



**RELATIONS ENTRE LA STABILITE STRUCTURALE, LA RESISTANCE AU CISAILLEMENT ET LES
CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES SOLS - APPLICATION SUR TROIS SITES
AGROFORESTIERS**

***RELATIONSHIPS BETWEEN AGGREGATE STABILITY, SHEAR STRENGTH AND SOIL PHYSICO-CHEMICAL
CHARACTERISTICS - APPLICATION ON THREE AGROFORESTRY SITES***

Jérôme NESPOULOUS

Mémoire de fin d'études - Stage en laboratoire de recherche

Master : Sciences et Technologies

Mention : Sciences Appliquées à la Montagne

Spécialité : Equipement, Protection et Gestion du milieu de Montagne (EPGM)

Septembre 2011



NOTICE ANALYTIQUE

MAITRES DE STAGE

Alexia STOKES

Ingénieur de recherche
INRA - UMR AMAP
Boulevard de La Lironde
34398 cedex5 MONTPELLIER
Tel. : +33(0)4 67 6161 54 77
Mail: alexia.stokes@cirad.fr

Yves LE BISSONNAIS

Directeur de recherche
INRA - UMR LISAH
2, place Pierre VIALA
34060 cedex1 MONTPELLIER
Tel. : +33 (0)4 99 61 22 25
Mail: lebisson@supagro.inra.fr

RESPONSABLE DE STAGE

Jérôme POULENARD

Maitre de conférences
INRA - UMR CARRTEL - Université de Savoie – CISM - Edytem
Bâtiment Pôle Montagne - Campus de Technolac
73370 LE BOURGET DU LAC
Tel. : +33(0)4 79 75 88 62
Mail: jerome.poulenard@univ-savoie.fr

REMERCIEMENTS - ACKNOWLEDGMENTS

French

Merci tout d'abord à **Pierre COUTERON** pour m'avoir accueilli dans les locaux du laboratoire UMR AMAP.

Le plus grand de mes « MERCI » est dédié à **Alexia STOKES** sans qui je n'aurais jamais fait ce stage complet, qui m'a accordé sa confiance et a toujours su rester disponible quelque soit la difficulté. Je remercie énormément **Yves LE BISSONNAIS** pour tous ses conseils, son soutien et m'avoir accompagné sur le terrain au Costa Rica. L'un comme l'autre m'ont énormément appris dans une ambiance qui était plus qu'agréable. C'est un enrichissement que je ne pourrai jamais oublier. Je remercie également **Jérôme POULENARD** pour m'avoir tutoré, très bien conseillé et redirigé dans la justesse du rapport. J'en profite pour le remercier ainsi que **Pierre FAIVRE** pour leurs excellents enseignements en pédologie et réhabilitation des sols. Ces derniers ont été indispensables à cette étude.

Merci beaucoup **Murielle GHESTEM et Zhun MAO** pour tout le temps qu'ils m'ont accordé malgré la difficulté de l'aboutissement proche de leur thèse. De même, merci à **Olivier ROUPSARD, Bruno RAPIDEL, Louise MEYLAN, Fabien CHARBONNIER, Thierry FOURCAUD, Bernard BARTHES, Didier BRUNET, Tiphaine CHEVALIER, Alain BERNARD, Nadia BENAHMED**, qui sont tous intervenus sans hésiter et à plusieurs reprises pour me conseiller, m'apporter des données et m'aider dans diverses situations. Merci à l'ensemble des techniciens : **Yves GREMEAUX, Michael GUEROUX & François PAILLET, Chantal GENIEZ & Jean-Luc BELLOTI, Joele TOUCET** pour m'avoir enseigné les différents protocoles et avec qui il sera toujours une joie de travailler. Merci à **Estelle et Laura de Valorhiz** pour la transmission de leurs données qui nous ont été bien utiles et m'avoir à l'occasion dépanné de précieux seaux et pelles lors de mes excavations de terrain. Merci aux **statisticiens** pour m'avoir tout enseigné dans ce domaine, qui m'ont repêché de la noyade au milieu de mes données, avec une mention spéciale pour Mr GLM (**Gille LE MOGUEDEC**) qui l'a fait avec des petits gâteaux et du café. Merci à **Thierry**, l'ouvrier ménager qui a eu maintes fois su adapter son emploi du temps pour ne pas brancher l'alarme lors de mes caprices expérimentaux tardifs. Merci à **ma famille et mes amis** qui ont fait preuve de beaucoup de patience et de tolérance envers mon comportement associable lors des derniers beaux jours de rédaction.

