisé pour une autre maille de 1 m X 1 m appartenant à une autre maille de 5 m X 5 m différente de la première. Ainsi, sur chaque maille de 20 m X 20 m on peut prélever jusqu'à 5 échantillons. L'opération est répétée sur l'ensemble des 24 mailles de 20 m X 20 m. Tous les échantillons sont ramenés au laboratoire et conservés à 4°C dans un réfrigérateur, en attendant les analyses.

- Echantillons non perturbés : ils sont prélevés sur les mêmes mailles que précédemment mais à des endroits différents. Un seul échantillon par maille 5 m X 5 m est prélevé à l'aide d'une boîte de Kubiena (9 X 6 cm) en position verticale, toujours à l'interface entre le CDV et le mélange TIT/SPP, après avoir découpé la couche de compost (Figure 8).



Figure 8. Prélèvement d'échantillons non perturbés

La boîte est placée perpendiculairement à la surface du sol et on l'enfonce délicatement en faisant attention à ne pas perturber l'échantillon. Puis, à l'aide d'un couteau, on extrait la boîte contenant le bloc de sol. Les blocs prélevés sont ramenés au laboratoire, conservés au frais et sont destinés à la confection de lames minces.

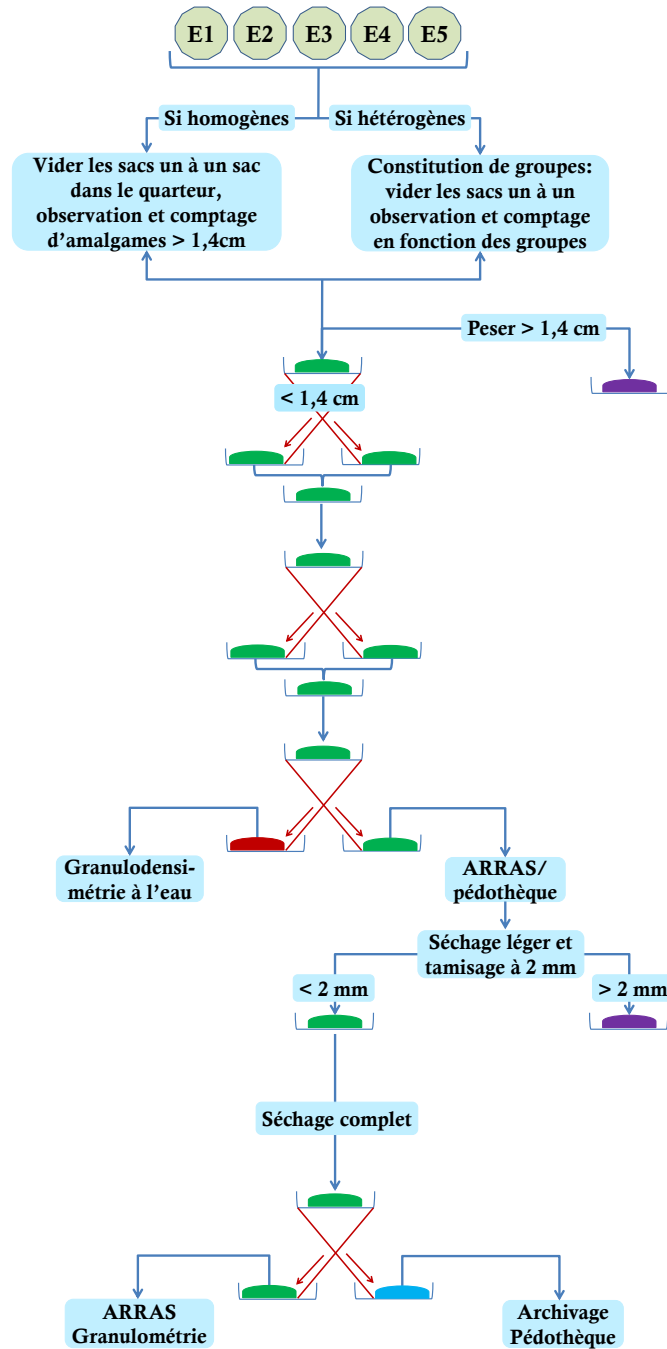
2.3. Opération d'homogénéisation des échantillons

Nous disposons ainsi de 1 à 5 échantillons « perturbés » par maille de 20 m X 20 m. L'idée à travers cette opération, est de réduire le nombre d'échantillons par maille tout en respectant l'hétérogénéité entre échantillons. Les échantillons mis à conservation dans le réfrigérateur sont pesés, puis observés à l'œil nu. Les échantillons qui n'affichent pas de différence marquée en termes de couleur, aspect, structure, rapport TIT/SPP ou humidité, sont rassemblés en un seul, sinon ils sont conservés séparément. Si bien que par maille de 5 m X 5 m, en fonction de l'hétérogénéité des échantillons, on peut avoir de 1 à 3 échantillons composites. Ensuite, tous les échantillons composites sont passés dans un quartier d'ouverture 1,4 cm (largeur) (Figure 9).



Figure 9. Echantillon de la maille L4 sur le quarteur pour description

Tous les amalgames supérieurs à 1,4 cm ne passant pas à travers les ouvertures du quarteur sont comptés, observés et décrits. Après description, ils sont émiettés et associés à la partie inférieure à 1,4 cm. Toutes les autres particules qui ne peuvent être émiettées, comme les cailloux, sont dénombrées et écartées. Les échantillons sont passés deux fois à travers le quarteur jusqu'à homogénéisation complète, puis finalement pesés. Ils sont ensuite divisés en deux parties toujours à l'aide du quarteur. Une partie est conservée au frais pour le fractionnement granulométrique à l'eau et l'autre partie est mise à sécher à l'air avant tamisage à 2 mm. Après tamisage, le refus [2 mm-1,4 cm] est pesé et évacué. La fraction fine (< 2 mm) est complètement séchée à l'air puis divisée en deux à l'aide du quarteur. Une partie est conservée dans la pédothèque du laboratoire et l'autre est destinée à la caractérisation physico-chimique, en particulier l'analyse texturale (laboratoire d'analyses des sols de l'INRA, Arras) (Figure 10).



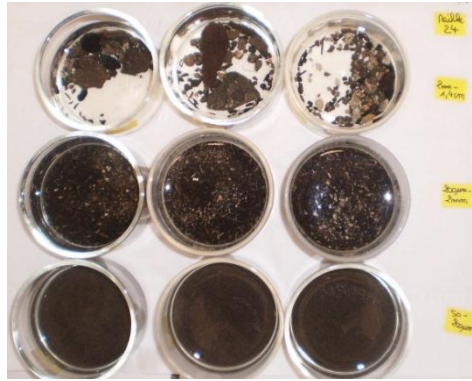


Figure 11. Fractions récupérées par tamisage

La fraction inférieure à 50 μm récupérée est complétée à 700 ml à l'eau distillée et mise en agitation mécanique pendant 16 h à 15 tours par minutes. La récupération des particules dans cette fraction est faite par siphonage en se basant sur la loi de Stokes. A la fin de l'agitation, le contenu est récupéré dans une allonge et le tout est complété à un 1 litre. On agite manuellement pendant 1 mn, puis on laisse décanter (Figure 12).



Figure 12. Décantation des échantillons avant prélèvement (photo, Adeline Bouchar)

Le temps de décantation avant prélèvement et la profondeur à laquelle se fait le prélèvement dans l'allonge sont fonction de la température de la suspension et de la taille des particules (supposées sphériques) à prélever (Tableau 2).

Tableau 2. Détermination du temps de sédimentation des fractions en fonction de leur diamètre et de la température. PS : profondeur de siphonage ; LG : limon grossier ; LF : limon fin ; A : argile, (h :mn :s) : heure, minute, seconde.

PS (cm)	Fraction	T (°C)	Durée (h:mn:s)
10	LG+LF+A	24	00:00:42
10	LF+A	24	00:04:22
10	A	24	07:16:00

Ces trois fractions sont récupérées dans des cristallisoirs et mises à sécher dans une étuve à 105°C pendant 16 h. Elles sont ensuite pesées. La détermination pondérale de la fraction A se fait par mesure, celle des fractions LF et LG par calcul selon :

$$LF = (LF + A) - A \quad 2$$

$$LG = (LG + LF + A) - (LF + A) \quad 3$$

LG correspond aux particules de diamètre [20-50 µm], LF à celles comprises entre [2- 20 µm] et les argiles (A) entre [0,2-2 µm]. On obtient ainsi la distribution pondérale du sol en cinq fractions granulométriques. Ces fractions (SG, SF, LG, LF et A) sont appelées ainsi car elles sont de même taille granulométrique que les sables, limons et argiles, mais elles ne correspondent pas à l'analyse texturale.

2.5. Analyse texturale

L'analyse texturale des échantillons de sol, incluant la décarbonatation et la destruction de la matière organique, est réalisée sur les prélèvements de 2008 et 2010. Par contre, en 2010, cette analyse est également effectuée sans décarbonatation. La granulométrie après décarbonatation consiste à détruire les carbonates (calcaires) par dissolution à l'aide de l'acide chlorhydrique (HCl) (Baize, 2000). Ainsi, la comparaison des distributions pondérales obtenues après le fractionnement granulodensimétrique à l'eau d'une part et la texture avant et après décarbonatation d'autre part, nous permettra de différencier la contribution de la matière organique et des carbonates dans la formation des associations organominérales des différentes fractions.

2.6. Réalisation et description de lames minces de sol

Des lames minces ont été fabriquées à partir des échantillons non perturbés selon la méthode décrite par Guilloire (1980). Les échantillons sont disposés dans une enceinte sous vide où ils sont imprégnés à l'aide d'une résine polyester non miscible à l'eau. Auparavant, l'eau contenue dans les échantillons est remplacée par de l'acétone en phase liquide. Après imprégnation, les échantillons sont placés hors de l'enceinte à température ambiante. Après polymérisation de la résine, l'échantillon se présente sous forme d'un bloc dur à partir duquel les lames sont fabriquées. Pour ce faire, le bloc est coupé en deux parties à l'aide d'une scie mécanique, une des deux parties est ensuite réduite à un échantillon d'environ 7 mm d'épaisseur à partir du bord intérieur du bloc. Cet échantillon est fixé sur une lame de verre, puis poli à l'aide d'une meule diamantée jusqu'à l'obtention d'une lame de 20 µm d'épaisseur.

Ces lames sont observées à l'aide d'un stéréomicroscope Leica MFLZIII munie d'une camera Leica DCF300. Elles sont ensuite décrites selon Bullock *et al.* (1985) en tenant compte de la spécificité des matériaux anthropiques observés. En particulier, des objets remarquables sont identifiés, comme des associations entre les différents constituants, dénommées « amalgames » et comparés avec les amalgames identifiés lors du quartage.

III. Résultats et discussions

3.1. Diversité des amalgames identifiés par quartage

L'observation des échantillons a permis de décrire et d'identifier plusieurs types d'amalgames (Figure 13). Ceci nous a permis de définir 7 types d'amalgames modèles à savoir : amalgame homogène de SPP pur (Ah-SPP), amalgame homogène de TIT/SPP (Ah-TIT/SPP), amalgame homogène de SPP avec des substances brunes (Ah-SPP_sb), amalgame hétérogène de TIT/SPP avec substances brunes (Ahe-TIT/SPP_sb), nodule de SPP avec un noyau de TIT (N-SPP_no-tit), nodule de TIT/SPP avec noyau de substances brunes (N-TIT/SPP_no-sp), nodule de TIT/SPP avec noyau de SPP (N-TIT/SPP_no-SPP).



Figure 13. Exemples d'amalgames rencontrés lors du quartage. a) TIT/SPP avec noyau de SPP ; b) TIT/SPP avec un noyau noir.

Lors de l'opération de quartage, on compte chaque type d'amalgame rencontré dans chaque aliquote de sol après comparaison à l'un des sept modèles types. Parfois, des amalgames ressemblent quasi parfaitement au modèle défini préalablement et parfois non, avec quelques différences. Cette différence n'est cependant pas assez marquée pour les différencier dudit modèle. Néanmoins, le type de différence est mentionné tout en comptabilisant l'amalgame dans sa propre catégorie. Par exemple, dans la maille N°2 - échantillon L2, l'amalgame hétérogène formé d'un mélange de TIT/SPP parsemé de substances brunes est rencontré 14 fois, mais parmi eux, 10 présentent un amas bien

distinct de SPP, 3 ont une incrustation de cailloux et 1 est constitué de SPP stratifié. D'un point de vue couleur, dans la maille N°7, échantillon P6, le même type d'amalgame est rencontré trois fois et un seul présente des tâches rouille. Du point de vue de la disposition aussi, les amalgames peuvent être légèrement différents. En effet, toujours dans l'échantillon P6 de la maille N°7, l'amalgame hétérogène de TIT/SPP parsemé de substances noires est disposé en double couche : du compost noir plus TIT déposé sur du SPP.

3.1.1. Campagne de 2008, T0

Dans la modalité éponge végétale (Wb) il y a pratiquement deux fois plus d'éléments grossiers (cailloux essentiellement) que dans la modalité confinement (Co). En effet, les pourcentages moyen de refus $>1,4$ cm sont de $10,15 \pm 3,26$ pour Wb contre $7,71 \pm 3,76$ pour Co.

Si l'on fait abstraction de cette différence, on peut noter que dans Wb, le type d'amalgame majoritairement rencontré est celui formé par un mélange homogène de TIT/SPP (29,65 % du total des amalgames observés par kg de sol). Les autres fréquemment observés sont ensuite les amalgames formés d'un mélange hétérogène de TIT/SPP parsemé de substances brunes (24,18 %) et les amalgames homogènes de SPP pur (15,38 %). Le moins couramment rencontré est l'amalgame homogène de SPP parsemé de substances brunes (2,2 %). Dans la modalité confinement, l'ordre décroissant de fréquence d'observation des amalgames se dessine comme suit : amalgames hétérogènes de TIT/SPP parsemés de substances brunes (59,17 %) plus nombreux que les amalgames homogènes de TIT/SPP (15,14 %) eux-mêmes plus nombreux que les nodules de TIT/SPP avec un cœur distinct de SPP pur (10,55 %). Les moins nombreux sont les amalgames de SPP pur (1,61 %).

3.1.2. Campagne de 2009

Les éléments grossiers (supérieurs à 1,4 cm de diamètre) sont abondants: $17,05 \pm 6,18$ % et $16,83 \pm 4,89$ % respectivement pour les modalités éponge végétale et confinement. Dans la modalité éponge, les types d'amalgames les plus nombreux sont ceux formés par un mélange homogène de TIT/SPP (44,52 % du total des amalgames rencontrés par kg de sol). Dans la modalité confinement, les amalgames formés par un mélange homogène de TIT/SPP sont particulièrement fréquents (55,94 %), suivis d'amalgames hétérogènes de TIT parsemés de SPP (17,33 %). Les nodules de SPP avec un cœur distinct de TIT occupent toujours la dernière place (0,65 %). Comparativement à la campagne T0, en T1 on remarque l'apparition d'un nouveau type d'agrégat. Il s'agit d'un amalgame biologique formé par les racines des plantes (Figure 14). Les

racines entrelacent les particules de terre ou de sous-produit papetier et forment un nodule très consolidé difficile à désagréger.



Figure 14. Amalgame de racines enchevêtrées

Ces types d'amalgames se rencontrent dans les deux modalités et révèlent une évolution dans le fonctionnement du sol.

3.2. Évolution des amalgames de 2008 à 2009

En 2008 nous avons identifié 9 types d'amalgames alors qu'en 2009 nous en avons dénombré 11. Deux nouveaux amalgames sont donc spécifiques à 2009 : (1) un nodule de mélange de TIT/SPP avec un noyau de SPP pur et (2) un amalgame biologique formé par les racines (Figure 13). Il faut noter que les racines ont considérablement participé à la formation d'autres types d'amalgames.

Sept types d'amalgames sont communs à 2008 et 2009. On remarque que les amalgames hétérogènes TIT/SPP, avec substances brunes, dominent largement en 2008, alors qu'en 2009 les amalgames homogènes TIT/SPP sont les plus nombreux (Figure 15).

41

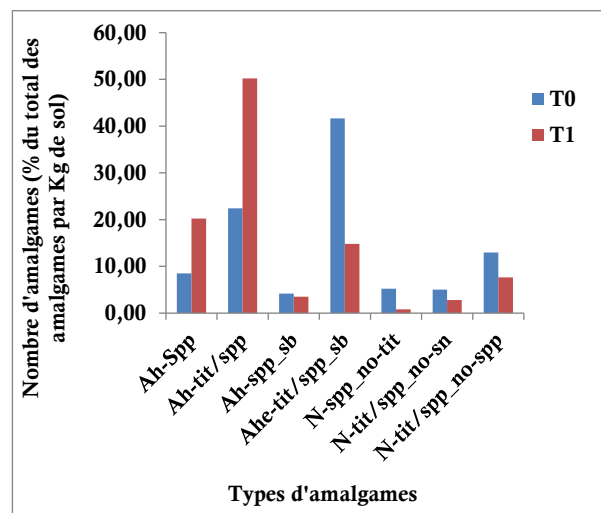
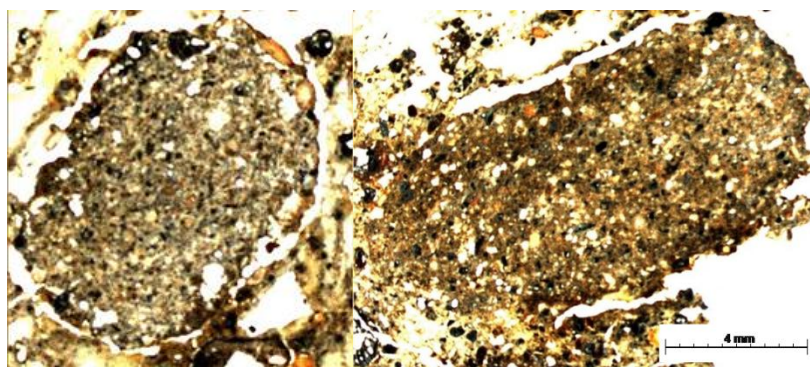


Figure 15. Évolution du nombre d'amalgames au cours du temps. Ah-SPP : amalgame homogène de SPP pur ; Ah-TIT/SPP : amalgame homogène de TIT/SPP ; Ah-SPP avec des substances brunes ; Ahe-TIT/SPP_sb : amalgame hétérogène de TIT/SPP avec substances brunes ; N-SPP_no-tit : nodule de SPP avec un noyau de TIT ; N-TIT/SPP_no-sp ; nodule de TIT/SPP avec noyau de substances brunes ; N-TIT/SPP_no-SPP : nodule de TIT/SPP avec noyau de SPP.

On peut dire que le nombre d'amalgames hétérogènes diminue au profit d'un mélange homogène de TIT/SPP. Cette homogénéisation peut être due à l'activité biologique, notamment celle des racines très nombreuses en 2009 suite au développement important de la végétation. Le nombre d'amalgames homogènes de SPP (Ah-SPP) augmente aussi avec le temps ; ceci peut sembler paradoxal puisqu'on s'attendait à ce que tous les amalgames purs se dissocient, se fragmentent pour se mélanger avec d'autres de nature différente. Cette augmentation est peut être liée à l'hétérogénéité intrinsèque du mélange, ce qui veut dire qu'en T1 on a probablement échantillonné là où les nodules de SPP sont proportionnellement plus nombreux. Cette hétérogénéité peut être liée au comportement particulier du SPP. En effet il a tendance à s'agglomérer en présence d'humidité; lorsqu'il sèche, il forme un agglomérat très dur et élastique difficile à briser même par application d'une force mécanique. Ceci n'est pas le cas de TIT, le taux d'argile qui serait susceptible de lui conférer des propriétés adhérentes et élastiques étant très faible. Dans ces conditions, la probabilité d'avoir des amalgames homogènes de SPP est plus grande. Une autre hypothèse serait qu'avec la pluie, les amas de SPP auraient tendance à s'agglomérer entre eux, alors que la TIT serait désagrégée et lessivée. Si la TIT n'est pas lessivée et qu'elle est mélangée à du SPP, elle peut adhérer autour du nodule de SPP pur, constituant ainsi un noyau pour l'ensemble.

3.3. Diversité des amalgames identifiés sur lames minces

L'observation des lames minces met en évidence la présence de débris végétaux, cailloux et amalgames comme le mélange homogène de TIT/SPP, entouré parfois d'un mélange avec une grande proportion de SPP (Figure 16).



a

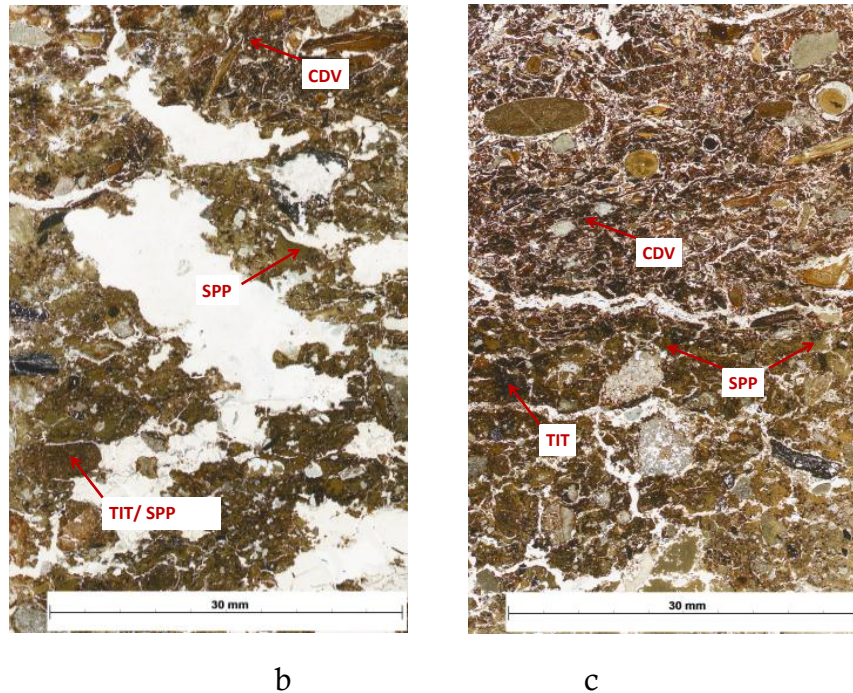


Figure 16. Deux amalgames homogènes de TIT/SPP. (a) extraits d'image de la maille 17 en 2008 (b). (c) est sa correspondante en 2010. TIT: terre industrielle traitée, SPP : sous-produit papetier, CDV : compost déchet vert

On observe aussi des amalgames de TIT/SPP avec un cœur de TIT (Figure 17 a) et des amalgames de TIT avec un noyau de SPP (Figure 17 b). Certains cailloux peuvent également être observés au sein d'amalgames constitués de TIT ou du mélange TIT/SPP (Figure 17 c).

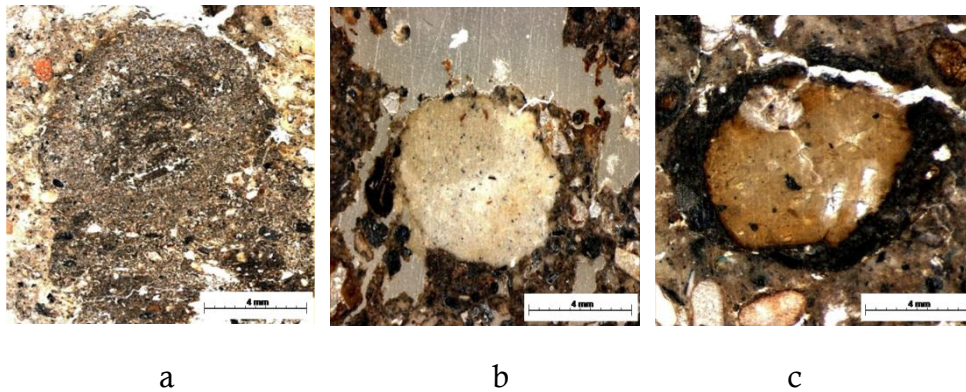


Figure 17. Amalgames observés sur les lames minces : a) TIT/SPP avec un noyau de TIT ; b) TIT/SPP avec un noyau de SPP et c) TIT/SPP avec un caillou.

D'une manière générale, tous les types d'amalgames rencontrés lors du quartage sont aussi identifiables sur lames minces. En plus de cela, on rencontre d'autres types d'amalgames qui, vus en coupe paraissent comme spécifiques aux lames minces. Ceci peut être dû au fait que sur lame, les observations peuvent être plus précises que sur l'échantillon. En effet, sur lames minces, le sol est bien stabilisé et toutes les structures présentes se conservent telles quelles, alors que dans l'échantillon, la

perturbation est très importante. On peut noter trois niveaux de perturbation : lors de l'échantillonnage, lors du transport et lors de la manipulation des sacs de terre. Toutes ces perturbations peuvent modifier ou détruire la structure.

3.4. Evolution de la stabilité structurale au cours du temps

3.4.1. Effet du temps sur la stabilité structurale

Les fractionnements granulométriques réalisés au LSE ont été faits sans destruction de la matière organique (cf. protocole dans le paragraphe 1.4). Les différentes fractions granulométriques peuvent donc contenir des associations organominérales. Les résultats du fractionnement à l'eau montrent une prédominance de la fraction [200 – 2000 μm] que ce soit en 2008 ou 2010, avec une augmentation avec le temps (Mann-Whitney, $p < 0,0001$). La proportion d'agrégats de la fraction [2 – 20 μm] quant à elle diminue avec le temps (Mann-Whitney, $p < 0,0001$). Par contre, le temps n'a aucun effet significatif sur l'évolution pondérale des autres fractions (Tableau 3).

Tableau 3. Distributions pondérales en pourcentage (moyenne $\pm$ écart type) des fractions granulométriques obtenues après fractionnement à l'eau et analyse texturale après décarbonatation (en gras entre parenthèses) au cours du temps, T0 : 2008, T2 : 2010.

	200-2000 μm	50-200 μm	20-50 μm	2-20 μm	0-2 μm
T0	40,8 $\pm$ 2,5 (17,3 $\pm$ 5,8)	23,8 $\pm$ 1,2 (12,3 $\pm$ 5,5)	8,6 $\pm$ 2,2 (7,2 $\pm$ 3,1)	22,1 $\pm$ 1,7 (19,1 $\pm$ 4,8)	4,7 $\pm$ 0,8 (43,8 $\pm$ 12,2)
T2	44,7 $\pm$ 2,5 (24,9 $\pm$ 5)	23,9 $\pm$ 1,2 (13,7 $\pm$ 2,8)	7,6 $\pm$ 1,1 (8,5 $\pm$ 1,2)	19,1 $\pm$ 1,7 (21,5 $\pm$ 4,5)	4,6 $\pm$ 1,2 (31,4 $\pm$ 5,1)

Toutefois l'hétérogénéité texturale observée (la texture apparaît plus grossière en 2010 qu'en 2008, Mann-Whitney, $p = 0,0002$), ne permet pas d'attribuer cette modification à une évolution pédogénétique.

Influence de la matière organique sur la distribution pondérale des fractions

Après destruction de la matière organique par l'eau oxygénée, une partie des associations organominérales se désagrègent. Les particules minérales ayant contribué à la formation de ces agrégats se retrouvent ainsi libres et peuvent alimenter les fractions plus petites. La comparaison entre les résultats issus du fractionnement granulodensimétrique à l'eau et l'analyse texturale sans décarbonatation permettent de souligner le rôle de la matière organique dans la stabilité des agrégats. L'analyse texturale sans décarbonatation n'ayant pas été réalisée en 2008, nous avons utilisé les résultats de l'analyse texturale sans décarbonatation réalisée au moment de la mise en place des parcelles sur les matériaux parents, en l'occurrence le mélange TIT/SPP (Figure 18 a). Cette comparaison suggère alors l'implication de matières

organiques dans l'association des particules $< 2 \mu\text{m}$ au sein de la fraction 2-20 μm et dans une moindre mesure au sein de la fraction 50-200 μm (Figure 18 a). Pour T2, la matière organique intervient essentiellement dans l'association de la fraction $< 2 \mu\text{m}$ à la fraction 50-200 μm (Figure 18 b). Ceci veut dire que des matières organiques et des particules minérales $< 2 \mu\text{m}$ contribuent notablement aux associations de la fraction 50-200 μm . Les autres fractions ne montrent pas une différence significative, même après destruction des ciments organiques.

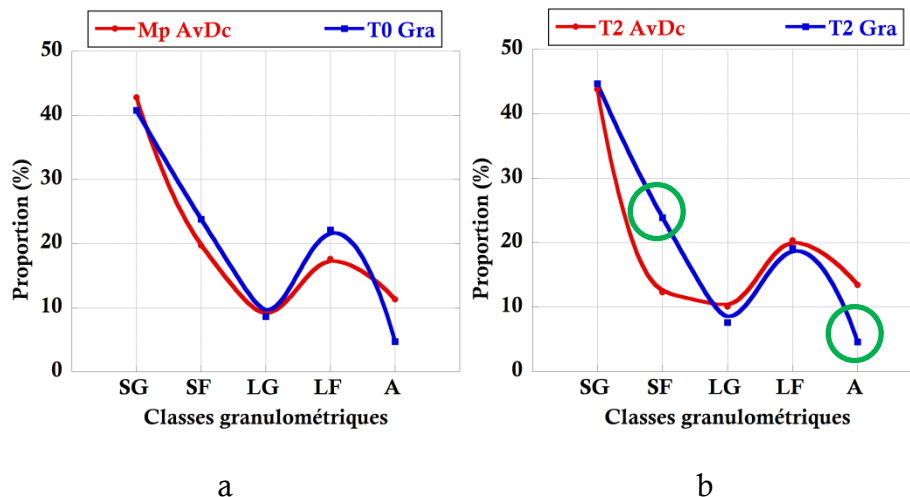


Figure 18. Rôle de la matière organique et des carbonates sur la formation de macroagrégats à T0 (a) et T2 (b). T0 : 2008, T2 : 2010, AvDc : avant décarbonatation, ApDc : après décarbonatation, Gra : granulodensimétrie. Mp : matériaux parents (TIT/SPP). Les points entourés de cercle vert indiquent les fractions significativement différentes entre Gra et AvDc.

Influence des carbonates sur la distribution pondérale des fractions

Lorsque, en plus de la minéralisation des matières organiques, on détruit les carbonates par attaque acide, on observe une nouvelle répartition des particules permettant d'établir la texture du sol (Figure 19). L'observation de cette figure montre qu'il y a des carbonates dans la fraction SG et que ces carbonates sont de la taille des SF et des A surtout. On peut imaginer que le calcaire associé aux particules de taille granulométrique SF soit dissout au cours du temps, ce qui libère des particules de taille granulométrique plus petite. Ce calcaire est sans doute lié aux autres particules par de l'argile pour former des associations organominérales. En effet, l'argile est considérée comme l'élément qui assure l'essentiel de la cohésion des agrégats (Baize, 2000). C'est ce qui expliquerait un enrichissement de la fraction $< 2 \mu\text{m}$ après décarbonatation. Mise à part la dissolution au cours de la pédogenèse, certains auteurs comme Dupuis (1969) avancent que de 1 à 5 % de calcaire par rapport au calcaire total peut être dissout lors de l'attaque de la matière organique par l'eau oxygénée. En 2010, la proportion des SG passe de 43,8 % à 24,8 % avant et après décarbonatation respectivement, soit quasiment une réduction de moitié (43,2 %).

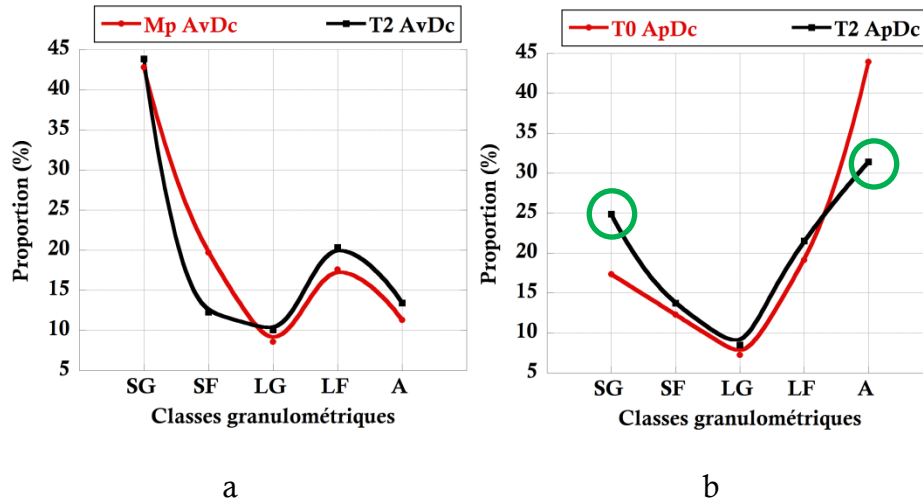


Figure 19. Influence des carbonates sur la distribution granulométrique. T0 : 2008, T2 : 2010, AvDc : avant décarbonation (a), ApDc : après décarbonation (b), Mp : matériau parent (TIT/SPP). Les points entourés de cercle vert indiquent les fractions significativement différentes entre T0 et T2.

Les LG, quant à eux, montrent une baisse de 15,87 % après décarbonation. Autrement dit, les SG et les LG sont constitués respectivement de 43,2 % et 15,87 % de calcaire associés à des particules de taille granulométrique plus petite. La proportion pondérale de certaines fractions évolue avec le temps. En effet, les SG et les LF sont significativement plus importants en 2010 qu'en 2008, tandis que la proportion des agriles diminue significativement avec le temps (Figure 18b) ; (Mann-Whitney test, $p = 0,00022$, $p = 0,03$, et $p = 0,00025$ respectivement). Ceci peut paraître paradoxal car la texture d'un sol n'est pas susceptible de changer aussi rapidement. Cette différence de texture peut être expliquée par la dissolution des particules gypseuses et ferriques lors de la pédogenèse et des différentes opérations d'analyse. En effet, le taux de Ca a considérablement baissé quand on compare sa proportion dans Mp et à T0 (Tableau 5). On peut imaginer que le même phénomène s'est produit entre T0 et T2 avec sans doute plus d'ampleur puisqu'en 2010 le sol est plus soumis à l'influence des facteurs biologiques (racines, microorganismes, vers de terre) et climatiques (humidité, température, pH) comparativement à T0.

3.4.2. Effet des modalités sur la stabilité structurale

Des tests de comparaison de médianes ont été effectués sur les données de granulodensimétrie et de granulométrie après décarbonation pour les deux modalités de construction de sol, Wb (modalité éponge) et Co (modalité confinement).

Influence de la matière organique

À T0, la modalité de construction de sol semble avoir une influence sur la distribution des associations organominérales. En effet, la proportion

des SG dans Wb est significativement plus faible que celle de la modalité confinement alors que l'ordre s'inverse pour ce qui est de la proportion des LG (p value = 0,0002, $p < 0,0001$ respectivement) (Figure 20).

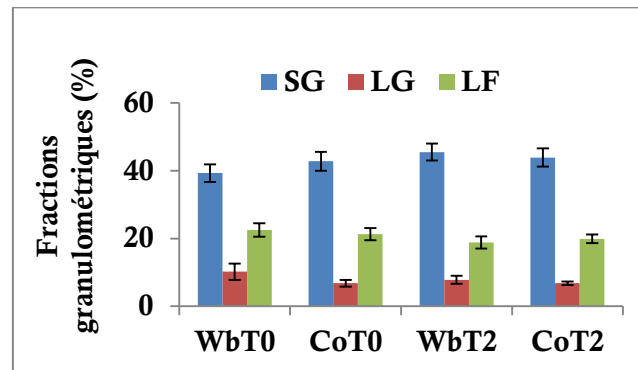


Figure 20. Evolution de la distribution pondérale des fractions granulodensimétriques en fonction du temps et des modalités de construction de sol. T0 : 2008, T2 : 2010, Wb : modalité éponge, Co : modalité confinement. SG : sable grossier, LG : limon grossier, LF : limon fin.

Malgré des proportions de certaines fractions organominérales significativement différentes à T0, cette différence ne s'explique pas d'un point de vue pédogénétique, puisque les sols venaient juste d'être mis en place. A moins que l'énergie apportée lors de la mise en œuvre des matériaux (difficile à quantifier) avait une influence sur la structure de ce sol. La présence d'agrégats de fraction SG et LG différents entre Wb et Co à T0 est donc due à l'hétérogénéité du sol.

A T2, les proportions des associations LG de la modalité éponge sont significativement supérieures à celles de la modalité confinement ($p = 0,0003$; $p = 0,0004$ respectivement) (Figure 20), alors qu'en 2008 les proportions des LG de la modalité éponge sont plus faibles que celles de la modalité confinement ($p < 0,0001$). Si la matière organique est dégradée, les associations organominérales se dispersent en des particules ou associations plus petites. Ceci expliquerait le fait que dans Wb on ait des proportions d'agrégats (LG) plus importantes que dans la modalité confinement car la modalité Wb est construite de telle sorte qu'elle serve de réserve d'eau pendant les périodes sèches. Si on compare année par année, on remarque que dans la modalité Wb, les agrégats de fraction SG augmentent avec le temps ($p < 0,0001$), tandis que ceux des fractions LG et LF diminuent avec le temps ($p = 0,0023$; $p < 0,0001$ respectivement). Dans la modalité Co, les agrégats de fraction LF sont en proportions plus élevées en 2008 qu'en 2010 ($p = 0,016$), tandis que ceux des autres fractions ne montrent aucune différence significative. Ceci confirme ce qu'on a observé au sein d'une même année. En effet, le mode de construction de la modalité éponge fait que la matière organique est moins dégradée que dans la modalité confinement, ce qui conserverait les associations organominérales

intactes. Cette baisse - augmentation de significativité au cours du temps entre les particules grossières et fines de mêmes modalités ou de modalité différentes est expliqué par la théorie hiérarchique de l'agrégation de Tisdall and Oades (1982) selon laquelle les particules de petite taille s'associent entre elles pour former des particules plus grosses. Toutes choses étant égales par ailleurs, s'il y a beaucoup de macroagrégats, la proportion des microagrégats diminue puisque les premiers sont formés à partir des seconds. Malgré les différences significatives de proportion d'associations organominérales qu'on a observé entre les modalités on peut dire que les modalités de construction de sol influent faiblement dans la structuration du sol en deux ans. Néanmoins, ça reste un paramètre à suivre car il est susceptible d'avoir un effet à long terme.

Influence et répartition des carbonates

Le tableau 5 rassemble les distributions pondérales des fractions correspondant à l'analyse texturale et au fractionnement sans décarbonatation. La répartition des carbonates au sein des fractions est très hétérogène. Il y a plus de carbonates dans les fractions SG (44% et 43% dans les modalités Wb et Co respectivement) et LG (15% et 17% dans Wb et Co respectivement). Il s'agit de carbonates moins actifs puisque de fraction grossière, donc moins susceptible d'être préjudiciable aux plantes. Les carbonates contribuent ainsi considérablement à la formation des associations organominérales. Cependant, les modalités de construction de sol n'ont aucune influence sur leur répartition dans le profil.

Tableau 4. Texture en fonction du temps et des modalités de construction de sol (moyenne, $\pm$ écart type). T0 : 2008, T2 : 2010, Wb : modalité éponge, Co : modalité confinement. Les lettres minuscules différentes indiquent une différence significative au sein d'une même année ; les lettres majuscules différentes indiquent une différence significative entre année (Mann-Whitney, $p = 0,05$). Les valeurs entre parenthèse en gras sont les résultats de l'analyse granulométrique avant décarbonatation. Ces analyses ont été faites uniquement en 2010.

	SG	SF	LG	LF	A
WbT0	20,5 $\pm$ 3,7aA	14,2 $\pm$ 4,3aA	8,2 $\pm$ 2,6aA	18,3 $\pm$ 5,7aA	38,2 $\pm$ 8,8aA
CoT0	14,1 $\pm$ 5,8bA	10,3 $\pm$ 6,0aA	6,2 $\pm$ 3,3aA	19,8 $\pm$ 3,8aA	49,5 $\pm$ 12,9bA
WbT2	25,5 $\pm$ 5,2aA	14,7 $\pm$ 3,3aA	8,8 $\pm$ 2,6aA	22,2 $\pm$ 6,0aB	28,7 $\pm$ 4,5aB
	(45,4$\pm$3,9)	(13,3$\pm$1,0)	(10,4$\pm$1,2)	(18,4$\pm$2,1)	(12,6$\pm$2)
CoT2	24,2 $\pm$ 4,9aB	12,7 $\pm$ 1,7aA	8,1 $\pm$ 1,0aA	20,8 $\pm$ 1,8aA	34,3 $\pm$ 4,0bB
	(42,1$\pm$4,4)	(11,2$\pm$1,1)	(9,8$\pm$1,6)	(22,5$\pm$2,5)	(14,4$\pm$0,8)

L'hétérogénéité du système et la dissolution des particules gypseuses ou du fer pourraient expliquer cette différence de fractions insolubles qu'on observe. Aussi, dans ce type de sol, il a été montré qu'il y a des agrégats Technogéniques et des laitiers (Monsérié *et al.*, 2009). Ces composés peuvent s'altérer en présence de certains facteurs ce qui enrichirait le sol en particules élémentaires.

IV. Conclusion

Le Technosol construit présente une très grande hétérogénéité structurale due aux conditions de sa mise en place. Cette hétérogénéité se caractérise par la formation d'amalgames hétérogènes de TIT/SPP identifiables aussi bien lors des observations durant le quartage que lors de l'analyse micromorphologique sur lames minces. Cependant, cette hétérogénéité initiale s'estompe peu à peu sous l'influence des facteurs pédogénétiques. A T2 déjà, des amalgames hétérogènes font place aux amalgames homogènes de TIT/SPP. En plus d'amalgames résultant de l'action de l'humidité et de la présence de matière organique, une autre catégorie d'amalgames biologiques se forme avec le temps. Il s'agit d'amalgames formés par l'enchevêtrement des racines autour des particules de sol. La comparaison des analyses texturales et de l'analyse granulométrique après fractionnement à l'eau révèle le rôle prépondérant de la matière organique et des carbonates dans la formation des associations organominérales. En général, la proportion des agrégats (200 – 2000 μm) croît avec le temps. Les modalités de construction de sol, par contre, agissent de manière disparate sur la formation des agrégats. Si les différences observées à T0 sont surtout dues à l'hétérogénéité intrinsèque du sol, à T2 la formation d'agrégats (LG) est plus intense dans la modalité éponge que dans la modalité confinement. Mais malgré ces différences significatives qu'on observe, il est difficile de les attribuer à l'évolution pédogénétique.

Chapitre III. Premiers stades d'évolution de la porosité de Technosols construits

I. Introduction

Les Technosols font partie de la classe des sols fortement anthropisés et présentent des caractéristiques agronomiques très contrastés comparativement aux sols naturels (Lefort, 2009). Si par définition la composition des Technosols est différente de celle des sols naturels (IUSS_Working_Group_WRB, 2006), on ne sait pas si leur pédogenèse est spécifique. Il est cependant nécessaire de connaître comment ces sols se fonctionnalisent et le stade vers lequel ils peuvent évoluer. La structure, en particulier l'architecture des pores fait partie des premières propriétés qui sont modifiées sous l'influence de facteurs pédogénétiques. Malheureusement elle est peu ou pas étudiée sur les Technosols. L'objectif de ce chapitre est d'étudier l'évolution au cours du temps de l'architecture de pores dans un Technosol construit.

II. Matériels et méthodes

2.1. Echantillonnage

Les échantillons utilisés sont les mêmes que ceux présentés dans le chapitre précédent, à savoir les 23 échantillons non perturbés prélevés en 2008 et 2010 sur les 23 mailles du dispositif implanté sur la station expérimentale du GISFI (Figure 21). Ces échantillons sont conservés et utilisés pour la fabrication de lames minces.

51

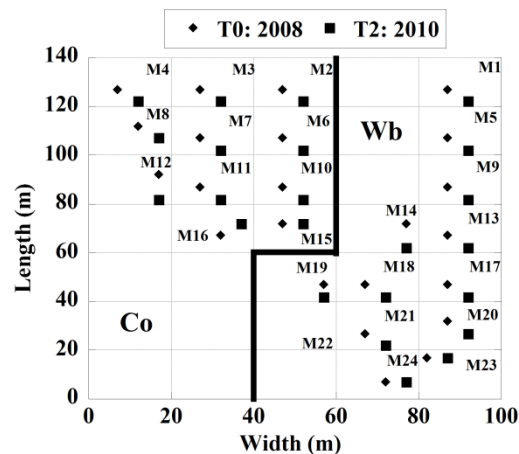


Figure 21. Plan d'échantillonnage sur la parcelle de 1 hectare. Modalités de construction de sol : Co : confinement, Wb : éponge végétale.

2.2. Fabrication de lames minces

Chaque échantillon a servi pour fabriquer une lame mince selon la méthode décrite par (Guilloré, 1980; Murphy, 1986). Détaillée dans le deuxième chapitre au point §§1.5.

2.3. Acquisition d'images

Les lames minces de sol sont scannées en couleur à l'aide d'un scanner EPSON V750 Perfection Pro à une résolution de 1200 dpi. Chaque pixel a une taille de 21 μm . Les images sont sauvegardées en format tif et une sous-image de 35,06 x 60,06 mm (soient 2105,70 mm^2) est échantillonnée sur chaque image. Cet échantillonnage est nécessaire pour éviter les artéfacts de bordure sur certaines lames. La microporosité (0,2 – 25 μm) est connue pour jouer un rôle significatif dans la constitution de la réserve en plus tard restituée aux plantes et aux microorganismes (Greenland et Pereira, 1977). Pour la quantifier nous avons utilisé les images magnifiées issues des lames précédentes. Pour ce faire nous avons utilisé un microscope photonique Leica DM2500 équipé d'une caméra Leica EC3. Nous avons utilisé 10 lames de chaque année (2008 et 2010) où trois images de grossissement X20 avec une résolution spectrale de 24bits couleur par pixel ont été capturées sur chaque lame. La taille minimale d'un pixel est 0,16 μm et chaque image a une dimension de 2048 X 1536 pixels ce qui équivaut à 327,68 X 245,76 μm .