Spanish

Muchísimas gracias a **Mario VILLATORO SANCHEZ** por todo su ayuda de comunicación y información sobre la parcela Llano Bonito. (Y también por su 4x4). Muchas gracias a **Patricia LEANDRO y Douglas** su asistente por sus paciencia cuando dejaba todo patas arriba en el laboratorio y sus ayuda con el vocabulario. Muchas gracias a **Tamara BENJAMIN y Manrique GONZALES VARGAS** por su fantástico escáner y su laboratorio de raíces. Disculpe me, he olvidado el nombre de la **mujer sonriente** quien me preparo el azul de toluidina

English

Thank **Normaniza OSMAN** for your insight, for your delicate work with your tiny hands on the CHN, your english teaching, malesian star attitude and spicy food.

MOTS CLEFS

Erosion hydrique
Glissements de terrain
Stabilité structurale
Cohésion du sol
Densité racinaire
Carbone organique
Argiles
Fer
Aluminium
Agroforesterie
Alluviosol
Andosol
Ferralitisol

RESUME

La stabilité structurale et la résistance au cisaillement du sol (cohésion et angle de frottement interne) qualifient respectivement la sensibilité des sols à l'érosion hydrique de surface et l'érosion en masse (glissements de terrains peu profonds). Cette sensibilité dépend des propriétés intrinsèques des sols et du contexte environnant climatique, écologique, topographique et anthropique. Des mesures de ces deux indicateurs ont été effectuées en conditions in situ et parallèlement : i) sur trois type de sols aux propriétés physico-chimiques différentes : un alluviosol (France), un andosol (Costa Rica) et un ferralitisol (Costa Rica) ; ii) en comparant différents agrosystèmes: Monoculture/Agroforesterie ; iii) en prenant en compte l'effet de profondeur entre l'horizon A et B. L'étude a permis de décrire au mieux le caractère érodible intrinsèque des sols, de relever les influences des propriétés physico-chimiques des sols sur la stabilité structurale et la cohésion, et de mieux comprendre les interactions entre ces différents paramètres. Les résultats obtenus montrent l'importance des formes du fer (Fe), de l'aluminium (Al), du carbone organique (SOC), de l'exsudation racinaire et du taux d'argiles sur la stabilité structurale. Sur la cohésion effective, sont mis en avant l'importance de la densité, de l'effet des racines fines (≤ 0.5 mm de diamètre) et du taux d'argiles.

KEY WORDS

Hydric erosion
Shallow landslides
Aggregate stability
Soil cohesion
Roots density
Soil organic carbon
Clay
Iron
Aluminum
Agroforestry
Eutric fluvisol
Mollic andosol
Ferrallitic cambisol

ABSTRACT

Aggregate stability and soil shear strength (cohesion and internal friction) describe respectively the soils sensitivity to run-off erosion and shallow landslides. This sensitivity depends on intrinsic soil properties and the climatic, ecological, topographical and anthropic context. Measures of these two indicators were carried out in situ: i) over three different soil types: Eutric fluvisol (France), Mollic andosol (Costa Rica), Ferrallitic cambisol (Costa Rica); ii) by comparing different agrosystems: Monoculture / Agroforestry iii) by considering the effect of depth between the A and B horizons. The study described the intrinsic soil erodibility; the influences of physico-chemical soil properties on soil structural stability and soil cohesion, and aimed to understand the interactions between these different parameters. The results show the importance of iron (Fe), aluminium (Al) and soil organic carbon (SOC) forms, root exudation and the clay amount on aggregate stability. The important effect of density, fine roots (≤ 0.5 mm in diameter) and clay is highlighted on effective cohesion.

LISTE DES ABRÉVIATIONS – ABBREVIATIONS LISTING

Φ : internal friction
 c' : cohésion effective
 d_{aw} : densité apparente fraîche
 H_p : humidité pondérale
 pF : potentiel de rétention hydrique
 Al_{CBD} : oxydes d'Aluminium - extraction au Citrate-Bicarbonate-Dithionite
 Fe_{CBD} : oxydes de Fer - extraction au Citrate-Bicarbonate-Dithionite
 SOC: Soil Organic Carbon
 WSC : Water Soluble Carbon
 HWE: Hot Water Extractable Carbon
 MWD: Mean Weight Diameter
 MWD_{FW} : Mean Weight Diameter after Fast Wetting
 MWD_{SW} : Mean Weight Diameter after Slow Wetting
 MWD_{MB} : Mean Weight Diameter after Mechanical Breakdown
 RLD: Root Length Density
 SRL : Specific Root Length

UMR : Unité Mixte de Recherche
 FAO : Food and Agriculture Organisation
 AFES : Association Française de l'Etude des Sols

TABLE DES MATIERES

Notice analytique	2
Remerciements.....	2
Mots clefs	3
Résumé	3
Key words.....	3
Abstract.....	3
Liste des abréviations.....	3
Table des matières.....	4
Table des illustrations	5
Présentation des laboratoires	7
 Étude et projet.....	 8
1. Introduction	8
2. Matériel et méthodes.....	11
2.1. Sites d'étude.....	11
2.2. Prélèvements et préparation des échantillons.....	12
2.3. Propriétés mécaniques et hydriques	12
2.4. Indicateurs d'érodibilité.....	13
2.5. Propriétés organiques.....	16
2.6. Propriétés minéralogiques.....	17
2.7. Analyse des données	17
3. Résultats.....	18
3.1. Analyse en composantes principales (ACP)	18
3.2. Variabilité de sites - Propriétés des types de sol	18
3.3. Variabilité de profondeur - Effets de profondeur	20
4. Discussion.....	23
4.1. La stabilité structurale	23
4.2. La résistance au cisaillement	23
4.3. Relation entre la stabilité structurale et la résistance au cisaillement	24
4.4. L'agroforesterie	25
5. Conclusion et perspectives	25
 Références.....	 26
Annexes.....	29

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Fig. 1 Situation des sites.....	10
Fig. 2 Mode opératoire du test de stabilité des agrégats.....	14
Fig. 3 Boîte de cisaillement.....	15
Fig. 4 Procédure d'extraction des formes labiles du carbone organique (WSC et HVEC).....	16
Fig. 5 Graphiques des valeurs moyennes par site.....	19
Fig. 6 Graphiques des valeurs moyennes par profondeur.....	22
Fig. 7 Diagramme des valeurs propres et courbe de la variance cumulée.....	33
Fig. 8 Analyse en composante principale (ACP) : projection sur le plan factoriel F1xF2.....	33
Table 1 Classes de stabilité, de battance et d'érosion en fonction du diamètre moyen pondéral.....	14
Table 2 Résultat de granulométrie et du test de stabilité structurale.....	22
Table 3 Matrice de corrélation.....	33
Annexe 1 - Descriptif du site Restinclières.....	30
Annexe 2 - Descriptif du site Aquiares.....	31
Annexe 3 - Descriptif du site Llano Bonito.....	32
Annexe 4 - Analyse en Composantes Principales et matrice de corrélation.....	33
Annexe 5 - Tableau de données moyennes par sites.....	34
Annexe 6 - Profil de rochers et racines sur l'andosol d'Aquiares, parcelle AQ1.....	35
Annexe 7 - Granulométrie des échantillons.....	36
Annexe 8 - Tableau de données moyennes par profondeur.....	37
Fig. 1 Sites location.....	10
Fig. 2 Operational diagram of aggregate stability test.....	14
Fig. 3 Shear box diagram.....	15
Fig. 4 Extraction procedure of labiles carbon forms (WSC et HVEC).....	16
Fig. 5 Graphs of mean values per site.....	19
Fig. 6 Graphs of mean values per depth.....	22
Fig. 7 Scree Plot.....	33
Fig. 8 Principal component analysis (ACP) : F1xF2 projection.....	33
Table 1 Stability classes, surface crusting and water erosion, depending on the Mean Weigth Diameter...14	
Table 2 Results of granulometry and aggregate stability tests.....22	
Table 3 Correlation matrix.....33	
Annexe 1 - Restinclières site description.....30	
Annexe 2 - Aquiares site description.....31	
Annexe 3 - Llano Bonito site description.....32	
Annexe 4 - Principal component analysis (ACP) and correlation matrix.....33	
Annexe 5 - Table of mean value per site.....34	
Annexe 6 - Stones and roots profil in Aquiares andisol, plot AQ1.....35	
Annexe 7 - Samples granulometry.....36	
Annexe 8 - Table of mean dataper depth.....37	