2.4. Protocole d'analyse d'images de lames minces

Les images sont importées dans un logiciel professionnel d'analyse d'images Visilog vs 7 (Noesis) installé sur un ordinateur Dell Precision T7500 sous Windows 764 bits, avec 12 Go de RAM et d'un processeur de 4,8 Ghz. Le protocole est mis au point en respectant les étapes standards d'analyse d'image : filtrage, segmentation, transformation de niveau de gris et seuillage. Les paramètres de ces étapes ont été choisis après comparaison des résultats des différentes méthodes disponibles obtenus pour une même image (Cocquerez, 1995).

2.4.1. Filtrage

C'est une opération qui permet de réduire ou éliminer les bruits d'une image. Il existe plusieurs types de filtres : le filtre utilisé ici est le lissage. Le lissage est une transformation morphologique appliquée à la fonction de niveau de gris, qui permet d'éliminer les variations fortes (+ ou -) du signal pour garder l'intensité de l'image à peu près constante. Cette fonction permet de ne garder que les transitions significatives et prépare ainsi à la détection des contours. Il s'agit d'appliquer un élément structurant (ici matrice de taille 3x3) centré en un point. Le filtre utilisé ici est le filtre médian car il conserve au mieux les transitions entre objets.

2.4.2. Segmentation/ Texture

La texture est une répétition spatiale d'un motif dans une direction donnée (Cocquerez, 1995) et décrit la structure des objets (Kunt, 1993).

Elle permet d'identifier tous les objets similaires au sein d'une image. La texture est basée sur la statistique de premier ordre. Le résultat est une image dont la valeur des pixels dépend de celle des pixels d'origine et de leur voisinage. La valeur du pixel résultat (n) est calculée selon une loi de probabilité (pn) en utilisant des formules mathématiques ou statistiques. L'équation choisie est la moyenne ; l'algorithme fait donc la moyenne des valeurs des pixels voisins selon un noyau de taille (3x3) et l'attribue au pixel central.

Que cela soit pour le lissage ou la texture, plus la taille du noyau est grande ($> 3 \times 3$) (primitive de texture ou fenêtre de texture), plus on obtient des objets de grande taille et donc une réduction du nombre de petits objets devenant associés à d'autres plus grands.

2.4.3. Transformation de niveau de gris

Après l'étape de texture, l'image devient floue (Noesis, 2008); on corrige le contraste en appliquant un algorithme de transformation de niveau de gris. On procède alors à une normalisation dont l'objectif est de corriger les zones trop claires ou trop foncées selon un intervalle de niveau de gris allant de 0 à 255.

2.4.4. Classification

L'image normalisée doit être classée. Une image couleur est constitutivement hétérogène dans la mesure où une lame mince présente plusieurs objets de signatures spectrales différentes. La classification permet de séparer cette image couleur en plusieurs segments (ou régions) de mêmes caractéristiques. Le nombre de classes est choisi d'avance et tous les vecteurs sont classés ou triés en utilisant la méthode « K-means » ou méthode du plus proche voisin, dont la distance entre voisins peut être calculée selon la méthode euclidienne, scalaire ou de Mahalanobis.

Distance Euclidienne:

$$d^2(u, v) = \sum_{j=1}^p (u_j - v_j)^2 = \|u - v\|^2 \quad 4$$

Distance de Tanimoto:

$$S(x_i; v_i) = \frac{\langle x_i; v_i \rangle}{\langle x_i; x_i \rangle + \langle v_i; v_i \rangle - \langle x_i; v_i \rangle} \quad 5$$

Distance scalaire: distance entre deux vecteurs

$$\langle x_i, v_i \rangle = \sum_k (x_i[k] \times v_i[k]) \quad 6$$

Distance de Mahalanobis:

$$d^2(x_j, v_i) = |F_i|^{1/n} \times (x_j - v_i)^T \times F_i^{-1} \times (x_j - v_i) \quad 7$$

Où:

$$F_i = \frac{1}{N_i} \times \sum_{j=1}^{N_i} ((x_j - v_i) \times (x_j - v_i)^T) \quad 8$$

Avec K , le nombre de classes, S l'ensemble des vecteurs, u, v le vecteur; x_i la coordonnée, N_i le nombre de vecteurs dans la classe i , T désigne le transposé de la matrice, F la matrice de la covariance commune et n la taille du vecteur.

En réalisant plusieurs tests, nous avons choisi six classes et la distance de Mahalanobis comme paramètre « d'auto-classification ».

2.4.5. Seuillage : Binarisation

La binarisation est une opération utilisée pour simplifier une image en la rendant binaire. Cette opération consiste à segmenter les régions, c'est-à-dire extraire les zones d'intérêt pour les distinguer des autres. Il existe en effet trois principales méthodes de segmentation (Kunt, 1993) : le seuillage, la croissance des régions et l'approche multi-résolution. Le seuillage utilisé ici est le plus simple et adapté aux images classées (Kunt, 1993). L'image obtenue est binaire, où tous les pixels correspondant à la zone d'intérêt sont 1 et les autres 0 (Noesis, 2008). Le seuillage se faisant à partir d'une image classée, on extrait une (des) classe (s) correspondant à un même type d'objets en fixant un seuil identique à celui de la (des) classe(s) à extraire.

2.4.6. Point opération : arithmétique

Lors de la classification, un objet peut être réparti en plusieurs classes. Pour obtenir l'objet complet, il faut additionner les sous classes segmentées par seuillage et les additionner deux à deux. L'image résultat mérite d'être seuillée en utilisant un seuil de 1 à 10 000 correspondant à celui d'une image texture (Noesis, 2008).

2.4.7. Morphologie : d-opening (ouverture par un disque)

L'ouverture est un algorithme de morphologie mathématique utilisé pour supprimer les points isolés (Devaux *et al.*, 2009; Noesis, 2008). C'est une érosion suivie d'une dilatation avec le même élément structurant (Devaux *et al.*, 2009). Cette opération est nécessaire dans les cas où les bruits n'ont pas été éliminés lors des étapes de prétraitement. On choisit un élément structurant dont la taille est fonction de celle des points à supprimer.

2.4.8. Analyse

Sur l'image binaire précédente, nous appliquons l'algorithme de traitement appelé « analysis » pour quantifier les différents paramètres de porosité à savoir le nombre de pores, la surface, le diamètre équivalent,

le périmètre de Crofton, la distance, le volume, l'excentricité, la connectivité et la forme.

Le nombre de pores (N) : c'est le nombre de particules identifiées par le logiciel et comptabilisées en tant que pores.

Surface (A) : c'est la somme en x et y de tous les pixels contenus dans une particule (X) donnée. Elle se calcule selon la formule :

$$A(X) = \sum_{i,j} g(x_i, y_j) \quad 9$$

Où g est la fonction de coordonnées x et y

Diamètre équivalent (Ed) : c'est une variable estimée à partir de la surface. C'est le diamètre d'une particule circulaire qui aurait la même surface que le grain analysé (Figure 22). Il se calcule selon la relation :

$$Ed = \sqrt{(4 \times Area/4)} \quad 10$$

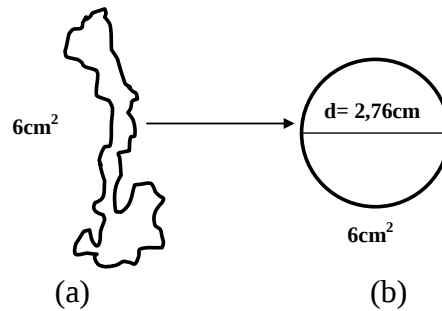


Figure 22. Mode d'expression du diamètre équivalent : (a) image extraite avec Visilog. (b) image équivalente en surface et en diamètre calculée.

Périmètre de Crofton (P) : il est calculé selon la formule de Crofton qui détermine le périmètre en fonction du nombre d'intercepts. Un intercept est le nombre de fois qu'une particule est traversée (dans le sens de l'entrée) selon une direction donnée (Figure 23):

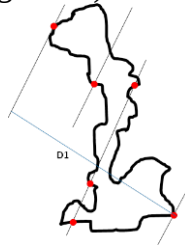


Figure 23. Illustration de l'expression de l'Intercept et du périmètre de Crofton

Le périmètre est donc égal au nombre de pixels se trouvant sur le pourtour de la particule.

Distance : c'est la distance au plus proche voisin (bord à bord) (Figure 24).

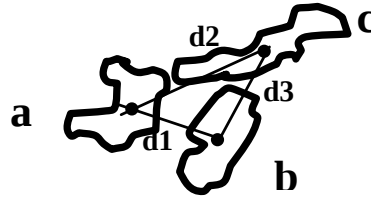


Figure 24. Illustration de l'expression de la distance au plus proche voisin. $d1 < d3 < d2$, mais le plus proche voisin de a est c ; le plus proche voisin de b est c

Volume : C'est une valeur approchée par la somme des intensités de tous les pixels contenus dans une particule (X) donnée. Il se calcule comme suit :

$$V(X) = \sum_{i,j} I(x_i, y_j) \quad 11$$

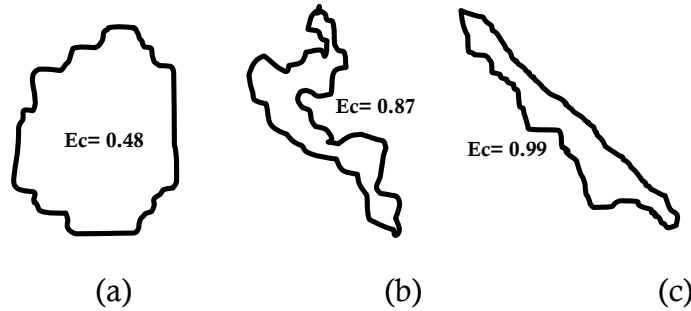
Où $I(x_i, y_j)$ est l'intensité du pixel de coordonnées (x_i, y_j) .

On remarquera que dans une image binaire, le volume d'une particule (X) serait équivalent à sa surface puisque :

$$I(x_i, y_j) = g(x_i, y_j) = 1 \quad 12$$

Excentricité : Elle mesure le degré d'allongement d'une particule. Elle varie de 0 à 1 et plus une particule est allongée, plus grande est son excentricité; une particule parfaitement sphérique aura une excentricité nulle et une particule longiligne a une excentricité de 1 (Figure 25). Elle est calculée comme suit :

$$Ec(x) = 4\pi^2 \frac{(I1 - I2)^2}{A^2(x)} \quad 13$$



Avec I_1 et I_2 les matrices d'inerties des valeurs propres.

Figure 25. Illustration de l'excentricité de certaines particules extraites avec Visilog. (c) est plus allongée que (b) elle-même plus allongée que (a), ce qui lui donne une excentricité plus grande.

L'indice de connectivité (Ic): appelée aussi connectivité bidimensionnelle désigne le degré d'interconnexion entre les pores. Il est calculé de la manière suivante :

$$Ic = 1 - \frac{Nc}{Nu} \quad 14$$

Avec Nu , nombre de particules connexes (ici nombre de pores) et Nu_c , nombre de particules convexes dans la porosité obtenu par érodé ultime.

L'indice de forme (Sf) : il mesure le degré d'irrégularité des particules. Il est d'autant petit qu'une particule est parfaitement ronde.

$$Sf(x) = \frac{P(x)^2}{4\pi A(x)} \quad 15$$

Avec P , le périmètre et A , la surface.

2.5. Correction d'erreurs d'analyse

Les grains de quartz ont dans la plupart des cas la même signature spectrale que les pores. Leur prise en compte conduit alors inéluctablement à une surestimation de la porosité. Trois techniques sont utilisées pour différencier les grains de quartz des pores : i) en amont, imprégnation des échantillons de sol avec une résine contenant un pigment (fluorescent) sensible aux rayons ultra-violets (Ringrose-Voase, 1996) ; ii) utilisation combinée des sources de lumières polarisée et non polarisée (Adderley *et al.*, 2002) et iii) comptage manuel dans le cas d'une seule source de lumière et sans pigment fluorescent. Cette dernière méthode induit des erreurs lors du comptage (Marschallinger, 1997). Elle est toutefois la seule solution dans notre cas.

Cette opération a été possible par la comparaison de : i) l'image analysée (label) précédemment à l'aide de Visilog et son originale, toutes deux affichées à l'écran de l'ordinateur ; ii) la lame originale à partir de laquelle a été obtenue l'image et iii) une loupe binoculaire équipée d'une caméra Leica DCF300. L'opération consiste à balayer la lame originale sous la loupe en établissant une correspondance avec les deux images sur l'écran. Ainsi, tous les grains de quartz pris en compte dans la porosité sont identifiés et supprimés lors de l'analyse de la porosité.

2.6. Analyse statistique

Les neuf paramètres précédemment cités sont organisés de deux manières :

- Ils ont été classés en fonction de leur diamètre circulaire équivalent selon une méthode adaptée de VandenBygaert et Protz (1999). En effet, il y a plusieurs manières de classer les pores en fonction de leur diamètre équivalent et aucune ne fait l'unanimité (Perret *et al.*, 1999). La différence se trouve au niveau des limites des classes et l'appellation qu'on leur donne. En fonction de l'étude certains considèrent comme macropores et micropores des pores de diamètre $>1000 \mu m$ et $<10 \mu m$ respectivement (Luxmoore, 1981) alors que d'autres considèrent tous les pores de diamètre compris entre $[200 - 2000 \mu m]$ comme des

macrofissures (Reeve *et al.*, 1980). Devant cette multitude de classifications, nous avons choisi celle de VandenBygaart et Protz (1999) qui proposent deux classes : [2000-500] μm et [500-50] μm . Puisque nous nous intéressons également aux pores plus grands que 2000 μm et plus petits que 50 μm , nous avons ajouté deux classes. Nous obtenons ainsi quatre classes de pores avec les diamètres et terminologie suivants : « Very Coarse Macropores » [$>2000 \mu\text{m}$] (VCM) ; « Coarse Macropores » [2000–500 μm] (CM) ; les « Medium Macropores » [500–50 μm] (MM) et les « Fine Macropores » [50–25 μm] (FM). Les préfixes « Very Coarse », « Coarse » et « Fine » sont empruntés à Johnson *et al.* (1960), également utilisés par Jahn *et al.* (2006), mais il n'y a pas de correspondance entre leurs classes de diamètre de pores et les nôtres. La moyenne et l'écart type de chaque paramètre de porosité ont été calculés au sein de chaque classe.

- Données non classées : nous avons déterminé le nombre total de pores et le pourcentage de porosité totale au sein de chaque image de lame ; puis nous avons déterminé le diamètre, la surface, le périmètre, l'excentricité, le volume, la connectivité, la forme d'un pore moyen et la distance moyenne entre pores au sein de chaque lame.

L'effet du temps et de la modalité de construction de sol sur l'évolution des paramètres de la porosité ont été précisés à l'aide de tests de comparaison de médianes (test de Mann-Whitney) et des Analyses en Composantes Principales (ACP) en utilisant Xlstat.

III. Résultats et discussions

3.1. Ordinogramme du protocole d'analyse d'images

Les différentes opérations telles qu'indiquées dans l'ordinogramme sont applicables en série (Figure 26). Elles sont choisies dans le but d'accroître la différenciation entre les objets, afin de mieux les extraire. Lorsque les paramètres sont optimisés pour un type d'image, toutes les images de même type provenant d'un même matériau peuvent être analysées automatiquement, si elles sont acquises dans les mêmes conditions. Autrement, des adaptations sont nécessaires, notamment lors des étapes de prétraitement et de classification.

La taille du kernel lors des opérations de prétraitement dépend de la résolution de l'image et de la taille des objets présents. Par exemple, si on utilise un kernel de dimensions 6 X 6 pixels pour lisser une image de grand grossissement (par exemple X200) et de résolution 300 dpi, cela induira du flou et les petits objets seront fusionnés en d'autres plus grands, sans cohérence avec la réalité de l'image.

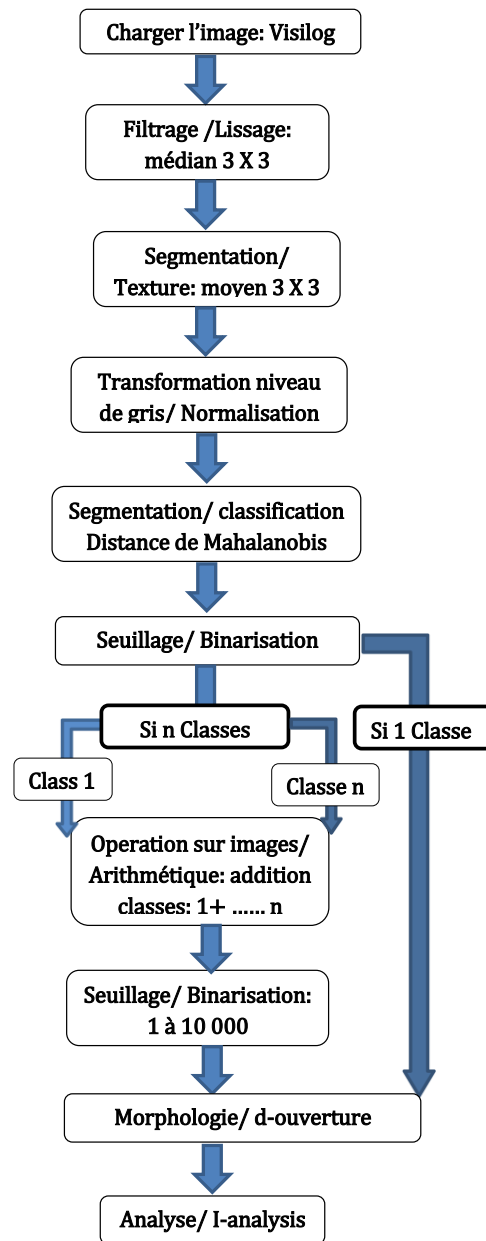


Figure 26. Ordinogramme du protocole de quantification de la porosité par analyse d'images de lames minces.

De ce fait, il sera pratiquement impossible de détecter des petits objets car ils auront été supprimés. Lors du filtrage, le kernel est optimisé à $3 \times 3 = 9$ pixels, après 30 comparaisons entre méthode manuelle et automatique. Nous avons fait la même optimisation pour l'étape de « texture ».

Lors de la classification, le nombre de classes à choisir dépend de la quantité de niveau de gris des différents objets présents dans l'image. Plus une image a de couleurs, plus grand est le nombre de classes. Dans notre cas, afin d'obtenir une bonne détermination de la porosité, le

nombre de classes choisi est de 6. Si nous choisissons moins ou plus de six classes, une partie de la porosité sera classée comme du quartz, en raison de sa signature spectrale équivalente, ce qui augmentera l'erreur des mesures et sous-estimera la porosité totale. La distance choisie est celle de Mahalanobis car elle donne les résultats les plus proches de la réalité.

3.2. Exemple de résultats obtenus

L'application du protocole décrit plus haut sur une image scannée permet d'obtenir les résultats suivants (Figure 27).

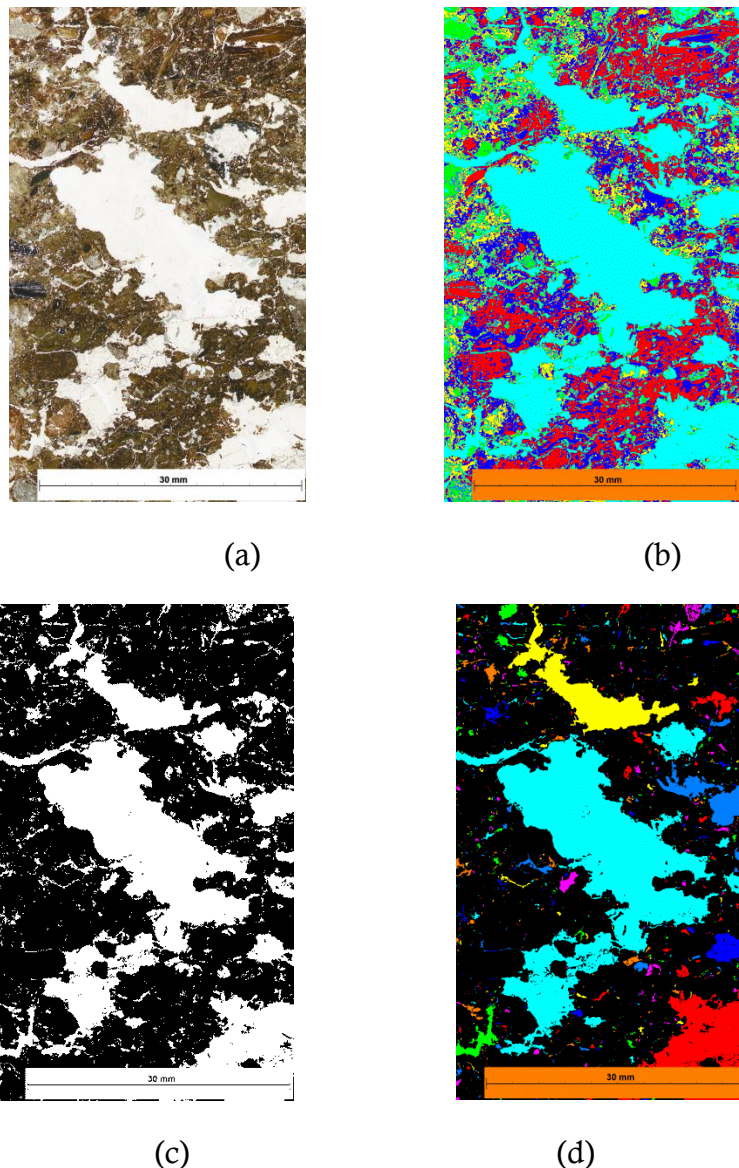


Figure 27. Trois étapes de l'application du protocole sur l'image de la maille 19 du dispositif expérimental (2008). (a) : image originale, (b) : image classée et (c) : image binarisée, (d) : image analysée. La porosité correspond à la couleur blanche (a) et (c), couleur bleu (b) et toutes les sauf le noir (d).

Pour cette image, la macroporosité ($> 25 \mu\text{m}$) est de 32,22 %. En dehors de cette macroporosité, il y a une microporosité ($< 25 \mu\text{m}$) quantifiable à partir des images à fort grossissement (X20, 24 bits couleur par pixel, 1 pixel = $0,16 \mu\text{m}$). En analysant trois images ($327,68 \times 245,76 \mu\text{m}$) échantillonnées sur l'image de la maille 19 du dispositif expérimental de terrain, nous estimons la microporosité ($0,2 - 25 \mu\text{m}$) à 8,36 % (Figure 28).

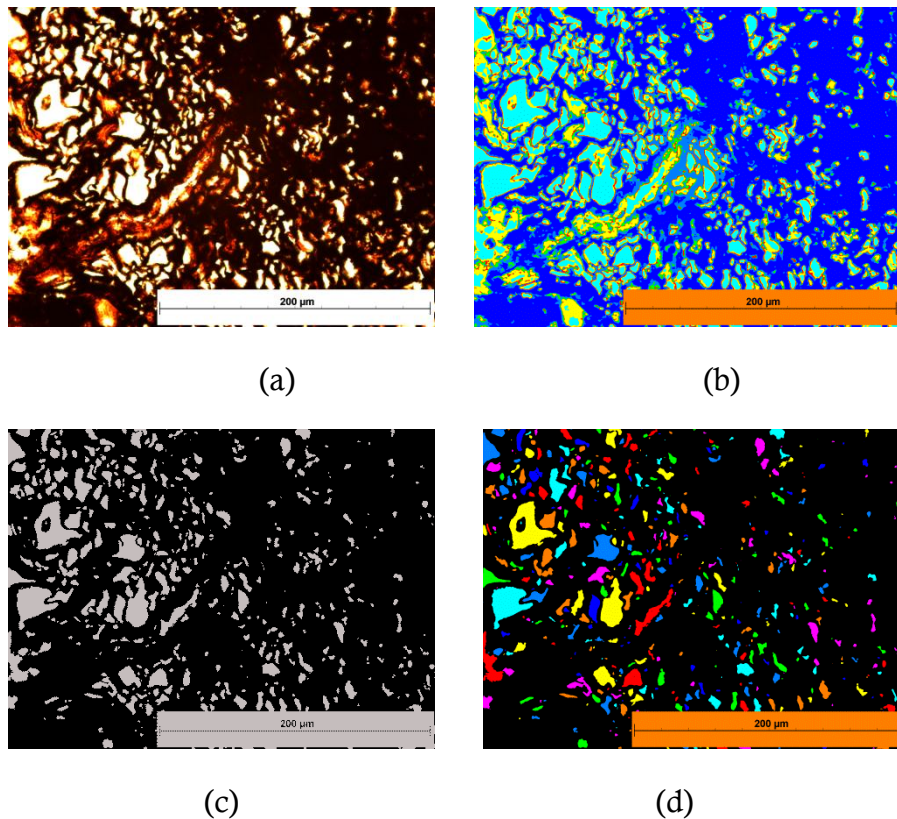


Figure 28. Principales étapes de l'application du protocole sur des images agrandies (X20) de la maille 19. (a) : image originale, (b) : image classée, (c) image binarisée, (d) : image analysée. La porosité correspond à la couleur blanche (a) et (c), couleur bleu (b), toutes les couleurs sauf noire (d).

3.3. Évolution de la porosité au cours du temps

3.3.1. Dynamique de la porosité

Lorsque nous appliquons le protocole sur toutes les images de 2008 et 2010, nous obtenons des données qui nous informent sur i) l'évolution des paramètres de porosité au cours du temps et ii) les différences entre les deux modalités de construction de sol. Ces données sont non classées ou classées en fonction du diamètre équivalent. Des tests statistiques ont été réalisés afin de mettre en évidence d'éventuelles différences. L'ensemble de données brutes quantifiées sur la porosité sont reportées dans l'annexe 1.

Données non classées

Le nombre des macropores $> 25 \mu\text{m}$ totale est significativement différent entre 2008 et 2010. La surface et le volume moyen des pores $> 25 \mu\text{m}$ décroissent en effet significativement au cours de ces deux années, ce qui indique une évolution de la structure de ce sol (Figure 29 a). La surface moyenne des pores suit la même tendance, puisqu'en 2008 elle est deux fois plus élevée que celle d'un pore de 2010 (respectivement $0,16 \pm 0,06$ et $0,08 \pm 0,04$). La surface et le volume moyen des pores décroissent significativement de 2008 à 2010 dans les deux modalités de construction de sol (Figure 29 b). De plus, la porosité totale décroît significativement en fonction du temps dans la modalité confinement. Les autres paramètres (périmètre, distance, excentricité, forme, diamètre et connectivité) ne montrent aucune différence significative. Au sein d'une même année, aucun paramètre ne montre de différence en fonction des modalités de construction de sol.

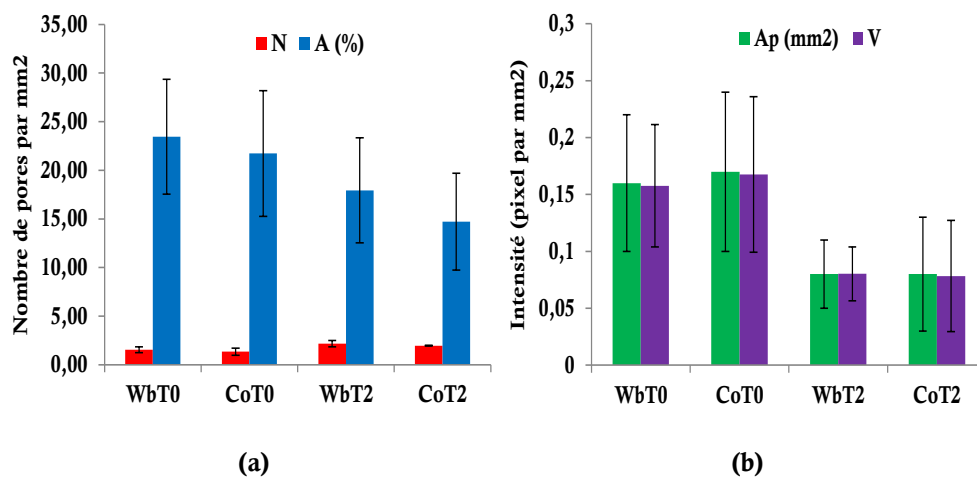


Figure 29. Evolution des paramètres de porosité nombre et pourcentage de porosité (a), volume et surface moyenne d'un pore (b) en fonction du temps (A) (T0 : 2008 et T2 : 2010) et en fonction des modalités de construction de sol calculés à partir des données non classées. N : nombre total des pores, A : % de porosité, V : volume des pores, Ap : surface des pores.

La porosité dans un sol dépend de plusieurs facteurs comme i) le tassement, ii) la granulométrie, iii) la forme des particules et iv) la compaction (Nimmo, 2004). Comparée à celle des sols naturels, la macroporosité de ce sol peut être qualifiée de modérée. En effet, Pagliai (1988) considère qu'en micromorphologie, un sol est considéré comme dense (compact) quand sa macroporosité totale ($> 50 \mu\text{m}$) est inférieure à 10%, modérément poreux quand elle est comprise entre 10 et 25%, poreux entre 25 et 40%, extrêmement poreux si elle est supérieure à 40%. Sur cette base, ces Technosols construits peuvent être considérés comme modérément poreux. En effet, la macroporosité totale ($> 50 \mu\text{m}$) calculée est de $20,6 \pm 6,10 \%$ et $14,36 \pm 5,35 \%$ respectivement en 2008

et 2010 (Tableau 6). Des études de la macroporosité par analyse d'images de sols divers ont montré des résultats similaires. Par exemple, dans une étude de l'effet des pratiques agricoles sur la structure de sol, Pagliai *et al.* (2004) ont montré que la macroporosité ($>50\ \mu\text{m}$) d'un sol limoneux classé comme Lamelic Calcaric Cambisol, se situe entre 5 et 20% dans les 10 premiers centimètres. Dans une autre étude d'un horizon Bk d'un sol calcaire, Aydemir *et al.* (2004) ont montré que le pourcentage de vides $> 13\ \mu\text{m}$ se situe autour de 22%. Ces exemples montrent que, malgré leurs compositions et leurs conditions de formations particulières, les Technosols construits peuvent présenter une porosité comparable à celle des sols naturels.

Données classées

Si la macroporosité totale suffit pour qualifier un sol de compact, modérément poreux, poreux ou extrêmement poreux, il est plus utile d'identifier la quantité et la proportion des pores qui jouent un rôle dans le fonctionnement du sol et l'activité biologique. En effet, des pores dont le diamètre équivalent est compris entre 0,5 et 500 μm (appelés aussi pores de réserve) sont connus pour remplir des fonctions de réserve en eau pour les plantes et les microorganismes (Greenland et Pereira, 1977). Les pores compris entre 50 et 500 μm sont appelés « pores de transmission » et sont impliqués dans les relations sol-eau-plante et dans le maintien de bonnes conditions de structure de sol (Pagliai *et al.*, 2004). Par conséquent, et pour connaître quelle classe de pores est responsable des différences que nous avons mises en évidence, nous avons effectué des tests statistiques sur les paramètres des données classées.

Dans un premier temps, si on ne tient pas compte des modalités de construction de sol, parmi les 9 paramètres classés, N_CM (nombre des coarse macropores, 500-2000 μm), N_MM (nombre des medium macropores, 50-500 μm), Ed_VCM (diamètre des very coarse macropores, $>2000\ \mu\text{m}$) et A_VCM (surface des very coarse macropores) évoluent de façon significative entre T0 (2008) et T2 (2010), le nombre de CM (500-2000 μm) et MM (50-500 μm) augmentant, Ed et A de VCM diminuant (Figure 30 a, b).

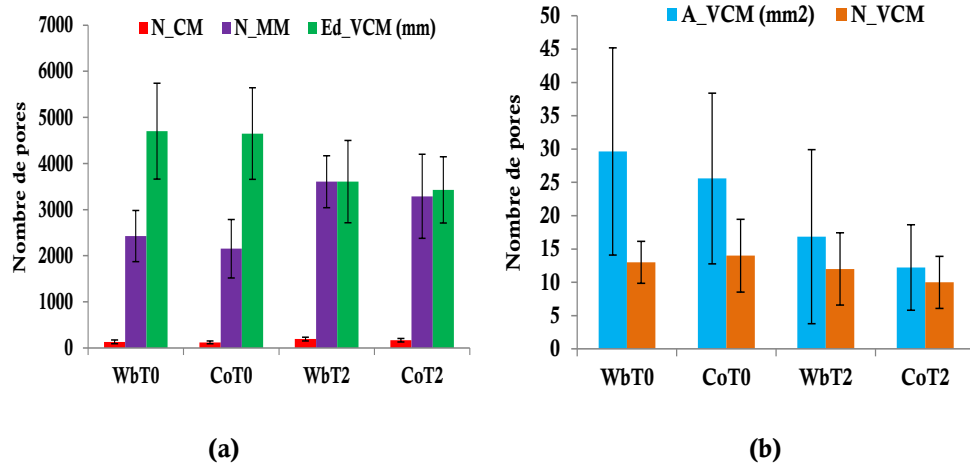


Figure 30. Evolution des paramètres de porosité, nombre et diamètre (a), surface et nombre (b) sur données classées en fonction des modalités de construction de sol en 2008 et 2010. Wb : modalité éponge végétale, Co : modalité confinement. N : nombre, Ed : diamètre équivalent, A : surface. VCM : very coarse macropores (>2000 μm), CM : coarse macropores (500-2000 μm), MM : medium macropores (50-500 μm).

Si, dans un deuxième temps, nous prenons en compte les modalités de construction de sol, d'autres classes de pores montrent une différence significative en fonction du temps. Le nombre de CM (500-2000 μm) dans les deux modalités et le nombre de MM (50-500 μm) dans la modalité éponge croissent significativement avec le temps (Figure 30 a). Par contre, la distance des CM (500-2000 μm) dans la modalité éponge, le volume des VCM (> 2000 μm) dans la modalité confinement (Figure 31) et le diamètre des VCM (> 2000 μm) dans les deux modalités (Figure 30 a) sont significativement plus faibles en 2010 qu'en 2008.

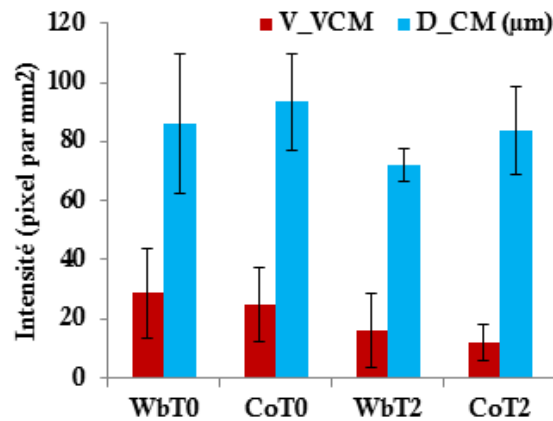


Figure 31. Evolution de la distance des CM (500 -200 μm) et volume des VCM (>2000 μm) en fonction du temps et des modalités de constructions de sol. le volume est exprimé en fonction de l'intensité de pixels par mm². V : volume, D : distance, Wb : modalité éponge végétale, Co : modalité confinement, pour respectivement VCM : very coarse macropores (>2000 μm), CM : coarse macropores (500-2000 μm).

Deux ans après sa construction, la porosité du sol a évolué et l'architecture des pores a changé. L'évolution de T0 à T2 de la surface

des pores indique que les pores s'élargissent au cours du temps. Ces modifications concernent essentiellement les paramètres des pores de grands diamètres équivalents c'est-à-dire les VCM, CM et MM. Selon Nimmo (2004), si un sol est naturellement et uniformément compacté, il perd normalement les pores très larges et gagne en pores plus petits. Ainsi, le sol s'est compacté de 2008 à 2010, ceci pouvant conduire à une augmentation de la densité du sol. Le phénomène de compaction du sol conduit à une diminution drastique de l'infiltration et du drainage de l'eau. Un sol imperméable est plus sujet à l'inondation et la création de situations d'anoxie (Pagliai et Vignozzi, 2002). Dans une étude du même Technosol construit, (Séré *et al.*, 2010) ont mis en évidence une augmentation de la densité au cours du temps. Un pore très rétréci (étranglé) tend à se diviser en plusieurs pores en fonction du nombre de points d'étranglement. Ces pores deviennent plus allongés (pores horizontaux) ou plats (pores verticaux), ce qui accroît ou réduit leur excentricité et modifie leur indice de forme, ce qui est le cas dans notre expérience (Tableau 7 E, F). Au fil du temps (quelques décennies), les pores deviendront plus proches et moins interconnectés, donc leur capacité à remplir les fonctions de filtre et d'échange sera sévèrement compromise. Sur une période plus courte (deux ans), les valeurs de l'indice de connectivité (IC) sont les suivantes : WbT0: $0,34 \pm 0,08$; CoT0: $0,38 \pm 0,05$; WbT2: $0,36 \pm 0,07$; CoT2: $0,31 \pm 0,07$; T0: $0,36 \pm 0,07$; T2: $0,34 \pm 0,07$. On observe une tendance à la diminution de l'IC au cours du temps, sans qu'elle soit significative. Tous ces résultats peuvent être conceptualisés de la manière suivante (Figure 32).

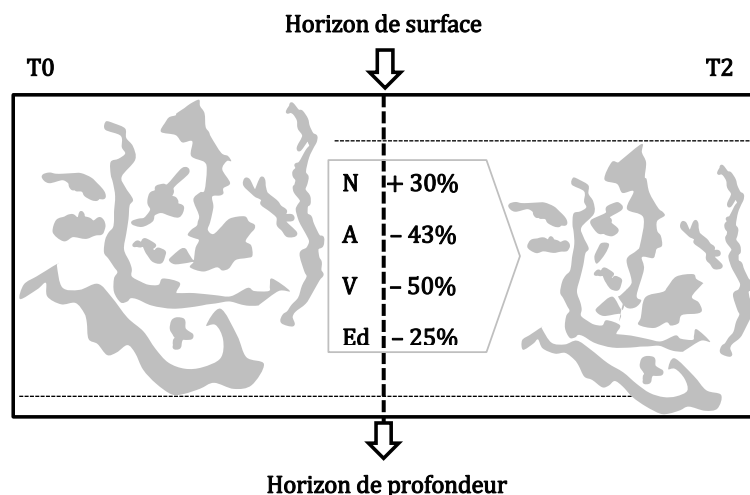


Figure 32. Concept d'évolution de l'architecture de la macroporosité (>25 µm). En gris : les pores, en blanc : la matrice du sol, T0 : 2008, T2 : 2010, N : nombre des pores, A : surface, V : volume, Ed : diamètre équivalent des VCM (>2000 µm).

Pour ce qui est de la microporosité (0,2 – 25 µm), on observe une augmentation significative de sa proportion de 2008 ($7,47 \pm 1,62$ %) à

2010 ($10,64 \pm 1,93$ %), (Mann-Whitney test, p value = 0,002). Ceci cadre avec la théorie de Nimmo (2004) selon laquelle, quand un sol se compacte, il perd la macroporosité et gagne en microporosité. Nos résultats confirment cette théorie puisque la surface des VCM (>2000 μm) est plus importante en 2008 qu'en 2010 et que la surface des CM (500-2000 μm), et MM (50-500 μm) croît avec le temps (Tableau 6).

Tableau 5. Pourcentage de la surface des macropores (>50 μm) en 2008 (T0) et 2010 (T2), (moyenne, $\pm$ écart type). A_VCM : surface des VCM (>2000 μm), A_CM : surface des CM (500-2000 μm), A_MM : surface des MM (50-500 μm), A : surface totale de la macroporosité (>50 μm). Les valeurs accompagnées d'une même lettre dans une même ligne ne sont pas significativement différentes.

Surface (%)	T0	T2
A_VCM	16,42a $\pm 6,66$	7,49b $\pm 4,94$
A_CM	3,78a $\pm 1,20$	5,09b $\pm 1,25$
A_MM	2,40a $\pm 0,69$	3,78b $\pm 0,90$
A	20,6a $\pm 6,10$	14,36b $\pm 5,35$

La distribution de la porosité dans le Technosol construit est décrite en relation avec la capacité de stockage en eau des pores, ce qui permet de faire la classification et la distinction des pores de transmission (50-500 μm) et les pores de stockage d'eau (0,5-50 μm) (Figure 33). Les pores de transmission occupent une proportion de 2,40 % en 2008 et 3,78 % en 2010. Les pores de stockage d'eau ne sont pas directement calculés mais estimés à partir de la microporosité (0,2-25 μm) et les « fine macropores » (FM, 25-50 μm). Sachant que la proportion des FM est très faible, celle des pores de stockage sera proche de la microporosité : $\leq 7,47$ % en 2008 et $\leq 10,64$ % en 2010.

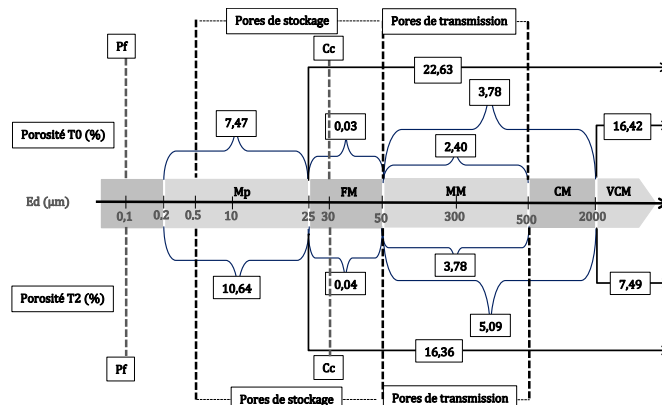


Figure 33. Distribution de la porosité d'un Technosol construit exprimée en pourcentage de la surface moyenne en fonction du diamètre équivalent et de l'état de l'eau. (Ed : diamètre équivalent, Pf : point de flétrissement, Mp : micropores, FM : fine macropores, Cc : capacité au champ, MM : medium macropores, CM : coarse macropores, VCM : very coarse macropores, T0 : 2008, T2 : 2010).

Comparé aux sols naturels, ce Technosol construit peut être considéré comme normalement poreux. L'eau sera plus disponible en 2010 qu'en 2008 du fait que les pores de stockage d'eau sont plus élevés dans la 1^{ère} que dans seconde année. L'hypothèse selon laquelle la porosité pourrait changer en fonction des modalités de construction de sol n'a pas été vérifiée pour l'instant. Un suivi à long terme de ce Technosol aidera à mettre en évidence une éventuelle différence de porosité et de l'agrégation en fonction du temps et des modalités.

Selon la classification proposée par Hallaire et Curmi (1994) et Ringrose-Voase (1996), les VCM ($>2000\ \mu\text{m}$) peuvent être qualifiés de pores d'assemblages ($S_f > 10$), les CM ($500-2000\ \mu\text{m}$) de fissures ($5 < S_f < 10$), les MM ($50-500\ \mu\text{m}$) et FM ($25-50\ \mu\text{m}$) de pores tubulaires ($S_f < 5$). Les pores d'assemblage ont des formes irrégulières et sont issus de l'assemblage des particules élémentaires, agrégats ou mottes de terre alors que les fissures résultent de phénomènes d'humectation-dessiccation ou tout stress physique ; les pores tubulaires quant à eux sont créés par l'activité biologique comme les racines des plantes et la faune du sol (Ringrose-Voase, 1996). De ce fait, l'augmentation de la proportion des pores tubulaires de 2008 à 2010 peut être expliquée par le développement de la végétation sur le site expérimental après deux ans. Chaque catégorie de pore joue un rôle spécifique dans le mouvement de l'eau. En effet, Lamandé *et al.* (2003) ont montré que les pores d'assemblages contrôlent le mouvement de l'eau dans les conditions proche de la saturation, alors que les pores tubulaires et les fissures sont plus efficaces quand le potentiel matriciel est plus faible.

3.3.2. Choix de paramètres comme indicateurs d'évolution de la porosité.

Données non classées

Nous avons réalisé une analyse en composantes principales (ACP) sur les données des paramètres de porosité afin de déterminer les variables ou le groupe de variables qui décrit au mieux l'évolution que nous avons constatée plus haut, ainsi que les liaisons qui existent entre variables.

Les résultats des ACP sur les données non classées montrent que certaines variables sont corrélées entre elles et avec des facteurs. La forme (S_f), la connectivité (I_c), la surface (A) et le périmètre, moyens de l'ensemble des pores, sont corrélés au premier axe tandis que la distance entre pores et le nombre sont corrélés au second. Toutes ces variables contribuent significativement à expliquer la variabilité de la porosité de 2008 à 2010 (Figure 34).

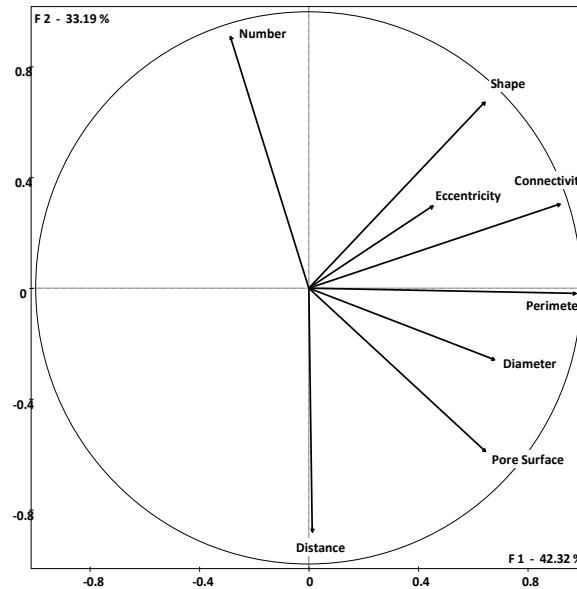


Figure 34. Projection des paramètres de porosité non classés dans un plan défini par les facteurs 1 (F1) et 2 (F2).