PRESENTATION DES LABORATOIRES

UMR AMAP (BOTANIQUE ET BIOINFORMATIQUE DE L'ARCHITECTURE DES PLANTES)

Les activités de l'UMR AMAP relèvent de deux grands champs disciplinaires : (i) la botanique (systématique et structurale), l'écologie de la végétation, l'agronomie et la foresterie, et (ii) l'informatique, les mathématiques et les statistiques appliquées, d'autre part.

Le projet scientifique s'articule autour de thèmes dans lesquels les équipes et les agents de l'UMR ont des compétences scientifiques et techniques originales et reconnues :

- il est centré sur la caractérisation et l'analyse de la diversité, de la structure et de l'organisation des plantes et des peuplements végétaux ;
- il aborde des problématiques méditerranéennes, tempérées et tropicales, prend en compte la dimension phylogénétique et évolutive, s'intéresse aux plantes actuelles ou fossiles, cultivées ou se développant en conditions « naturelles » ou faiblement anthropisées ;
- il s'appuie sur des méthodes originales qu'il contribue souvent à développer, telles que l'identification assistée par ordinateur, l'analyse de l'architecture et du développement des plantes, l'analyse biomécanique des végétaux, la représentation mathématique et informatique des organes, des plantes, des peuplements et des paysages, la modélisation de la croissance et de la dynamique des espèces et des peuplements.

Le projet de l'UMR a pour but de fédérer :

- des recherches cognitives, centrées sur la description et la compréhension de la diversité de la végétation, des relations structure-fonction, des relations avec les phylogénies, la biogéographie et la systématique, de la croissance et du fonctionnement des végétaux ;
- des recherches méthodologiques, visant à proposer des approches et des modèles mathématiques, statistiques et informatiques suffisamment génériques pour analyser, prédire et simuler la structure et le développement des plantes et de la végétation dans des contextes variés ;
- des recherches finalisées orientées vers la maîtrise de la dynamique, de la composition et de la production, en quantité et en qualité, des écosystèmes végétaux cultivés ou naturels.

UMR LISAH (LABORATOIRE D'ETUDE DES INTERACTIONS - SOL - AGROSYSTEME - HYDROSYSTEME)

Le LISAH est une UMR qui regroupe des chercheurs et enseignants-chercheurs de l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier (AgroM) et de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD).

La thématique centrale de recherche de l'UMR LISAH, est l'étude de l'hydrologie des milieux cultivés. Ses objectifs spécifiques sont : i) de développer les connaissances sur les transferts de masse et l'écodynamique des substances polluantes dans les sols et les bassins versants ruraux en relation avec leur organisation spatiale et temporelle d'origines naturelle et anthropique, ii) d'élaborer des outils permettant de diagnostiquer et prévenir les risques qu'induisent les activités humaines dans les milieux cultivés sur les régimes hydrologiques et l'évolution des ressources en eau et en sol, iii) de contribuer à la définition de nouveaux modes de gestion durable de l'espace, iv) de former des étudiants aux concepts et aux outils d'analyse et de modélisation de l'organisation spatiale et de l'hydrologie des milieux cultivés.