Comme les échantillons sont organisés selon le barycentre entre le premier et le troisième quadrat, le nombre, la surface, la forme et la connectivité des pores permettent de les distinguer. Par conséquent, les échantillons de 2008 ont des pores plus larges (surface) et toutefois moins nombreux que ceux de 2010 qui sont plus fins. La distance entre les pores est plus grande en 2008 et ces pores tendent à être plus interconnectés qu'en 2010. La distribution des échantillons montre une certaine homogénéisation de la porosité (concernant ses dimensions), donc des sols des parcelles, de 2008 à 2010 (Figure 35). En effet, après sa mise en place, le sol présente une grande hétérogénéité de taille et de nombre de pores. Il y a des pores très grands, d'autres très petits (*e.g.* T0M17/ T0M11), sur certaines mailles il y a peu de pores (*e.g.* T0M7) et sur d'autres il y en a beaucoup (*e.g.* T0M24). Cette hétérogénéité est mise en évidence par les écarts types des valeurs de certains paramètres, en particulier la surface des VCM et FM. L'homogénéisation est générale sur tous les échantillons, sauf T2M6 qui diffère des autres par le nombre de pores très en dessous de la moyenne. Dans les stades précoces d'évolution suivant sa construction, le sol présente une hétérogénéité de la porosité. Au fil du temps, sous l'impact des facteurs climatiques (pluie principalement) et de la pesanteur, les pores sont homogénéisés jusqu'à l'atteinte d'un stade d'équilibre.

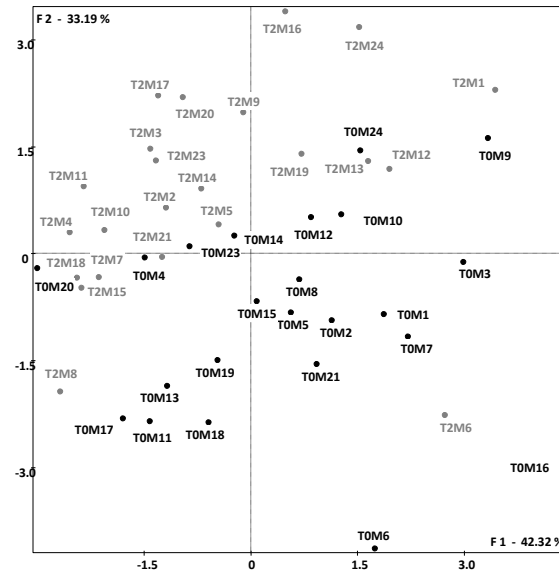


Figure 35. Distribution des échantillons de 2008 (T0) et 2010 (T2) en fonction des paramètres de porosité non classés dans un plan défini par les facteurs 1 (F1) et 2 (F2) de l'ACP. En noir : échantillons de 2008, en gris : les échantillons de 2010.

Les conditions climatiques favorables vont induire le développement de l'activité biologique (plante et faune), ce qui permettra de créer une nouvelle catégorie de pores. Ceci conduira à l'augmentation ou la diminution de la porosité en fonction du type et de l'intensité des facteurs.

69

Données classées

Les résultats des ACP sur les données classées sont moins informatifs que précédemment. Si nous considérons les trois premiers axes de l'ACP, nous pouvons constater que les deux premiers sont corrélés aux valeurs de FM, tandis que le troisième est corrélé aux valeurs de VCM (Figure 36). Le premier axe est un axe temporel parce qu'il permet de distinguer deux groupes d'individus. Le premier est composé majoritairement d'échantillons de 2008 et le second principalement d'échantillons de 2010. Cet axe est corrélé positivement avec N_CM, N_MM, N_FM, P_CM, P_MM et F_CM, et négativement avec D_CM, D_MM et D_FM. Ceci veut dire que, plus le temps passe, plus le nombre de pores augmente, et plus leur distance et leur forme diminuent. Ceci confirme l'hypothèse de compaction et peut avoir une influence sur le fonctionnement du Technosol. En effet, Zdravkov *et al.* (2007) ont montré que des milieux poreux avec en apparence une même porosité mais avec des pores de taille et géométrie (forme) différentes, réagissent différemment dans les mêmes conditions. Or, entre 2008 et 2010 la porosité du sol étudié a significativement changé en plus de la modification dans la géométrie et la classe des pores. Ceci confirme l'idée que le fonctionnement du Technosol est susceptible d'avoir changé entre 2008 et 2010.

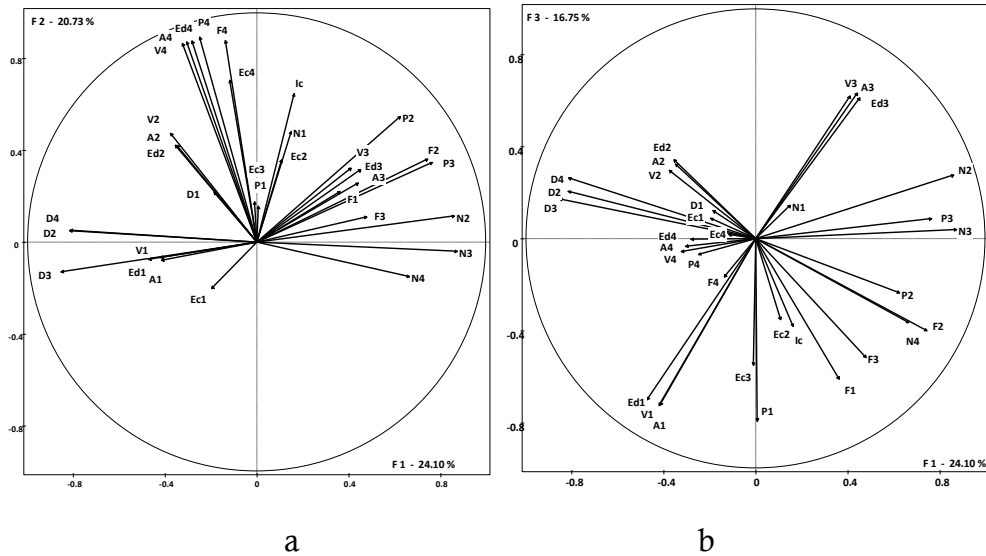


Figure 36. Projection des variables de porosité en fonction des données classées dans un plan défini par les facteurs 1 et 2 (a), 1 et 3 (b) de l'ACP. N : nombre, A : surface, P : périmètre, D : distance, V : volume, Ec : excentricité, Sf : forme, Ed : diamètre équivalent, Ic : indice de connectivité. VCM : very coarse macropores (>2000 μm), CM : coarse macropores (500-2000 μm), MM : medium macropores (50-500 μm), FM : fine macropores (25-50 μm).

Le deuxième axe met en évidence les individus classés en fonction de leur capacité de rétention en eau, sans distinction d'année ou de modalité. En effet, cet axe est bien corrélé avec les paramètres de FM. La surface, le périmètre, le volume, l'excentricité, la forme et diamètre sont à peu près identiques pour les différents groupes ; c'est seulement la connectivité qui les différencie. Les échantillons situés dans le troisième quadrat (*e.g.* T0M3) ont des pores plus interconnectés que ceux situés dans le quatrième quadrat (*e.g.* T0M17) (Figure 37). Ceci n'est pas lié à l'évolution du sol, puisqu'on retrouve dans un même groupe les échantillons de 2008 et 2010. Néanmoins, cette propriété de changement dans la connectivité des pores peut avoir une conséquence sur l'activité biologique et le mouvement de l'eau dans le sol. En effet, une faible connectivité des pores augmente la diversité bactérienne (Carson *et al.*, 2010), c'est-à-dire lorsque le potentiel hydrique diminue (le sol devient sec) la diversité bactérienne augmente. En plus, la modification de la distribution des classes de pores est strictement corrélée avec une baisse de la conductivité hydraulique (Pagliai et Vignozzi, 2002). Le troisième axe, par contre, est négativement corrélé avec les paramètres de VCM (Figure 36 b) et comme le second axe, il ne met pas en évidence une différence entre T0 et T2 (Figure 38).

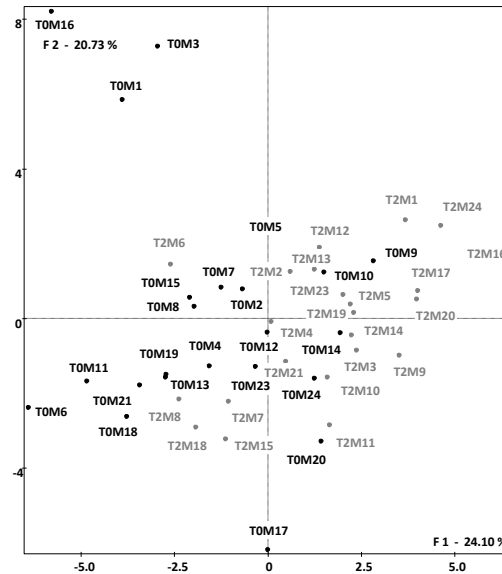


Figure 37. Distribution des échantillons de 2008 (T0) et 2010 (T2) en fonction des paramètres de porosité quantifiés sur les données classées, dans un plan défini par les facteurs 1 et 2 de l'ACP. En noir : les échantillons de 2008, en gris : échantillons de 2010.

On peut noter que les individus comme TOM17 sont censés être plus susceptibles à la compaction que TOM5. En effet, la surface des VCM dans les premiers est cinq fois plus importante que dans les seconds (données brutes non montrées), or ces types de pores sont connus pour être sensibles au phénomène de compaction (Nimmo, 2004). Du fait que TOM17 est susceptible d'être sec, soit l'eau n'est pas retenue à cause de la faible connectivité des pores, soit elle s'évapore rapidement du fait de la prépondérance des VCM.

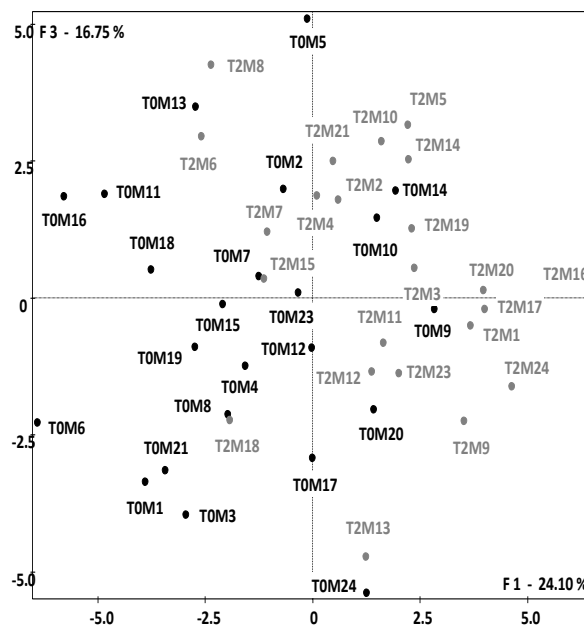


Figure 38. Distribution des individus en 2008 (T0) et 2010 (T2) sur les facteurs 1 (F1) et 3 (F3) après une ACP sur les variables classées. En noir : échantillons de 2008 ; en gris : échantillons de 2010.

En effet, dans les sols compactés, la proportion des pores interconnectés, utiles pour le mouvement de l'eau et le développement racinaire, est considérablement réduite (Pagliai et Vignozzi, 2002). En conséquence, même si ce type de sol est connu pour son intense pédogénèse après construction (Scalenghe et Ferraris, 2009; Séré *et al.*, 2010), la diminution du mouvement de l'eau peut avoir une influence sur l'horizonation. En effet, le mouvement de l'eau est considéré comme le facteur majeur de la formation de profils de sol (Jenny, 1941). Le fait que des individus d'une même modalité soient si différents concernant l'architecture des pores, montre à quel point ce sol est hétérogène au même titre que tous les autres sols. En effet Poletika et Jury (1994) ont montré que la présence de macropores est l'un des facteurs responsables de l'hétérogénéité dans le mouvement de l'eau et de solutés dans un sol. Cette hétérogénéité inhérente à tout type de sol contribue à maintenir une nouvelle hétérogénéité dans son développement. De ce fait, à des endroits différents, le sol se développe en une mosaïque imparfaite où les horizons ne sont ni les mêmes, ni de même épaisseur. Inéluctablement cette hétérogénéité peut avoir une influence sur le développement de la végétation, des micro- et des macro-organismes dont le rôle sur l'évolution de la structure du sol n'est plus à démontrer.

Ce phénomène observé chez un sol nouvellement mis en place peut être qualifié de « **soupir** », en corolaire avec ce qui se passe chez les organismes biologiques mis en état de stress. Avant l'application de ce stress (ici remaniement et pollution (e.g. HAP) liée à l'activité industrielle), le sol était dans le régime de fonctionnement (A) jusqu'à ce qu'il atteigne son seuil de résilience lorsque l'anthropisation devient trop importante (Figure 39). Puis un nouveau Technosol est construit à partir de différents matériaux Technogéniques issus du sol pollué après traitement. Ces matériaux sont excavés ou produits, humides le plus souvent puis séchés, transportés, traités, mélangés. Ce sont ses états de perturbation. Une fois mis en place et laissé sans perturbation pendant un temps relativement long, il quitte cet « état de stress » et trouve un « **temps de répit** ». Cet état d'équilibre instable permet à ses différents matériaux constitutifs de se mettre en place sous l'effet des conditions environnantes naturelles, pesanteur, pluviosité: c'est le « **soupir** ». Cet état est caractérisé par une perte de volume et de surface de VCM suite à un réarrangement des particules du sol qui occupent les grands espaces vides. Les pores sont plus proches mais moins interconnectés. Cette phase correspond au régime de fonctionnement (B). Quelques temps après, le sol retrouve un autre régime grâce à l'action des plantes et de la faune (Figure 39). Ce régime est caractérisé par une amélioration de la structure du sol, de son fonctionnement et de ses fonctions. Cette phase

est ralentie sinon interrompue pendant les périodes non favorables aux actions des êtres vivants (*e.g.* sécheresse ou gel). Ces cycles périodiques (journalier, annuel...) qui affectent l'évolution du sol sont ce que Lin (2011) appelle les « short-term functioning processes (SFPs) » ou les processus à court terme de fonctionnement de sol. A l'échelle du temps de notre expérimentation, ce sont surtout ces processus qui gouvernent l'évolution du Technosol construit. C'est le régime de fonctionnement (C). D'autres processus irréversibles à plus long terme interviennent avec le temps.

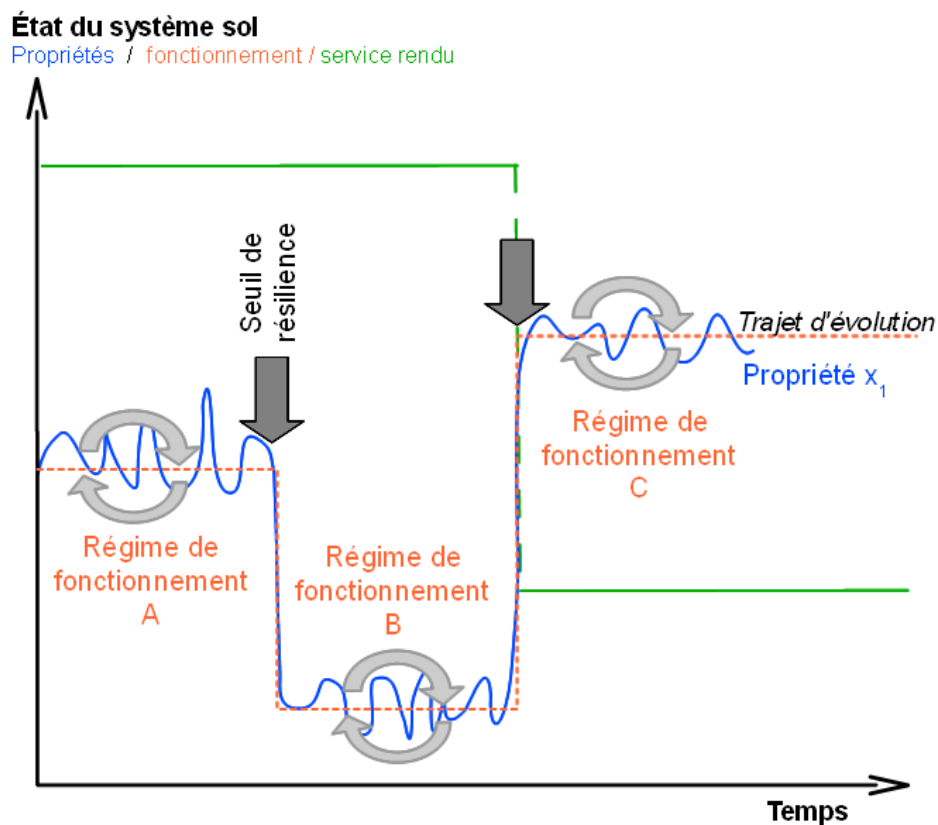


Figure 39. Modèle conceptuel de l'évolution général d'un sol (d'après Leguedois *et al.* (2012) soumis), adapté de Lin (2011). L'axe vertical est une représentation monodimensionnelle des multiples variables qu'on peut suivre pour étudier l'évolution d'un sol.

Grâce à sa particularité (grande quantité de matière organique, forte rétention en eau...) le Technosol construit peut retrouver un régime de fonction (C) meilleur que (A) où on retrouve une structuration élevée et un important développement de la faune et de la flore.

IV. Conclusion

Les paramètres sélectionnés à suivre pour mettre en évidence une éventuelle évolution de la porosité dans un Technosol construit sont le nombre, la surface, la forme et l'indice de connectivité. Quand un sol est nouvellement construit, après une période de « repos » sous l'effet de facteurs environnementaux, le nombre de pores augmente. Simultanément, les dimensions des pores d'assemblage décroissent significativement. Ceci est une conséquence de la compaction du sol qui conduit à une augmentation de la microporosité. L'augmentation de la proportion des pores capillaires et de l'indice de connectivité engendre une amélioration de la capacité de rétention en eau du sol. Dans les premiers stades de sa pédogenèse, le facteur majeur qui contrôle l'évolution de la structure du sol est le temps, avec l'action de la gravité et de la pluie. Quand le temps passe, sous l'influence des conditions de fertilité favorables et du climat tempéré, l'activité biologique (e.g. racines de plantes, faune du sol et microorganismes) est un facteur pédogénétique pouvant devenir prédominant. A l'avenir, il serait pertinent de mesurer d'autres paramètres du sol comme l'humidité, l'activité biologique, l'abondance faunistique et la diversité biologique, afin de les relier aux paramètres descriptifs de la porosité et ainsi de développer des modèles qui simuleraient l'effet de ces facteurs sur l'évolution de la structure du Technosol construit.

Chapitre IV. Genèse de l'agrégation dans de Technosols construits

I. Introduction

L'agrégation est une propriété pédologique fondamentale considérée comme indicateur de fonctionnement d'un sol (Duchaufour et Souchier, 1983). Les agrégats formés à partir de ce processus sont considérés comme les unités de base du sol (Henao Valencia, 2008) et comme des indicateurs de la stabilité structurale (Niewczas et Witkowka-Walczak, 2005). Cependant, la plupart des travaux sur l'agrégation sont descriptifs et qualitatifs. De ce fait, les données quantitatives sur les agrégats manquent crucialement. Des tentatives de quantification des agrégats ont été entreprises sur la base des résultats de tests de stabilité structurale (*e.g.* (De Gryze *et al.*, 2005; Plante *et al.*, 2002). Néanmoins, les résultats de tests de stabilité structurale sont obtenus par des méthodes indirectes et ne peuvent donc être considérés comme des méthodes de quantification des agrégats à proprement dit.

Le but de ce travail est d'établir une méthode de quantification directe des agrégats par analyse d'images de lames minces. L'évolution de l'agrégation d'un Technosol construit est ensuite étudiée dans les premiers stades de sa pédogenèse.

II. Matériels et méthode

2.1. Echantillonnage

Les travaux ont été principalement menés à partir d'échantillons obtenus sur la même station expérimentale que celle décrite dans les chapitres précédents, où deux campagnes d'échantillonnage ont été conduites en 2008 (T0) et 2010 (T2) (Figure 40). Deux types d'échantillons ont été prélevés :

- Un échantillon composite est constitué à partir de quatre sous-échantillons prélevés dans les 10 premiers cm, du profil de sol sur chacune des 23 mailles. Cet échantillon est conservé au frais au laboratoire et sera soumis au fractionnement granulométrique à l'eau, permettant d'établir la distribution pondérale des agrégats stables à l'eau en fonction de 5 fractions granulométriques (Figure 11 et 12 , chapitre II). Le diamètre moyen pondéral (MWD_{st}) est calculé selon la formule :

$$MWD_{st} = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i \cdot w_i \quad 16$$

Avec MWD_{st} le diamètre moyen pondéral par granulodensimétrie, w_i représente le pourcentage pondéral de macroagrégats de diamètre moyen $\bar{x}_i$, exprimé en fonction de la masse totale de l'échantillon.

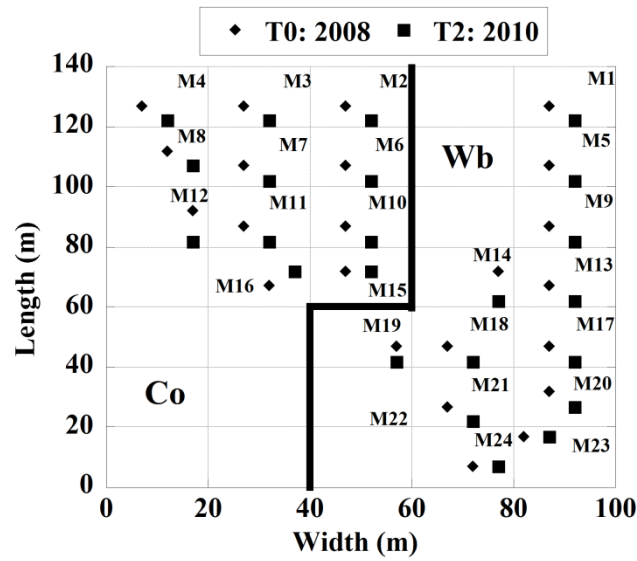


Figure 40. Maillage et plan d'échantillonnage de la parcelle. Modalités de construction de sol : (Wb) « éponge végétale » ; (Co) : « confinement ».

- Des échantillons non perturbés sont prélevés à l'aide de boîtes de Kubiena ainsi que cela est décrit dans le chapitre précédent. Les mêmes images de lames minces ont été analysées à l'aide du logiciel Visilog, pour cette fois-ci quantifier les agrégats à l'aide d'un protocole spécifiquement développé. Les paramètres descriptifs des agrégats suivants ont été quantifiés : le nombre (N), la surface (A), le périmètre (P), le diamètre équivalent (Ed), l'excentricité (Ec) et la forme (Sf). Ces paramètres sont organisés de deux manières :
 - non classés, où le pourcentage et le nombre total des macroagrégats (>50 µm) ont été calculés pour chaque échantillon. Ensuite la surface, le périmètre, l'excentricité, la forme et le diamètre d'un pore moyen ont été calculés.
 - classés en fonction du diamètre équivalent en deux classes : [50-200 µm] et [200-0000 µm]. La moyenne et l'écart type de chaque paramètre de chaque classe sont calculés pour chaque échantillon.

Un nouvel indice, Mean Index of Aggregation (MIA) est calculé comme suit :

$$MIA_{ia} = \sum_{i=1}^n \bar{w}_i / \sum m_i \quad 17$$

Où ia indique que l'indice est calculé à partir des données d'analyse d'images, w_i représente le pourcentage d'agrégats de diamètre moyen donné, $\sum m_i$ est la surface totale de la matrice du sol calculée par différence entre la surface totale de la lame mince d'une part, et la surface de la porosité et la surface des particules dont le diamètre est plus

grand que la classe des agrégats considérés d'autre part. Dans notre cas, aucune particule $> 2000 \mu\text{m}$ n'est prise en compte. Nous avons fait ce choix pour cibler les mêmes fractions que celles issues des tests de stabilité structurale où les échantillons sont initialement tamisés à $2000 \mu\text{m}$.

Des tests de comparaison de médianes (Mann-Whitney, 5%) et des Analyses en Composantes Principales (ACP) ont été réalisés afin d'étudier l'évolution de l'agrégation et les relations entre l'agrégation et les autres facteurs pédogénétiques mesurés.

2.2. Définition de l'agrégat en analyse d'images

Lors des tests de stabilité structurale, on mesure l'aptitude des sols à résister aux stress, notamment hydriques. La capacité qu'a un sol de maintenir son agrégation après application de ces stress est appelée « stabilité structurale » (Díaz-Zorita *et al.*, 2002). Si le test est réalisé par tamisage, on considère alors comme associations organominérales, toutes les particules qui n'ont pas pu passer à travers les mailles du tamis.

Sur cette base, nous définissons des agrégats en analyse d'images comme « tout ensemble de particules distinguables, isolées ou isolables dans la matrice du sol à une résolution donnée. Les particules formant cet ensemble sont plus cohérentes entre elles qu'avec le reste de la matrice et séparées par une distance minimale. Leur limite est définie par les pores, ou plans de rupture entourant ou presque, une unité de sol sans fissures internes à la même résolution (Díaz-Zorita *et al.*, 2002).

2.3. Acquisition d'images

Nous avons utilisé les mêmes lames minces qui ont servi à quantifier la porosité (23 en 2008 et 23 en 2010). Elles sont scannées en couleur à l'aide d'un scanner EPSON V750 Perfection Pro à une résolution de 1200 dpi. Chaque pixel a une taille de $21 \mu\text{m}$. Les images sont sauvegardées en format tif et une sous-image de $35,06 \times 60,06 \text{ mm}$ (soient $2105,70 \text{ mm}^2$) est échantillonnée sur chaque image.

2.4. Protocole de quantification des agrégats

L'étape la plus difficile du protocole de quantification des agrégats par analyse d'image est sans doute la segmentation qui permet d'identifier et de détecter les objets d'intérêt. En effet, il n'existe pas de technique universelle de segmentation ou de détection de contours (Kunt, 2000; Latrous et Boucher, 1984). Chaque technique est spécifique à une situation bien donnée. Par conséquent, si le protocole que nous proposons peut être applicable de manière générique à beaucoup d'images, les paramètres des différentes étapes doivent être adaptés au

type de sol considéré. Les étapes de « filtrage, texture, transformation de niveau de gris » sont identiques à celles du protocole de quantification de la porosité (Chapitre III). Nous détaillerons ici uniquement les choix des étapes spécifiques au protocole de quantification des agrégats. Pour des détails sur les opérations elles-mêmes, se référer à la documentation générale sur l'analyse d'images et de morphologie mathématique.

2.4.1. Miscellaneous : convert

L'image obtenue après « filtrage, texture, normalisation » est alors convertie car après normalisation d'une image prétraitée, nous obtenons une image de format « float ». Ce format n'est pas reconnu par plusieurs opérations comme « la color dilation ». Nous convertissons alors cette image en format « short integer ».

2.4.2. Color dilation

Cette opération est appliquée sur une image couleur. En raison de la transparence des lames minces de sol, la porosité est représentée par la couleur blanche. La dilatation de couleur est basée sur le principe de maximisation de la luminance (pixels blancs) ou de la saturation (pixels gris) en prenant en compte le voisinage. Le centre de maximisation est pris en fonction du pixel qui donne le maximum de luminance ou de saturation (Noesis, 2008). Cette opération surestime les pixels blancs ou noirs. Dans notre cas, nous avons maximisé la luminance avec un élément structurant de taille 1 X 1 pixels afin d'optimiser la mise en évidence des agrégats.

L'image dilatée est classée automatiquement en se basant sur la méthode de « k-plus proche voisin » dont la distance est calculée selon la méthode de Mahalanobis. La classe d'intérêt est ainsi segmentée en utilisant un seuil adapté. Si l'objet d'intérêt est reparti en plusieurs classes, toutes les classes sont segmentées et additionnées puis seuillées afin d'avoir une image binaire complète. Cette image binaire est nettoyée en utilisant un algorithme de morphologie mathématique « ouverture par un disque » ; les trous internes aux particules sont fermés dans l'étape suivante.

2.4.3. Morphology : hole-fill

Le but de cette opération est de fermer les trous à l'intérieur des agrégats qui peuvent induire leur fragmentation lors de l'étape de séparation. La présence de trous au sein des agrégats (pores intra-agrégats) ou leur absence ponctuelle empêchant une bonne séparation (pores inter-agrégats) induit respectivement une surestimation ou une sous-estimation du nombre d'agrégats. La méthode utilisée pour fermer les

trous est celle décrite par Coster et Chermant (1989) qui consiste à utiliser un masque de contour et une dilatation géodésique.

Une dilatation géodésique utilise deux images : une image marqueur f et une image masque g . Elle se fait en cherchant point par point le minimum entre la dilatation de f et l'image de masque g (Hanbury, 2002).

Dans Visilog, toutes ces étapes qui conduisent à la fermeture de trous sont regroupées en une seule commande appelée « hole fill » qui utilise deux types d'algorithmes, la « 4 connexité » et la « 8 connexité ». Pour résoudre les problèmes de voisinage liés à la connexité, on emploie en général la « 4 connexité » pour les régions et la « 8 connexité » pour les contours (Cocquerez, 1995). Le domaine d'efficacité de « 4 connexité » est fonction de la qualité de l'image, en l'occurrence de la porosité. Ce n'est pas la porosité totale qui compte, mais la distribution spatiale de celle-ci au sein de la lame. Nous pouvons cependant affirmer que, sur des lames de même dimension, plus la porosité est importante, plus grande est la probabilité d'appliquer efficacement l'algorithme « 4 connexité ». Si les agrégats se recouvrent ou qu'il n'existe pas de pores entre ces agrégats, il n'est pas judicieux d'appliquer la « 4 connexité » au risque de fusionner tous les agrégats en un seul bloc. Dans ces conditions, l'application successive et séparée des opérations de « masque de contour » et « dilatation géodésique » est plus efficace.

Il est toutefois à noter que l'étape de fermeture de trous « hole fill » n'est obligatoire que dans le cas où il y a énormément d'artefacts au sein des agrégats qui forment des trous. Afin de mieux séparer les objets connexes, cette image subit l'étape de détection de points.

2.4.4. Point detection : interior point

Cette commande basée sur la morphologie mathématique applique une transformation de HMT (Hit of Miss Transform) pour sélectionner des points ou régions disjoints (Noesis, 2008). Le principe de HMT est d'extraire des régions, ou points, sans leurs bords, ce qui conduit à réduire leur connexité. La connexité des particules étant réduite au maximum, on tente maintenant de les séparer avec le moins d'erreur possible à l'aide de l'algorithme de partage des eaux. Cet algorithme, appelé aussi « Watershed » est construit en analogie avec ce qui se passe dans les zones montagneuses où les lignes de crêtes séparent les bassins versants en fonction de là où se déverse l'eau.

2.4.5. Fast morphology: separation

Cette opération sépare des objets en zones homogènes en fonction de leurs propriétés. Les sous-ensembles ayant des niveaux de gris similaires

seront regroupés dans une même région. On choisit un critère d'homogénéité à appliquer sur l'image binaire. Celle-ci est subdivisée en régions plus petites qui vérifient le critère, sinon elle est encore subdivisée selon l'algorithme de ligne de partage des eaux. La séparation est de loin l'une des étapes les plus décisives dans la méthode de quantification des agrégats, dans une image où les entités sont connexes. En effet, elle permet de séparer les objets connexes en des régions indépendantes (ici des agrégats). C'est à partir de cette image qu'on analyse les objets d'intérêt.

2.4.6. Analysis

Après séparation des particules, on les soumet à l'algorithme d'analyse qui labélise les objets et en quantifie les différents paramètres choisis.

2.4.7. Morphology: d-dilation

Cette étape est étroitement liée à l'étape de « color dilation ». En effet, lors de cette dernière, nous avons surestimé la proportion des pixels blancs (pores), au détriment des pixels gris (matrice du sol ; agrégats éventuels). Ceci aura pour conséquence de réduire les dimensions des éventuels agrégats à détecter. Nous avons donc appliqué l'algorithme de « d-dilate » avec le même élément structurant (1 X 1) afin que les agrégats recouvrent leur tailles initiales. Nous avons appliqué cette opération après l'étape d'« analyse » car elle n'a pas de conséquence sur le nombre et l'indépendance des agrégats détectés.

2.4.8. Analysis

Le résultat de cette opération « d-dilate » est à nouveau analysé afin de quantifier les différents paramètres des agrégats détectés.

2.5. Détermination de l'incertitude

L'objectif de cette partie est de valider le protocole de quantification des agrégats et de déterminer le taux d'erreur induit par la méthode. Cette démarche a été entreprise sur trois types de matériaux : des images d'un mélange artificiel (a) et des images capturées à partir de lames minces réalisées sur des sols bien agrégés (b et c).

a) Le mélange artificiel est formé par mélange homogène de la terre industrielle traitée (TIT) (2/3) et du sous-produit papetier (SPP) (1/3) (en masse). Le mélange est tamisé à l'aide de deux tamis successifs de 2000 μm et de 500 μm . Les détails concernant la constitution de ce mélange sont donnés dans les matériels et méthode du chapitre V. Les agrégats compris entre [2000 μm et 500 μm] sont analysés à l'aide du protocole proposé. Pour ce faire, quinze images sont capturées à partir de quinze échantillons de ce mélange à l'aide d'un stéréomicroscope équipé d'une caméra Leica DCF300. Les images, à un grossissement de

X 0,8 ont une dimension de 10,96 x 8,67 mm. Le nombre d'agrégats au sein de chaque image est déterminé à l'œil nu. Ensuite, ces images sont analysées avec Visilog et le nombre d'agrégats est déterminé automatiquement par le protocole développé. Les résultats du nombre d'agrégats déterminés manuellement sont comparés à ceux déterminés par analyse d'images.

b) En complément, des lames minces ont été réalisées à partir de quinze échantillons prélevés sur un sol agricole bien agrégé (Alfisol développé sur des alluvions anciens sous maïs, Isère, France). Une image de dimension 10,96 X 8,67 mm a été échantillonnée sur chaque lame et analysée suivant le protocole.

c) Lame mince d'un sol forestier de structure grumeleuse développé sur plateau calcaire (Cambisol selon la WRB, Meurthe-et-Moselle, France) a été réalisée. Trois sous échantillons d'images de 10,96 X 8,67 mm ont été sélectionnés et analysés à l'aide du protocole développé.

III. Résultats et discussions

3.1. Ordinogramme du protocole

La figure 41 montre les différentes opérations à appliquer successivement pour quantifier les agrégats à partir d'images de lames minces de sol. Ces opérations sont choisies pour permettre une bonne extraction des agrégats. Une fois ces opérations définies pour un type d'images, toutes les images issues du même sol peuvent être traitées avec les mêmes paramètres, à conditions qu'elles aient été acquises dans les mêmes conditions.

Lors de la classification, le nombre de classes dépend de l'hétérogénéité et de la diversité des objets de l'image. Plus le nombre de couleurs de l'image est grand, plus élevé sera le nombre de classes. Dans notre cas, nous avons choisi six classes. La taille de l'élément structurant dépend de la résolution de l'image et de la taille des objets dans l'image. Pour le « filtrage » et la segmentation par « texture », nous avons choisi un kernel de taille 3 X 3. Pour le nettoyage par ouverture, la « color dilation » et la « disk-dilation » après « analysis », nous avons choisi un kernel de taille 1 X 1. Comme nous l'avons mentionné dans la définition, les agrégats sont séparés entre eux par une distance minimale créée par la porosité. Ce faisant, nous choisissons cette distance comme étant la taille du plus petit pore détectable à la résolution de l'image. Dans notre cas, à une résolution de 1200 dpi, le plus petit pore détectable a une dimension de 25 μm . Par conséquent, nous considérons comme agrégats, toutes

particules dont le plus proche voisin est situé à une distance de 25 μm au minimum. La taille de cette particule ne doit pas dépasser 2000 μm .

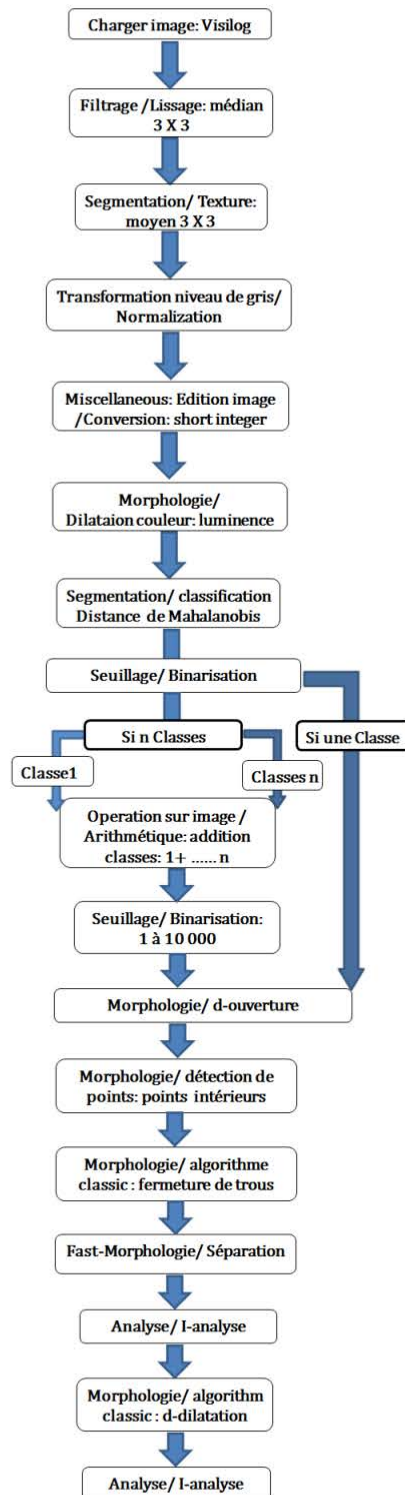


Figure 41. Ordigramme du protocole de quantification des agrégats par analyse d'images de lames minces d'un Technosol

3.2. Validation du protocole

L'application du protocole sur 15 images du mélange artificiel, en comparaison avec le comptage manuel (Figure 42 a, b) montre un taux de détection de 92% et une forte corrélation assez significative ($r = 0,94$, Figure 43 a).

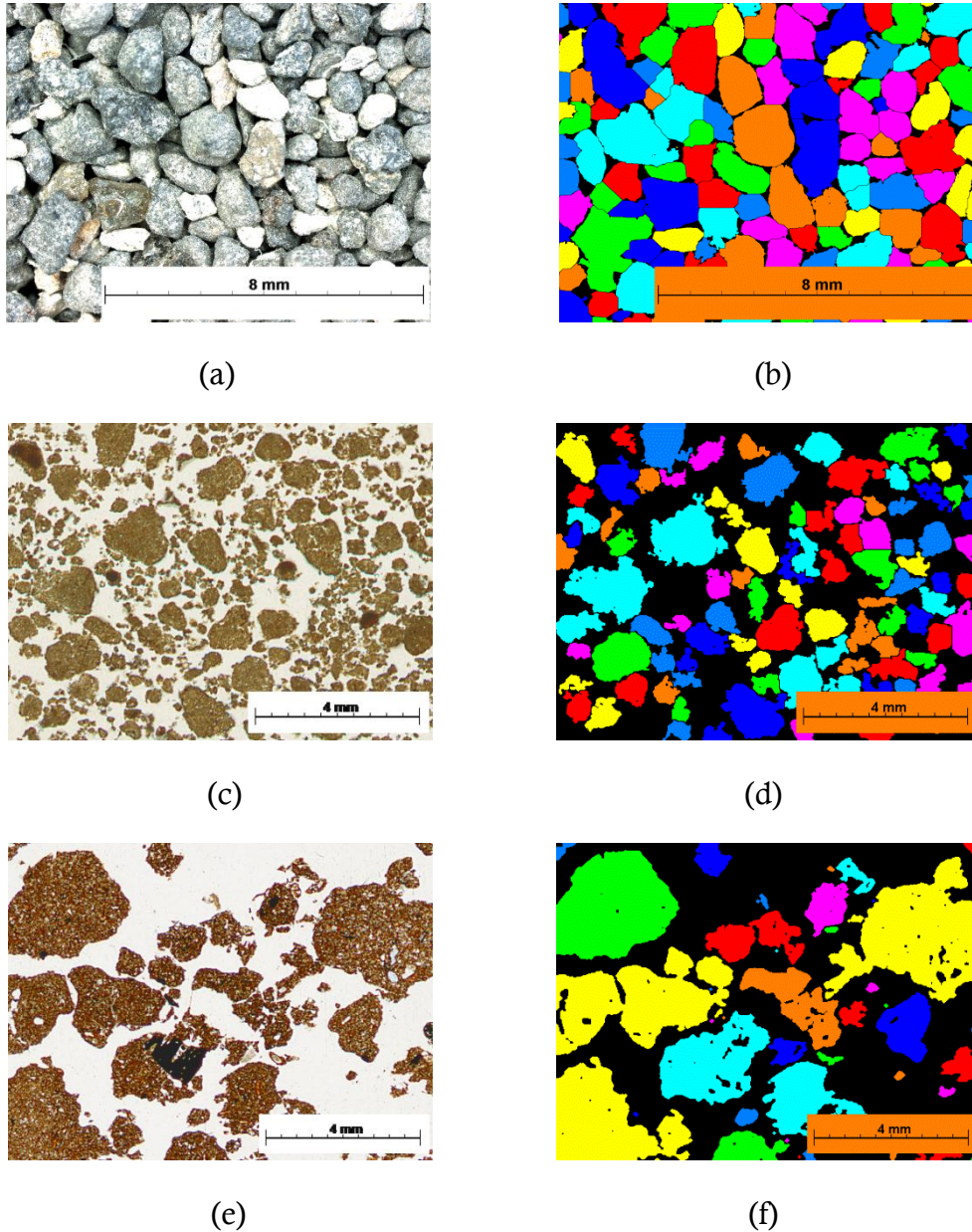


Figure 42. Exemple de l'application du protocole sur des images d'un mélange artificiel (a), d'un sol agricole bien agrégé (c), d'un sol forestier bien agrégé (d) et les résultats correspondant (b), (d) et (f) respectivement en vue de détermination de l'incertitude.

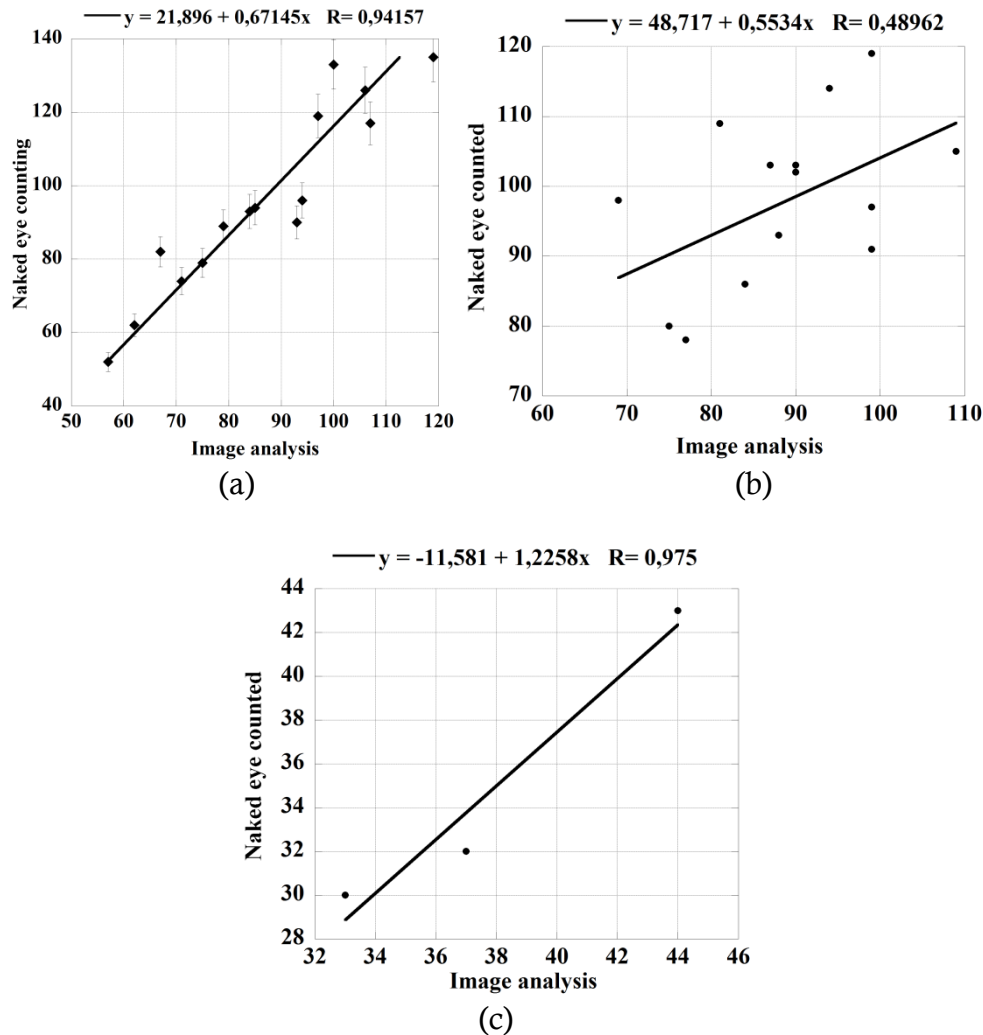


Figure 43. Matrice de corrélation entre le nombre d'agrégats artificiels (a), des agrégats de sol agricole (b), d'agrégats d'un sol forestier (c) détectés par analyse d'images et ceux comptabilisés à l'œil nu.

Les résultats sur 15 échantillons prélevés sur un sol agricole (Figure 42 c, d) montrent une corrélation moins significative que précédemment ($r = 0,48$, modérée). Néanmoins, le taux de détection des agrégats reste toutefois à peu près identique (91%) (Figure 43 b). Les résultats sont satisfaisants pour les trois échantillons du sol forestier à structure grumeleuse (Figure 42 e, f): le coefficient de corrélation r est égal à 0,97 et le taux de détection est de 92% (Figure 43 c). Cette amélioration du coefficient est sans doute induite par la petitesse du nombre d'échantillons. En dépit de ces incertitudes, on obtient un coefficient de corrélation moyen de 0,80 qu'on peut considérer de fort.

Sur la base de ces résultats, nous pouvons considérer que le protocole développé permet de détecter les agrégats de manière fiable. Il induit certes une sous-estimation du nombre des agrégats, mais l'adéquation entre le nombre d'agrégats réellement présents dans la matrice du sol et ceux détectés par le protocole est importante. Le taux d'incertitude

moyen de 8% est sans conteste introduit lors des étapes de segmentation (séparation) et de fermeture de trous. En effet, Outal (2006) et Ringrose-Voase (1991) ont montré qu'une mauvaise segmentation peut conduire à une surestimation ou une sous-estimation des objets détectés lors de l'analyse d'images.

3.3. Evolution des macroagrégats dans un Technosol construit

Le protocole d'analyse d'images (Figure. 41) est appliqué sur les images acquises à partir des lames minces réalisées sur les échantillons prélevés sur le terrain en 2008 (T0) et 2010 (T2). Données visibles dans annexe1.

3.3.1. Effet du temps sur l'évolution de l'agrégation

Le tableau 7 montre l'évolution des paramètres non classés d'agrégats en fonction du temps. Le nombre d'agrégats augmente significativement avec le temps (Mann-Whitney test, $p = 0,0086$). Les agrégats sont par conséquent plus nombreux en 2010 qu'en 2008. Le pourcentage de la surface totale des agrégats est aussi plus élevé en 2010 qu'en 2008 ($p = 0,0043$). Les agrégats en T2 tendent à être plus petits (voir le diamètre et la surface moyens d'un agrégat) qu'en 2008 mais la différence n'est pas significative. Bien qu'ils tendent à être plus petits, les agrégats de 2010 sont significativement plus irréguliers que ceux de 2008, comme en témoigne l'augmentation de la valeur de leur indice de forme (Sf) entre 2008 et 2010 ($p = 0,021$).

Tableau 6. Paramètres non classés des agrégats en fonction du temps et des modalités de construction de sol (moyenne, $\pm$ écart type). T0 : 2008, T2 : 2010. N : nombre total d'agrégats, A : surface des agrégats, P : périmètre, Ed : diamètre, Ec : excentricité, Sf : forme. Les valeurs accompagnées d'une même lettre dans une même colonne ne sont pas significativement différentes.

	N	A (mm ²)	P (mm)	Ed (mm)	Ec	Sf	A (%)
T0	834a ± 379	0,37a $\pm 0,08$	2,25a $\pm 0,24$	0,48a $\pm 0,07$	0,68a $\pm 0,01$	1,73a $\pm 0,09$	13,66a $\pm 4,04$
T2	1261b ± 601	0,34a $\pm 0,08$	2,23a $\pm 0,30$	0,46a $\pm 0,07$	0,67a $\pm 0,02$	1,80b $\pm 0,11$	18,47b $\pm 4,71$

Les résultats de tests statistiques sur les données classées en fonction du diamètre équivalent permettent d'identifier les classes d'agrégats qui montrent une évolution. Les agrégats des deux classes (CM [200 – 2000 μm] et MM [50 – 200 μm]) sont plus nombreux en 2010 qu'en 2008 (p value = 0,0038 et $p = 0,019$ respectivement) (Figure 44 a). Les agrégats ne changent pratiquement pas de dimensions (cf. surface et diamètre) mais la tendance est à la baisse pour CM. Par contre, l'indice de forme des CM croît significativement avec le temps, ce qui veut dire qu'en 2010, les CM sont moins arrondis que ceux de 2008 (p value = 0,021).

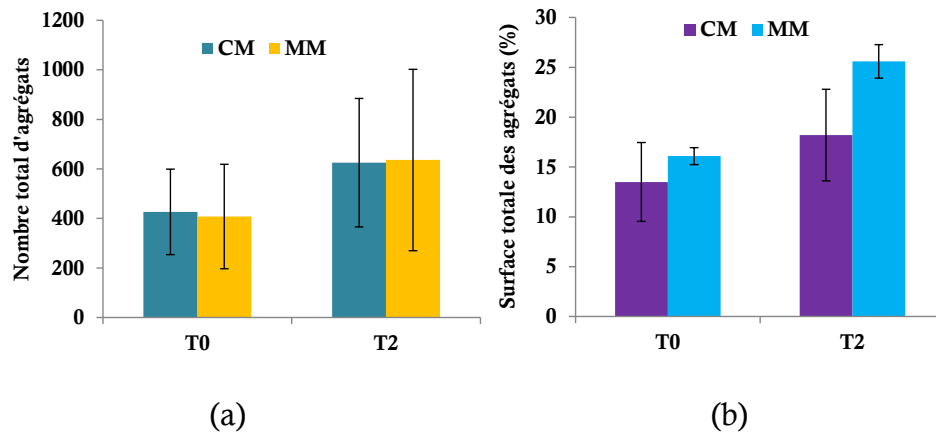


Figure 44. Evolution du nombre total des agrégats classés en fonction du diamètre équivalent (a) et de la surface totale des agrégats (b) en fonction du temps. T0 : 2008, T2 : 2010. CM : coarse macroaggregates, MM : Medium macroaggregates.

En comparaison, les MM ne montrent aucune différence de forme avec le temps. Le pourcentage de surface totale des CM et MM, quant à lui, croît significativement de 2008 à 2010 (p value = 0,00035 ; p value = 0,022 respectivement) (Figure 44 b). Par conséquent nous pouvons émettre l'hypothèse que la différence d'agrégation de 2008 à 2010 est principalement due aux CM (500 – 2000 μm). Cette classe d'agrégats est susceptible d'être plus sensible aux actions des facteurs pédogénétiques sur un sol dans ses premiers stades d'évolution. En effet à ce stade d'évolution, les agents susceptibles d'agir sont principalement l'humectation, les racines des plantes et dans une certaine mesure la macrofaune comme les vers de terre. Cependant, quand l'eau circule dans le sol, elle contribue à la création de fractures qui délimitent des particules de sol séparées les unes des autres et comptabilisées comme agrégats. Les racines de plantes aussi, par l'enchevêtrement qu'elles créent, influencent positivement l'agrégation (Angers et Caron, 1998) et sont connues pour être impliquées avec les vers de terre dans la création de macroagrégats (Zangerlé *et al.*, 2011). Parmi les microorganismes, les champignons, grâce à leur propriété adhésive contribuent à la formation et la stabilisation des macroagrégats (Schutter et Dick, 2002).

Une autre raison qui expliquerait que seuls les CM montrent une différence significative avec le temps est probablement la résolution des images (1200 dpi) qui ne permet pas de détecter des pores < 25 μm . Ces pores sont plutôt intra-agrégats alors que la classe de pores > 25 μm est potentiellement plus présente entre les macroagrégats. De ce fait, la probabilité de bien détecter les CM sera plus importante que celle d'identifier les MM. Nous avons montré que la macroporosité de ce Technosol construit décroît avec le temps tout en gagnant en microporosité, et que ces pores deviennent plus proches les uns des

autres. Or la proximité des pores ($> 25 \mu\text{m}$) est un facteur d'identification et de détermination des agrégats plus petits. Cependant, comme nous l'avons montré dans la définition de l'agrégation en analyse d'images, la porosité est l'un des facteurs qui définit les bords ou limites des agrégats. Ces pores sont utilisés par l'algorithme de partage des eaux comme chemins pour la détermination des bords d'agrégats.

3.3.2. Effet des modalités sur l'évolution de l'agrégation

La modalité de construction de sol « confinement » ne montre aucune différence en ce qui concerne les paramètres descriptifs des agrégats, que les données soient classées ou non. La modalité « éponge », par contre, montre une évolution significative de quelques paramètres en fonction du temps. Concernant les données non classées, le nombre, la forme et la surface totale des agrégats de la modalité « éponge » croissent significativement de 2008 à 2010 (Figure 45). Pour une même année, il n'existe toutefois aucune différence significative de paramètres descriptifs des agrégats entre les deux modalités.

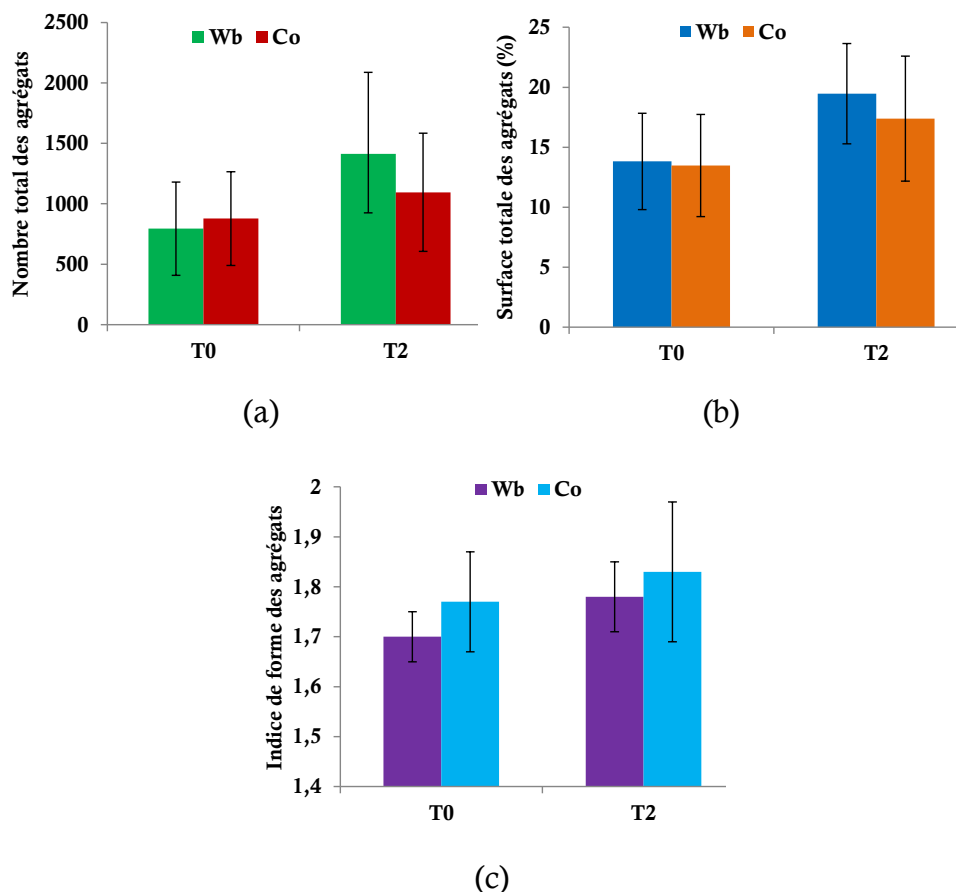


Figure 45. Evolution du nombre des agrégats (a), de la surface totale des agrégats (b) et de l'indice de forme des agrégats (c) en fonction des modalités de construction de sol et du temps sur les données non classées. Wb : modalité « éponge végétale », Co : modalité « confinement ». T0 : 2008, T2 : 2010.

Concernant les résultats sur les données classées, il ressort que le nombre, la forme et la surface totale des CM dans la modalité « éponge » augmentent significativement avec le temps (Figure 46 a, b). Pour les MM de cette même modalité, seuls le nombre et la surface totale augmentent (Figure 46 a, c). Les modalités ont un effet sur la géométrie des MM. En effet, l'excentricité et la forme des MM de la modalité Wb en 2010 sont plus élevées que ceux de la modalité Co (Mann-Whitney test, p value = 0,028 et 0,033 respectivement) (Figure 46 d).

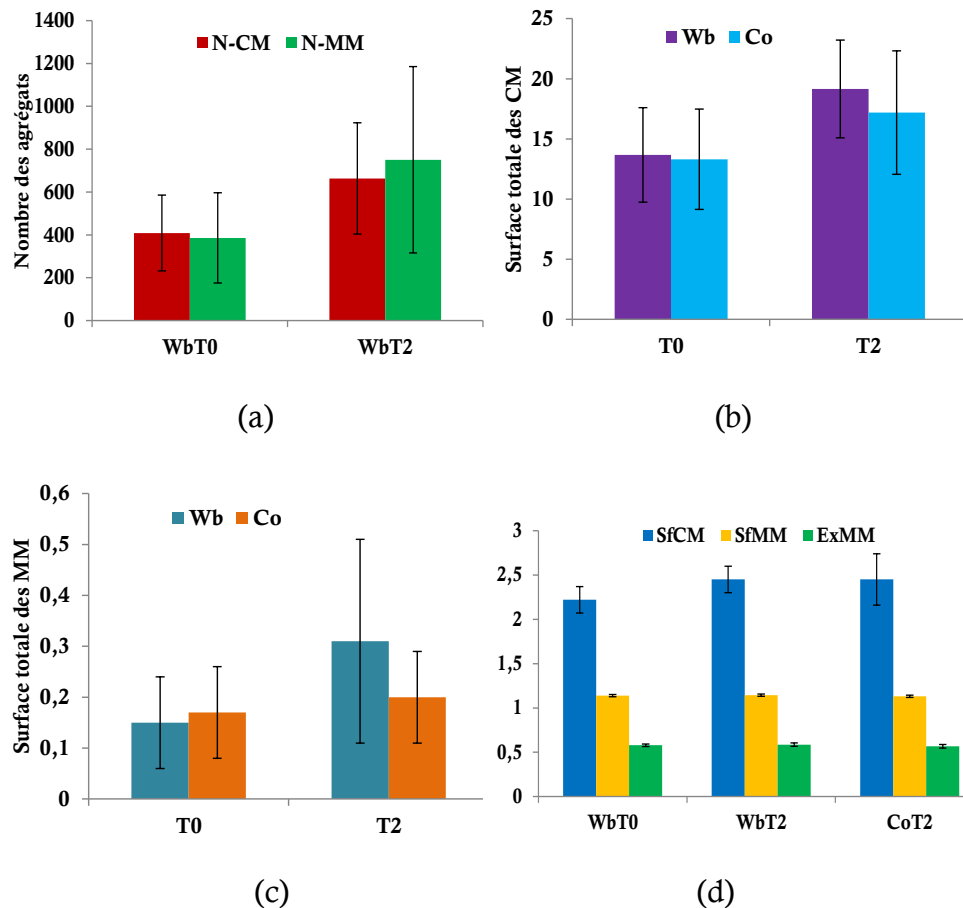


Figure 46. Evolution du nombre des agrégats (a), de la surface des agrégats (b et c), de l'indice de forme et de l'excentricité des agrégats (d) en fonction des modalités de construction de sol sur les données classées. N : nombre, Wb : modalité éponge végétale, Co : modalité confinement. T0 : 2008, T2 : 2010. CM : coarse macroaggregates (200 – 2000 μ m), MM : medium macroaggregates (50 – 200 μ m).

Cette différence de géométrie pourrait s'expliquer par la proportion de compost qui est très dominante sur la majorité d'images de la modalité « éponge ». En effet, les débris végétaux seraient plus allongés, donc moins arrondis que les agrégats formés en majorité de particules de sol. L'hydrophobicité de la matière organique fait que les agrégats formés d'un mélange de terre et de compost seraient plus isolés car moins adhérents, donc la probabilité de détecter des agrégats dans ces échantillons est grande. Ceci est confirmé par le nombre d'agrégats qui

tend à être plus élevé dans la modalité « éponge » que dans la modalité « confinement ». Les données classées mettent mieux en évidence l'évolution des agrégats, que ce soit en fonction du temps ou des modalités. Parmi ces classes, les CM seraient mieux adaptés dans le suivi de la dynamique de l'agrégation en fonction du temps, alors que les MM seraient dédiés à l'étude de l'effet de la construction du sol sur la géométrie des agrégats.

3.3.3. Choix des paramètres comme indicateurs de l'agrégation

Sur la base des tests de comparaison de moyenne, le nombre, la forme et la surface totale des agrégats peuvent être choisis comme indicateurs de suivi de la dynamique d'agrégation en fonction du temps. Nous avons réalisé des ACP sur toutes les données quantifiées afin de vérifier si ces résultats se confirment et pour déterminer la contribution de chaque variable à cette dynamique. Les figures 47 et 48 montrent respectivement les résultats de ces ACP sur les données non classées et classées.

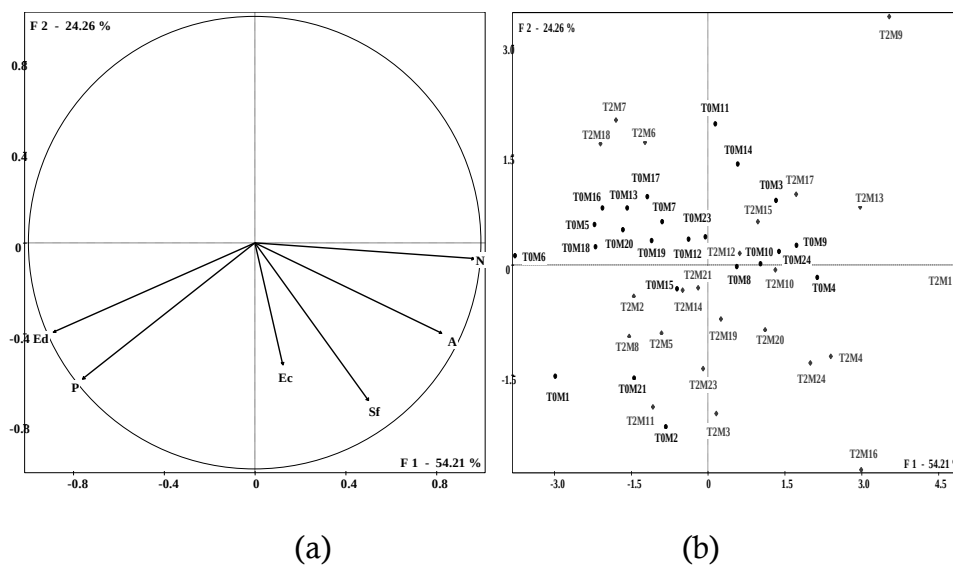


Figure 47. Projection des variables (a) et distribution des échantillons (b) dans le plan défini par les facteurs 1 (F1) et 2 (F2) d'une ACP sur les données non classées. N : nombre, A : surface totale d'agrégats en pourcentage, P : périmètre, Ed : diamètre, Ec : excentricité, Sf : forme. T0 : 2008, T2 : 2010, M : maille, en noir : échantillons de 2008, en gris : échantillons de 2010.

Le premier axe est positivement corrélé aux valeurs de N et A (Figure 47 a). Il oppose les échantillons bien agrégés (e.g. T0M1) à ceux moins agrégés (e.g. T0M6) (Figure 47 b). Le deuxième axe, quant à lui, est corrélé négativement à la forme. Cet axe permet de distinguer les individus de 2008 de ceux de 2010. Les échantillons de 2010 sont généralement caractérisés par des agrégats avec de fortes valeurs d'indice de forme : ils sont grands et moins arrondis. En témoignent les valeurs de la surface totale des agrégats, plus élevées en 2010 qu'en 2008. Les échantillons qui répondent plus à cette logique sont ceux de la modalité

éponge en 2008 ; ils sont moins agrégés (faibles valeurs de N, A et Sf). La variabilité de l'ACP sur les données classées est distribuée entre 12 paramètres. Encore une fois, le nombre, la surface totale et la forme des CM (500 – 2000 μm) sont prépondérants dans la définition des axes (Figure 48 a). Le premier axe est défini par la surface totale, le diamètre et le nombre des agrégats alors que le second axe est plutôt mieux corrélé avec la forme des CM. Le deuxième axe contribue aussi à la distribution des échantillons en fonction du temps. En effet, on voit une tendance à la distinction entre les échantillons de 2008 et 2010, comme c'est le cas sur les données non classées (Figures 48 a, b).

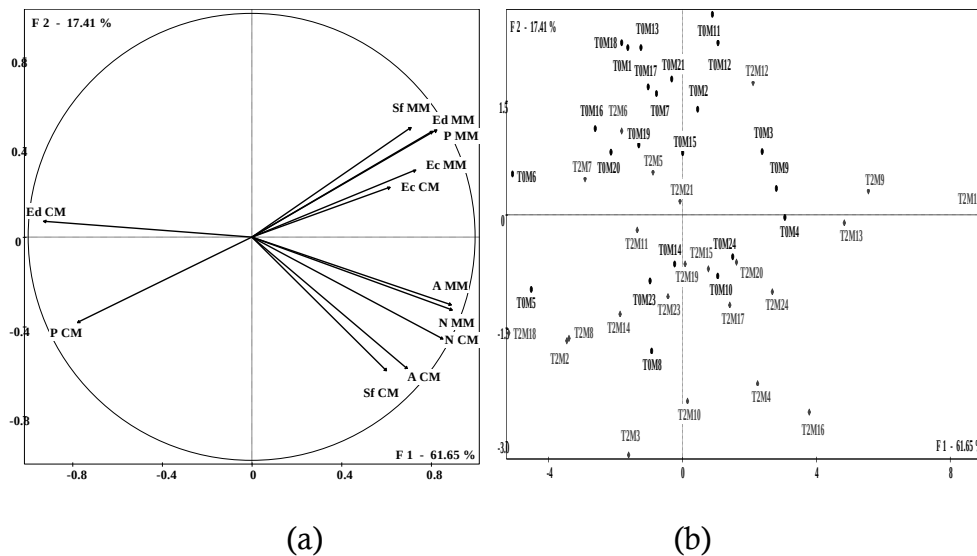


Figure 48. Projection des variables (a) et distribution des échantillons (b) dans le plan défini par les facteurs 1 (F1) et 2 (F2) d'une ACP sur les données classées. N : nombre, A : surface totale d'agrégats en %, P : périmètre, Ed : diamètre, Ec : excentricité, Sf : forme. T0 : 2008, T2 : 2010, M : maille, en noir : échantillons de 2008, en gris : échantillons de 2010.

Si nous tentons d'ordonner les paramètres descriptifs des agrégats, en fonction de leur contribution dans la mise en évidence de la dynamique d'agrégation au cours du temps et des modalités de construction de sol, ils sont classés comme suit : Sf CM, A CM et N CM.

3.4. Relation entre l'agrégation et la porosité

Il existe une relation entre les surfaces totales (exprimées en % de la surface totale) des pores (P) et des agrégats (A). Cette relation est représentée par le coefficient de corrélation linéaire, non significatif en 2008 (Figure 49 a) et satisfaisant en 2010 (Figure 49 b), $r = 0,31$ et $r = 0,62$ respectivement. Le pourcentage de porosité est aussi lié au MIAia (Mean Index of Aggregation) en 2008 (Figure 49 c) et en particulier en 2010 (Figure 49 d), les coefficients de corrélation linéaire étant respectivement de $r = 0,49$ et $r = 0,85$. La relation entre la porosité et MIAia est donc plus forte que celle reliant A et P (Figure 49 a et b). Par

conséquent nous pouvons dire que MIAia est mieux à même de caractériser la relation entre la porosité et les paramètres d'agrégation. L'amélioration de la qualité de la relation entre la porosité et les paramètres d'agrégats entre T0 et T2 peut être expliquée par le fait qu'à T0, le Technosol n'est pas nécessairement agrégé. A T0, les agrégats quantifiés sont majoritairement des agrégats intrinsèques au sol, issus du processus de formulation du sol (mélange et mise en place des matériaux) et non une conséquence de l'action de facteurs pédogénétiques. La structure est définie comme l'arrangement spatial des particules et des pores dans un sol. Il est donc logique de trouver une relation entre l'agrégation et la porosité. En effet, Chappell *et al.* (1999) ont montré une corrélation entre la stabilité structurale d'un Ultisol tropical et la porosité ($r^2 = 0,43$; $p = 0,015$). La porosité dans un sol est de deux ordres : la porosité intra- et la porosité inter-agrégats, chacune avec des tailles spécifiques.

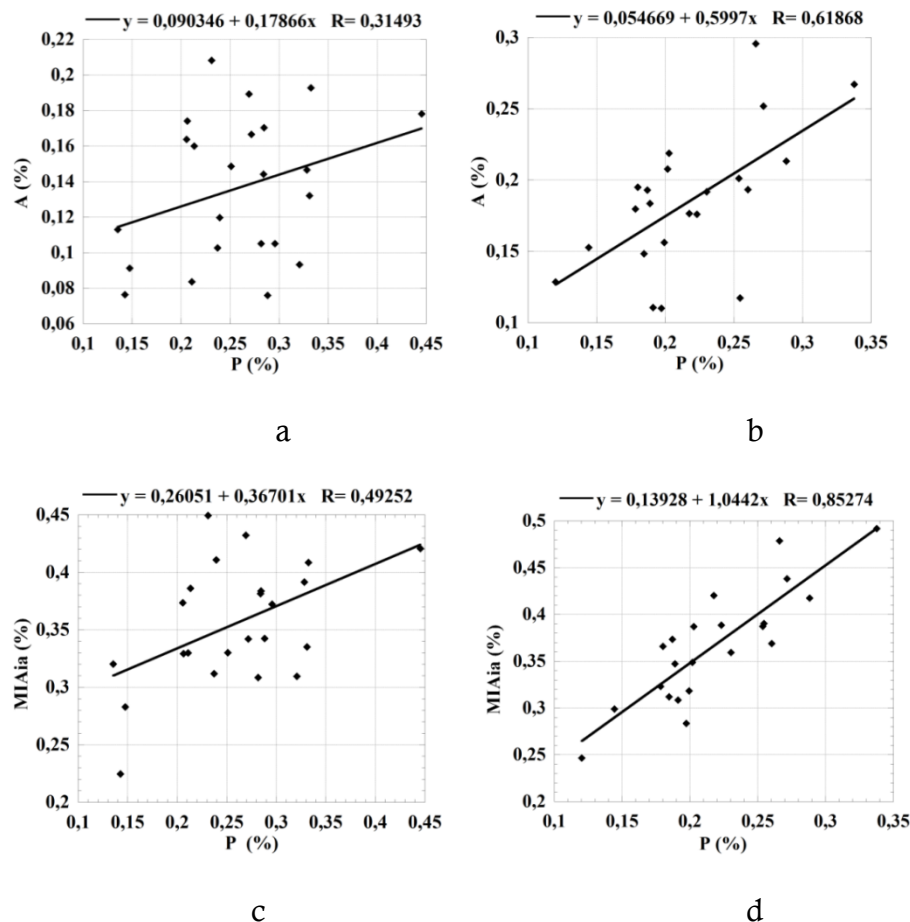


Figure 49. Relations entre la porosité et les paramètres d'agrégation quantifiés par l'analyse d'images de lames minces d'un Technosol construit en 2008 (a, c) et 2010 (b, d). MIAia : Mean Index of Aggregation, A : surface totale des agrégats en %, P : surface totale de la porosité en %.

Les macropores sont associés aux grandes particules, c'est à dire aux agrégats (Nimmo, 2004) ; par conséquent, plus les agrégats sont grands,

plus la porosité est importante (Nandi et Luffman, 2012). Considérant les « principes d'exclusion de la porosité », (porosity exclusion principles) (Dexter, 1988), les agrégats d'un niveau hiérarchique bas (plus petits), excluent la porosité entre les compartiments formant les agrégats d'un niveau hiérarchique supérieur (plus grands). Ceci montre comment les pores contribuent à la définition et à la détermination des agrégats de différentes dimensions. La qualité de cette détermination en analyse d'images dépend de la distance entre les agrégats (pores, failles). En outre, Nandi et Luffman (2012) soutiennent que la porosité d'un sol peut être considérée comme un indicateur de son agrégation, ce qui est en cohérence avec nos résultats.

IV. Conclusion

L'objectif de développement d'un protocole de reconnaissance des agrégats par analyse d'images de lames minces d'un Technosol construit est atteint. Un nouvel algorithme de calcul de distance, qui prend en compte les différentes directions à partir du barycentre de la particule, pourrait améliorer la méthode de quantification. Le protocole développé permet également de quantifier les paramètres descriptifs de l'agrégation au sein du sol et de dégager les plus pertinents en fonction du temps ou des modalités de construction de sol étudiées. Les résultats montrent une augmentation de l'agrégation au cours du temps, avec un moindre effet des modalités. Trois paramètres : nombre moyen d'agrégats, surface totale des agrégats et forme des agrégats établis lors de l'analyse des lames minces sont retenus en tant que paramètres révélateurs de l'évolution de l'agrégation du Technosol construit dans les stades précoces de pédogenèse. L'agrégation est corrélée à la porosité et cette relation est encore plus aboutie avec le nouvel indice moyen d'agrégation défini. Mais les résultats de quantification de l'agrégation par analyse ne sont pas bien corrélés à ceux de granulodensimétrie (Figure 50). En effet le MWDst est très faiblement lié au MIAia en 2008 et 2010 avec des coefficients de corrélation de $r = 0,135$ et $r = 0,035$ respectivement.

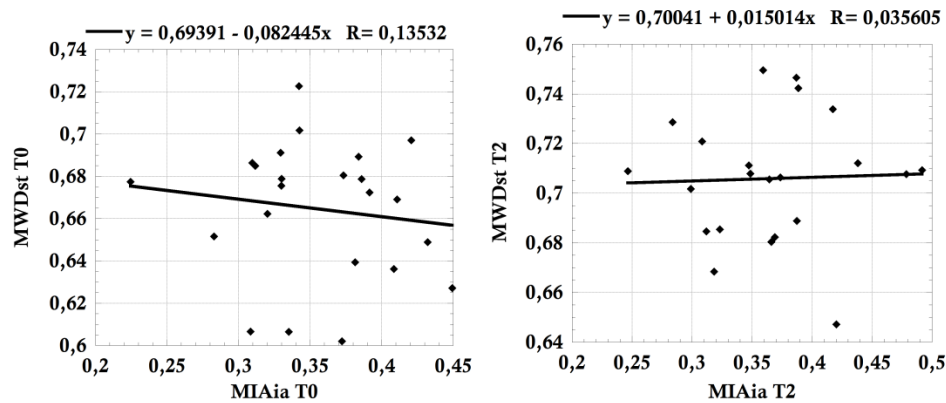


Figure 50. Relations entre les paramètres d'agrégation quantifiés par l'analyse d'images de lames minces d'un Technosol construit et par test de granulodensimétrie à l'eau en 2008 (a, c) et 2010 (b, d). MIAia : Mean Index of Aggregation, MWDst : diamètre moyen pondéral.

Cette méthode est donc moins corrélée à toute méthode où la désagrégation des associations organominérales est trop poussée comme la granulodensimétrie ou les tests des microagrégats. A l'avenir, des tests de stabilité structurale adaptés pourront être réalisés lors des campagnes d'échantillonnage de sols construits, afin d'établir une éventuelle relation des résultats de cette mesure indirecte avec l'indice moyen d'agrégation. Les méthodes de quantification de l'agrégation directes et indirectes permettent toutes de donner une idée sur la structure d'un sol mais sous d'angles différents. Chacune a ses atouts et ses limites (Tableau 8) mais la maîtrise des deux permet de faire des choix raisonnés en fonction des besoins de l'étude.

Tableau 7. Atouts et contraintes (non exhaustifs) des méthodes directes et indirectes de quantification de l'agrégation dans un sol.

	Analyse d'images	Stabilité structurale Granulodensimétrie
Atouts	-Directes -Mesures sur chaque agrégat (diamètre, surface...) -Paramètres faciles à suivre -Reproductible et automatisable -Rapide et facile d'application. -Echantillons faciles de conservation de l'échange. -Conservation longue durée des échantillons. -conserve la structure intacte	-Mesure la résistance des agrégats aux stress -Méthode d'échantillonnage simple et rapide -Reproductibles et normalisables. -Echantillonnage à volonté
Contraintes	-Ne donne aucune idée sur la stabilité des agrégats. -Echantillons (lames minces) difficiles et long à obtenir. -Beaucoup d'algorithmes non harmonisés. -Echantillon de petite taille	-Indirectes -Difficile de suivre les paramètres des agrégats -Méthode fastidieuse. -Echantillons épuisables. -beaucoup de techniques non harmonisées -Détruit la structure lors de l'échantillonnage.

Chapitre V. Dynamique d'agrégation dans de Technosols

I. Introduction

L'agrégation est une propriété fondamentale considérée comme indicateur de fonctionnement d'un sol (Duchaufour et Souchier, 1983). Le résultat de ce processus donne des agrégats considérés comme les unités de base des sols (Henao Valencia, 2008) et comme des indicateurs de la stabilité structurale. Plusieurs théories ont été émises sur les mécanismes d'agrégation (Edwards et Bremner, 1967; Tisdall et Oades, 1982) et les principaux facteurs qui agissent dans ce processus sont bien connus (Six et al., 2004). Pour mieux comprendre les processus d'agrégation et rendre plus génériques ces différentes théories, la démarche par la modélisation est une étape décisive. Pour ce faire, des données quantitatives sur les différents facteurs qui influencent ou contribuent à l'agrégation sont indispensables. Or ces données quantitatives manquent crucialement, sans doute à cause des interactions qui caractérisent les facteurs impliqués (Six et al., 2004). Les tentatives de quantification de l'agrégation entreprises jusque-là (De Gryze *et al.*, 2005; Plante *et al.*, 2002), passent par les tests de stabilité structurale. Or, i) l'agrégation est un processus dynamique (Tisdall et Oades, 1982) qui ne peut pas être compris exhaustivement à travers des démarches statiques et instantanées, ii) les tests de stabilité des agrégats ne sont qu'une mesure indirecte de l'agrégation (Niewczasz et Witkowka-Walczak, 2005), iii) il est impossible, en mettant en œuvre des méthodes destructives, de prélever deux fois un même échantillon de sol au même endroit, et iv) le prélèvement d'un échantillon enclenche la rupture du processus en cours. L'objectif de ce travail est alors de mettre en place un dispositif qui permette de suivre visuellement *in situ* l'agrégation d'un sol fortement anthropisé sous l'influence de plusieurs facteurs et de quantifier les paramètres les plus discriminants de ce processus. Les données quantitatives ainsi obtenues aideront indéniablement à la formalisation des étapes de modélisation des processus d'agrégation, et plus globalement à la compréhension des mécanismes de pédogenèse d'un Technosol construit, voire à une généralisation pour des sols « classiques ».

II. Matériels et méthode

2.1. Agrégatron : dispositif de suivi *in situ* de l'agrégation

2.1.1. Présentation générale de l'agrégatron

L'agrégatron est le nom proposé pour un dispositif original, conçu au cours de la thèse, qui combine des outils informatiques (logiciel, scanners, ordinateurs) permettant la capture et la sauvegarde d'images

de coupes de sol contenu dans des cosmes. Une enveloppe « Soleau » a été déposée à cet effet. Ces dispositifs ont pour objectif de suivre l'impact de facteurs pédogénétiques sur l'agrégation, tels que le développement de plantes, les bioturbations de la faune ou encore l'hydrodynamique. L'agrégatron est alors dimensionné de façon à capturer automatiquement et en continu des images du système sol en 2 dimensions sur une période relativement longue (une année d'expérimentation). La figure 51 présente le principe général de l'agrégatron. Dans la réalité, afin de disposer d'un nombre satisfaisant de répétitions, 12 cosmes reliés chacun à un scanner sont mis en place.

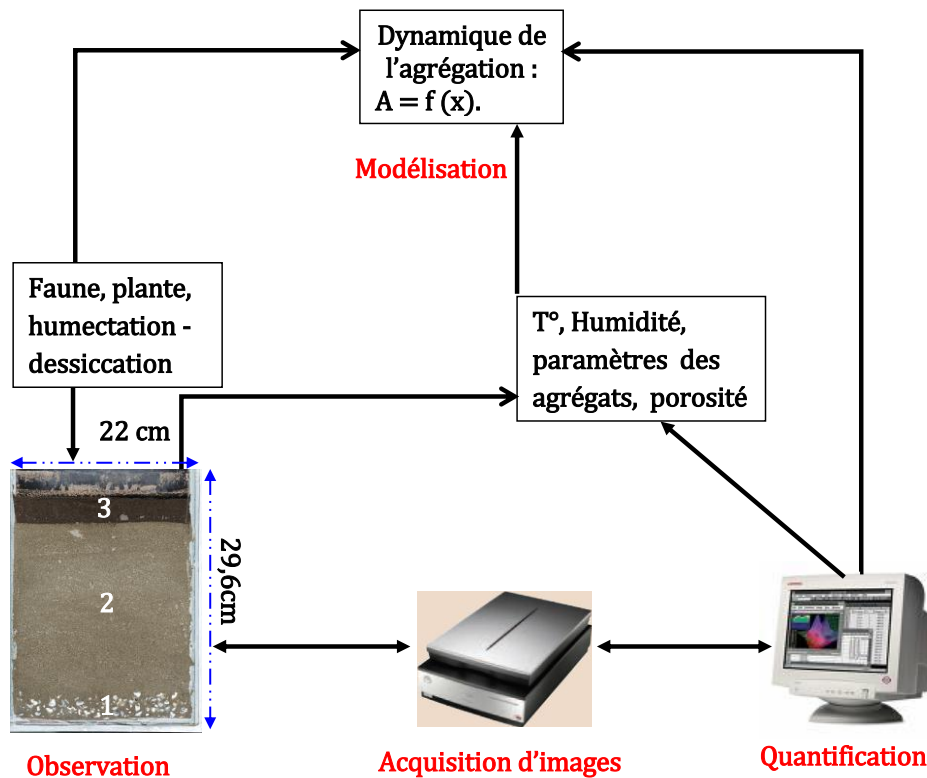


Figure 51. Schéma général du dispositif Agrégatron. 1) couche de gravier ; 2) Mélange TIT/SPP ; 3) couche de compost dans le cosme, A : agrégation.

Les scanners capturent automatiquement les images de sol disposé en horizons dans les cosmes. Les images capturées et sauvegardées seront montées chronologiquement en un film permettant de visualiser la dynamique d'évolution de la structure. Grâce à un logiciel de traitement d'images (Visilog7, Noesis), des paramètres de structures (*e.g.*, porosité, système racinaire et agrégation) seront quantifiés sur un panel choisi d'images.

2.1.2. Les cosmes

Les cosmes sont de dimensions suivantes : 29,6 cm de longueur, 22 cm de largeur et 4,6 cm de profondeur. Trois types de matériaux sont

disposés en couches dans les cosmes, avec du bas vers le haut (Figure 52):

- (1), une couche de gravier lavé (500 g) retenu par une fine toile disposée sur le fond du cosme. Le rôle de cette couche est d'assurer un bon drainage de l'eau dans le cosme. Un orifice ouvert à la base du dispositif permet de récupérer les éventuels lixiviats.

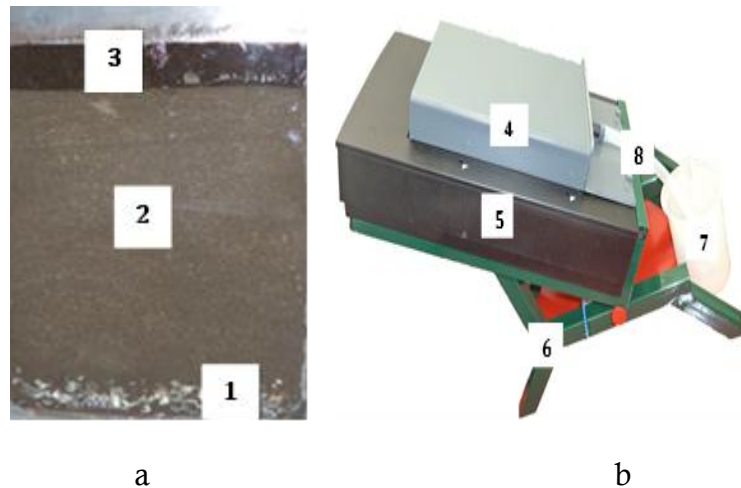


Figure 52. Disposition des matériaux dans le cosme et montage sur scanner.

(a) Le cosme rempli de sol construit : couche de graviers (1), mélange TIT/SPP (2), couche de compost (3)

(b) L'unité cosme/scanner : le cosme (4) disposé sur le scanner (5), le tout supporté par une table inclinable à 40°(6). Le lixiviat est collecté dans une fiole (7) via un tube (8) joint à l'orifice à la base du cosme

- (2), une couche de sol (2200 g de sol sec) formée à partir d'un mélange de Terre Industrielle Traitée (TIT) et de Sous-Produit Papetier (SPP) en mélange 2/3-1/3 (m/m) tamisé à 500 μm .
- (3), une faible épaisseur de compost (100 g) tamisé à 500 μm est disposée à la surface, simulant une couche humifère du sol et servant de source nutritive pour les vers de terre.

Les cosmes sont fabriqués en plexiglas noir opaque, sauf la face qui sera en contact avec le scanner qui est en verre traité anti reflet pour éviter les risques de reflets sur la paroi vitrée lors des séquences de numérisation. Les cosmes sont inclinables à 40° par rapport à l'horizontale à l'aide d'une table métallique. Cette position inclinée conduira les vers et les racines à se diriger sur la paroi vitrée par géotropisme positif.

Les différents matériaux disposés en horizons sont humectés (pendant 24h) par remontée capillaire en plongeant le cosme dans un bac contenant de l'eau distillée à deux tiers de sa hauteur. Le cosme est pesé instantanément à la fin de l'humectation pour déterminer le taux d'humidité en condition saturée. Puis on le laisse ressuyer pendant 1h avant de le placer sur le scanner.

2.1.3. Les scanners

Nous avons choisis des scanners de type EPSON V750 Perfection Pro. Ce modèle de scanner est équipé du système double lentille, d'un système d'autofocus et d'une lumière froide pour pallier les problèmes de condensation. Ceci nous permet de capturer des images A4 qui, à une résolution de 1200 dpi ont une taille d'environ 409 Mo chacune. A cette résolution, un pixel a une taille de 21 μm . Les scanners sont fixés solidairement aux cosmes et à la table d'acquisition d'image pendant toute la durée de l'expérience.

2.1.4. Les ordinateurs

Nous avons utilisé quatre ordinateurs de bureau de marque Dell Précision T5500 sous Ubuntu 64 bits avec 4Ghz de RAM et un processeur Intel. Compte tenu de la grande taille des images à capturer (409 Mo), nous avons équipé chaque ordinateur de deux disques durs de 4 To au total. Cette configuration permet simultanément de stocker les images et de faire fonctionner le système d'exploitation et les autres logiciels.

2.1.5. Le programme « agrégatron »

Une application spécifique a été développée par une société de service, afin de concevoir une interface permettant le pilotage de 3 scanners par un seul ordinateur, ce qui divise par 4 le nombre d'ordinateurs à mettre en œuvre. En effet, sans cette application, un ordinateur ne peut piloter qu'un seul scanner connecté via un port USB. De plus, cette application permet de gérer et classer les images dans des dossiers précis en fonction des modalités. Chaque scanner est défini physiquement sur un port USB de l'ordinateur de sorte que l'adressage se situe au niveau de l'ordinateur. Par exemple, au niveau du port USB1 on définit le « Premier Scanner » et quel que soit le scanner qui sera branché, il le reconnaîtra comme « Premier Scanner ». Les noms des scanners sont modifiables à partir de l'interface de l'application et seront alors nommés en fonction des modalités. Il y a deux possibilités de scan, automatique ou manuel, chacun présentant les mêmes paramètres, modulables selon les besoins. Parmi ces paramètres figurent en particulier la résolution de scan, le type de scan : noir, couleur ou niveau de gris, la luminosité, la netteté, l'intervalle entre deux scans (Figure 53).



Figure 53. Vue générale de l'application « Agrégatron » montrant les différentes options et paramètres du scan.

Comme des échantillons épais et foncés sont scannés, le scan est opaque par défaut. Les paramètres choisis pour le scan automatique sont les suivants :

- résolution des images 1200dpi
- type de scan : couleur
- luminosité : 3
- netteté : 2
- seuil : 0
- intervalle entre deux scans : 120 mn

100

2.1.6. Description de l'opération de scan

Qu'elle soit lancée automatiquement ou manuellement, l'application enclenche le premier scanner, qui balaye toute la surface vitrée (format A4) en 4 mn. L'image acquise faisant une taille de 409 Mo est sauvegardée en .Tif. Aussitôt le deuxième scanner effectue la même opération sur le deuxième cosme et ainsi de suite pour le troisième scanner. Nous avons programmé 1 image toutes les 2 heures. En 24 heures nous avons donc 12 images par cosme. Pour une durée d'expérience d'un an sans interruption, le nombre d'images capturées est de 4380 (365 X 12) par cosme, soient $12 \times 4380 = 52560$ images pour douze cosmes.

2.2. Constitution et choix du mélange de sol

2.2.1. Caractéristiques des matériaux parents du mélange

Trois types de matériaux, tamisés à 2 mm, sont utilisés : compost de déchets verts (CDV), terre industrielle traitée (TIT) et sous-produits papetiers (SPP) de caractéristiques suivantes (Tableau 9). La TIT est excavée sur le site d'une ancienne cokerie située à Homécourt, Nord Est de la France, à 90 km de Nancy. Le site était initialement pollué par des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et la terre industrielle a été traitée par désorption thermique.

Tableau 8. Quelques caractéristiques des matériaux parents (d'après Séré et al, 2008)

Paramètres	Unité	CDV	SPP	TIT
Argile	g.kg ⁻¹	254	244	49
MO	g.kg ⁻¹	376	251	94
CEC	Cmol.kg ⁻¹	42,3	4,6	6,7
pH eau		8,6	7,9	9,0

Le CDV est principalement formé de végétaux issus d'élagage d'arbres de milieux urbains et de résidus de tonte. Le SPP, quant à lui, est un sous-produit de l'industrie papetière. A partir du TIT et du SPP, nous avons constitué différents mélanges, afin de choisir celui qui favorise au mieux l'agrégation, soit celui pour lequel il se forme le plus d'agrégats visibles et quantifiables par analyse d'image. Les humidités pondérales de TIT et du SPP sont déterminées avant mélange selon la méthode décrite par Baize (2000) ; elles sont de 32,9% et 18% respectivement pour la TIT et le SPP.

2.2.2. Préparation et choix du mélange

L'humidité finale du mélange est une moyenne de celles des deux humidités des matériaux parents pondérée à leur masse. Dans notre cas : l'humidité initiale hm du mélange TIT/SPP est:

$$hm = \left(\frac{h_1 m_1 + h_2 m_2}{m_1 + m_2} \right) \quad 18$$

où h_1 : humidité du matériau 1 de masse m_1 ; h_2 : humidité du matériau 2 de masse m_2

Si nous voulons une humidité finale hf de 35% alors il faut ajouter une quantité d'eau he dans 100 grammes de mélange :

$$he = (hf - hm) \quad 19$$

Sachant que nous avons m_1 g de SPP et m_2 g de TIT alors il faut ajouter une quantité d'eau he de :

$$he = \frac{(m_1 + m_2)}{100} \times (hf - hm) \quad 20$$

Ce qui donne :

$$he = \frac{1}{100} (m_1 + m_2) \times \left(hf - \left(\frac{h_1 m_1 + h_2 m_2}{m_1 + m_2} \right) \right) \quad 21$$

Avec he : masse d'eau à ajouter ; hf : humidité finale du mélange ou humidité cherchée ; hm : humidité du mélange des matériaux parents ; h_1 : humidité du matériau 1 de masse m_1 ; h_2 : humidité du matériau 2 de masse m_2 .

Nous mélangeons une quantité y de TIT à une quantité 2, 5y, 2y, 1, 5y, 1y, 0,75y et 0,5y de SPP (procédé P1) à l'aide d'une quantité d'eau suffisante pour avoir une humidité constante de 35%. Inversement, nous avons mélangé une quantité x de SPP avec une quantité 2,5x, 2x, 1,5x, x , 0,75x et 0,5x de TIT (procédé P2) dans les mêmes conditions (Tableau 10). Les matériaux (SPP et TIT) sont pesés et rassemblés dans un mortier. Ils sont d'abord mélangés à sec, puis humidifiés. Le tout est malaxé à l'aide du pilon pendant six minutes puis versé dans une boîte de pétri et aplani. Trois images (10,83 X 8,51 mm) d'un échantillon de chaque mélange ont été capturées à l'aide d'un stéréomicroscope équipé d'une caméra Leica DCF300 (X0,8). Ces images sont enregistrées en .tif et importées dans Visilog pour analyse (Figure 54).

Tableau 9. Proportion des matériaux parents utilisés dans la constitution des mélanges. (a) : Procédé 1 ; (b) : Procédé 2. TIT : terre industrielle traitée ; SPP : sous-produits papetier.

Mélange	TIT (g)	SPP (g)	Mélange	SPP (g)	TIT (g)
M1	30	75	M1	30	75
M2	30	60	M2	30	60
M3	30	45	M3	30	45
M4	30	30	M4	30	30
M5	30	22.5	M5	30	22.5
M6	30	15	M6	30	15

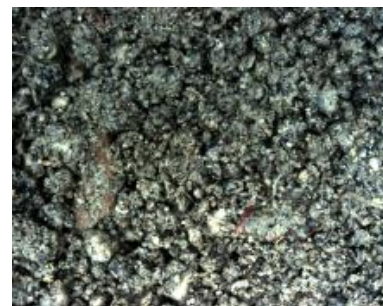
a

b

Après comparaison, c'est le mélange M6 du procédé 1 qui montre un meilleur potentiel d'agrégation car le pourcentage de la surface d'agrégats dans ce mélange est significativement plus élevé que dans les cinq autres (Anova $p = 0,023$). Il est ainsi choisi pour le suivi *in situ* de la dynamique de l'agrégation en fonction des facteurs physiques et biologiques.



a



b

Figure 54. Exemples d'images des mélanges de TIT/SPP. (a) : Mélange M6 du procédé 1 ; (b) : Mélange M6 du procédé 2. TIT : Terre industrielle traitée ; SPP : Sous-produits papetiers

2.2.3. Préparation du sol construit

Les humidités caractéristiques du mélange choisi ont été déterminées en se basant sur la méthode de Mathieu *et al.* (1998). Son humidité à la capacité au champ est de 39,4 % et celle au point de flétrissement est de 20,9 %. Le mélange TIT/SPP ainsi constitué et caractérisé est réalisé en grande quantité. Il est ensuite séché à l'air, broyé à l'aide d'un mortier à agate et tamisé à 500 µm. Cette granulométrie est choisie dans le but de maximiser les chances de formation d'agrégats. Afin d'éliminer la méso- et macro-faune, le sol a été défauné selon une technique qui est la combinaison des méthodes proposées par Huhta *et al.* (1989) et Ernst *et al.* (2008). L'échantillon de sol sec est alternativement congelé à -20°C (72 h), décongelé à +20°C (72 h) et chauffé à 60°C (72 h), ces opérations étant réalisées deux fois de suite.

2.3. Choix de facteurs d'agrégation

Selon Six *et al.* (2004), il existe cinq facteurs majeurs qui influencent l'agrégation. Il s'agit de i) la faune du sol, ii) les microorganismes, iii) les racines, iv) les agents de liaisons inorganiques et v) les variables environnementales. Parmi ces facteurs nous en avons choisi trois: pour la faune nous avons retenu les vers de terre (*Lombricus castenus*); pour les racines nous avons choisi comme plante le lupin (*Lupinus albus*) et pour les variables environnementales nous avons choisi le cycle humectation-dessiccation. Ces facteurs sont étudiés selon trois modalités, chacune répétée trois fois. Une quatrième répétition, dénommée « témoin d'arrosage » est mise en place pour chaque modalité et est destinée à évaluer la quantité d'eau à apporter dans les 3 autres répétitions. Les cosmes témoins ne sont pas reliés à un scanner et peuvent ainsi facilement être séparés de leurs support afin d'être quotidiennement pesés. Ces pesées déterminent l'eau perdue (drainage, évapo-transpiration, absorption) par le système et permettent de calculer l'eau à apporter en fonction de la capacité au champ du système.

2.3.1. Modalité plante

Par leurs racines, les plantes contribuent à la formation d'agrégats stables dans le sol. En outre, les racines des fabacées contribuent plus fortement à la stabilité des agrégats que celles des non légumineuses. Dans une étude sur deux légumineuses, Haynes et Beare (1997) ont montré que les lupins généraient plus d'agrégats stables à l'eau que les trèfles blancs. C'est pour cela que nous avons choisi le lupin blanc de printemps (*Lupinus albus* L.) en tant qu'agent plante dans notre expérimentation. Cinq graines de lupin ont été semées dans chaque cosme, après imbibition dans de l'eau pendant quatre jours. Deux semis ont été effectués : à T0 au début de l'expérimentation et à 10 jours, ce

deuxième semis permettant de remplacer les graines du premier semis n'ayant pas germé. Les plantes sont arrosées lorsque l'humidité du système descend en dessous de 63% de la capacité au champ, pour la ramener à 79%. Lorsque les plantes ont dépassé le bord du cosme, du compost a été ajouté.

2.3.2. Modalité faune et plante

Brown *et al.* (2000) ont montré que les vers de terre agissent sur la formation des agrégats en créant des galeries et en produisant des turricules. Nous avons vu plus haut que les plantes aussi ont un effet bénéfique sur la stabilité des agrégats. Des études récentes comme celles de Zangerlé *et al.* (2011) ont montré que les effets des vers de terre et des plantes sur la structuration des sols sont additifs si les deux facteurs sont présents au même moment et dans un même milieu. Deux séries d'introduction de vers ont été réalisées. Pendant la première introduction réalisée le 37^{ème} jour de l'expérimentation, 6 vers de terre endogés (*Apporectodea caliginosa*) ont été inoculés dans chaque cosme avec l'ajout de 100 g de compost. Ces vers n'ont pas survécu longtemps, certains s'étant échappés. Pour la deuxième introduction effectuée le 70^{ème} jour, six vers de terre épianéciques (*Lumbricus castaneus*) ont été ajoutés. Tous les vers ont été collectés manuellement sur les stations expérimentales de la Bouzule (Calciisol redoxic) et d'Homécourt (Technosol construit) respectivement pour les endogés et les épianéciques. Concernant la densité des vers à utiliser en expérimentation, Fründ *et al.* (2010) recommandent de respecter la densité trouvée dans un sol en conditions naturelles. Toutefois, il n'existe que peu de référence concernant le sol construit, *a fortiori* dans les premiers stades d'évolution (Pey, 2010). Mais selon des travaux réalisés par Smetak *et al.* (2007) dans un cas d'étude de sols anthropisés, la densité de vers dans un sol jeune est faible (26 individus/m²) par rapport à des sols plus âgés (jusqu'à 437 individus/m²). En outre, Lowe et Butt (2005) ont estimé que la densité optimale pour une expérimentation avec *L. terrestris* (épi-anécique) dans des cosmes de 2 litres est de 3 à 5 adultes. Sur ces bases, utilisant la même catégorie écologique que précédemment, nous avons choisi une densité de 6 adultes par cosme (environ 3 L), afin d'augmenter les chances d'observer des effets des vers sur l'agrégation. Du compost a été ajouté au même moment qui coïncide avec celui où les plantes déjà présentes ont dépassé le bord de cosmes.

Avant leur introduction dans le Technosol, les vers sont nettoyés à l'eau, séchés délicatement, puis pesés. Par contre ils n'ont pas été affamés comme proposé par Dalby *et al.* (1996), car ce traitement a tendance à les affaiblir. Toutefois, ils ont préalablement été mis pour adaptation

dans un milieu semblable à celui de l'expérience pendant 7 jours (Fründ *et al.*, 2010). Pour subvenir aux besoins en eau des plantes et des vers de terre, des arrosages fréquents sont réalisés. Pour cela, des pesées quotidiennes des cosmes sont effectuées. Lorsque l'humidité des cosmes « témoins » descend en dessous du seuil correspondant à 63% de la capacité au champ, nous ajoutons la quantité d'eau qu'il faut pour atteindre 79 % d'humidité à la capacité au champ.

2.3.3. Modalité humectation-dessiccation

Le cycle humectation-dessiccation a un effet ambivalent sur l'agrégation selon que des argiles gonflantes sont présentes ou non: augmentation de la stabilité en absence d'argile gonflante (Denef *et al.*, 2001a) et diminution en présence d'argiles (Singer, 1992). A D0 cette modalité est saturée en eau à la capacité au champ, puis laissée en phase dessiccation jusqu'à perdre 80% de sa teneur en eau par rapport à la capacité au champ. Elle est alors réhumectée pour ramener l'humidité à 100 % de la capacité au champ et le cycle reprend.

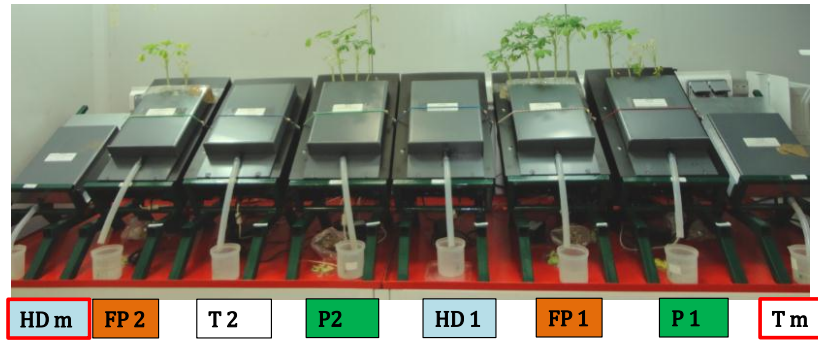
2.3.4. Modalités témoin

Quatre témoins sont mis en place : le sol reste nu, sans plante, ni vers. Ils sont maintenus au même niveau d'humidité que les modalités « plante » et « faune-plante » c'est-à-dire compris entre 63% et 79% de la capacité au champ.

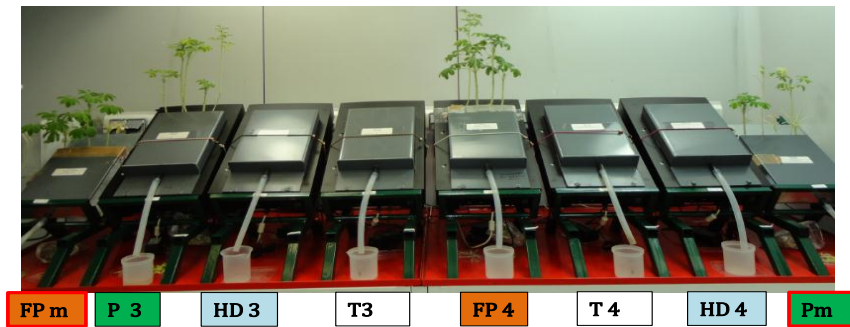
2.4. Plan et conditions de l'expérience

L'expérience s'est déroulée dans un phytotron de dimensions 2,80 X 2,60 X 1,99 m où certaines conditions sont contrôlées : température constante de 20 °C, humidité constante de 50%, photopériode de 16h par jour. Les dispositifs (scanner, cosme, table) sont disposés à 1,2 m du sol à l'aide de deux bancs de dimensions 2,6 X 1,4 m chacun. Le plan d'expérience respecte une randomisation complète. Pour des raisons de dimension du phytotron, nous avons divisé le plan en deux blocs (Figure 55). Les dispositifs sont en position inclinée à 40° sauf lors de l'arrosage où ils sont redressés à 90°. Après avoir apporté la quantité d'eau nécessaire pour atteindre l'humidité recherchée, on rebascule le système en position inclinée. Lors de l'arrosage, toute l'eau n'est pas retenue par le sol. Une partie est drainée et est recueillie au travers d'un orifice situé à la base du cosme.

Au fur et à mesure que les plantes croissent, elles perdent des feuilles. Cette biomasse aérienne est collectée, séchée et pesée afin de pouvoir réaliser un bilan en masse.



a



b

Figure 55. Photo du plan général de l'expérimentation suivant deux blocs (a et b). Modalités étudiées, HD : humectation dessiccation, FP : faune et plante, T : témoin, P : plante, m : indique les modalités « faux témoins » utilisés pour la mesure de l'humidité dans les cosmes.

Le tableau 11 donne le récapitulatif des paramètres et conditions de l'expérience.

Tableau 10. Récapitulatif des paramètres d'expérience. HD : cycle humectation-dessiccation.

	Paramètres	Unité	Valeur
Conditions	Température	(°C)	20
	Photopériode	(h)	16
	Hygrométrie	(%)	50
	Granulométrie du sol	(μm)	<500
	Durée de l'expérience	(mois)	8
Plante	Profondeur de semi	(cm)	3
	Densité de semis	(graine/cosme)	5
	Humidité du sol	(% capacité au champ)	80
	Granulométrie du compost	(μm)	<500
Faune	Origine des vers		Terrain
	Méthode de collecte		Manuelle
	Période d'adaptation de vers	(jours)	7
	Profondeur d'inoculation de vers	(cm)	3
	Densité de vers	(adulte/cosme)	6
	Humidité du sol	(% capacité au champ)	80
HD	Granulométrie du compost	(μm)	<500
	Humidité du sol (Dessiccation)	(% capacité au champ)	20
	Granulométrie du compost	(μm)	<500

2.5. Exploitation des images

2.5.1. Montage de films

Grâce au très grand nombre d'images acquises, il est possible de monter un film. Pour réaliser un film sans que les transitions d'images ne soient visibles à l'œil humain, on a besoin de 24 images par seconde (Béghin et Dubois, 2003). A cette fréquence, les images défilent tellement vite qu'on ne voit pas les détails, surtout concernant l'action des vers de terre. Après plusieurs tests, nous avons choisi une fréquence de 5 images par seconde. Les films ont été montés à l'aide de Windows Live Movie Maker : Microsoft inc. Ces films constituent une vision d'ensemble du dispositif durant toute la durée de l'expérience et permettent de sélectionner les images correspondant à des étapes importantes d'évolution du système et susceptibles d'être soumises au protocole de quantification des paramètres structuraux par analyse d'images.

2.5.2. Choix des images à analyser

Les premières images acquises par le dispositif expérimental servent à déterminer l'homogénéité du système à T0. Par la suite, les images sont exploitées de deux manières (Figure 56):

- Une sous-image de dimensions fixées (185,26 X 210,16 mm) est échantillonnée sur chaque image acquise, afin d'éviter les effets de bords ainsi que les couches de compost et de gravier. L'échantillonnage est automatisé tout en respectant les coordonnées x et y de l'image, c'est-à-dire que tous les échantillons ont été prélevés exactement au même endroit sur l'image originale. Cette tâche est assurée grâce à une macro éditée dans Visual Basic. La période d'arrosage est variable ; elle peut être considérée comme un mini cycle humectation-dessiccation. En quantifiant globalement les paramètres de structure sur ces images avant et après arrosage, on peut déterminer l'effet de l'humidité sur le paramètre en question. Afin de maximiser les chances d'observer des effets globaux, ce sont les images avant arrosage qui sont choisies car après arrosage il y a risque de gonflement d'argiles (aussi minime soit-il) qui peut modifier la porosité.
- La cinétique d'évolution des racines est aussi quantifiée en analysant des images de série régulière (toutes les semaines pendant trois semaines) en commençant par le premier jour de pousse de chaque racine. On suit cette même racine pendant trois semaines. Cette opération est effectuée dans les modalités « P » et « FP » là où il y a les plantes.

- Des échantillons pris sur des parties agrandies avant et après passage d'une racine ou d'un ver afin de quantifier l'effet de facteurs sur la structure à l'échelle locale. Le choix des zones agrandies est fait à la suite des observations faites sur les films. Des zones d'intérêt ont été sélectionnées, des typologies d'action d'agents ont été définies :

- Pour les vers on a défini la typologie des zones d'intérêt en fonction de l'intensité de l'activité des vers : 1) zone non prospectée, 2) zone prospectée une fois, 2) zone prospectée 2 fois ... n) zones prospectée n fois.

- Pour les racines, la typologie est faite en fonction des types de racines : 1) pas de racines, 2) jeune racine, 3) racine âgée ou adulte, 4) racine sénescence ou mortes.

La quantification de l'effet de l'agent plante porte sur la surface et la vitesse de croissance racinaire.

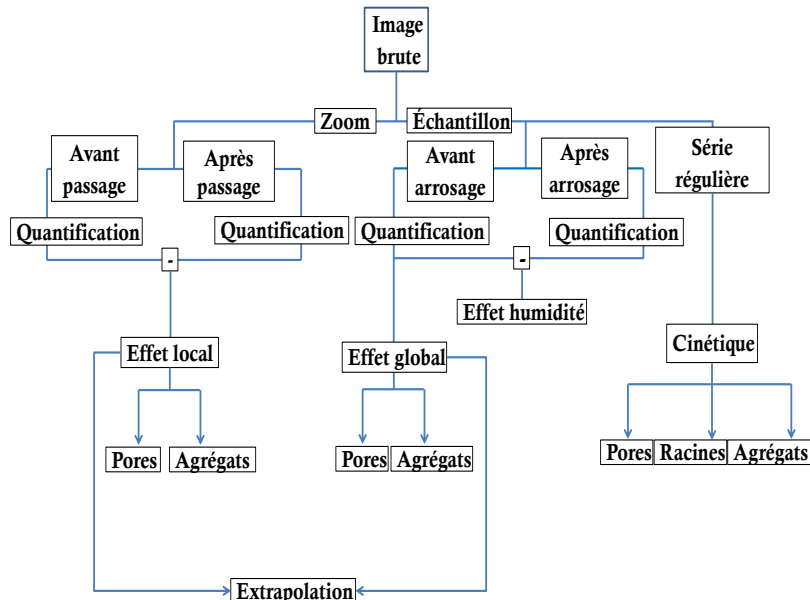


Figure 56. Différents modes d'exploitation et dédiassions des images.

Les effets quantifiés à l'échelle locale sur l'intensité des agents sont extrapolés à l'échelle globale en intégrant la somme des effets puisque l'ensemble des zones prospectées par les vers et les racines sont connues, cartographiées et quantifiées.

2.5.3. Analyse d'images

Les images ont été analysées à l'aide de Visilog7 pour quantifier les paramètres descriptifs de porosité, d'agrégation et de système racinaire. Dans le cas des images issues de l'agrégatron, un nouveau protocole de quantification spécifique est nécessaire. En effet, les images de lame minces analysées dans les chapitres 3 et 4 sont transparentes, alors que

celles de l'agrégatron sont opaques. Dans le premier cas, la porosité apparaît en blanc alors que dans le second elle apparaît en noir.

Quantification de la porosité

Le protocole de quantification de la porosité issue des images de l'agrégatron est spécifique comparativement à celui d'analyse d'images de lames minces, mais la plupart des étapes ont d'ores et déjà été décrites dans le chapitre III. La différence fondamentale vient du fait que la signature spectrale des objets est inversée sur les images de l'agrégatron (porosité noire) par rapport à celle des lames (porosité blanche). A ceci s'ajoute une autre difficulté liée au fait que les matériaux des cosmes ne sont pas secs (exception faite de la modalité HD) ; de plus, leur niveau d'humidité diffère même au sein du cosme. Or l'humidité a une influence sur la couleur des images du fait qu'elle affecte la couleur du sol. Sur la base de ces constatations, les opérations suivantes ont été appliquées aux images afin d'en extraire la porosité :

- un filtrage (lissage) avec le filtre médian de taille 3X3 afin d'éliminer les bruits (sel-poivre) introduits lors de l'acquisition d'images
- une opération de texture afin d'éliminer davantage de bruits mais surtout de reconnaître la forme et la texture des pores. Ici nous avons utilisé un filtre moyen de taille 3X3. L'image ayant subi un algorithme de texture est de format « float » or ce format n'est pas supporté par toutes les opérations. Ainsi, nous lui avons appliqué une opération de conversion de format « miscellaneous/image editing » et convertie en format « short integer ». Ensuite, à l'aide d'un seuillage « Thresholding/ Binarisation/ Colorthreshold » adapté nous avons extrait la porosité sur les différentes images préalablement sélectionnées. Dans la plupart des études sur la quantification de la porosité par analyse d'images, les auteurs convertissent d'abord l'image couleur en niveau de gris avant le seuillage (Ledru *et al.*, 2009). Nous avons choisi un seuillage couleur car la couleur de nos images n'est pas très contrastée, elle s'apparente même à une image en niveau de gris. La convertir induit des erreurs lors du seuillage. En effet, des pixels dont l'intensité est proche de celle de la porosité se retrouvent dans la classe des pores si l'image est convertie en niveau de gris. Le seuil utilisé varie en fonction des modalités. Il est de 52 pour les modalités FP1, FP4, de 60 pour la modalité HD et de 48 pour la modalité T.
- L'image seuillée est nettoyée à l'aide d'un opérateur morphologique « morphology/open/diskopening » avec un

élément structurant de taille 1X1. Cette opération permet de supprimer tous les pixels isolés qui peuvent être des biais de mesure.

- L'opération d'analyse « I-analysis » est appliquée afin de quantifier les différents paramètres désirés.

Quantification du système racinaire

Pour la quantification du système racinaire, il y a une étape supplémentaire à ajouter. Après avoir prétraité l'image (lissage, texture), relevé le niveau de gris par normalisation et converti le format, il faut changer de format de couleur. Il s'agit de convertir le système de couleur RGB (Red, Green, Blue) en HLS (Hue, Lightness, Saturation), car ce dernier donne de meilleurs résultats lors de l'analyse selon des essais réalisés par Barton et Delmas (2002). Selon des essais que nous avons faits, cette opération n'est efficace que dans le cas de quantification de racines mais pas pour quantifier la porosité. En fonction de l'âge des racines, les paramètres du protocole changent aussi. Pour cela, les images peuvent être classées en trois groupes : le premier correspond aux jeunes racines présentant à peu près le même niveau de gris. Le deuxième groupe concerne les racines plus âgées, qui commencent à changer de couleur et le troisième groupe rassemble les racines les plus vieilles qui se distinguent par une teinte encore plus foncée que les précédentes. Ce dernier stade correspond à l'arrêt de la croissance des plantes, les jeunes racines n'étant plus produites. Pour le reste du protocole, les étapes sont identiques à celles de la quantification de la porosité. A la fin du traitement, on applique une « I-filter-image » et puis une « I-analyze » pour quantifier les différents paramètres des racines.

Quantification des agrégats

Sur les images issues de l'agrégration, il y a de la porosité et des racines, toutes deux contribuant à définir les agrégats. Or, ces deux paramètres sont quantifiables selon deux protocoles différents. Ainsi pour quantifier les agrégats, il faut réunir les résultats des deux protocoles. On suit alors le protocole de quantification de la porosité jusqu'à l'obtention d'une image binaire. Puis on procède au protocole de quantification des racines jusqu'à séparation entre la matrice du sol et les racines. Finalement, on applique l'opération « Point opération/arithmetic » et on soustrait l'image de la porosité à celle constituant la matrice. On obtient ainsi une image dépourvue des racines et de la porosité. Cette image est seuillée pour obtenir une image binaire. Elle est ensuite nettoyée par une « ouverture par un disque » puis séparée à l'aide de l'algorithme de partage des eaux « Separate ». Elle est enfin analysée par l'algorithme « I-filter-image » ou directement « I-analyze-filter » pour quantifier les différents paramètres d'agrégats sélectionnés. Dans ce cas, l'agrégat est

défini comme toute unité de sol distincte, individualisée ou individualisable, distante d'au moins 25 μm de sa voisine sur une image de résolution 1200 dpi et dont le diamètre est inférieur à 5 mm.

III. Résultats et discussion

3.1. Suivi des paramètres de l'expérience

3.1.1. Germination, croissance des plantes et survie des vers

Germination de graines

Les graines ont été semées dans les modalités plante et faune plus plante. Il y a eu deux séries de semis.

La première a eu lieu le jour de la mise en route du dispositif à D0. Les graines ont été semées directement dans le sol à une profondeur de 3 cm. Quatre jours plus tard les premières graines ont commencé à germer, mais certaines n'ont pas pu lever complètement. La raison en est certainement imputable à l'arrosage : la quantité d'eau apportée laisse les graines en cours de germination complètement immergées dans l'eau. Le lupin ne tolérant pas l'excès d'eau, ces graines n'ont pas pu finir de germer. Le taux de germination pour cette première série est de 37,5 % (Tableau 12).

111

Tableau 11. Masse et taux de germination des graines dans les différents cosmes : FP : faune et plante, P : plante, R : répétition, m : répétition de mesure, Moy1 : masse moyenne de graines de lupin, les valeurs entre parenthèse sont celles de la deuxième série.

	Première série		Deuxième série		Moy1
	Graines (g)	Germination (%)	Graines (g)	Germination (%)	
FP_R1	0,88	0	0,81	100	0,93 (0,81)
FP_R2	0,97	0	0,83	60	
FP_R4	0,86	20	0,79	100	
FP_Rm	0,99	100		100	
P_R1	0,94	20	0,83	100	0,92 (0,79)
P_R2	0,92	60	0,75	100	
P_R3	0,93	80	0,81	100	
P_Rm	0,88	20	0,78	100	
Moyenne	0,92	37,5	0,80	95	

Tirant leçon de la première série de semis, les graines ont été mises à germer dans des boîtes de pétri avec à la base du papier filtre imbibé d'eau distillée. Lorsque les graines ont pré-germé, elles sont repiquées dans les cosmes en remplacement de celles de la première série qui n'ont pas germé. Le taux de germination pour cette deuxième série est de 95 % (Tableau 12). La masse des graines n'est pas différente au sein d'une

même série. Par contre, les graines de la deuxième série sont plus petites que celles de la première série. La différence du taux de germination peut s'expliquer par la différence de la technique de semis et du mode d'arrosage. Certains auteurs comme Bravo-Garza *et al.* (2009) proposent un arrosage par montée capillaire, mais cette technique n'est pas applicable à nos systèmes.

Biomasse aérienne

Malgré un taux de germination assez élevé lors du deuxième semis, beaucoup de plantes ont fané après quelques jours. La fanaison est constatée lorsque la plante perd toutes ses feuilles, la tige jaunit et commence à sécher (Figure 57).

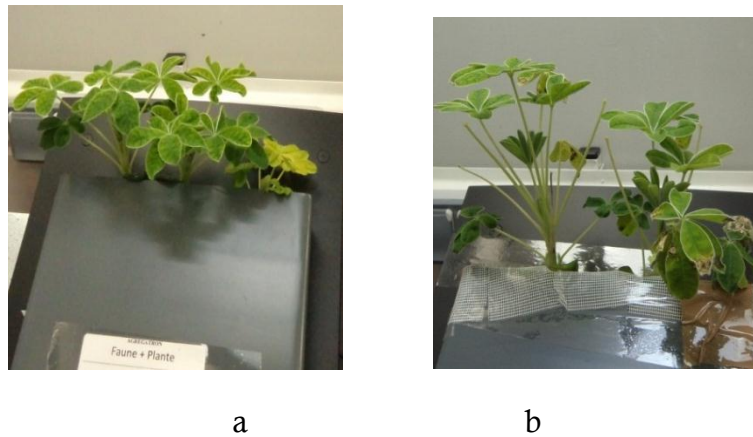


Figure 57. Photos du FP_R2 à D43 (a) et D57 (b) montrant le début de fanaison de plantes. FP : faune et plante, R : répétition, D : date.

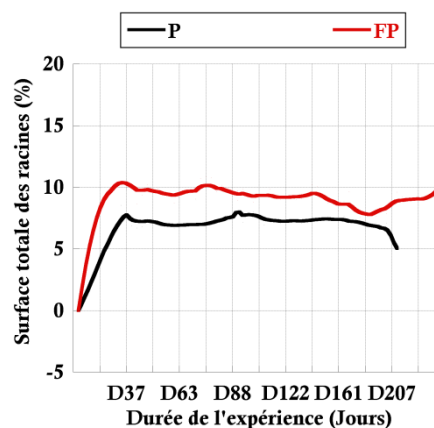
Les premières plantes qui ont fané sont de la modalité FP_R2 dès D57. S'ensuivent les autres jusqu'à atteindre une densité moyenne de 1,75 plantes par cosme à D205. Le nombre de plantes est variable selon les modalités. En effet, il tend à être plus important dans la modalité FP que dans la modalité P mais la différence n'est pas significative à 5% (p value = 0,5 : Mann Whitney test) (Tableau 13).

Tableau 12. Nombre de plantes, biomasse aérienne des plantes respectivement à D205 (moyenne, $\pm$ écart type). FP : faune et plante, F : faune, R : répétition, m : répétition de mesure, Moy1 : nombre moyen de plante par modalité, Moy2 : biomasse moyenne par modalité. Les valeurs entre parenthèse sont le nombre total de plantes germées par cosme.

	Plantes (nombre)	Biomasse (g)	Moy1	Moy2
FP_R1	5 (5)	21,07		
FP_R2	1 (3)	5,5	2,25	13,35
FP_R4	1 (5)	15,09	$\pm 1,89$	$\pm 6,50$
FP_Rm	2 (5)	11,75		
P_R1	1 (5)	9,3		
P_R2	2 (5)	12,97	1,25	11,26
P_R3	1 (5)	13,24	$\pm 0,5$	$\pm 2,14$
P_Rm	1 (5)	9,53		
Moyenne	1,75	12,31		

Dynamique des racines

En se basant sur les parties racinaires visibles sur la vitre, nous avons estimé la cinétique de la croissance racinaire. Dans les trois premières semaines de leur croissance, les racines s'allongent à une vitesse moyenne de $17,69 \pm 7,91$ mm/jour et $10,17 \pm 5,61$ mm/jour respectivement pour les modalités FP et P. Au début les racines croissent vite, jusqu'à atteindre un plateau. A partir de cet instant, elles cessent de croître et commencent à vieillir. Lorsque la plante atteint la fin de son cycle, les racines les plus âgées commencent à se rétrécir ou même dégénérer, la surface totale des racines diminuant de ce fait. Cette observation se constate aussi bien dans la modalité « P » que « FP » avec une allure à peu près identique (Figure 58).



a

Figure 58. Dynamique de croissance des racines au cours du temps et en fonction des modalités. FP : faune et plante, P : plante, D0 : premier jour de l'expérience, D1 : 92 jours, D2 : 148 jours, D3 : 231 jours.

Si la vitesse de la croissance des racines ne diffère pas en fonction des modalités, la surface totale des racines quant à elle varie significativement (Tableau 14).

Tableau 13. Evolution de la surface racinaire dans les modalités plantes (P) et faune-plante (FP) au cours du temps (moyenne, $\pm$ écart type). Les lettres différentes au sein d'une même colonne indiquent des différences significatives entre modalités.

Modalité	D52	D95	D147	D211	D268
P	7,60 a $\pm 1,07$	7,18 a $\pm 0,70$	7,36 a $\pm 0,28$	7,19 a $\pm 0,27$	7,00 a $\pm 0,56$
FP	9,58 b $\pm 0,62$	9,68 b $\pm 0,65$	9,31 b $\pm 0,45$	8,13 b $\pm 0,80$	8,08 b $\pm 0,95$

En effet, la surface des racines de la modalité FP reste significativement plus élevée que dans la modalité P. Des mesures de moyenne de surface racinaires effectuées à quatre périodes, D52, D95, D147 et D211 confirment ces résultats : (Mann-Whitney, $p = 0,0046$, $p < 0,0001$ et $p =$

0,0001 respectivement). Lorsque les vers ont été introduits, on a observé l'apparition de nouvelles racines juste après le passage d'un ver. On peut émettre l'hypothèse que les vers en bioturbant le sol, créent de la porosité autour des racines, ce qui provoque l'émergence de nouvelles racines. Mais la différence de surface racinaire qu'on observe ne peut pas être attribuée à l'effet des vers car avant même leur introduction on observait déjà une différence significative. On ne peut pas non plus l'imputer à une différence de vitesse de croissance puisque cette vitesse n'est pas statistiquement différente (Mann-Whitney, $p = 0,2$). Les vers ont contribué à maintenir cette différence certes, mais la raison principale serait liée à la différence du nombre de plantes ainsi qu'à la différence dans la durée de vie des plantes. En effet les plantes de la modalité FP sont les dernières à faner.

3.1.2. Dynamique de l'eau dans les cosmes

L'humidité des systèmes est maintenue dans une plage comprise entre [60 à 80 %] et [20 à 100 %] par rapport à la capacité au champ respectivement pour les modalités plante, faune-plante, témoin et humectation-dessiccation (Figure 59 a).

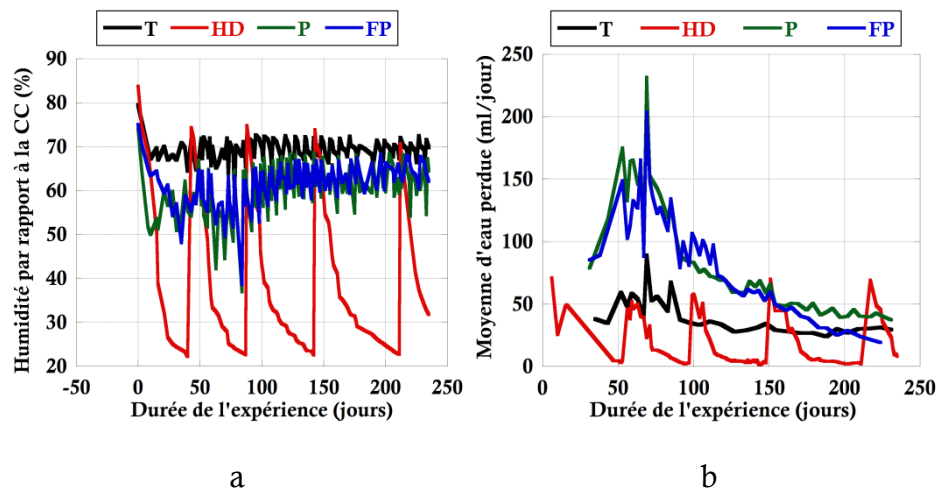


Figure 59. Dynamique de l'eau dans les cosmes en fonction du temps. T : témoin, HD : humectation dessiccation, P : plante, FP : faune-plante. CC : capacité au champ. a) : fluctuation d'humidité dans les cosmes «témoins de mesure» montrant les cycles d'arrosage ; b) : vitesse moyenne de dessiccation des cosmes en fonction des modalités au cours du temps.

Les modalités FP et P sont arrosées tous les quatre jours en moyenne en apportant une quantité moyenne d'eau de 80,31 et 82,11 ml/jour respectivement. La fréquence d'arrosage diminue pour la modalité FP à partir de D161 et passe à six jours. Les modalités témoin et humectation-dessiccation sont arrosées moins souvent (tous les six jours et tous les 53 jours respectivement) que les modalités FP et P. La quantité moyenne d'eau apportée par jour est plus faible : 43,79 et 23,07 ml/jour respectivement. De D0 à D268 il y a eu cinq arrosages pour la

modalité humectation-dessiccation, tandis que les modalités FP, P et T sont arrosées 69, 72 et 45 fois respectivement. La différence de la fréquence d'arrosage s'explique par la différence d'utilisation de l'eau. Dans les modalités FP et P, la faune et/ou les plantes prélèvent l'eau, en particulier quand les plantes sont jeunes, alors que dans les modalités HD et T, cette eau n'est qu'évaporée. Si l'humidité peut descendre en dessous du seuil à partir duquel il faut arroser, elle n'atteint jamais la barre supérieure (Figure 59 a). C'est dû au fait qu'une partie de l'eau apportée est drainée. La partie restante dans les systèmes est soit évaporée soit utilisée par les plantes et la faune. La dynamique de l'eau est régulière dans les modalités HD et, dans une moindre mesure, T, tandis qu'elle fluctue énormément dans les modalités FP et P (Figure 59 b).

La modalité HD perd beaucoup d'eau dans les premiers jours qui suivent l'arrosage puis la perte d'eau devient très faible voire constante lorsque le sol est très sec. A ce stade de dessiccation l'eau est tellement liée au sol qu'elle ne s'évapore pas sous la seule action de la température ambiante.

Les modalités FP et P perdent beaucoup d'eau dans les deux premiers mois d'expérience, ce qui coïncide avec la période de croissance de plantes. Par la suite la quantité moyenne d'eau perdue par jour décroît lorsque les plantes ont fini leur cycle et qu'elles commencent à faner. En outre, on remarque que cette baisse est plus accentuée dans la modalité FP que P. Ceci veut dire que le sol de la modalité FP retient plus d'eau que celui de la modalité P ; ce qui serait expliqué par l'action de vers de terre. En effet ces derniers améliorent la structure du sol en le bioturbant (mélange du compost avec le sol), en créant de galeries et produisant des agrégats. L'enrichissement du sol en matière organique et l'amélioration de sa structure jouent un rôle dans sa capacité à retenir l'eau (Rawls *et al.*, 2003). Ceci cadre parfaitement avec les résultats de notre étude du fait que dans la modalité « FP » l'eau est plus retenue que dans les autres.

3.1.3. Description globale des comportements des agents

Cette description est établie sur la base de la visualisation des films montés à partir des images obtenues pour chaque modalité.

Agent plante

Dès que les plantes germent, les racines font leur apparition sur la surface vitrée. Ces racines créent de la porosité en se frayant un chemin à travers le sol ou bien passent dans la macroporosité (fentes de retrait, fissures) si elle existe. Les racines principales croissent plus ou moins

verticalement dans la profondeur du sol, tandis que les racines secondaires poussent le plus souvent latéralement. Tout le long des racines secondaires, on observe de très fines racines appelées racines protéoïdes, caractéristiques du lupin. Lors de leur croissance, plusieurs racines de même âge peuvent se croiser ; il arrive alors que la racine butant sur une autre, change de direction et s'oriente parallèlement à la première. Si cela concerne plus de deux racines, un amas très dense de racines se forme (Figure 60 a). Dans certains cas, la seconde racine passe soit au-dessus s'il existe un espace entre la première et la surface vitrée, soit en dessous. Le réseau racinaire plaqué obliquement contre la surface vitrée constitue une barrière à l'eau. Si elles sont verticales par contre, elles constituent un chemin d'écoulement préférentiel pour l'eau. L'écoulement répété de l'eau le long des racines engendre un entraînement de particules, ce qui fait apparaître des vides au-dessus ou le long des racines. Ce phénomène est mieux mis en évidence quand les racines prennent de l'âge. En effet, lorsque les racines vieillissent, elles perdent du volume en se rétrécissant ce qui laisse apparaître du vide (porosité) (Figure 60 b).

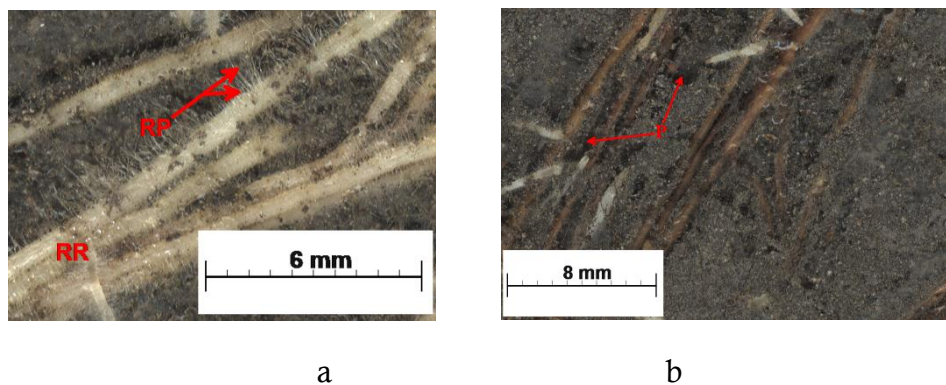


Figure 60. Comportement de racines de lupin dans un Technosol construit mis en évidence sur une image PR3 capturée le 17/06/2012 à 23h. RR : réseau racinaire, RP : racine protéoïdes, P : pores, a) jeunes racines formant un réseau dense, b) racines vieillissantes montrant la formation de la porosité.

A partir de D46 les premières racines ont arrêté de croître pendant environ 10 jours puis ont repris la croissance à D55. A partir de D60 on voit apparaître les premières nodosités sur les racines. A partir de D176, les plantes cessent de produire de nouvelles racines et celles produites cessent de croître. Les racines et les nodules commencent à jaunir et se rétrécissent ce qui augmente la porosité totale. L'apparition des événements cités précédemment est variable dans le temps. Le tableau 15 récapitule les différentes modifications observables sur les racines dans les modalités plantes et faune-plante. La porosité créée par les racines est plus ou moins stable, c'est-à-dire qu'elle évolue peu tant qu'il

n'y a pas un lessivage important qui entrainerait des particules de sol obturant les pores.

Tableau 14. Chronologie des modifications intervenues sur les racines en fonction des modalités et des répétitions.

Evènements	Modalité plante			Modalité faune-plante		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3
Germination	D4	D4	D4	D7	D23	D4
Interruption de croissance	D46	D46	D48	D47	D47	D63
Inactivité						
Reprise de croissance	D55	D57	D53	D59	D56	D69
Première nodosité			D66	D60		D76
Arrêt	D130	D113	D127	D130		D139
Fanaison			D192	D216		D203

Agent faune

Lorsque les vers sont introduits, leur mouvement est aléatoire au début. Ils prospectent sans préférence les différents horizons du sol et restent actifs durant 25 jours en moyenne. Après, leurs activités restent invisibles pendant en moyenne 41 jours, puis se remettent à creuser des galeries et produire des turricules (Tableau 16).

Tableau 15. Chronologie des différentes modifications observables occasionnées par les vers en fonction des répétitions dans la modalité « faune et plante ».

Evènement	Modalité faune et plante		
	R1	R2	R3
Inoculation vers	D70	D70	D70
Première galerie	D72	D81	D74
Interruption d'activité	D92	D96	D97
Inactivité			
Reprise activité	D114	D138	D153

Lors de la première phase d'activité que nous qualifions de phase « d'exploration du sol », les vers adoptent deux types de mouvements : un mouvement circulaire où les vers sont enroulés et avancent unidirectionnellement vers le fond du cosme, un mouvement « détendu » où les vers sont allongés sur leur longueur et se déplacent aussi vers le fond du cosme. Lorsqu'ils reprennent leur activité, les vers adoptent le dernier type de mouvement. Ils font trois types de galeries : des galeries horizontales, obliques et verticales. Au début les vers se déplacent dans les 10 premiers centimètres, le plus souvent dans l'horizon de compost puis ils migrent en profondeur. Au cours de ce mouvement d'aller-retour entre les horizons de compost et de mélange TIT/SPP, les vers apportent le compost dans l'horizon de mélange. Un vers passe au moins deux fois dans la même galerie (Figure 61).

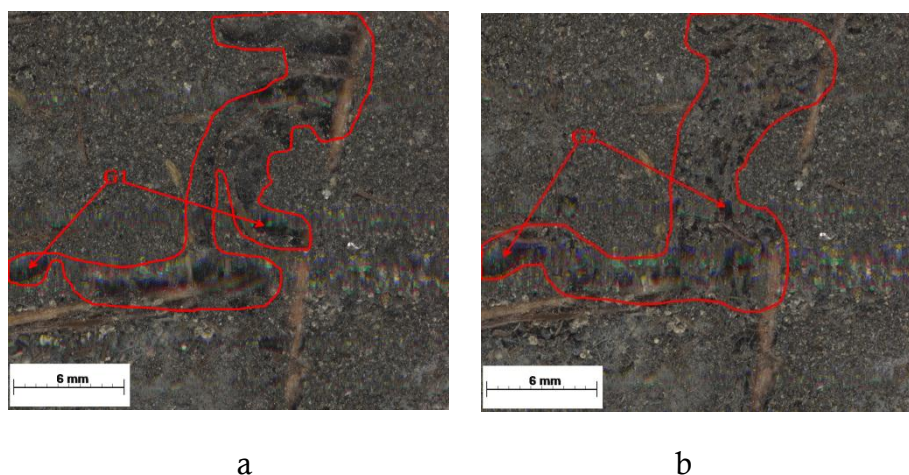


Figure 61. Processus de création (a) et de fermeture (b) de galerie (G) montrant des pores formés et imparfaitement bouchés entre deux dates : D224 à 9h (a) et D231 à 11h. Modalité FPR1.

Lors du premier passage il laisse la galerie ouverte ; il la referme plus ou moins imparfaitement lors du second passage. L'intervalle de temps entre le premier (création de galerie) et le second (fermeture de la galerie) passage est très variable. Il peut être très court (deux heures) ou très long (quelques jours). En effet une galerie est restée ouverte pendant 15 jours [D189 – D205, FPR1] avant d'être rebouchée malgré plusieurs passages d'autres vers. Mais il arrive qu'une galerie ou une partie d'elle reste définitivement ouverte parce que le ver trop rapide n'a pas pris le temps de la refermer en repassant ou que la fermeture est imparfaite. Le rebouchage de galeries se fait avec les turricules que les vers produisent et qu'ils viennent écraser contre la surface vitrée. Ceci fait que les agrégats produits ne sont pas parfaitement distinguables dans tous les cas. Mais deux autres types d'agrégats sont formés : des agrégats formés par l'enchevêtrement des racines et des particules de sols isolées par de la porosité (Figure 62).

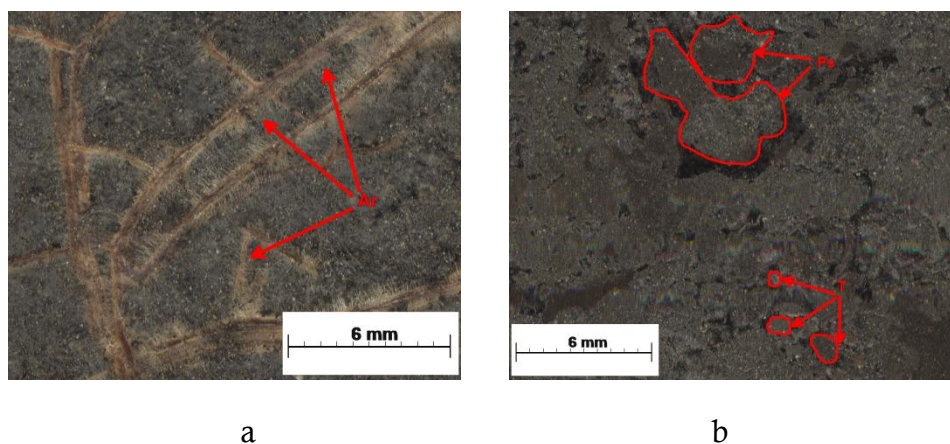


Figure 62. Impact des racines (a : PR3, D231) et de vers de terre (b : FPR1, D238) sur la structure d'un Technosol construit. Ar : agrégats racinaires formés par l'enchevêtrement des racines primaires, secondaires, tertiaires et protéoïdes ; Ps : particules de sols isolées par de la porosité suite à plusieurs passage de vers ; T : turricules de vers écrasés contre la vitre.

Si les mouvements des vers dans l'horizon de surface sont aléatoires, ceux de profondeur sont préférentiels. En effet, les vers se déplacent le long des racines principales et secondaires sans doute à la recherche de la nourriture. Les galeries formées à la surface sont donc majoritairement horizontales à obliques alors que celles de profondeur sont majoritairement verticales.

Au bout de cinq mois et demi d'expérience, commencent à apparaître des vers de terre juvéniles, mais ceci n'est pas général à toutes les répétitions (Figure 63).

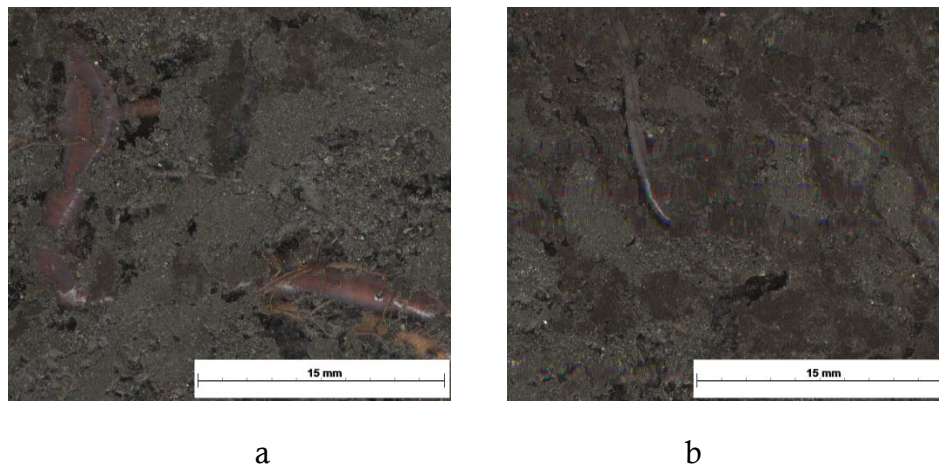


Figure 63. Vers de terre adulte (a) et juvénile (b) dans le cosme de la modalité FPR1, à D249 et D233 respectivement.

Ces juvéniles restent principalement dans l'horizon de surface. Ils créent leurs propres galeries qu'ils laissent le plus souvent ouvertes, ou bien utilisent celles déjà créées par les adultes. En suivant les traces des racines ou des vers adultes, ils peuvent parfois descendre jusque dans les horizons de profondeur.

Agent eau : cycle humectation-dessiccation

Le sol se dessèche constamment au cours du temps, d'abord à la surface et progressivement en profondeur. Cette dessiccation fait apparaître des fentes de retrait et des fissures de trois types : horizontales, obliques et verticales. Ces fentes et fissures sont préservées jusqu'au prochain cycle d'humectation. Après arrosage, les fentes et fissures principales se rétrécissent, mais ne disparaissent pas totalement et gardent leur forme. En effet, lors de l'arrosage, étant donné qu'une grande quantité d'eau est apportée, des particules de sol sont entraînées à travers les fentes et fissures. Ces particules se déposent, ce qui réduit le diamètre des pores. Lorsque le sol se remet à se dessécher, les pores se rouvrent, sans retrouver leur diamètre d'avant humectation (Figure 64). Les particules sont entraînées du haut vers le bas ; on peut émettre l'hypothèse que les

pores des horizons de surface gagnent en diamètre au détriment de ceux d'horizons de profondeur qui sont bouchés par les particules détachées des premiers. Ce phénomène serait éventuellement observable au fur et à mesure que les cycles humectation-dessiccation se répètent

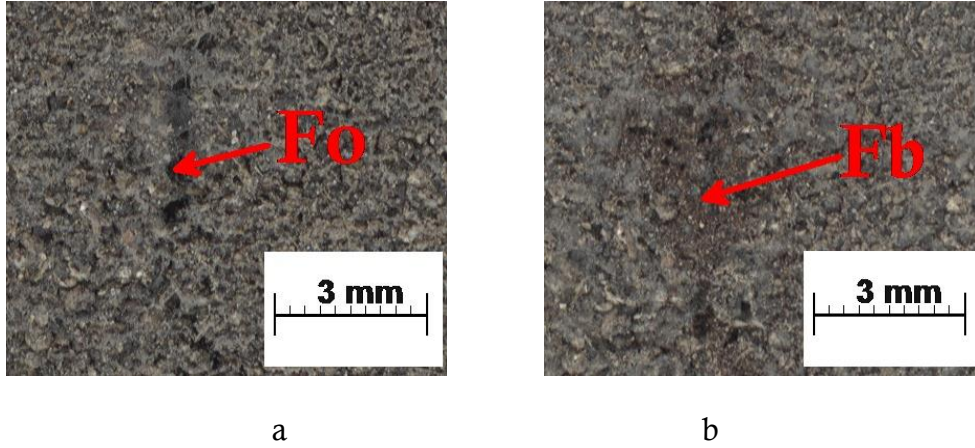


Figure 64. Évolution de la porosité au cours des cycles humectation-dessiccation. Fo : fissure ouverte lors du premier cycle humectation-dessiccation (a : HDR3, D52) ; Fb : fissure bouchée par du compost transporté lors du second cycle d'humectation-dessiccation (b : HDR3, D94).

Visiblement, la porosité est plus abondante à la surface qu'en profondeur ; en plus, les pores de l'horizon de surface tendent à être allongés horizontalement tandis que ceux de profondeur sont plutôt polygonaux. Les agrégats se forment lorsque plusieurs pores se rejoignent et isolent des particules de sol. Ils seront plus abondants lorsque la porosité est dense.

3.2. Dynamique de la structure du Technosol construit

La figure 65 montre les résultats de quantification de la porosité et de l'agrégation sur toutes les modalités en fonction du temps.

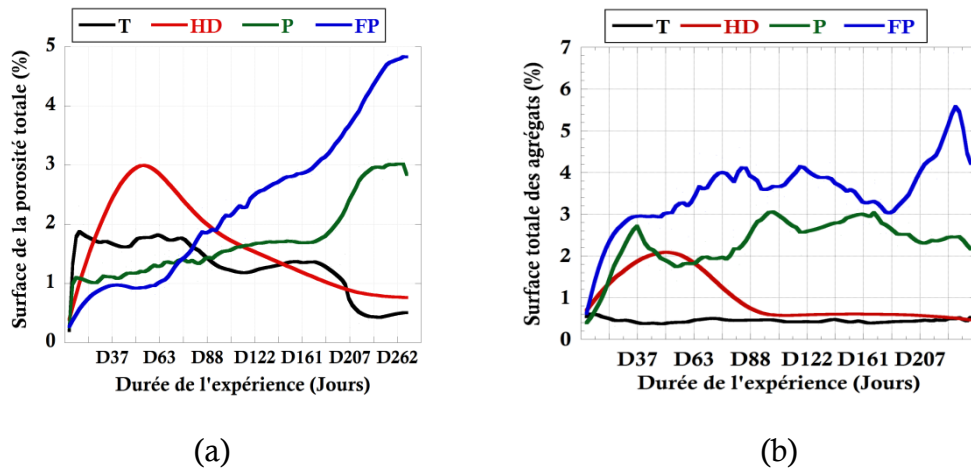


Figure 65. Dynamique globale de la porosité (a) et de l'agrégation (b) d'un Technosol construit au cours du temps soumis à l'action des agents. T : témoin, HD : humectation-dessiccation, P : plante, FP : faune-plante.

3.2.1. Les images choisies pour analyse

Compte tenu des résultats de visualisation des films (Tableau 14 et 15), on a opéré les choix suivants pour la quantification des différents paramètres de structure. Pour ce qui est de la modalité FP, seules les images acquises à partir de D70 seront prises en comptes car c'est à cette date que les vers ont été introduits. Pour la quantification de la porosité globale, toutes les images acquises juste avant arrosage de D0 à D268, de dimensions 185,27 X 211,97 mm, sont analysées. Par contre, afin de quantifier les agrégats il a fallu faire un autre échantillonnage car les images précédentes ne peuvent être analysées en raison de problèmes techniques (insuffisance de mémoire des ordinateurs utilisés). On a ainsi pris l'échantillon de dimensions 90,05 X 120 mm au milieu des images acquises à des dates correspondant à des étapes importantes du système comme mentionné dans les tableaux 210 et 22. Pour comparer la dynamique de la structure au cours du temps en fonction des modalités, six dates ont été considérées : D0, D52, D95, D147, D211 et D268. A l'exception D0 et de la modalité HD, les résultats des autres dates correspondent aux moyennes des résultats dans les périodes suivantes : D52 : [D8 – D52], D95 : [D56 – D95], D147 : [D98 – D147], D211 : [D151 – D211], D268 : [D224 – D268]. Des analyses de variances suivies de tests de comparaison de moyennes ont été appliquées sur ces données afin de savoir si la structure évolue significativement.

121

3.2.2. Dynamique de la porosité et de l'agrégation dans la modalité « T »

En l'absence des agents plante et vers, et en maintenant une humidité constante (modalité T), la porosité du Technosol croît avec le temps au fur et à mesure que le sol se dessèche. Cette porosité baisse à la suite d'un apport d'eau. Cette baisse est inéluctable et irréversible même si le sol se remet à se dessécher. Autrement dit le sol ne retrouve jamais sa porosité d'avant le premier arrosage (Figure 65 a). Ce phénomène s'explique par le fait qu'au début de sa mise en place, le sol est saturé d'eau. Toutes les particules du sol s'imbibent alors d'eau et se gonflent. Lorsque le sol se dessèche, ces particules se rétractent ce qui fait apparaître des fentes et des fissures qui constituent la porosité. Lorsqu'on apporte une certaine quantité d'eau, le sol s'affaisse pour trouver un équilibre ce qui engendre une réduction des fentes. En outre, lors de l'arrosage, des particules fines du sol sont entraînées et déposées dans les fissures ce qui entraîne l'obturation de ces dernières.

Si la dynamique de la porosité « témoin » montre une certaine variabilité au cours du temps, celle de l'agrégation est restée stable. En effet, le pourcentage total des agrégats est resté constant durant toute la durée de l'expérience (Figure 65 b).

3.2.3. Dynamique de la porosité et de l'agrégation dans la modalité « HD »

Le phénomène observé dans la modalité « témoin » s'observe aussi dans la modalité HD et ce de façon encore plus accentuée. La porosité étant fonction de l'humidité, plus la durée de dessiccation est longue, plus la porosité se crée. Ce qui fait que le pourcentage de porosité avant le premier arrosage dans la modalité « HD » est nettement plus élevé (Figure 65 a). La diminution de la porosité lors des différents arrosages successifs est proportionnelle à la porosité de départ. A partir du troisième cycle d'arrosage, la porosité baisse en dessous du témoin. Ceci s'explique par la quantité d'eau qui est apportée à chaque arrosage dans modalité « HD » qui est plus importante ; ce qui va avec la quantité de particules de sol potentiellement transportées. Plus ce lessivage est important, plus la porosité serait réduite par remplissage des particules lessivées. Malgré tout ce flux de matière et d'eau, la porosité finale au cinquième cycle d'arrosage reste toujours supérieure à celle de l'état initial (D0). L'agrégation suit également la même dynamique. On observe une augmentation avant le premier cycle puis une diminution lors des cycles suivants sans jamais revenir au niveau précédent (Figure 65 b). Mieux encore, à partir de D95 on observe une stabilisation de la dynamique d'agrégation qui tend à être au même niveau que le témoin.

3.2.4. Dynamique de la porosité et de l'agrégation dans la modalité « P »

Tout comme pour les deux précédentes modalités, on remarque une première augmentation de la porosité avant le premier arrosage. Cette augmentation est moins élevée que dans les modalités « T et HD ». Puis elle décroît régulièrement mais brièvement pendant quelques jours et se remet à croître régulièrement jusqu'à D268. Malgré cette augmentation régulière, le pourcentage de porosité reste en dessous de celui des modalités « T et HD » jusqu'à D95 et D120 respectivement (Figure 65 a). Au moment où la porosité croît régulièrement au cours du temps, l'agrégation quant à elle fluctue au cours du temps. En effet, l'agrégation augmente au début puis baisse et reste constante pendant quelques semaines. Elle connaît un pic vers D95 puis baisse tout en restant supérieure au niveau précédent (Figure 65 b). Dans cette modalité, l'agrégation est restée indéfiniment en dessous de celle de la modalité « FP ».

3.2.5. Dynamique de la porosité et de l'agrégation dans la modalité « FP »

Lorsqu'on introduit de vers dans une modalité où les racines existent déjà, on observe une augmentation nette de la porosité. Cette augmentation de la porosité est en dents de scie. La raison est que les

vers créent des galeries lorsqu'ils passent (augmentation de la porosité), mais qu'ils les rebouchent lors de passages ultérieurs provoquant ainsi une nouvelle baisse de la porosité. Mais comme on a vu au point §2.2.2, les vers peuvent repasser plus d'une fois au même endroit et en plus la fermeture des galeries n'est pas toujours parfaite. Par conséquent plus les vers sont actifs, plus il y a de chances de trouver des galeries ouvertes. Ceci explique le fait que l'augmentation de la porosité dans la cette modalité soit régulière. L'effet combiné des vers et des plantes, la baisse de la porosité dans les modalités « T et HD » fait que la porosité dans la modalité « FP » est supérieure à celle observée dans les autres modalités, au fur et à mesure que l'expérience dure (Figure 65 a). L'agrégation ne suit pas la même dynamique que la porosité : elle présente une dynamique irrégulière c'est-à-dire qu'elle croit puis décroît à des pas de temps irréguliers mais la tendance est à une augmentation avec le temps (Figure 65 b). Ceci est dû aux actions de creusement et bouchage de galeries par les vers de terres. En examinant l'évolution du système racinaire (Figure 58) on peut aisément remarquer qu'elle présente à peu près la même allure que la dynamique de l'agrégation des modalités « P et FP ». Les résultats de l'étude de l'effet des agents sur les paramètres nous permettront de vérifier s'il existe une relation entre ces deux variables.

3.3. Effets des agents sur les paramètres de structure

Le but de cette partie est de chercher à savoir si les différences observées précédemment concernant les paramètres de porosité et d'agrégation en fonction des agents pédogénétiques au cours du temps sont statistiquement significatives.

3.3.1. Etude de l'homogénéité du système à D0

Avant de comparer les effets quantifiés des agents sur les différents paramètres de structure, nous avons cherché à vérifier l'homogénéité des systèmes à D0. Pour cela, les premières images capturées ont été analysées pour quantifier la porosité et l'agrégation. Pour ce faire, deux types d'échantillons ont été prélevés sur chaque image et soumis aux protocoles de quantification de la porosité (185,27 X 211,97 mm) et de l'agrégation (90,05 X 120 mm) comme indiqué précédemment. Les résultats de comparaison de moyenne montrent qu'il n'y a aucune différence significative de pourcentage de porosité ni de l'agrégation entre les modalités (Anova, $p = 0,65$, $p = 0,69$ respectivement) (Figure 66). Ces résultats nous donnent une idée sur l'homogénéité du milieu. Les différents systèmes sont donc comparables entre eux et on suppose qu'ils sont identiques à D0.

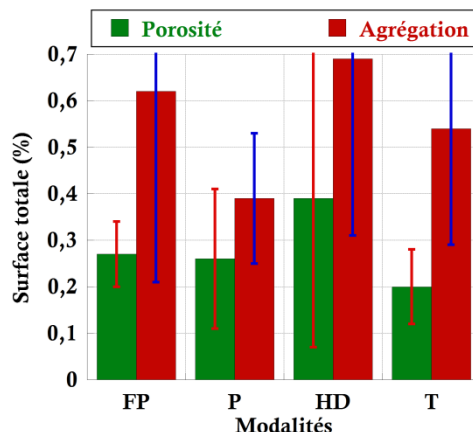


Figure 66. Etat de la porosité et de l'agrégation du système à D0 en fonction des modalités. FP, Faune et plante, P : plante, HD : humectation-dessiccation, T : témoin.

Par conséquent, les différences significatives éventuelles qu'on mettra en évidence au cours du temps seront attribuées à l'action des agents ou de l'évolution naturelle du système au cours du temps.

3.3.2. Effets des agents sur la porosité au cours du temps

Les résultats d'analyse d'images aux six dates indiquées précédemment montrent une évolution significative de la porosité moyenne en fonction des agents et du temps (Figure 67). La porosité a significativement augmenté dans toutes les modalités de D8 à D52 (Anova, $p < 0,0001$) mais l'augmentation la plus importante s'observe dans les modalités HD et T respectivement.

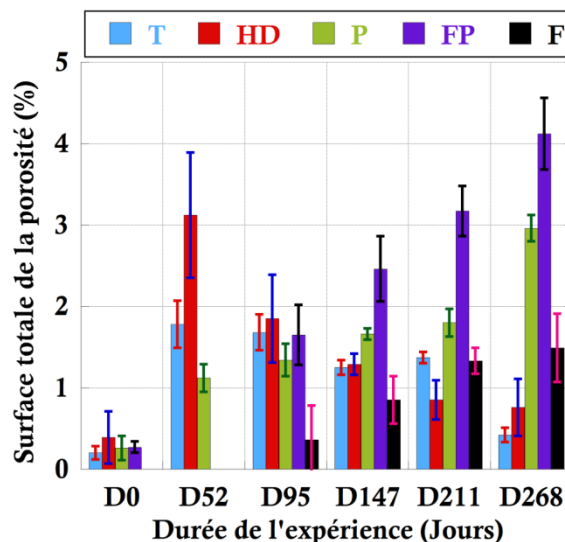


Figure 67. Evolution de la porosité en fonction des agents au cours du temps. T : témoin, HD : humectation-dessiccation, P : plante, FP : faune et plante, F : faune.

A D52, la porosité de la modalité « P » est significativement plus faible que celle des modalités « T et HD » ($p = 0,0002$, $p < 0,0001$ respectivement). Ceci peut s'expliquer par deux raisons : (i)

l'augmentation de la porosité avant le premier arrosage semble plus faible dans « P » que dans les deux autres modalités, (ii) les racines qui poussent exercent une pression sur le sol car elles occupent un volume qui n'existait pas antérieurement. Ce phénomène engendrerait momentanément une diminution de la porosité dans la modalité T. Mais dès que les racines vieillissent, leur volume se réduit, engendrant ainsi une augmentation de la porosité. Le phénomène s'accroît lorsque les racines dégènèrent et se dégradent sous l'action des microorganismes et de l'humidité. La majorité de l'espace qu'elles ont prospecté deviendra alors de la porosité. Ceci expliquerait la croissance régulière du pourcentage de porosité dans la modalité « P » au cours du temps. De D56 à D95 on observe une baisse significative de la porosité dans la modalité « HD » par rapport à D52 (Mann-Whitney $p = 0,04$) et une hausse significative dans la modalité « P », (Mann-Whitney $p < 0,0001$). Malgré cette hausse, la porosité dans cette dernière modalité reste significativement plus faible que dans les modalités « T et HD », ($p = 0,02$, $p = 0,03$ respectivement). Entre « P » et « FP » par contre on n'observe aucune différence significative de porosité (Mann-Whitney $p = 0,07$). En effet, on sait que les plantes ont repris la croissance dans cette période et que les vers, introduits à D70, n'ont travaillé que très peu de temps (jusqu'à D92) (Tableaux 15 et 16). De ce fait, les vers ont induit une légère hausse de la porosité mais pas assez pour compenser l'effet de compaction engendré par l'accroissement du volume racinaire. De D96 à D147 la porosité diminue significativement dans la modalité « T » par rapport à la période précédente (Mann-Whitney, $p = 0,00018$) mais reste toujours supérieure à la porosité initiale. Celle des modalités « P et FP » augmente significativement par rapport à la période précédente ($p < 0,0001$, $p = 0,0002$ respectivement). Dans cette même période, la porosité dans la modalité « FP » est significativement plus élevée que celle des modalités « T, HD et P », (Anova, $p < 0,0001$). Ceci indique l'effet des vers de terre sur l'augmentation de la porosité. Il en est de même pour la période de D151 à D211 où le pourcentage de porosité a significativement baissé dans la modalité « HD » par rapport à la première période ($p = 0,0005$). La baisse est aussi significative dans la modalité « T » par rapport à la période de D95 à D147. Dans les modalités « P et FP » la porosité continue inexorablement et très significativement sa hausse par rapport aux trois périodes précédentes. Cette hausse est très remarquable dans la modalité « FP » car la porosité est significativement plus élevée que dans les modalités T, HD et P (Anova, $p < 0,0001$). La porosité de la modalité « P », quoique inférieure à celle de FP, est significativement plus élevée que celle des modalités T et HD (Tukey, $p = 0,001$, $p < 0,0001$ respectivement). Ces résultats nous permettent de remarquer que l'effet des agents sur la porosité d'un

Technosol est variable au cours du temps. Au début de sa construction, le sol présente une porosité plus importante sous l'impact de l'agent eau comparativement à l'impact de l'agent plante. Au fil du temps, la porosité dans les modalités « T et HD » décroît alors que celle des modalités « P et FP » croît significativement jusqu'à dépasser celle des deux premières. Les plantes, à travers leurs racines, et les vers de terre ont un effet significatif sur la porosité (Figure 68). En effet, il existe une relation significative entre le pourcentage de racines et celui de la porosité dans les modalités « P et FP », (Anova, $p < 0,0001$).

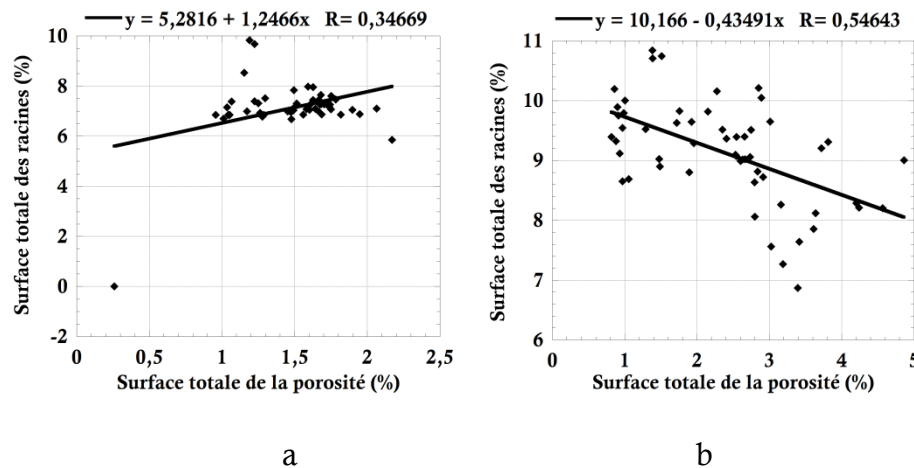


Figure 68. Influence des racines sur la porosité d'un Technosol construit soumis à l'action des agents plante (a) et faune-plante (b).

Cette relation est positive dans la modalité « P » et négative dans la modalité « FP », ce qui veut dire que la porosité augmente lorsque la surface des racines augmente (P) ou diminue (FP). Cette liaison est plus forte dans « P » que dans « FP ». La liaison négative dans la modalité « FP » peut s'expliquer par la synergie entre les vers et les racines de plantes. En effet on a vu que les vers se déplacent préférentiellement le long des racines, donc plus ces racines sont importantes plus grande est la surface à prospecter par les vers. Or les vers ont un effet ambivalent sur la porosité, ils créent les galeries mais les rebouchent après. On peut donc imaginer que la présence des racines enclenche une grande activité de vers ce qui fait décroître la porosité.

3.3.3. Effet des agents sur l'agrégation au cours du temps

L'analyse des résultats de quantification de l'agrégation aux mêmes cinq périodes que précédemment montre une influence nette des agents biologiques sur la formation des agrégats (Figure 69). Sur toute la durée de l'expérience, à l'exception de D0, l'agrégation dans la modalité témoin est restée toujours significativement plus faible que celle des modalités « HD, P et FP », (Anova, $p < 0,0001$).

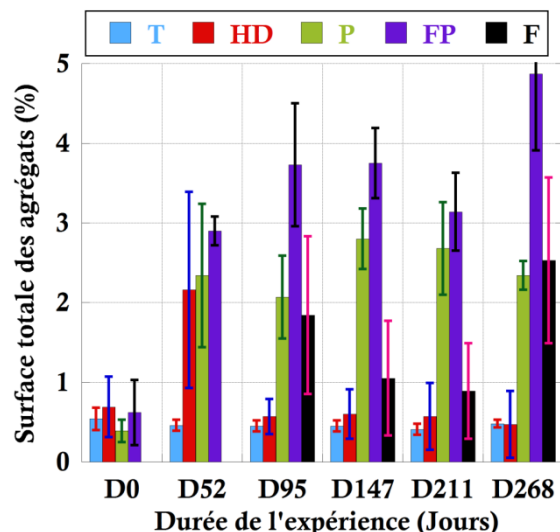


Figure 69. Evolution de l'agrégation d'un Technosol construit soumis à l'influence des agents au cours du temps. T : Témoin, HD : humectation-dessiccation, P : plante, FP : faune-plante.

Cette différence s'explique par la différence de porosité (modalité HD) et du système racinaire (modalités P et FP). A la fin de la période [D0-D52], les modalités « HD, P et FP » par contre ne présentent, entre elles, aucune différence significative d'agrégation (Anova, $p = 0,49$). On peut imaginer qu'il y a un facteur de compensation entre l'effet des racines et de la porosité sur l'agrégation. En effet à D52, la porosité est significativement plus élevée dans la modalité « HD » que dans « P et FP » mais cette différence est compensée par les racines qui n'existent pas dans la modalité « HD ». Mais au-delà de cette période, l'agrégation de la modalité « HD » est restée inférieure à celles des modalités « P et FP » (Anova, $p < 0,0001$). Cette baisse de l'agrégation est consécutive à celle de la porosité. On peut donc conclure que l'évolution de l'agrégation dans la modalité « HD » est surtout liée à celle de la porosité. Aux périodes D95 et D147, l'agrégation dans la modalité « FP » est significativement plus élevée que celle de la modalité « P », (Mann-Whitney, $p < 0,0001$). Sachant que (i) c'est à partir de D70 que les vers ont été introduits, (ii) qu'à D52 l'agrégation dans les deux modalités n'est pas significativement différente, on peut alors émettre l'hypothèse que les vers ont eu un effet positif sur l'évolution de l'agrégation. Cet effet est la conséquence de l'action de vers sur l'architecture du système poral. Ce phénomène se traduit par une relation étroite entre la porosité et l'agrégation dans les deux modalités (Figure 70).

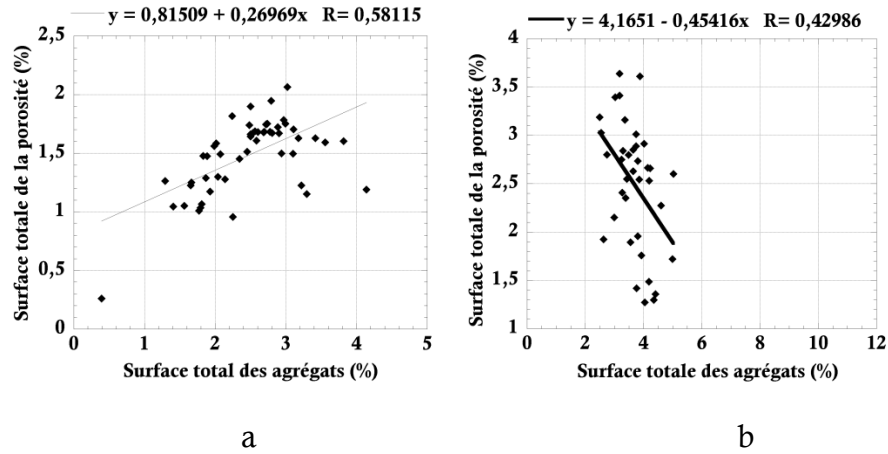


Figure 70. Effet de la porosité sur l'évolution de l'agrégation d'un Technosol construit en fonction des agents : plante (a) et faune-planté (b).

Cette relation qui traduit l'effet de la porosité sur l'agrégation est significative dans les deux modalités (Anova, $p < 0,0001$) même si les coefficients de corrélation ne sont pas très élevés. Dans la modalité « P » la surface totale des agrégats croît avec l'augmentation de la surface de pores alors que dans la modalité « FP » la surface des agrégats diminue lorsque la porosité augmente. L'augmentation de l'agrégation dans la modalité « FP » est donc induite par d'autres phénomènes mais pas seulement l'accroissement de la surface totale des pores. Parmi ces phénomènes on peut inclure l'impact du système racinaire dont l'influence sur l'accroissement de l'agrégation est significativement importante (Anova, $p < 0,0001$). Cette influence se matérialise par une relation modérément linéaire entre les surfaces totales de la porosité et de l'agrégation pour les deux modalités (Figure 71).

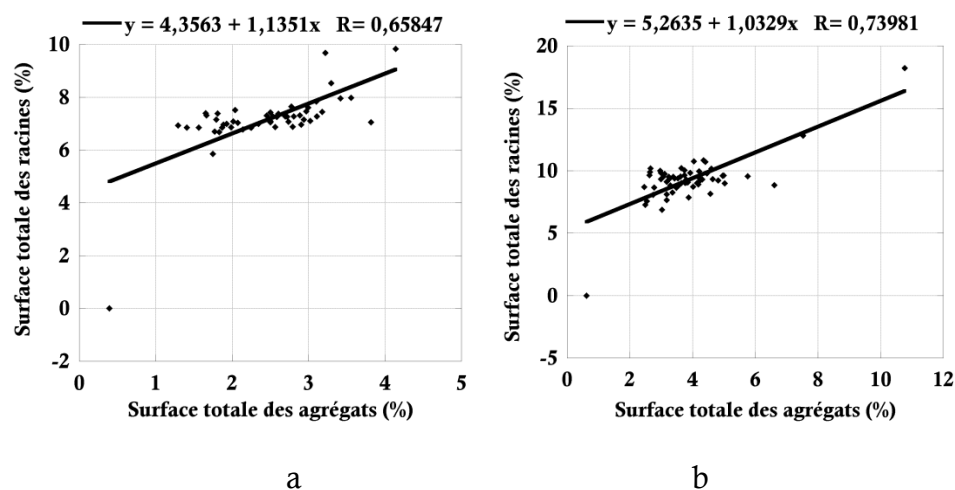


Figure 71. Influence du système racinaire sur l'agrégation d'un Technosol construit soumis à l'action des agents plantes (a) et faune-planté (b).

Ici la tendance est partout la même; autrement dit dans les deux modalités, plus la surface totale des racines augmente, plus l'agrégation augmente mais avec une corrélation plus élevée dans la modalité « FP ». On note ainsi la synergie entre les vers et l'accroissement de la surface racinaire et indirectement l'effet sur l'augmentation de l'agrégation. A la fin de la période D211, l'agrégation a baissé dans les modalités « P et FP » par rapport à son niveau de la période précédente. Cette baisse n'est significative qu'au sein de la modalité « FP » (Mann-Whitney, $p = 0,0325$). Malgré cette baisse significative, l'agrégation dans la modalité « FP » est toujours supérieure à celle de la modalité « P » (Mann-Whitney, $p = 0,025$). Cette différence n'est pas seulement induite par l'action de vers, mais aussi par la croissance racinaire qui est significativement plus élevée dans la modalité « FP » que « P » à cette période (Tableau 15). L'action des vers sur la formation des agrégats, quantifiés par analyse d'image, est donc moins significative que celle des racines. Ceci s'explique par le comportement ambivalent des vers sur la formation des agrégats. Ils créent de la porosité, ce qui est censé accroître l'agrégation mais cette porosité (sous forme de galerie) est rebouchée peu de temps après. En plus, les turricules qu'ils produisent sont le plus souvent écrasés contre la paroi vitrée ce qui les rend moins discernables. Des tests de stabilité structurale permettront de vérifier l'hypothèse selon laquelle les turricules impactent la stabilité structurale. Les racines quant à elles ont une action univoque en termes d'accroissement de l'agrégation. En effet lorsqu'elles s'enchevêtrent elles contribuent à isoler des agrégats, lorsqu'elles vieillissent elles laissent de la porosité qui constitue des chemins de délimitation des bords des agrégats et lorsqu'elles disparaissent, la majorité de l'espace qu'elles ont prospecté devient de la porosité (s'il n'a pas été bioturbé par la faune du sol) ce qui contribue davantage à isoler des agrégats. Sur la base de ces résultats on peut dire qu'en analyse d'images, les racines agissent plus sur l'identification des agrégats que les vers, mais qu'il y a une synergie entre ces deux processus. Plus le réseau racinaire est dense, plus l'enchevêtrement est élevé, contribuant ainsi à isoler du sol sous forme d'agrégats.

3.4. Dynamique de structure en fonction de l'intensité des agents

Il a été établi que globalement les vers et les racines et le cycle humectation-dessiccation ont un effet sur la porosité et l'agrégation du Technosol construit. Ce que nous cherchons à savoir c'est comment varient la porosité et l'agrégation en fonction de l'intensité de ces agents. Pour rappel nous avons considéré les deux agents biologiques et nous avons fait la typologie suivante ; pour les racines : (1) sans racine, (2)

racine jeune, (3) racine âgée, (4) racine morte ; pour les vers : (1) sans passage de ver, (2) 1 passage ... (n) n passages. Pour chaque type nous avons quantifié la porosité et l'agrégation. Pour ce faire trois échantillons ont été prélevés sur la base de la cartographie des zones prospectées par les vers (Figure 72) et de l'âge des racines. Les échantillons sont de deux types en termes de dimensions : 5,61 X 5,61 mm pour l'étude de l'effet de l'intensité d'activité des vers et 11,22 X 11,22 mm pour l'étude de l'effet de l'âge des racines.

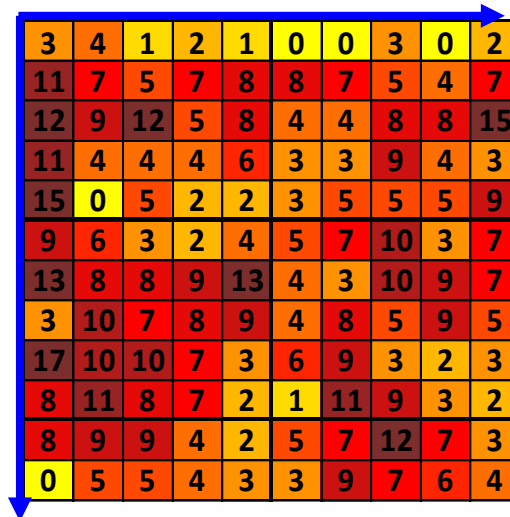


Figure 72. Extrait de la cartographie globale de l'intensité de l'agent faune indiquant la fréquence des zones prospectées par les vers. Les chiffres indiquent le nombre de fois qu'une zone est prospectée par un ver. Cette carte a été réalisée en subdivisant l'image entière (22 X 29 cm) en de carrés de 5,61 X 5,61 mm et en comptabilisant le nombre de fois qu'un ver est passé dans un carré. Chaque carré a une coordonnée (x, y) en projetant l'abscisse et l'ordonnée sur l'image.

Ces échantillonnages ont été réalisés sur les répétitions FP1 et P3. A D208, la surface totale prospectée par les vers dans FP1 est de 32% avec une prédominance dans les horizons de surface. Pour la modalité « P », la surface racinaire à une date donnée constitue la totalité de la zone prospectée. La surface totale maximale prospectée par les racines dans la modalité « P3 » et « FP1 » est de 10,15% et 9,5 % respectivement. C'est dans ces surfaces prospectées qu'ont lieu les échantillonnages et la quantification des paramètres de structure. Sur la cartographie on voit qu'un ver peut passer jusqu'à quinze fois au même endroit. Le but de cette partie c'est de quantifier l'évolution de la porosité et de l'agrégation en fonction de cette intensité d'activité.

3.4.1. Effet de l'âge des racines sur la porosité et l'agrégation

Les résultats de quantification à six dates différentes montrent une évolution en V de la porosité (Figure 73). Quelques jours avant que les racines poussent (D0), la porosité est relativement importante. Cette porosité est sans doute créée par la différence de pression hydrique créée par la graine au niveau de ce que va être la rhizosphère. Elle peut aussi

avoir comme origine des fentes de retrait liées au phénomène de gonflement et rétraction des particules du sol comme les argiles ou les sous-produits papetiers.

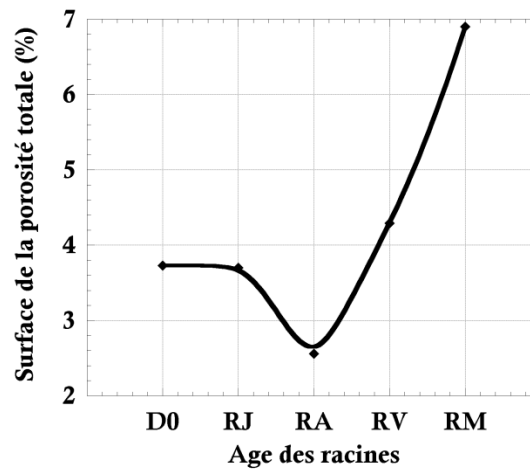


Figure 73. Effet de l'âge des racines sur l'évolution de la porosité. D0 : sans racine, RJ : racine jeune, RA : racine âgée, RV : racine vieille, RM : racine morte.

Lorsque la racine pousse, la porosité baisse légèrement et continue de baisser jusqu'à ce que la racine atteigne son stade de maturité (RA). C'est à ce stade qu'on observe la baisse la plus marquée de la porosité car la racine en augmentant de volume exerce une pression sur le sol ce qui engendre une réduction de la surface des vides. Mais dès que la racine commence à vieillir, elle diminue de volume, ce qui provoque un regain de porosité. Le processus continue jusqu'à atteindre son stade ultime lorsque la racine meurt et se dégrade. Le rôle de la racine sur la porosité est donc différent en fonction de l'âge. Jeune, elle fait baisser la porosité et la fait augmenter lorsqu'elle est vieille.

3.4.2. Effet de l'intensité des actions de vers sur la porosité

Le mouvement des vers de terre dans le sol ont trois principales conséquences sur la structure. Lorsqu'ils passent à un endroit pour la première fois ils créent de la porosité. Quand ils repassent soit ils ferment les pores, soit ils les ré-ouvrent, soit ils passent sans rien modifier. Les phases d'ouverture et de fermeture peuvent se faire au même moment (le ver creuse puis referme derrière lui) et parfois en plusieurs phases. Ceci explique le fait que la surface totale de la porosité augmente, ne varie pas et/ou baisse à des pas de temps irréguliers (Figure 74). Cette intense activité autour d'un même point veut dire que les vers aiment repasser au même endroit sans doute pour minimiser l'effort de creusage de galerie (Caro *et al.*, 2012). La variabilité du pourcentage de porosité est très importante entre deux actions. Ne sachant pas si c'est un même ver qui passe plus d'une fois au même endroit, il est difficile de conceptualiser avec certitude ce qui se passe

lorsqu'un ver passe deux fois dans la même galerie. Une tendance générale se dégage néanmoins : lors du premier passage, la porosité augmente et lors du second passage elle diminue que ce soit le même ver ou un autre.

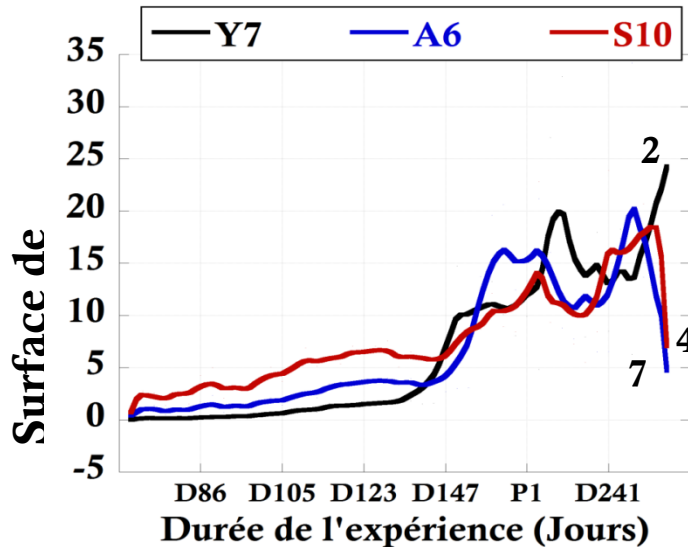


Figure 74. Effet de l'intensité de l'activité de vers sur l'évolution de la porosité au cours du temps. Y7 : 19 actions, échantillon de coordonnées (25, 7), A6 : 14 actions, échantillon de coordonnées (19,1), S10 : 9 actions, échantillon de coordonnées (1,6), (c)

Dans la plupart des cas la fermeture des pores n'est pas parfaite ce qui fait que globalement la porosité augmente. Ceci dépend de la taille des vers : si un ver adulte ouvre une galerie et qu'un juvénile passe derrière, il est peu probable qu'elle soit complètement fermée. Au contraire il peut contribuer à l'ouvrir davantage ce qui explique des phases successives d'accroissement de la porosité.

IV. Conclusion

Nous avons mis en place un dispositif de suivi en temps réel de la dynamique d'agrégation d'un Technosol construit. Ce système a permis d'observer visuellement l'évolution de la porosité et de l'agrégation au cours du temps et sous l'action de différents agents pédogénétiques à l'aide d'un système d'acquisition automatique d'images. Un protocole innovant a été mis en place, qui a permis pour la première fois, la quantification dynamique de l'agrégation dans un sol par analyse d'image. L'analyse de ces images montre que les racines croissent préférentiellement à travers les fentes ou les fissures si elles existent. Elles croissent de manière exponentielle au début jusqu'à atteindre un plateau puis commencent à se rétrécir avec l'âge. Les vers quant à eux prospectent le sol au début de leur introduction puis adoptent un mouvement d'aller-retour entre la couche du compost et les horizons de

profondeur. Leur déplacement est préférentiellement lié à la présence de racines. Au début, la porosité croît dans toutes les modalités mais elle baisse sous l'effet de l'apport d'eau. Dans les modalités « T et HD » la porosité diminue continuellement durant toute la durée de l'expérience, alors qu'elle augmente dans les modalités « P et FP ». L'agrégation est liée à l'évolution de la porosité mais encore plus à celle du système racinaire. Elle est constante dans la modalité « T », fluctuante dans la modalité « HD », et augmente significativement dans les modalités « P et FP ». En analyse d'images les racines contribuent plus à la formation d'agrégats que les vers, mais l'action des deux est bénéfique dans la structuration du Technosol. En tentant de hiérarchiser ces facteurs par ordre croissant de formation d'agrégats on peut écrire : $T < HD < F < P < FP$. Les agents plante et faune agissent sur la structure du Technosol en fonction de l'âge des racines et de l'intensité d'activité de vers. La contribution des racines dans la formation de la porosité est une fonction croissance de leur âge. L'intensité d'action de vers quant à elle a une triple action sur la porosité : croissante, constante ou décroissante. La résultante de ces actions répétées est une augmentation de la surface totale de la porosité.

Chapitre VI. Discussion générale

I. Introduction

Dans le but de modéliser les processus d'agrégation dans des Technosols, deux expérimentations ont été conduites. La première est basée sur la mise en place d'une parcelle d'un hectare en application d'un procédé de génie pédologique aboutissant à deux modalités de Technosol construit. Compte tenu des conditions de mise en place de cette parcelle en utilisant des engins du génie civil, des hétérogénéités structurales ont été introduites. La première étape a donc consisté à caractériser ces Technosols à partir de méthodes d'analyses physiques et d'observation. Pour répondre à la question principale de la Thèse « comment modéliser les processus d'agrégation de Technosols », nous nous sommes posés un certain nombre de questions et émis des hypothèses sur la base d'une analyse bibliographique. Le résultat principal de celle-ci fait apparaître que la plupart des méthodes utilisées dans la quantification de la structure d'un sol - porosité et agrégation - sont indirectes. Pour quantifier directement cette structure il faut utiliser les techniques d'analyses d'images. Ainsi, un protocole de quantification de la porosité et de l'agrégation de Technosols par analyse d'images a été mis au point. L'analyse d'image de lames minces est une méthode statique dans le temps ; autrement dit elle ne permet pas de suivre la dynamique *in situ* de l'évolution de la structure du Technosol. Ceci pour la simple raison qu'avec cette méthode, on ne peut pas échantillonner deux fois au même endroit. Pour lever cette contrainte, nous avons mis au point un dispositif de laboratoire, consistant à suivre et observer *in situ* la dynamique d'un Technosol construit sous l'influence de facteurs pédogénétiques. Le but de ce chapitre est de discuter des principales méthodes et résultats de ces études, de consolider les principales conclusions en fonction des questions scientifiques posées et enfin de proposer un modèle conceptuel d'évolution de l'agrégation de Technosols construits.

II. Etude qualitatives vs quantitatives de la structure

2.1. Etudes qualitatives de la structure

Les principales méthodes qualitatives d'appréciation de la structure d'un sol sont l'observation et la description. Cette étape est considérée comme le préalable avant toute analyse quantitative (Ruellan et Dosso, 1993). Elle permet de décrire la structure d'un sol, sa couleur, la couleur et la profondeur de ses horizons, l'état de l'horizon de surface (érodé, fissuré, imperméabilisé...). On peut aussi décrire la granulométrie des particules primaires, en déterminer l'odeur et compléter par quelques analyses

pour apprécier le pH par exemple (Jahn *et al.*, 2006). A l'aide des clés d'interprétation, on peut aussi tenter de classer les sols en fonction des éléments d'observation. Ces différentes opérations d'observation et de description qualitative sont importantes et indispensables dans beaucoup de cas. Mais rapidement elles peuvent atteindre leurs limites dans l'explication du fonctionnement et de l'évolution des sols. Il est donc indispensable de compléter les résultats qualitatifs par des mesures quantitatives afin de prendre des décisions objectives et reproductibles donc vérifiables en cas de besoin.

2.2. Etudes quantitatives de la structure

Il existe de nombreuses méthodes d'obtention de données quantitatives sur la structure (porosité et état d'agrégation). Pour la quantification de la porosité on peut utiliser des mesures physiques (presse à membranes, porosimètre...). Nous n'avons pas réalisé de mesures physiques de porosité dans nos expérimentations, la texture grossière de la parcelle n'offrant pas les conditions idéales de réalisation de ces mesures. Concernant la quantification de l'agrégation on utilise le plus souvent des tests de stabilité structurale. Ces méthodes permettent d'obtenir des données quantifiées, exprimées sous différentes manières (Amezket, 1999; Kemper et Rosenau, 1986; Le Bissonnais et Le Souder, 1995). Nous avons utilisé une variante de ces méthodes, le fractionnement granulodensimétrique à l'eau, pour caractériser l'évolution de la structure des Technosols construits au cours du temps. Mais cette méthode n'est pas sans poser problèmes en raison de la quantité importante de sous-produits papetiers (SPP) utilisée pour construire les Technosols. Cette matière est très hydrophile, colmatante et collante à l'état humide mais devient très dure une fois séchée. Les méthodes classiques utilisées sur les sols naturels ne peuvent donc être appliquées directement et ont nécessité des adaptations.

III. Etude indirectes vs directes de la structure

3.1. Etudes indirectes de la structure

Les différentes opérations de prélèvement, tamisage et agitation effectuées lors des tests de stabilité structurale ou de granulodensimétrie détruisent la structure avant de la quantifier. Ce que l'on mesure est la donc la capacité du sol à résister aux stress, comme la pluie par exemple. La méthode permet certes d'obtenir des données quantifiées sur l'agrégation, mais elle le fait de manière indirecte. Elle a l'avantage d'être normalisée et reproductible à tout moment sans qu'il y ait un grand biais. Ainsi les résultats de divers échantillons peuvent être comparables. Mais cette comparabilité reste limitée car les méthodes de

quantification de la structure par mesure indirecte sont nombreuses et diversifiées. Une autre limite à ces méthodes peut être liée à la limitation de la quantité de l'échantillon prélevé, l'archivage ne permettant de répéter les mesures à l'infini. Une vérification à long terme serait donc pratiquement impossible. En dépit de ces limites, les méthodes indirectes d'études de la structure sont indispensables pour déterminer la résistance d'un sol à la dégradation comme la battance ou l'érosion (Le Bissonnais et Le Souder, 1995). Mais pour quantifier directement les paramètres de structure (porosité, agrégation) d'autres méthodes doivent être utilisées.

3.2. Etudes directes de la structure

L'étape la plus cruciale dans une démarche de quantification directe de la structure est d'obtenir des échantillons de sol non perturbés. Une des manières d'obtenir ce genre d'échantillons est de prélever des blocs de sol à l'aide de boîtes de Kubiena et de réaliser des lames minces. Ces lames peuvent être utilisées de deux manières : pour des analyses locales par micromorphologie quantitative (*e.g.* comptage manuel) ou des analyses globales par traitement d'images (Bullock *et al.*, 1985; Coster et Chermant, 1989). Nous avons suivi cette deuxième démarche pour mettre au point une méthode directe et semi-automatique de quantification de la porosité adaptée au Technosol construit. Ceci a été possible en faisant plusieurs essais afin d'adapter et optimiser les différentes opérations et les différents paramètres. Les algorithmes d'analyse d'image étant très nombreux (Noesis, 2012), nous avons choisi les plus performants en fonction de notre objet d'étude. L'une des grandes difficultés de quantification de la porosité par analyse d'images de lames minces est de pouvoir différencier les grains de quartz des pores. Nous avons franchi cette étape en utilisant la méthode de « point counting » et nous avons estimé le taux de quartz dans le Technosol (2%). Les résultats d'application de cette méthode sur le Technosol construit montrent une diminution de sa porosité deux ans après sa mise en place. C'est une compaction qui se caractérise par la diminution des diamètres des pores $> 2\text{mm}$. Ceci engendre un accroissement des pores de plus faible diamètre et confère à ce sol une plus grande capacité de rétention en eau. L'important développement du couvert végétal, associé à l'évolution de la forme et la taille des pores, montre que le Technosol construit suit à peu près le même processus pédogénétique que les sols naturels. Des résultats d'études antérieures ont montré que sa pédogenèse est relativement rapide (Séré *et al.*, 2010). Mise à part sa spécificité en termes de composition et d'origine de ses matériaux, le Technosol construit est donc semblable à un sol naturel, dans la mesure où il est à même d'assurer les mêmes fonctions (support de biodiversité, filtre-échange...). La surface, la forme et la connectivité des pores sont

des indicateurs qui permettent de suivre l'évolution de la porosité au cours du temps. Si la porosité a été largement quantifiée par analyse d'images dans divers travaux, les agrégats quant à eux n'ont fait cas d'aucune étude par cette méthode. Nous avons levé ce défi en mettant au point une méthode de quantification des agrégats d'un Technosol. Cette méthode est basée sur deux démarches primordiales : (i) définition de l'agrégat en analyse d'image et (ii) choix des algorithmes qui permettent de détecter ces agrégats au sein d'une matrice de sol. La définition de l'agrégat en analyse d'image est une conséquence de la définition de la structure qui est l'arrangement spatial des particules et des pores dans un sol. De ce fait, les pores peuvent être considérés comme des chemins qui permettent de délimiter les agrégats (Sandri *et al.*, 1998). Les agrégats sont donc définis en fonction de ces pores, donc de la distance qui sépare les différents compartiments du sol. Dans cette définition, on retrouve la théorie hiérarchique de l'agrégation qui veut que les microagrégats s'associent pour former des agrégats plus grands et ainsi de suite (Tisdall et Oades, 1982). Dans le cas d'analyse d'images on peut dire que les macroagrégats sont séparés par de la macroporosité et en leur sein on trouve des microagrégats qui sont séparés par des micropores. L'aptitude à détecter les agrégats dépend donc de la détection du plus petit pore. La méthode développée permet de détecter tous les ensembles individualisés ou individualisables au sein d'une matrice du sol. L'agrégation dépendra donc de la porosité totale du sol, mais aussi et surtout de la répartition spatiale de celle-ci dans la matrice sol. En se basant sur cette méthode, on peut dire qu'un sol à porosité bien répartie aura une agrégation plus importante qu'un sol à porosité élevée mais inégalement répartie. Les résultats de l'application de cette méthode sur les lames minces issues des Technosols construits étudiés montrent un début d'agrégation en deux ans, mais cette agrégation est surtout liée aux facteurs physiques (*e.g.* fissuration, circulation de l'eau), l'activité biologique n'ayant pas eu encore beaucoup d'impact.

Les méthodes directes nous permettent de déterminer la surface, le nombre ou la forme des agrégats, mais elles ne nous permettent pas de savoir si ces agrégats sont stables ou non. Par contre elles ont l'avantage d'être moins fastidieuses et entièrement automatisables si les paramètres sont définis et fixés. Le temps d'obtention des lames minces est par contre très long par rapport aux analyses indirectes, mais ces échantillons sont peuvent être conservés indéfiniment. Les images obtenues à partir de ces échantillons se stockent et sont facilement échangeables entre chercheurs. Les méthodes directes et indirectes de quantification de la structure sont donc complémentaires. Il y a lieu de

chercher des corrélations entre ces deux types de résultats pour renforcer davantage leur complémentarité.

IV. Etudes instantanées vs dynamiques de la structure

4.1. Les études instantanées de la structure

Les méthodes d'observation, de quantification directes et indirectes que nous avons vu jusque-là correspondent à des instantanés, c'est-à-dire qu'elles créent une rupture du système analysé. En effet, le prélèvement des échantillons interrompt le processus d'évolution des parties prélevées. Toute extrapolation dans le temps introduirait inéluctablement des incertitudes. Au vu de la variabilité et de l'hétérogénéité spatiale du système sol, une méthode quantitative, directe et dynamique, doit permettre de mieux étudier les processus d'évolution de la structure.

4.2. Etudes dynamiques de la structure.

Le suivi de la dynamique de la structure a été réalisé à l'aide d'un dispositif de visualisation *in situ* d'un Technosol construit sous l'influence de variables de forçage. En appliquant les protocoles de quantification de la porosité et de l'agrégation développés en amont, nous avons suivi l'évolution de la structure de ce Technosol construit au cours de 268 jours d'expérience. Les résultats ont montré que les agents biologiques « plante » et « faune-plante » ont un impact sur la structure du sol plus important que le seul facteur « humectation-dessiccation ». Ces résultats confirment, pour un Technosol construit, le rôle des facteurs pédogénétiques sur la structuration du sol et la synergie entre la plante et les vers dans la formation des agrégats. A propos du comportement des vers de terre, nous avons vu que ces derniers passent plusieurs fois aux mêmes endroits, que ceux prospectés par leur congénères. Au premier passage les vers créent la porosité. Une partie de cette porosité est ensuite bouchée lors des passages suivants, mais au final ces passages successifs augmentent la porosité totale. On peut donc conclure qu'à court terme, plus l'activité des vers est intense, plus ils améliorent la structure. Mais cette tendance peut changer voire s'inverser à long terme. On ignore cependant le nombre de fois qu'un même ver passe au même endroit, car plusieurs vers sont introduits dans le système et il n'est pas possible de les différencier. Par conséquent on ne sait pas si les modifications de la structure sont liées à un ver qui passe plusieurs fois au même endroit ou à plusieurs vers. L'apparition des juvéniles qui peuvent avoir des comportements différents de ceux des adultes contribue à induire des incertitudes dans la compréhension de l'effet de l'intensité d'activité de l'agent ver sur la structure d'un

Technosol construit. En outre, le fait que les vers se déplacent préférentiellement le long des racines, fait qu'il est difficile de dissocier les impacts des vers d'une part et des racines d'autre part. Ainsi un point situé dans la zone rhizosphérique peut avoir plus de chance d'être prospecté plusieurs fois qu'une zone où les racines ne se sont pas beaucoup développées. Les racines aussi contribuent favorablement à l'amélioration de la structure d'un sol mais cet effet est dépendant de l'âge. Plus elles sont âgées, plus elles laissent apparaître la porosité et indirectement les agrégats. Cet effet est global mais il faut savoir qu'il y a plusieurs types de racines dans le lupin : primaires, secondaires, tertiaires et protéoïdes. Toutes ne contribuent sans doute pas avec la même intensité à l'amélioration de la structure du Technosol construit.

Cette méthode permet certes de suivre *in situ* la dynamique de structure mais seulement une partie du système sol (ce qui apparaît sur la surface vitrée) est visible. Tous les processus qui se déroulent à l'intérieur de la matrice sol sont pour l'instant ignorés. Des méthodes de tomographie permettraient néanmoins d'avoir des informations ponctuelles (Pierret *et al.*, 1999).

V. Vers la modélisation de la pédogénèse au sein des Technosols

L'ensemble de développement méthodologique pour l'observation, la description et la quantification de l'agrégation permettent d'une part de formaliser le modèle conceptuel du processus d'agrégation et d'autres part proposer des pistes de formalisation mathématique dans l'objectif d'une intégration dans des modèles plus intégrés d'évolution du sol. il s'agira en particulier d'envisager une intégration de résultats dans la plate forme Sol Virtuel de l'INRA.

5.1. Modèle conceptuel de l'agrégation du Technosol

Sous l'influence des agents pédogénétiques choisis pour leur rôle sur la structure des sols, l'agrégation du Technosol évolue au cours du temps (Figure 75). Cette dynamique d'agrégation peut être conceptualisée à l'aide des équations mathématiques en factorisant les effets des différents agents mis en expérience. Cette factorisation est rendue possible sur la base des résultats obtenus. Les résultats d'observation et de quantification des images issues de suivi *in situ* de la dynamique du Technosol construit nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

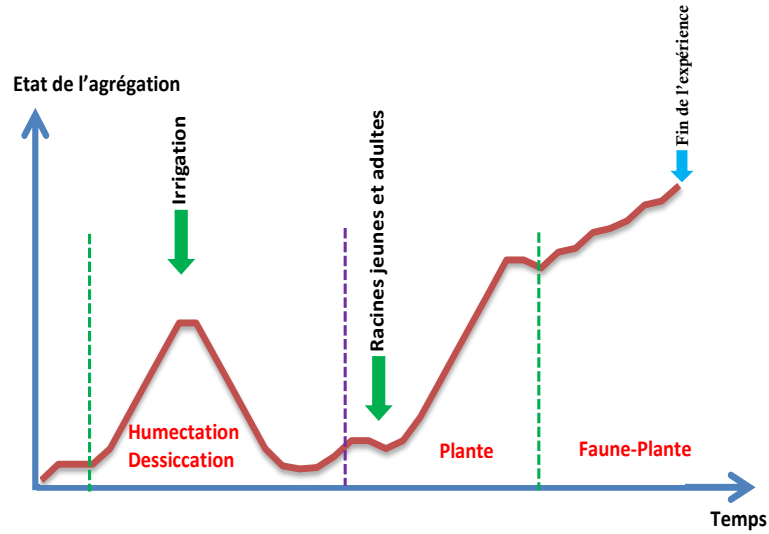


Figure 75. Modèle conceptuel de la dynamique d'agrégation de Technosols construits au cours du temps, soumis à l'action des agents pédogénétiques.

- 1- La porosité est une fonction décroissante de la surface des racines jeunes, mais croissante de la surface des racines vieilles ou mortes. En résumé, en présence de racines, la porosité est une fonction croissante du temps. Ceci peut être formalisé comme suit :

$$Po = f(r) \Rightarrow \frac{d(Po)}{dt} = \frac{d(f(r))}{dt} > 0 \quad 22$$

- 2- L'agrégation est une fonction croissante de la porosité et de la surface racinaire. Ce qui peut être formalisé comme suit :

$$Ag = f(r) \Rightarrow \frac{d(Ag)}{dt} = \frac{d(f(r))}{dt} > 0 \quad 23$$

$$Ag = f(Po) \Rightarrow \frac{d(Ag)}{dt} = \frac{d(f(Po))}{dt} > 0 \quad 24$$

- 3- L'intensité de l'action des vers accroît la porosité ; plus ces vers sont nombreux, plus l'activité sera intense. La matière organique et l'humidité sont des facteurs limitant à cette intensité d'activité.

L'équation de l'évolution de la matière organique s'écrit :

$$\frac{d(Mo)}{dt} = -kMo \quad 25$$

L'évolution instantanée de l'humidité dans le système sans arrosage s'écrit :

$$\frac{d(Hu)}{dt} = -vHu \quad 26$$

Sachant que l'intensité de l'activité des vers est limitée par ces deux grandeurs dans le temps, alors on peut écrire :

$$\frac{d(Iv)}{dt} = (-vHu - kMo)Ew(t) \quad 27$$

Et finalement, l'augmentation de la porosité en fonction de de l'intensité de vers s'écrit :

$$\frac{d(Po)}{dt} = \frac{d(Iv)}{dt} = (-vHu - kMo)Ew(t) \quad 28$$

- 4- La porosité et l'agrégation sont des fonctions croissantes des racines et des vers de terre plus que l'effet des deux agents séparés.

$$Po = f(Fa)f(Hu, Mo) \quad 29$$

Et

$$Po(r + Fa) > Po(r) + Po(Fa) \quad 30$$

Avec, Po : porosité, r : surface racinaire, Ag : surface des agrégats, Fa : faune, hu : taux d'humidité, Mo : taux de matière organique. Ew : ver de terre, Iv : intensité nette des actions de ver de terre, k et v sont respectivement des constantes de dégradation de Mo et de dessiccation du sol.

L'intégration de toutes ces équations doit contribuer à écrire le modèle conceptuel d'évolution de l'agrégation d'un Technosol construit. Ensuite, des expérimentations plus spécifiques peuvent être conduites pour confirmer certaines théories.

5.2. Contribution à la création d'un module « agrégation » dans les modèles intégrés de fonctionnement et d'évolution de sols

Sol Virtuel est une plateforme informatique dont les objectifs sont (i) la définition et la manipulation des processus (par exemple agrégation), (ii) développer de nouveaux modules ou représentation (ii) couplage de modules pour créer de nouveaux modèles et (iv) fournir un outil pour utiliser facilement les modèles (INRA, 2006). L'écriture des équations précédentes permettra d'avancer dans la construction d'un module « agrégation » qu'on peut intégrer dans la plateforme sol virtuel. Les principales données d'entrées seraient :

La surface racinaire (densité), le nombre de vers (densité), l'humidité, le taux de matière organique, la diversité de vers, la température, l'humidité, le pH, la conductivité électrique, la texture. Les variables de sortie seraient : le nombre, la surface, la forme des agrégats et des pores, l'indice de connectivité des pores.

Conclusion générale

Le Technosol construit est un matériau particulier en raison de son origine et de sa composition. Il peut donc avoir un fonctionnement et une pédogenèse propre ; l'étude de ce matériau permet de le vérifier. La quantification directe de sa porosité par analyse d'image et le suivi de sa dynamique au cours du temps montre qu'il se compacte. Dans ces premiers stades de pédogenèse, le Technosol perd les macropores $> 2000 \mu\text{m}$ de diamètre et s'accroît en micropores $< 25 \mu\text{m}$. Ce phénomène a une influence sur la circulation et le stockage de l'eau et par conséquent sur sa capacité à assurer la fonction de filtre et d'échange et de support de végétation.

Dans la suite de cette partie, nous allons synthétiser les résultats des hypothèses émises à la suite des questions scientifiques.

Il est possible de quantifier l'agrégation dans un Technosol construit à partir d'analyse d'images de lames minces.

En se basant sur les algorithmes présents dans un logiciel général d'analyse d'images (Visilog, Noesis), nous avons mis au point un protocole de quantification des agrégats. La première étape a consisté à définir l'agrégat en analyse d'images. Il est ainsi défini comme « tout ensemble de particules distinguables, isolées ou isolables dans la matrice du sol à une résolution donnée. Les particules formant cet ensemble sont plus cohérentes entre elles qu'avec le reste de la matrice et séparées par une distance minimale. Leur limite est définie par les pores ou plans de rupture entourant ou presque, une unité de sol sans fissures internes à la même résolution ». Dans un deuxième temps, nous avons choisi des algorithmes permettant de mettre en évidence ces agrégats. Des opérations de filtrage, texture, normalisation, morphologie mathématique, de segmentation, de détection de points et enfin d'analyse ont été appliquées. Les résultats de ces analyses ont permis de mettre en évidence une évolution de l'agrégation dans le Technosol construit. Autrement dit l'agrégation du Technosol croît avec le temps. Cette évolution concerne surtout la classe des agrégats CM (Coarse Macropores : $[500 - 2000 \mu\text{m}]$). Les CM seraient donc mieux adaptés dans le suivi de la dynamique de l'agrégation en fonction du temps alors que les MM (Medium macropores : $[200 - 500 \mu\text{m}]$) seraient dédiés à l'étude de l'effet de la construction du sol sur la géométrie des agrégats.

Il est possible de suivre la dynamique d'agrégation dans un Technosol construit au cours du temps en fonction des effets de facteurs pédogénétiques.

En associant divers outils informatiques et de visualisation, nous avons conçu un dispositif innovant de suivi *in situ* de la dynamique d'agrégation d'un Technosol construit. Ce dispositif nous a permis de suivre le comportement des agents de pédogenèse (humectation-dessiccation, plante et faune) dans la structuration du Technosol au cours du temps. Les différents films réalisés à l'aide des images acquises toutes les deux heures pendant huit mois permettent de suivre ces comportements en dynamique. L'observation de ces films montre que le sol se fissure lorsqu'il est soumis aux cycles d'humectation-dessiccation mais ces fissures se referment sans jamais retrouver leur niveau initial dès qu'il est réhumecté. Les racines croissent très vite au début mais se stabilisent lorsque les plantes atteignent leur stade ultime de développement, puis vieillissent et enfin meurent. Elles font décroître la porosité et l'agrégation lorsqu'elles sont jeunes mais les font accroître quand elles sont vieilles ou mortes. Les vers prospectent le sol de manière indifférente lors de la phase « d'exploration » puis se déplacent préférentiellement le long des racines. Leur activité se concentre surtout dans les horizons de surface et progressivement explorent les horizons de profondeur lorsque la quantité de compost se fait rare.

Les facteurs climatiques (agent humectation-dessiccation) et biologiques (agent plante et faune) impactent à court terme l'agrégation d'un Technosol construit.

Les résultats de quantification des images acquises montrent que la porosité et l'agrégation évoluent en fonction du temps et des agents pédogénétiques. Dans la modalité humectation-dessiccation la porosité et l'agrégation croissent lors du premier cycle mais décroissent continuellement lors des cycles suivants. Les racines des plantes font croître la porosité et l'agrégation au début, puis elle baisse et enfin croit indéfiniment au cours du temps. L'effet des vers sur la porosité et l'agrégation est en zigzag. Elles croissent et baissent mais la résultante est une croissance avec le temps à court terme.

Il est possible de hiérarchiser les facteurs pédogénétiques en fonction de leur impact sur l'agrégation d'un Technosol construit.

L'agrégation est constante dans la modalité témoin et est significativement supérieure dans les modalités plante et faune + plante. Les résultats obtenus par analyse d'images soulignent que dans le cadre des conditions expérimentales choisies, les racines contribuent plus à la formation d'agrégats que les vers, mais l'action des deux agents est bénéfique dans la structuration du Technosol. En tentant de hiérarchiser les facteurs étudiés par ordre croissant d'impact sur la formation

d'agrégats on peut écrire : Témoin < Humectation-Dessiccation < Faune < Plante < Faune + Plante.

Il existe des corrélations entre les paramètres de porosité et d'agrégation et les paramètres de croissance du système racinaire.

Le pourcentage d'agrégats est positivement corrélé à celui de la porosité ($r = 0,58$ et $r = 0,43$ respectivement pour la modalité Plante et Faune + Plante) mais cette corrélation est plus élevée avec le pourcentage racinaire (respectivement $r = 0,66$ et $r = 0,74$). Ceci veut dire que plus les racines et la porosité croissent, plus l'agrégation est élevée mais cette augmentation de l'agrégation est plus significative là où la densité racinaire est plus élevée.

Il est possible de conceptualiser l'agrégation d'un Technosol construit à partir des résultats de suivi de sa dynamique.

En intégrant les équations 22 à 30 on peut écrire un modèle conceptuel d'agrégation d'un Technosol construit. La confrontation des résultats de quantification des agrégats par analyse d'images à ceux réalisés par tests de granulodensimétrie, montre une corrélation, mais faible, entre ces données.

Les résultats de la Thèse concernent tant (i) le développement de méthode d'observation et de quantification de la porosité et de l'agrégation au cours du temps que (ii) l'application de cette méthode pour proposer des modèles de fonctionnement et d'évolution d'un sol. Cette quantification dynamique permet de hiérarchiser les effets d'agents biologiques (plante et/ou faune du sol) ou climatiques (alternance humectation-dessiccation) choisis, sur la cinétique d'agrégation. Le « Technosol construit » est alors un modèle expérimental dont la constitution organo-minérale et le fonctionnement sont très largement contrôlés, en comparaison de sols « naturels » évolués dont le point initial de développement est quasi systématiquement inconnu. Les conclusions des travaux de Thèse peuvent alors également venir éclairer de manière plus générique les connaissances sur l'installation progressive des agrégats dans les stades précoces de la pédogenèse des sols, en général.

Perspectives

Les principaux résultats obtenus nous ont permis d'avancer dans les questions scientifiques posées. Afin de préciser davantage notre compréhension de la pédogénèse des Technosols, nous pouvons proposer divers travaux ou améliorations :

1) Afin d'améliorer la méthode de quantification des agrégats par analyse d'images, la détection des agrégats peut être perfectionnée en prenant en compte non pas la distance au plus proche voisin (bord à bord), mais la distance moyenne entre une particule et ses voisines suivant plusieurs directions différentes. Pour une image 2D, les valeurs d'angle qu'on peut considérer dans le calcul de cette distance moyenne sont : 0, 18,36, 54, 72, 90, 108, 126, 144, et 162 degrés (Noesis, 2012).

2) Les images acquises par le dispositif de suivi in situ sont de couleurs variables (à cause de l'humidité qui n'est pas homogène sur toute l'image) ce qui engendre des difficultés lors des étapes d'analyse. Le dispositif peut donc être amélioré en utilisant des scanners à plusieurs canaux de couleurs notamment une lumière infrarouge. Ceci permettra de s'affranchir de cette hétérogénéité.

3) Nous avons quantifié l'effet de l'intensité des agents sur la structure du technosol. Cette quantification peut être améliorée en complétant la typologie du système racinaire notamment en séparant les effets en fonction de types de racines : primaires, secondaires, tertiaires et protéoïdes. Pour ce qui est des vers de terre, on peut conduire une nouvelle expérimentation avec un seul ver mais dans un système réduit, afin de voir si c'est un même ver qui passe au même endroit et quel effet ceci aurait sur la structure du Technosol. Les résultats de ces tests peuvent être introduits dans le modèle SWORM (Simulated Worms) afin de simuler l'effet de l'intensité de l'activité de vers de terre sur la structure du sol. Sworm est un système multi-agents qui permet de simuler le comportement d'un agent (ici vers de terre) dans un environnement virtuel (Blanchart *et al.*, 2009).

4) A la fin de l'expérience, il est recommandé de faire des tests de stabilité structurale sur les différents systèmes afin de confronter les résultats obtenus par analyse d'images à ceux de la quantification indirecte. Ceci permettra de répondre à la question : les agrégats détectés par analyse d'images sont-ils stables à l'eau ?

5) Afin de savoir ce qui se passe à l'intérieur du sol, en plus de ce que nous avons quantifié sur la surface vitrée, des blocs non perturbés peuvent être prélevés au sein des cosmes dans le but de réalisation de lames minces. L'analyse des images de ces lames permettra de se faire une idée sur les relations entre les observations sur la surface vitrée et les modifications non visibles sur la structure qui ont lieu en profondeur du sol. La plupart des résultats précédents sont en deux dimensions ; des études en 3D à l'aide de la tomographie aideront à extrapoler les résultats.

6) La construction d'un module « agrégation » à intégrer dans « sol virtuel » doit se poursuivre en intégrant toutes les équations énoncées au point §§4.1. Ensuite, des expérimentations plus spécifiques peuvent être conduites pour confirmer certaines théories.

7) Les résultats obtenus sur la porosité et l'agrégation sont à l'échelle d'un cosme (22 X 29 cm). Ces résultats peuvent être extrapolés à des échelles plus petites et plus grandes grâce aux techniques de changement d'échelle, afin de mieux connaître le processus d'agrégation d'un Technosol dans toutes ses dimensions.

8) Les résultats de quantification de l'effet local peuvent être extrapolés à l'échelle globale (l'image entière). Pour cela on identifie tous les points (5,61 X 5,61 mm) en fonction du nombre de passage de vers. Quantifier la surface des racines en fonction de leur âge et de leur type (primaire, secondaire, tertiaire, protéoïdes).

9) Les parcelles expérimentales doivent être suivies sur plusieurs années afin de comprendre vers quels stades elles vont évoluer à long terme. Les résultats de ce suivi à long terme peuvent être reliés à d'autres paramètres dans le but d'avoir des informations complètes sur la pédogenèse des Technosols et des sols anthropisés en général.

Annexe1. Données quantifiées de porosité et agrégation

Données quantifiées sur la porosité

Tableau1. Paramètres de porosité sur données classées en fonction des modalités de construction de sol en 2008 et 2010 (moyenne, $\pm$ écart type). Wb : modalité éponge végétale, Co : modalité confinement. N : nombre (2A), P : périmètre (2B), D : distance (2C), V : volume (2D), Ec : excentricité (2E), Sf : forme (2F), Ed : diamètre équivalent (2G), A : surface (2H) pour respectivement VCM : very coarse macropores ($>2000 \mu\text{m}$), CM : coarse macropores ($500\text{-}2000 \mu\text{m}$), MM : medium macropores ($50\text{-}500 \mu\text{m}$), et FM : fine macropores ($25\text{-}50 \mu\text{m}$). Les valeurs avec des lettres différentes dans une même colonne sont significativement différentes (Mann Whitney test, 5%).

	N_VCM	N_CM	N_MM	N_FM
WbT0	13a ± 3.16	132a ± 41	2428a ± 556	672a ± 273
CoT0	14a ± 5.45	120a ± 31	2152a ± 636	542a ± 151
WbT2	12a ± 5.43	194b ± 41	3605b ± 561	754a ± 126
CoT2	10a ± 3.90	169b ± 37	3287b ± 911	673a ± 165

(A)

	P_VCM (μm)	P_CM (μm)	P_MM (μm)	P_FM (μm)
WbT0	97 815a ± 47027	6015a ± 772	587a ± 31	95.61a ± 4.74
CoT0	90 772a ± 34389	6239a ± 432	578a ± 24	98.83a ± 5.45
WbT2	96 379a ± 72446	6682a ± 596	612a ± 28	96.67a ± 1.38
CoT2	62 203a ± 29160	6152a ± 703	599a ± 31	96.56a ± 1.44

(B)

	D_VCM (μm)	D_CM (μm)	D_MM (μm)	D_FM (μm)
WbT0	31.97a ± 11.05	86.23a ± 13.55	167a ± 18	192a ± 32
CoT0	39.53a ± 9.52	93.37a ± 16.56	183a ± 33	229a ± 46
WbT2	38.80a ± 15.59	71.77b ± 05.52	149a ± 18	182a ± 20
CoT2	35.41a ± 9.88	83.83a ± 14.82	168a ± 24	209a ± 36

(C)

	V_VCM	V_CM	V_MM	V_FM
WbT0	60 251a ± 31791	1253a ± 102	44.77a ± 4.46	1.89a ± 0.16
CoT0	52 064a ± 26153	1305a ± 057	44.16a ± 2.94	1.99a ± 0.19
WbT2	34 116a ± 26416	1187a ± 082	46.59a ± 3.23	1.91a ± 0.03
CoT2	24 772b ± 12973	1194a ± 116	46.68a ± 2.69	1.91a ± 0.04

(D)

	Ec_VCM	Ec_CM	Ec_MM	Ec_FM
WbT0	0.85a ± 0.03	0.84a ± 0.02	0.79a ± 0.03	0.22a ± 0.20
CoT0	0.84a ± 0.04	0.85a ± 0.01	0.80a ± 0.03	0.29a ± 0.16
WbT2	0.86a ± 0.04	0.86a ± 0.01	0.80a ± 0.02	0.25a ± 0.12
CoT2	0.88a ± 0.06	0.86a ± 0.02	0.79a ± 0.01	0.25a ± 0.13

(E)

	Sf_VCM	Sf_CM	Sf_MM	Sf_FM
WbT0	32.90a ± 20.95	5.39a ± 1.31	1.57a ± 0.16	0.79a ± 0.02
CoT0	31.15a ± 11.97	5.43a ± 0.68	1.53a ± 0.08	0.81a ± 0.03
WbT2	49.52a ± 36.91	6.61a ± 1.05	1.59a ± 0.10	0.80a ± 0.01
CoT2	29.50a ± 17.36	5.61a ± 1.13	1.53a ± 0.09	0.80a ± 0.01

(F)

	Ed_VCM (μm)	Ed_CM (μm)	Ed_MM (μm)	Ed_FM (μm)		A_VCM (mm^2)	A_CM (μm^2)	A_MM (μm^2)	A_FM (μm^2)
WbT0	4 700a ± 1039	821a ± 33	140.04a ± 7.25	33.57a ± 1.28	WbT0	29, 65a $\pm 15, 56$	617 508a $\pm 50 235$	22 072a $\pm 2 214$	931a ± 74
CoT0	4 649a ± 0992	841a ± 15	139.13a ± 4.43	34.38a ± 1.28	CoT0	25, 58a $\pm 12, 82$	641 225a $\pm 23 381$	21 710a $\pm 1 428$	977a ± 81
WbT2	3 608b ± 0892	806a ± 22	143.38a ± 5.31	33.85 ± 0.27	WbT2	16, 85a $\pm 13, 05$	586 631a $\pm 40 620$	23 019a $\pm 1 594$	943a ± 14
CoT2	3 427b ± 0718	807a ± 34	143.61a ± 4.10	33.87a ± 0.33	CoT2	12, 24b $\pm 6, 41$	590 093a $\pm 57 354$	23 063a $\pm 1 329$	945a ± 17

(G)

(H)

Tableau 2. Les paramètres de porosité exprimés en fonction du temps (A) (T0 : 2008 et T2 : 2010) et en fonction des modalités de construction de sol (B) calculés à partir des données non classées (moyenne, $\pm$ écart type). N : nombre total des pores, A : % de porosité, P : périmètre, D : distance entre les pores, V : volume des pores, Ec : excentricité des pores, Sf : forme des pores, Ed : diamètre des pores, Ic : connectivité des pores, Ap : surface des pores. Les valeurs suivies d'une même lettre dans une même colonne ne sont pas significativement différentes (Mann-Whitney test, 5 %).

	N	A (%)	P (mm)	D (mm)	V	Ec	Sf	Ed (mm)	Ic	Ap (mm^2)
T0	3045a ± 729	22,63a $\pm 6,10$	1,13a $\pm 0,19$	0,18a $\pm 0,03$	337a ± 127	0,68a $\pm 0,07$	1,69a $\pm 0,14$	0,17a $\pm 0,02$	0,36a $\pm 0,07$	0,16a $\pm 0,06$
T2	4361b ± 918	16,40b $\pm 5,35$	0,98a $\pm 0,20$	0,16a $\pm 0,02$	167b ± 78	0,71a $\pm 0,03$	1,73a $\pm 0,18$	0,16a $\pm 0,01$	0,34a $\pm 0,07$	0,08b $\pm 0,04$

(A)

	N	A (%)	P (mm)	D (mm)	V	Ec	Sf	Ed (mm)	Ic	Ap (mm^2)
WbT0	3244a ± 630	23,45a $\pm 5,91$	1,09a $\pm 0,19$	0,17a $\pm 0,02$	332a ± 113	0,66a $\pm 0,08$	1,68a $\pm 0,17$	0,16a $\pm 0,02$	0,34a $\pm 0,08$	0,16a $\pm 0,06$
CoT0	2828a ± 774	21,73a $\pm 6,46$	1,18a $\pm 0,19$	0,19a $\pm 0,03$	353a ± 144	0,70a $\pm 0,03$	1,70a $\pm 0,10$	0,17a $\pm 0,02$	0,38a $\pm 0,05$	0,17a $\pm 0,07$
WbT2	4565b ± 691	17,94a $\pm 5,41$	1,02a $\pm 0,19$	0,15a $\pm 0,02$	169b ± 50	0,71a $\pm 0,03$	1,79a $\pm 0,17$	0,16a $\pm 0,01$	0,36a $\pm 0,07$	0,08b $\pm 0,03$
CoT2	4139b ± 106	14,71b $\pm 4,98$	0,93b $\pm 0,2$	0,17a $\pm 0,03$	165b ± 103	0,70a $\pm 0,03$	1,66a $\pm 0,17$	0,16a $\pm 0,01$	0,31a $\pm 0,07$	0,08b $\pm 0,05$

(B)

Données quantifiées sur l'agrégation

Tableau 3. Paramètres des agrégats classés en fonction du diamètre équivalent (moyenne, $\pm$ écart type). T0 : 2008, T2 : 2010. N : nombre, A : surface, P : périmètre, Ed : diamètre, Ec : excentricité, Sf : forme. CM : coarse macroagrégats, MM : Medium macroagrégats. Valeurs accompagnées d'une même lettre dans une même colonne ne sont pas significativement différentes.

	N	A (mm^2)	P (mm)	Ed (mm)	Ec	Sf	A (%)
CMT0	426,35a $\pm 172,64$	0,70a $\pm 0,11$	4,00a $\pm 0,23$	0,83a $\pm 0,07$	0,77a $\pm 0,01$	2,28a $\pm 0,21$	13,5a $\pm 3,96$
CMT2	625,13b $\pm 259,57$	0,66a $\pm 0,12$	4,04a $\pm 0,30$	0,81a $\pm 0,08$	0,76a $\pm 0,01$	2,45b $\pm 0,22$	18,21b $\pm 4,6$
MMT0	407,87a $\pm 210,807$	0,008a $\pm 0,000$	0,323a $\pm 0,009$	0,095a $\pm 0,002$	0,581a $\pm 0,016$	1,141a $\pm 0,013$	16,1a $\pm 0,85$
MMT2	636,00b $\pm 366,675$	0,008a $\pm 0,001$	0,322a $\pm 0,013$	0,095a $\pm 0,003$	0,577a $\pm 0,021$	1,138a $\pm 0,014$	25,6b $\pm 1,67$

Tableau 4. Paramètres d'agrégats en fonction des modalités de construction de sol sur les données non classées (moyenne, $\pm$ écarts types). N : nombre, A (mm^2) : surface moyenne d'un agrégat, P : périmètre, Ed : diamètre, Ec : excentricité, Sf : forme, A (%) : pourcentage d'agrégats, Wb : modalité « éponge végétal », Co : modalité « confinement ». T0 : 2008, T2 : 2010. Les valeurs accompagnées d'une même lettre au sein d'une même colonne ne sont pas significativement différentes (Mann-Whitney test).

	N	A (mm^2)	P (mm)	Ed (mm)	Ec	Sf	A (%)
WbT0	794,67a $\pm 383,90$	0,40a $\pm 0,07$	2,29a $\pm 0,21$	0,50a $\pm 0,06$	0,68a $\pm 0,02$	1,70a $\pm 0,05$	13,82a $\pm 4,01$
WbT2	1413,67b $\pm 673,06$	0,33a $\pm 0,09$	2,15a $\pm 0,35$	0,45a $\pm 0,08$	0,67a $\pm 0,02$	1,78b $\pm 0,07$	19,46b $\pm 4,18$
CoT0	877,36a $\pm 387,11$	0,35a $\pm 0,09$	2,20a $\pm 0,26$	0,47a $\pm 0,07$	0,68a $\pm 0,01$	1,77a $\pm 0,10$	13,48a $\pm 4,25$
CoT2	1094,73a $\pm 489,04$	0,36a $\pm 0,06$	2,33a $\pm 0,22$	0,48a $\pm 0,05$	0,67a $\pm 0,02$	1,83a $\pm 0,14$	17,39a $\pm 5,21$

Tableau 5. Les paramètres de CM (A) et MM (B) en fonction des modalités de construction de sol sur les données classées. (moyenne, $\pm$ écarts types). N : nombre, A (mm^2) : surface moyenne d'un agrégat, P : périmètre, Ed : diamètre, Ec : excentricité, Sf : forme, A (%) : surface totale d'agrégats en pourcentage, Wb : modalité éponge végétale, Co : modalité confinement. T0 : 2008, T2 : 2010. Les valeurs accompagnées d'une même lettre au sein d'une même colonne ne sont pas significativement différentes (Mann-Whitney test).

	N	A (mm^2)	P (mm)	Ed (mm)	Ec	Sf	A (%)
WbT0	408,83a $\pm 176,43$	0,74a $\pm 0,10$	4,07a $\pm 0,25$	0,86a $\pm 0,07$	0,77a $\pm 0,01$	2,22a $\pm 0,15$	13,67a $\pm 3,93$
WbT2	663,42b $\pm 259,66$	0,65a $\pm 0,14$	4,02a $\pm 0,39$	0,80a $\pm 0,10$	0,77a $\pm 0,02$	2,45b $\pm 0,15$	19,15b $\pm 4,06$
CoT0	445,45a $\pm 174,8$	0,66a $\pm 0,11$	3,92a $\pm 0,2$	0,81a $\pm 0,07$	0,77a $\pm 0,01$	2,35a $\pm 0,25$	13,31a $\pm 4,17$
CoT2	583,36a $\pm 265,31$	0,66a $\pm 0,10$	4,07a $\pm 0,24$	0,82a $\pm 0,06$	0,76a $\pm 0,01$	2,45a $\pm 0,29$	17,19a $\pm 5,13$

(A)

	N	A (mm^2)	P (mm)	Ed (mm)	Ec	Sf	A (%)
WbT0	385,833a $\pm 210,671$	0,008a $\pm 0,000$	0,322a $\pm 0,008$	0,094a $\pm 0,002$	0,580a $\pm 0,014$	1,140a $\pm 0,013$	0,15a $\pm 0,09$
WbT2	750,250b $\pm 434,952$	0,008a $\pm 0,001$	0,326a $\pm 0,015$	0,095a $\pm 0,004$	0,586a $\pm 0,019$	1,144a $\pm 0,013$	0,31b $\pm 0,20$
CoT0	431,909a $\pm 218,469$	0,008a $\pm 0,000$	0,324a $\pm 0,011$	0,095a $\pm 0,003$	0,582a $\pm 0,019$	1,142a $\pm 0,013$	0,17a $\pm 0,09$
CoT2	511,364a $\pm 234,390$	0,008a $\pm 0,000$	0,318a $\pm 0,010$	0,094a $\pm 0,003$	0,568a $\pm 0,020$	1,131a $\pm 0,012$	0,2a $\pm 0,09$

(B)

Annexe2. Takaitau (Hausa abstract)

[Kasarkira](#) sabon nau'i ne a cikin rukunnaƙaƙasa, wanda ke da ƙaƙƙarƙan tasirin ɗan Adam a kansu. Sun ƙunshi ababen da suka fito daga ruƙa da ki-ruƙa, waɗanda asalinsu zai iya kasancewa na halitta (yadda Allah Ya yi su) ko kuma ƙirƙirarre. Yawan wuraren dake ƙunshe da Kasarkira na ƙaruwa a doron ƙasa. Yiyuwar tasirin da za su iya yi ko dai ta hanyar fitowar tsirrai ko kuma gurɓatar muhalli, ya sa lalle a samu ilmi dangane da yadda suke aiki da kuma yadda suke sauyigaba. Burguza (dunkulewar ruƙa da ki-ruƙa) muhimmin mataki ne ƙasamu. Bugu da ƙari, za a iya ɗaukar ɓaraguzai a matsayin mahadun tarihin ƙasa da kuma manunin amfaninta ga halittu. Don haka, nazarin yadda [burguza](#) ke wanzuwa hanya ce da ta dace a bi wajen fahimtar yadda [Kasarkira](#) ke aiki da kuma zuwa matsayin da za ta sauyigaba. Aiki na farko bisa tsari ya ba mu damar gina ƙa'idodin ƙididdiga ta kai tsaye ba tare da ɓurgujewa ba, ta [ɓuraguzai](#) da kuma sarari/hudoji dake tsakanin ɓuraguzan ta hanyar nazarin majigan/hotunan [rezaƙasai](#) marassa kauri. An yi rezaƙasai marasa kauri ne ta ɗibar [tsakurai](#) a wani filin gwaji mai girman kadada/eka/hekta guda, inda aka yi wani aiki na samar da Kasarkira. Sakamako ya nuna cewa wannan Kasarkira tana dabewa abin da ke haifar da raguwar hudoji/sararrai waɗanda gyarinsu ya wuce $>2000 \mu\text{m}$, da kuma ƙaruwar hudoji/sararrai waɗanda gyarinsu ya yi kasa ga $<25 \mu\text{m}$. Duk da wannan dabewa, matsakaicin nuniyar burguza yana ƙaruwa. Domin yin nazarin gudaniyar sararai/hudoji da ɓurguzar wannan ginanniyar Kasarkira, ƙarƙashin dalilan [kasamu](#) kamar haka : yanayi (jika-bushewa), da ayukkan halittu (tsirrai da tana), an ƙirƙiri wani dandamali na sa-ido kan abin da ke faruwa cikin ƙasa kai tsaye. Wannan dandamalin ya ba mu damar ci gaba da sa-ido don lura da halayyar ababen da ke cikin ƙasar a kai tsaye, ta hanyar majigan da ake dauka bayan kowad'anne sa'o'i biyu cikin watanni takwas. Sakamakon nazarin majigan ya nuna cewa a farko-farkon sauyigabar ƙasa, sarari da burguza na ƙaruwa ainun cikin haykunan ginin Kasarkirar. Sai kuma su ragu ainun a haykunin "jika da bushewa", amma kuma su ci gaba da ƙaruwa a haykunin "tsiro" da haykunin "tsiro-da-tana". Wannan ƙari yana dogara ne ga tsufan sayyun tsirrai da kuma yawan aikace-aikacen tana. Ba shakka, sabbi da tsaffin sayyu (saiwowi) suna haifar da raguwar shirinar ƙasa yayin da kuma tsaffin sayyu ko waɗanda suka mutu suke wanzar da ƙarinta. Sai dai ita kuma tana tana samar, ta kuma ruguzar da shirinar ; illa dai, galibi, tsanantar aikace-aikacen tana yana inganta shirinar ƙasa . Don haka, "ginanniyar Kasarkirar", ƙasa ce ta gwaji, wadda ƙumshinta na « [ruƙa da ki-ruƙa](#) » da aikin da take yi an san tushensu , in an kwatanta da wadda ake kira "ƙasar halitta". Lallai ita "ƙasar halitta" da ta sauyigaba, kusan kullum babu sani game da lokacin da ta fara samuwa. Don haka, naɗewar wannan bincike za ta iya kasancewa ba da gudummuwa wajen wayar da kai, galibi, game da samuwar ɓuraguzai a matakan farko na ƙasamu.

Références bibliographiques

- Abiven, S., Menasseri, S., et Chenu, C. (2009). The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability - A literature analysis. *Soil Biology and Biochemistry* **41**, 1-12.
- Abu-Sharar, T. M. (1988). Stability of Soil Aggregates as Inferred from Optical Transmission of Soil Suspensions: Abstract. *Soil Sci Soc Am J* **52**, 951-954.
- Abu-Sharar, T. M. (1996). Modification of hydraulic properties of a semiarid soil in relation to seasonal applications of sewage sludge and electrolyte-producing compounds. *Soil Technology* **9**, 1-13.
- Adderley, W. P., Simpson, I. A., et Davidson, D. A. (2002). Colour description and quantification in mosaic images of soil thin sections. *Geoderma* **108**, 181-195.
- Amezket, E. (1999). Soil Aggregate Stability: A Review. *Journal of Sustainable Agriculture* **14**, 60.
- Amezket, E., Aragüés, R., et Gazol, R. (2004). Infiltration of water in disturbed soil columns as affected by clay dispersion and aggregate slaking. *Spanish Journal of Agricultural Research* **2**, 22.
- Amundson, R., Guo, Y., et Gong, P. (2003). Soil Diversity and Land Use in the United States. *Ecosystems* **6**, 470-482.
- Angers, D. A., et Caron, J. (1998). Plant-induced Changes in Soil Structure: Processes and Feedbacks. *Biogeochemistry* **42**, 55-72.
- Attou, F., et Bruand, A. (1998). Experimental study of 'fragipans' formation in soils. Role of both clay dispersion and wetting-drying cycles. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science* **326**, 545-552.
- Aubert, G., et Boulaine, J. (1972). "La Pédologie," Presse universitaire de France, Paris.
- Avery, B. W. (1980). "Soil classification of England and Wales. in Lefort et al (2009)," Rep. No. No 14. Harpenden.
- Aydemir, S., Keskin, S., et Drees, L. R. (2004). Quantification of soil features using digital image processing (DIP) techniques. *Geoderma* **119**, 1-8.
- Bachmann, J., Guggenberger, G., Baumgartl, T., Ellerbrock, E. H., Urbanek, E., Goebel, M. O., Kaiser, K., Horn, R., et Fischer, W. R. (2007). Physical carbon sequestration mechanisms under special consideration of soil wettability. *Journal of Plant Nature Soil Science*, 12.
- Badin, A.-L., Bedell, J.-P., et Delolme, C. (2009). Effect of water content on aggregation and contaminant leaching: the study of an urban Technosol. *Journal of Soils and Sediments* **9**, 653-663.
- Baize, D. (2000). "Guide des analyses en pédologie : choix, expression, présentation, interprétation," 2/Ed. Institut national de la recherche agronomique, Paris.
- Baize, D., et Girard, M. C. (1992). "Référentiel pédologique: Principaux sols d'Europe," 1/Ed. Quae, Versailles.
- Baize, D., et Girard, M. C. (2008). "Référentiel pédologique," 3/Ed. Quae, Versailles.
- Barros, E., Curmi, P., Hallaire, V., Chauvel, A., et Lavelle, P. (2001). The role of macrofauna in the transformation and reversibility of soil structure of an oxisol in the process of forest to pasture conversion. *Geoderma* **100**, 193-213.

- Bartoli, F., Burtin, G., et Herbillon, A. J. (1991). Disaggregation and clay dispersion of Oxisols: Na resin, a recommended methodology. *Geoderma* **49**, 301-317.
- Barton, G., et Delmas, P. (2002). A semi-automated Colour Predicate for Robust Skin Detection. pp. 23. University of Auckland, Computer science Department.
- Bearden, B., et Petersen, L. (2000). Influence of arbuscular mycorrhizal fungi on soil structure and aggregate stability of a vertisol. *Plant and Soil* **218**, 173-183.
- Beare, M. H. (1994). Aggregate-protected and unprotected organic matter pools in conventional- and no-tillage soils. In: Amezketa; (1999). Soil Aggregates Stability. a review. *Soil Science Society of America Journal* **58**, 787-795.
- Bechet, B., Carré, F., Florentin, L., Leyval, C., Montanarella, L., Morel, J. L., Raimbault, G., Rodriguez, F., Rossignol, J. P., et Schwartz, C. (2009). Caractéristiques et fonctionnement des sols urbains. In "sous les pavés, la terre" (Omniscience, ed.), pp. 45 -77. Cheverry C et Gascuel C Montreuil.
- Béghin, C., et Dubois, P. (2003). L'art du film: une introduction. (D. B. Université, ed.). De Boeck & Larcier.
- Bellenger, N. G., Grothues, F., Smith, G. C., et Pennell, D. J. (2000). Quantification of Right and Left Ventricular Function by Cardiovascular Magnetic Resonance. *Herz* **25**, 392-399.
- Bethlenfalvay, G. J., Cantrell, I. C., Mihara, K. L., et Schreiner, R. P. (1999). Relationships between soil aggregation and mycorrhizae as influenced by soil biota and nitrogen nutrition. *Biology and Fertility of Soils* **28**, 356-363.
- Blanchart, E., Marilleau, N., Chotte, J. L., Drogoul, A., Perrier, E., et Cambier, C. (2009). SWORM: An agent-based model to simulate the effect of earthworms on soil structure. *European Journal of Soil Science* **60**, 13-21.
- Bonneau, M., et Souchier, B. (1994). "Pédologie: constituants et propriétés du sol," 2/Ed. Masson, Paris.
- Bossuyt, H., Denef, K., Six, J., Frey, S. D., Merckx, R., et Paustian, K. (2001). Influence of microbial populations and residue quality on aggregate stability. *Applied Soil Ecology* **16**, 195-208.
- Bottinelli, N., Henry-des-Tureaux, T., Hallaire, V., Mathieu, J., Benard, Y., Duc Tran, T., et Jouquet, P. (2010). Earthworms accelerate soil porosity turnover under watering conditions. *Geoderma* **156**, 43-47.
- Bouché, M. B. (1977). Stratégies lombriciennes. In: Pierret et al (2002). 3D reconstruction and quantification of macropores using X-ray computed tomography and image analysis. *Ecological Bulletins*, 10.
- Bravo-Garza, M. R., Bryan, R. B., et Voroney, P. (2009). Influence of wetting and drying cycles and maize residue addition on the formation of water stable aggregates in Vertisols. *Geoderma* **151**, 150-156.
- Bronick, C. J., et Lal, R. (2005). Soil structure and management: a review. *Geoderma* **124**, 3-22.
- Brown, G. G., Barois, I., et Lavelle, P. (2000). Regulation of soil organic matter dynamics and microbial activity in the drilosphere and the role of interactions with other edaphic functional domains. *European Journal of Soil Biology* **36**, 177-198.

- Bullock, P., Fedoroff, N., Jongerius, A., Stoops, G., Tursina, T., et Babel, U. (1985). "Handbook for soil thin section description," Waine Research, Albrighton.
- Calvet, R. (2003). "Le sol; Propriétés et fonctions," France Agricole/Ed. Dunod, Paris.
- Camuzard, J. P. (2001). Fonctionnement du système sol. Engref, Paris.
- Caro, G., Abourachid, A., Decaëns, T., Buono, L., et Mathieu, J. (2012). Is earthworms' dispersal facilitated by the ecosystem engineering activities of conspecifics? *Biology and Fertility of Soils* **48**, 961-965.
- Caron, J., Banton, O., Angers, D. A., et Villeneuve, J. P. (1996). Preferential bromide transport through a clay loam under alfalfa and corn. *Geoderma* **69**, 175-191.
- Carson, J. K., Gonzalez-Quinones, V., Murphy, D. V., Hinz, C., Shaw, J. A., et Gleeson, D. B. (2010). Low pore connectivity increases bacterial diversity in soil. *Applied and Environmental Microbiology* **76**, 3936-3942.
- Carter, M. R. (1994). A review of conservation tillage strategies for humid temperate regions. In: Amezketi; (1999). Soil Aggregates stability: a review. *Soil and Tillage Research* **31**, 289-301.
- Centre des Sciences des Processus Industriels et Naturels, S. (2000). Cours d'analyse d'images. pp. 35, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.
- Chappell, N. A., Ternan, J. L., et Bidin, K. (1999). Correlation of physicochemical properties and sub-erosional landforms with aggregate stability variations in a tropical Ultisol disturbed by forestry operations. *Soil and Tillage Research* **50**, 55-71.
- Chermant, J.-L., et Serra, J. (1996). Automatic Image Analysis Today. *Microsc. Microanal. Microstruct.* **7**, 279-288.
- Churchman, G. J., et Take, K. R. (1987). Stability of aggregates of different size grades in allophonic soils from volcanic ash in New Zealand. In: Le Bissonnais Y., Le Souder C. (1995). Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. . *Etudes et Gestion des Sols* **2**, 13.
- Cocquerez, J.-P. (1995). "Analyse d'images : filtrage et segmentation," Masson, Paris.
- Condat, L. (2010). Segmentation et quantification d'image rapides par mean-shift accéléré. Caen.
- Cosentino, D. J. (2006). Contribution de la matière organique à la stabilité de la structure des sols limoneux cultivés. Effet des apports organiques à court terme. Sciences agronomiques, INA-PG, Paris.
- Coster, M., et Chermant, J.-L. (1989). "Précis d'analyse d'images," Presses du CNRS, Paris.
- D. Cluzeau, G. Pérès, M. Guernion, R. Chaussod, J. Cortet, M. Fargette, F. Martin-Laurent, T. Mateille, C. Pernin, J-F. Ponge, N. Ruiz-Camacho, C. Villenave, L. Rougé, V. Mercier, A. Bellido, M. Cannavacciuolo, D. Piron, D. Arrouays, L. Boulonne, C. Jolivet, P. Lavelle, E. Velasquez, O. Plantard, C. Walter, B. Foucaud-Lemercier, S. Tico, Giteau, J.-L., et Bispo, A. (2009). Intégration de la biodiversité des sols dans les réseaux de surveillance de la qualité
- des sols : Exemple du programme-politte à l'échelle régionale, le RMQS BioDiv. *Etude et gestion des Sols*. **16**, 16.

- Dalby, P. R., Baker, G. H., et Smith, S. E. (1996). "Filter paper method" to remove soil from earthworm intestines and to standardise the water content of earthworm tissue. *Soil Biology and Biochemistry* **28**, 685-687.
- De Gryze, S., Six, J., Brits, C., et Merckx, R. (2005). A quantification of short-term macroaggregate dynamics: influences of wheat residue input and texture. *Soil Biology and Biochemistry* **37**, 55-66.
- De Leenheer, L., et De Boodt, M. (1959). Determination of aggregate stability by the change in Mean Weight Diameter. In. Le Bissonnais Y., Le Souder C. (1995). Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. . *Etudes et Gestion des Sols* **2**, 13.
- Denef, K., Six, J., Bossuyt, H., Frey, S. D., Elliott, E. T., Merckx, R., et Paustian, K. (2001a). Influence of dry-wet cycles on the interrelationship between aggregate, particulate organic matter, and microbial community dynamics. *Soil Biology and Biochemistry* **33**, 1599-1611.
- Desrosières, A. (2008). L'argument statistique. Pour une sociologie historique de la quantification . Paris, presses de l'école des mines, 2008. *Revue d'Anthropologie des Connaissances* **3**, 26.
- Devaux, M.-F., Sire, A., et Papineau, P. (2009). Macrovision et analyse granulométrique en niveaux de gris pour l'analyse histologique de tissus végétaux. *Le Cahier des Techniques de l'Inra*, 7.
- Dexter, A. R. (1988). Advances in characterization of soil structure. *Soil and Tillage Research* **11**, 199-238.
- Dexter, A. R., Richard, G., Arrouays, D., Czyz, E. A., Jolivet, C., et Duval, O. (2008). Complexed organic matter controls soil physical properties. *Geoderma*, 7.
- Díaz-Zorita, M., Perfect, E., et Grove, J. H. (2002). Disruptive methods for assessing soil structure. *Soil and Tillage Research* **64**, 3-22.
- Duchaufour, P., et Souchier, B. (1983). "Pédologie: pédogenèse et classification, 2ème édition revue et augmentée," Masson/Ed., Paris.
- Duchaufour, P., Souchier, B., et Bonneau, M. (1977). "Pédologie: Pédogenèse et classification," Masson/Ed., Paris.
- Dupas, A. (2009). Segmentation d'images 3D à l'aide de critères topologiques en utilisant un modèle basé cartes. In "Ecole Jeunes Chercheurs du GdR-IM : EJCIM'09", Lyon.
- Edwards, A. P., et Bremner, J. M. (1967). Dispersion of soil particles by sonic vibration.. In. Le Bissonnais Y., Le Souder C. (1995). Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. *Etudes et Gestion des Sols* **2**, 13.
- Elmoutaouakkil, A., Peyrin, F., et Fuchs, G. (2001). Quantification à partir d'images microtomographiques 3D de la structure des mousses solides. pp. 536 ; 748 p., Toulouse.
- Emerson, W. W. (1959). Stability of soil crumbs. In. Six et al (2004). A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil & Tillage Research*, 24.
- Emerson, W. W. (1967). A classification of soil aggregates based on their coherence in water. In. Le Bissonnais Y., Le Souder C. (1995). Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. . *Etudes et Gestion des Sols*. **2**, 13.
- Ernst, G., Müller, A., Göhler, H., et Emmerling, C. (2008). C and N turnover of fermented residues from biogas plants in soil in the presence of three different earthworm species (*Lumbricus terrestris*, *Aporrectodea*

- longa, Aporetodea caliginosa). *Soil Biology and Biochemistry* **40**, 1413-1420.
- Farres, P. J. (1987). The dynamics of rainsplash erosion and the role of soil aggregate stability. In Le Bissonnais et al (1998). Crusting, runoff and sheet erosion on silty loamy soils at various scales and upscaling from m² to small catchments. *Catena* **14**, 119-130.
- Field, D. J., et Minasny, B. (1999). A description of aggregate liberation and dispersion in A horizons of Australian Vertisols by ultrasonic agitation. *Geoderma* **91**, 11-26.
- Fristensky, A. J., et Grismer, M. E. (2009). Evaluation of ultrasonic aggregate stability and rainfall erosion resistance of disturbed and amended soils in the Lake Tahoe Basin, USA. *CATENA* **79**, 93-102.
- Fründ, H.-C., Butt, K., Capowicz, Y., Eisenhauer, N., Emmerling, C., Ernst, G., Potthoff, M., Schädler, M., et Schrader, S. (2010). Using earthworms as model organisms in the laboratory: Recommendations for experimental implementations. *Pedobiologia* **53**, 119-125.
- Gee, G. W., et Bauder, J. W. (1986). Particle-size analysis: Abstract. In "American Society of Agronomy, INC".
- Gobat, J. M., Aragno, M., et Mathey, W. (1998). "Le sol vivant: bases de pédologie; biologie des sols," 1/Ed. Presses polytechniques et universitaire romandes, Lausanne.
- Greenland, D. J., et Pereira, H. C. (1977). Soil Damage by Intensive Arable Cultivation: Temporary or Permanent? [and Discussion]. in Pagliai et al; 2004. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences* **281**, 193-208.
- Grieve, I. C. (1980). The magnitude and significance of soil structure stability declines under cereal cropping. In Le Bissonnais Y., Le Souder C. (1995). Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. *Etudes et Gestion des Sols* **2**, 13.
- Griselin, M., et Nageleisen, S. (2008). « Quantifier » le paysage au long d'un itinéraire à partir d'un échantillonnage photographique au sol ». *Cybergeo*, 12.
- Gross, M. (1981). Les bases empiriques de la notion de prédicat sémantique. *Langages*, 7-52.
- Guilloré, P. (1980). "Méthode de fabrication mécanique et en série des lames minces. In. Berthet et Ferrier (2003)." Institut National Agronomique, Paris.
- Hadjigeorgiou, J., et Lemy, F. (2005). "Développement d'un système d'analyse d'images pour la caractérisation des massifs rocheux." IRSST, Montréal.
- Hallaire, V., et Curmi, P. (1994). Image analysis of pore space morphology in soil sections, in relation to water movement. *Soil micromorphology*, 559-567.
- Hanbury, A. (2002). Morphologie Mathématique sur le Cercle Unité avec applications aux teintes et textures orientées Morphologie Mathématique, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Paris.
- Haynes, R. J., et Beare, M. H. (1997). Influence of six crop species on aggregate stability and some labile organic matter fractions. *Soil Biology and Biochemistry* **29**, 1647-1653.
- Henao Valencia, L. J. (2008). Etude des bases moléculaires de l'agrégation des sols par des exopolysaccharides bactériens. Doctorat Chimie Physique moléculaire et structurale, Université Joseph Fourier, Grenoble.

- Henin, S., Monnier, G., et Combeau, A. (1958). Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. In Le Bissonnais Y., Le Souder C. (1995). Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. . *Etudes et Gestion des Sols* **2**, 13.
- Hilgard, E. W. (1914). ""Soils," The Macmillan Company, New York. In Jenny, H.(1941). Factors of Soil Formation: A system quantitative pedology. McGraw-Hill."
- Hollis, J. M. (1991). The Classification of Soils in Urban Areas. In "Soils in the urban environment" (B. S. Publications, ed.), pp. 173, Oxford.
- Huhta, V, Wright, D, H., Coleman, et D, C. (1989). "Characteristics of defaunated soil. I: A comparison of three techniques applied to two different forest soils," Urban & Fischer, Jena, ALLEMAGNE.
- Hütsch, B. W., Jürgen, A., et Wolfgang, M. (2002). Plant rhizodeposition - an important source for carbon turnover in soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **165**, 397-407.
- INRA (2006). Sol virtuel - Accueil.
- Isbell, R. F. (2002). "The Australian soil classification," SCIRO Land and water.
- Itami, K., et Kyuma, K. (1995). Dispersion behavior of soils from reclaimed lands with poor soil physical properties and their characteristics with special reference to clay mineralogy. *Soil Science and Plant Nutrition* **41**, 45-54.
- IUSS_Working_Group_WRB (2006). "World Reference Base for soil resources: A framework for international classification, correlation and communication," Rep. No. 103. Food and Agroculture Organisation, Rome.
- IUSS_Working_Group_WRB (2007). "World Reference Base for soil resources, first apdate 2007.," Rep. No. 103. Food and Agroculture Organisation, Rome.
- Jahn, R., Blume, H. P., Asio, V. B., Spaargaren, O., et Schad, P. (2006). Guidelines for soil description, 4th edition. FAO.
- Jarvis, S., Tisdall, J., Oades, M., Six, J., Gregorich, E., et Kögel-Knabner, I. (2012). Landmark papers. *European Journal of Soil Science* **63**, 1-21.
- Jastrow, J. D. (1991). Methods for assessing the effects of biota on soil structure. In Field et al (2006). Modelling aggregate liberation and dispersion of three soil types exposed to ultrasonic agitation. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **34**, 279-303.
- Jenny, H. (1941). Factors of Soil Formation: A system of Quantitative Pedology. (M. Graw-Hill, ed.). Dover Publications INC.
- Joffe, J. S. (1936). "Pedology. In Jenny, H. (1941). Factors of soil formation: A system of quantitative pedology. McGraw-Hill," Rutgers University Press, New Brunswick, N.
- Johnson, W. M., McClelland, J. E., McCaleb, S. B., Ulrich, R., Harper, W. G., et Hutchings, T. B. (1960). Classification and Description of Soil Pores. *Soil Science* **89**.
- Kay, B. D. (1998). Soil structure and organic carbone: A review. In "Soil processes and the carbone cycle." (C. Press, ed.). Lal, R. Kimble, J.M. Follet, R.F. Stewart, B.A., Ohio.
- Kemper, W. D., et Rosenau, R. C. (1986). Aggregates stability and side distribution. *Agriculture Research service, USDA*, 18.
- Kögel-Knabner, I., Guggenberger, G., Kleber, M., Kandeler, E., Kalbitz, K., Scheu, S., Eusterhues, K., et Leinweber, P. (2007). Organo-mineral association in temperate soils: Integrating biology, mineralogy and organic matter chemistry. *Journal of Plant Nature Soil Science*, 21.

- Kunt, M. (1993). "Traitement numérique des images," Presses polytechniques et universitaires romandes; CNET-ENST, Lausanne ;[Paris].
- Kunt, M. (2000). "Reconnaissance des formes et analyse de scènes," Presses polytechniques et universitaires romandes; CNET-ENST, Lausanne ;[Paris].
- Lamandé, M., Hallaire, V., Curmi, P., Pérès, G., et Cluzeau, D. (2003). Changes of pore morphology, infiltration and earthworm community in a loamy soil under different agricultural managements. *CATENA* **54**, 637-649.
- Latrous, S., et Boucher, J. (1984). Comptage du zooplancton par analyse d'image-automatisation de l'extraction des paramètres morphologiques du zooplancton. In "Image : traitement, synthèse, technologies et applications", pp. 6, Biarritz.
- Le Bissonnais, Y., et Le Souder, C. (1995). Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. *Etudes et Gestion des Sols* **2**, 13.
- Ledru, Y., PIQUET, R., MICHEL, L., SCHMIDT, F., et BERNHART, G. (2009). Quantification 2-D et 3-D de la porosité par analyse d'images dans les matériaux composites stratifiés aéronautiques. In "16ème Journées Nationales sur les Composites", pp. 11, Toulouse.
- Lee, K. E., et Foster, R. C. (1991). Soil fauna and soil structure. In Six et al; (2004). A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota and soil organic matter dynamics. *Australian Journal of Soil Research* **29**, 745-775.
- Lefort, C. (2009). Contribution à la définition et à la classification des Technosols. Sciences Agronomiques, INPL, Nancy.
- Leguedois, S., Morel, J.-L., Cortet, J., Ouvrard, S., Séré, G., Watteau, F., et Schwartz, C. (2012). Modelling pedogenesis in the Anthropocene, Soumis. *Geoderma*.
- Lehrsch, G. A. (1991). Freezing effects on aggregate stability affected by texture, mineralogy, and organic matter. *Soil Science Society of America Journal* **55**, 1401-1406.
- Lehrsch, G. A. (1993). Freezing effects on aggregate stability of soils amended with lime and gypsum. *Catena Supplement* **24**, 115-127.
- Levy, G. J. (1993). Microaggregate stability of kaolinitic and illitic soils determined by ultrasonic energy. In. Fristensky et al. (2008). A simultaneous model for ultrasonic aggregate stability assesment. *Soil Science Society of America Journal* **57**, 803-808.
- Lin, H. (2011). Three Principles of Soil Change and Pedogenesis in Time and Space. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **75**, 2049-2070.
- Loch, R. J. (1989). Aggregate breakdown under rain : its management and interpretation. In/ Le bissonnais and Le Souder (1989). Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion.
- Low, A. J. (1967). Measurement of stability of moist soil aggregates to falling waterdrops according to Low; In. Le Bissonnais Y., Le Souder C. (1995). Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. *Etudes et Gestion des Sols*. **2**, 13.
- Lowe, C. N., et Butt, K. R. (2005). Culture techniques for soil dwelling earthworms: A review. *Pedobiologia* **49**, 401-413.
- Luxmoore, R. J. (1981). Micro-, meso-, and macroporosity of soil. In Perret et al (1999). *Soil Sci. Soc. Am. J. United States* **45:3**, Medium: X; Size: Pages: 671.

- Mahboubi, A. A., Lal, R., et Faussey, N. R. (1993). Twenty-Eight Years of Tillage Effects on Two Soils in Ohio. *In*. Amezketa (1999). *Soil Sci Soc Am J* **57**, 506-512.
- Marashi, A. R. A., et Scullion, J. (2003). Earthworm casts form stable aggregates in physically degraded soils. *Biology and Fertility of Soils* **37**, 375-380.
- Marschallinger, R. (1997). Automatic mineral classification in the macroscopic scale. *Computers and Geosciences* **23**, 119-126.
- Martin, A. (1991). Short- and long-term effects of the endogeic earthworm *Millsonia anomala* (Omodeo) (Megascolecidae, Oligochaeta) of tropical savannas, on soil organic matter. *In*. Six et al (2004). *Biology and Fertility of Soils* **11**, 234-238.
- Matheron, G., et Serra, J. (2002). The Bierth of Mathematical Morphology. *In* "Mathematical Morphology: proceedings of the VIth International Symposium ISMM" (H. T. a. R. Beare, ed.), pp. 16. CSIRO Publishing, Sydney.
- Mathieu, C., et Pielain, F. (2003). "Analyse chimique des sols: Méthodes choisies," Tec & Doc, Paris.
- Mathieu, C., Pielain, F., Asseline, J., Chossat, J.-C., et Valentin, C. (1998). "Analyse physique des sols: méthodes choisies," Lavoisier/Ed. TEC & DOC, Lassy-les-Châteaux.
- McCartney, D. A., Stinner, B. R., et Bohlen, P. J. (1997). Organic matter dynamics in maize agroecosystems as affected by earthworm manipulations and fertility source. *Soil Biology and Biochemistry* **29**, 397-400.
- Méadel, C. (1998). De l'émergence d'un outil de quantification. *Quaderni*, 63-78.
- Mermillod-blondin, R. (2003). "Minéralogie quantitative au microscope électronique à balayage et analyse d'images Application à la caractérisation minéralogique de résidus miniers." Ecole Polytechnique de Montréal; INPL, Nancy.
- Monsérié, M.-F., Watteau, F., Villemin, G., Ouvrard, S., et Morel, J.-L. (2009). Technosol genesis: identification of organo-mineral associations in a young Technosol derived from coking plant waste materials. *Journal of Soils and Sediments* **9**, 537-546.
- Monsérié, M. F. (2009). Processus d'agrégation dans les sols anthropisés pollués végétalisés ; conséquences sur la disponibilité des polluants, INPL, Nancy.
- Mooney, S. J., Morris, C., Craigon, J., et Berry, P. (2007). Quantification of soil structural changes induced by cereal anchorage failure: Image analysis of thin sections. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **170**, 363-372.
- Murphy, C. P. (1986). Thin section preparation soils and sediments AB Academic Publishers, Berkhamsted *in* Camuti and McGuire (1999). pp. 146.
- Nandi, A., et Luffman, I. (2012). Erosion Related Changes to Physicochemical Properties of Ultisols Distributed on Calcareous Sedimentary Rocks. *Journal of sustainable development* **5**, 17.
- Niewczas, J., et Witkowka-Walczak, B. (2005). The soil aggregates stability index (ASI) and its extreme values. *Soil & Tillage Research* **9**.
- Nimmo, J. R. (2004). Porosity and Pore Size Distribution, *in* Hillel, D., ed. *Encyclopedia of soil in the Environment*: London. *Elsevier* **3**, 8.
- Noesis (2008). Visilog 6 Reference Guide. pp. 565, Gif sur Yvette.
- Noesis (2012). Visilog 7 Reference Guide. pp. 565, Gif sur Yvette.

- Oades, J. M. (1984). Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant and Soil* **76**, 319-337.
- Oades, J. M. (1993). The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. . *Geoderma*, 23.
- Oual, S. (2006). Quantification par analyse d'images de la granulométrie des roches fragmentées: amélioration de l'extraction morphologique des surfaces, amélioration de la reconstruction stéréologique, Ecole Nationale Supérieure de Mine de Paris, Paris.
- Pagliai, M. (1988). Soil porosity aspects: *in* Arocena et al; 2010: Initial soil development under pioneer plants species in metal mine waste deposit. *The International Agrophysics*, 215-232.
- Pagliai, M., et Vignozzi, N. (2002). Image analysis and microscopic techniques to characterize soil pore system, in Kutilek et al; 2002: Physical methods in agriculture : approach to precision and quality. pp. 27. Kluwer Academic / Plenum Publishers, New York.
- Pagliai, M., Vignozzi, N., et Pellegrini, S. (2004). Soil structure and the effect of management practices. *Soil and Tillage Research* **79**, 131-143.
- 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. Biology, Rennes1, Rennes.
- Perret, J., Prasher, S. O., Kantzas, A., et Langford, C. (1999). Three-dimensional quantification of macropore networks in undisturbed soil cores. **63**, 14.
- Petersen, A., Gröngroft, A., et Miehlich, G. (2010). Methods to quantify the pedodiversity of 1 km² areas -- results from southern African drylands. *Geoderma* **155**, 140-146.
- Pey, B. (2010). Diversité et rôle fonctionnel de la faune du sol dans un sol construit en milieu industriel: contribution à la modélisation de l'évolution d'un Technosol. Sciences agronomiques, INPL.
- Pierret, A., Capowiez, Y., Belzunces, L., et Moran, C. J. (2002). 3D reconstruction and quantification of macropores using X-ray computed tomography and image analysis. *Geoderma* **106**, 247-271.
- Pierret, A., Capowiez, Y., Moran, C. J., et Kretzschmar, A. (1999). X-ray computed tomography to quantify tree rooting spatial distributions. *Geoderma* **90**, 307-326.
- Pikul, J. L., Jr., Chilom, G., Rice, J., Eynard, A., Schumacher, T. E., Nichols, K., Johnson, J. M. F., Wright, S., Caesar, T., et Ellsbury, M. (2009). Organic Matter and Water Stability of Field Aggregates Affected by Tillage in South Dakota. *Soil Sci Soc Am J* **73**, 197-206.
- Piñuela, J., Alvarez, A., Andina, D., Heck, R. J., et Tarquis, A. M. (2010). Quantifying a soil pore distribution from 3D images: Multifractal spectrum through wavelet approach. *Geoderma* **155**, 203-210.
- Plante, A. F., Feng, Y., et McGill, W. B. (2002). A modeling approach to quantifying soil macroaggregate dynamics. *Canadian Journal of Soil Science* **82**, 181-190.
- Plante, A. F., et McGill, W. B. (2002). Soil aggregate dynamics and the retention of organic matter in laboratory-incubated soil with differing simulated tillage frequencies. *Soil and Tillage Research* **66**, 79-92.
- Pojasok, T., et Kay, B. D. (1990). Assessment of a combination of wet sieving and turbidimetry to characterize soil structure stability of moist aggregates. In. Le Bissonnais Y., Le Souder C. (1995). Mesurer la

- stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. . *Etudes et Gestion des Sols* **2**, 13.
- Poletika, N. N., et Jury, W. A. (1994). Effects of Soil Surface Management on Water Flow Distribution and Solute Dispersion: *in* Prado *et al* (2009). *Soil Sci. Soc. Am. J.* **58**, 999-1006.
- Prakongkep, N., Suddhiprakarn, A., Kheoruenromne, I., et Gilkes, R. J. (2010). SEM image analysis for characterization of sand grains in Thai paddy soils. *Geoderma* **156**, 20-31.
- Pulleman, M. M., Six, J., Uyl, A., Mrinissen, J. C. Y., et Jongmans, A. G. (2005). Earthworms and management affect organic matter incorporation and microaggregate formation in agricultural soils. . *Applied Soil Ecology* **29**, 15.
- Ramann, E. (1928). " The Evolution and Classification of Soils. *In* Jenny, H (1941). Factors of Soil Formation. A system of quantitative pedology. McGram-Hill," W. Heffer & Sons, Ltd., London.
- Rawls, W. J., Pachepsky, Y. A., Ritchie, J. C., Sobecki, T. M., et Bloodworth, H. (2003). Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma* **116**, 61-76.
- Reeve, M. J., Hall, D. G. M., et Bullock, P. (1980). The effect of soil composition and environmental factors on the shrinkage of some clay British soils. *In* Perret *et al* (1999) *Journal of soil science* **31**, 429-442.
- Rennert, T., Kaufhold, S., Händel, M., Schuth, S., Meißner, S., et Totsche, K. U. (2011). Characterization of a Technosol developed from deposited flue-dust slurry and release of inorganic contaminants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **174**, 721-731.
- Rillig, M. C., Wright, S. F., Shaw, M. R., et Field, C. B. (2002). Artificial climate warming positively affects arbuscular mycorrhizae but decreases soil aggregate water stability in an annual grassland. *Oikos* **97**, 52-58.
- Ringrose-Voase, A. J. (1991). Micromorphology of soil structure: description, quantification, application. *Australian Journal of Soil Research* **29**, 777-813.
- Ringrose-Voase, A. J. (1996). Measurement of soil macropore geometry by image analysis of sections through impregnated soil. *Plant and Soil* **183**, 27-47.
- Rossiter, D. (2007). Classification of Urban and Industrial Soils in the World Reference Base for Soil Resources (5 pp). *Journal of Soils and Sediments* **7**, 96-100.
- Ruellan, A., et Dosso, M. (1993). "Regards sur le sol," Foucher ; AUPELF, Paris; [s.l].
- Ruellan, A., Poss, R., Blanchart, E., Brauman, A., Grimaldi, M., Grünberger, M., Barbiero, M., Chaplot, V., Monga, O., et Bernoux, M. (2008). Les sols, des milieux vivants très fragiles. Les dossiers thématiques de l'IRD. *SUDS en ligne*.
- Ryszkowska, J. (2007). Applications of quantitative image analysis to the description of the morphology of ZrO₂ including 10% Eu³⁺ and their polyurethane nanocomposites. *Microelectronic Engineering* **84**, 538-541.
- San José Martínez, F., Martín, M. A., Caniego, F. J., Tuller, M., Guber, A., Pachepsky, Y., et García-Gutiérrez, C. (2010). Multifractal analysis of discretized X-ray CT images for the characterization of soil macropore structures. *Geoderma* **156**, 32-42.

- Sandri, R., Anken, T., Hilfiker, T., Sartori, L., et Bollhalder, H. (1998). Comparison of methods for determining cloddiness in seedbed preparation. *Soil and Tillage Research* **45**, 75-90.
- Santos, D. (1997). Uniform separation of concentric surface layers from soil aggregates. In: Lal and Bronick (2005). Soil structure and management: a review. *Soil Science Society of America Journal* **61**, 720-724.
- Satchell, J. E. (1983). "Earthworm Ecology: From Darwin to Vermiculture. In: Six et al; (2004). A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota and soil organic matter dynamics,," London.
- Scalenghe, R., et Ferraris, S. (2009). The First Forty Years of a Technosol. *Pedosphere* **19**, 40-52.
- Schutter, M. E., et Dick, R. P. (2002). Microbial Community Profiles and Activities among Aggregates of Winter Fallow and Cover-Cropped Soil. *Soil Sci Soc Am J* **66**, 142-153.
- Séré, G. (2007). Fonctionnement et évolution pédogénétique de Technosols issus d'un procédé de construction de sol. Sciences Agronomiques, INPL, Nancy.
- Séré, G., Ouvrard, S., Magnenet, V., Pey, B., Morel, J. L., et Schwartz, C. (2012). Predictability of the Evolution of the Soil Structure using Water Flow Modeling for a Constructed Technosol. *Vadose Zone Journal* **11**.
- Séré, G., Schwartz, C., Ouvrard, S., Renat, J. C., Watteau, F., Villemin, G., et Morel, J. L. (2010). Early pedogenic evolution of constructed Technosols. *Journal of Soils and Sediments* **10**, 1246-1254.
- Séré, G., Schwartz, C., Ouvrard, S., Sauvage, C., Renat, J.-C., et Morel, J. (2008). Soil construction: A step for ecological reclamation of derelict lands. *Journal of Soils and Sediments* **8**, 130-136.
- Shipitalo, M. J., et Protz, R. (1989). Chemistry and micromorphology of aggregation in earthworm casts. In: Six et al (2004). A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Geoderma* **45**, 357-374.
- Singer, M. J. (1992). Stability of synthetic sand-clay aggregates after wetting and drying cycles. In: Bronick and Lal (2005). Soil structure and management: A review. *Soil Science Society of America Journal* **56**, 1843-1848.
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., et Deneff, K. (2004). A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research* **79**, 7-31.
- Smetak, K. M., Johnson-Maynard, J. L., et Lloyd, J. E. (2007). Earthworm population density and diversity in different-aged urban systems. *Applied Soil Ecology* **37**, 161-168.
- Tisdall, J. M., et Oades, J. M. (1982). Organic matter and water stable-aggregates in soils. *Journal of soil science* **33**, 21.
- Uzarowicz, Ł., Skiba, S., Skiba, M., et Šegvić, B. (2011). Clay-mineral formation in soils developed in the weathering zone of pyrite-bearing schists: a case study from the abandoned pyrite mine in wieściszowice, lower silesia, SW Poland. *Clays and Clay Minerals* **59**, 581-594.
- Van Der Geest, R. J. (1999). Quantification in cardiac MRI. *Journal of Magnetic Resonance Imaging* **10**, 602-608.
- VandenBygaart, A. J., et Protz, R. (1999). The representative elementary area (REA) in studies of quantitative soil micromorphology. *Geoderma* **89**, 333-346.

- Veltman, K. (2000). Mesures, Quantification et sciences. *In* "L'époque de la renaissance: Crises et essors nouveaux (1560-1610)", Vol. 4, pp. 823. John Benjamins.
- Watteau, F., Villemin, G., Burtin, G., et Jocteur-Monrozier, L. (2006). Root impact on the stability and types of microaggregates in silty soil under maize. *European Journal of Soil Science* **57**, 247-257.
- Williams, B. G., Greenland, D. J., Lindstrom, G. R., et Quirk, J. P. (1966). Techniques for the Determination of the Stability of Soil Aggregates. *In*. Amezketa (1999). *Soil Science* **101**, 157-163.
- Wilson, W. S. (1991). "Advances in soil organic matter research. the impact on agriculture and the environment. *In*. Gobat J.M., Aragno M., Mathey W. (1998). Le sol vivant: bases de pédologie; biologie des sols," The royal society of chemistry., Cambridge.
- Yoder, R. E. (1936). A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *In*. Le Bissonnais Y., Le Souder C. (1995). Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. . *Etudes et Gestion des Sols*. **2**, 13.
- Young, R. A. (1984). Method of measuring aggregate stability under waterdrop impact. *In*. Amezketa (1999). Soil aggregate stability: A review. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* **27**, 1351-1354.
- Zangerlé, A., Pando, A., et Lavelle, P. (2011). Do earthworms and roots cooperate to build soil macroaggregates? A microcosm experiment. *Geoderma* **167-168**, 303-309.
- Zdravkov, B., Čermák, J., Šefara, M., et Janků, J. (2007). Pore classification in the characterization of porous materials: A perspective. *Central European Journal of Chemistry* **5**, 385-395.
- Zhang, X. C., et Norton, L. D. (2002). Effect of exchangeable Mg on saturated hydraulic conductivity, disaggregation and clay dispersion of disturbed soils. *Journal of Hydrology* **260**, 194-205.
- Zhou, H., Li, B., et Lu, Y. (2009). Micromorphological analysis of soil structure under no tillage management in the black soil zone of Northeast China. *Journal of Mountain Science* **6**, 173-180.



**AUTORISATION DE SOUTENANCE
DU DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LORRAINE**

o0o

VU LES RAPPORTS ETABLIS PAR :

**Monsieur HILLAIRE Vincent, Chargé de Recherche HDR, INRA Rennes,
Madame COUSIN Isabelle, Chargée de Recherche HDR, INRA Orléans.**

Le Président de l'Université de Lorraine, autorise :

Monsieur JANGORZO Salifou Nouhou

à soutenir devant un jury de l'UNIVERSITE DE LORRAINE, une thèse intitulée :

"Modélisation du processus d'agrégation dans les Technosols"

en vue de l'obtention du titre de :

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LORRAINE

Intitulé du doctorat : **"Sciences Agronomiques"**

Fait à Vandoeuvre, le **22 janvier 2013**

Le Président de l'Université de Lorraine,

Pierre MUTZENHARDT

Pour le Président et par délégation,
La Vice-Présidente du CS



Clotilde BOULANGER

Résumé

Les Technosols forment une nouvelle classe de sols, caractérisée par une forte influence anthropique dont le fonctionnement est peu étudié. L'agrégat étant l'intégrateur de l'histoire du sol et révélateur de son fonctionnement actuel, l'étude du processus d'agrégation est de ce fait une entrée pertinente pour comprendre le fonctionnement des Technosols et les stades vers lesquels ils peuvent évoluer. A partir d'échantillons de sol prélevés sur une parcelle d'un hectare, un protocole non destructif de quantification directe de la porosité et de l'agrégation par analyse d'images a été mis en place. Les résultats montrent qu'au bout de deux ans, le Technosol construit se compacte avec une réduction de la surface de des pores de diamètre $> 25 \mu\text{m}$ et une augmentation des pores $< 25 \mu\text{m}$. Malgré cette compaction, l'agrégation augmente avec le temps. Pour suivre la dynamique de la porosité et d'agrégation de ce Technosol en fonction de facteurs choisis de pédogenèse, un dispositif de visualisation *in situ* a été conçu. Les résultats d'analyse d'images ont montré que dans les stades précoces d'évolution des sols, la porosité et l'agrégation augmentent significativement. Ensuite, elles baissent significativement dans la modalité « humectation-dessiccation » tout en continuant d'augmenter dans les modalités « plante » et « faune + plante ». Cette augmentation est proportionnelle à l'âge des racines et à l'intensité de l'action des vers de terre. Le « Technosol construit » est alors un modèle expérimental dont la constitution organominérale et le fonctionnement sont très largement contrôlés, en comparaison de sols « naturels » évolués dont le point initial de développement est quasi systématiquement inconnu.

Mots clés: Quantification d'agrégation, analyse d'images, pédogenèse de Technosol, porosité, structure du sol, processus d'agrégation

Abstract

Quantifying the process of aggregation in Technosols

Technosols form a new class of soils, which is characterized by a strong anthropogenic influence of which functioning is less studied. Aggregates can be considered as an integrator of soil history and an indicator of soil bio functioning, therefore studying the process of aggregation is a relevant way to understand how technosols operate and states towards which they will evolve. Through samples collected on a one hectare plot, a protocol of non destructive direct quantification of aggregates and porosity by thin sections images analysis has been performed. Results showed that this Technosol is compacting with a decrease of pores with an equivalent diameter $> 2000 \mu\text{m}$ and an increase of those $< 25 \mu\text{m}$. Despite this compaction, the aggregation increases with time. To study the dynamics of porosity and aggregation of this constructed Technosol as function of pedogenetic factors, a device of *in situ* soil visualization has been developed. Results of images analysis showed that, during the early stage of soil evolution, porosity and aggregation increase significantly in all modalities. Then, they significantly decrease in "wetting drying cycle" modality but continued increasing in "plant" and "plant-earthworm" modalities. This increase is proportional to the age of plants roots and intensity of earthworm's activity. The "constructed Technosol" is therefore an experimental soil model whose organomineral contents and function are well controlled compared to so-called "natural soils". In these evolved natural soils, the starting point is quite systematically unknown.

Key words: aggregation quantification, image analysis, pedogenesis of Technosol, porosity, soil structure, process of aggregation