Les terrains cibles du LISAH sont les milieux cultivés à risques environnementaux forts: région semi-aride du bassin méditerranéen, régions tropicales...

ÉTUDE ET PROJET

1. Introduction

La FAO (Food and Agriculture Organisation) a estimé que plus de 10 MHa de terres cultivées dans le monde sont perdues par an, notamment à cause de l'érosion hydrique des sols. Le sol étant une ressource indispensable, vulnérable et difficilement réhabilitable, il devient un enjeu essentiel de trouver des solutions d'intégrité écologique et notamment de préservation des sols sans freiner la productivité agricole. Des recherches menées sur l'agroforesterie mettent en avant la meilleure productivité agricole de ce type d'agrosystème. L'explication est en partie liée au développement plus profond des systèmes racinaires en réponse à la concurrence des cultures (Mulia and Dupraz, 2006). L'importance du système racinaire dans la lutte anti-érosion donne un intérêt particulier de l'agroforesterie face aux problèmes d'érosion hydrique des sols agricoles. C'est un des axes de recherche du **projet ANR Ecosfix** (Services écosystémiques des racines – redistribution hydrique, séquestration du carbone et fixation du sol)¹ par lequel est cadrée cette étude.

L'érosion hydrique se distingue en deux processus : l'érosion de surface (effet splash, phénomène de battance, érosion diffuse et érosion concentrée) et l'érosion en masse (glissement de terrain, coulées boueuses). L'érosion de surface commence à l'impact de la goutte de pluie (effet splash) qui provoque un détachement des microagrégats (20 à 250 μm de diamètre) qui en se redéposant affectent les processus d'infiltration, provoquent le développement de la croûte de battance qui favorise à son tour le ruissellement (Legout et al., 2005). Ce dernier, engendre une érosion diffuse qui peut s'accroître en érosion localisée selon des chemins privilégiés [...] et entraîner la formation de rigoles et de ravines (Le Villio et al., 2001). La sensibilité du sol aux processus d'érosion de surface dépendra de sa stabilité structurale (Le Bissonnais and Le Souder, 1995), qui peut-être quantifiée par l'indicateur MWD (Mean Weight Diameter) correspondant au diamètre moyen pondéré des agrégats du sol après qu'ils aient subi des tests simulant ces mécanismes de désagrégation (Le Bissonnais - NF X31-515, 2005).

L'érosion en masse s'observe pour des sols plus drainants où les eaux de précipitation vont s'infiltrer réduisant les frottements entre les particules de sol en profondeur. Si le sol est disposé dans une pente, cela peut suffire à ce qu'il ne résiste plus aux forces de gravité et générer un glissement de terrain superficiel. Le mouvement de substrat en masse peut-être mesuré par le facteur de résistance au cisaillement (τ – Amajor Factor) (Terzaghi, 1943). La résistance au cisaillement dans une matrice de sol est le résultat de la résistance au mouvement au niveau des contacts interparticulaires. Elle est due à des liaisons physiques (ou particules d'enclenchement) formées au travers des zones de contact (résultant d'atomes de surface partageant des électrons au niveau des contacts interparticulaires), et des liaisons chimiques (ou de cimentation) (Craig, 2004). Les deux principaux composants actifs de la résistance à la contrainte de cisaillement du sol sont : i) la cohésion effective (c') qui est la somme de l'effet des particules d'enclenchement et de cimentation ; ii) l'angle de frottement interne (Φ) correspondant à l'angle mesuré entre la force normale (N) et la force tangentielle (T) atteint lors de la rupture face à une contrainte cisailante (équation Mohr-Coulomb – Timoshenko, 1983).

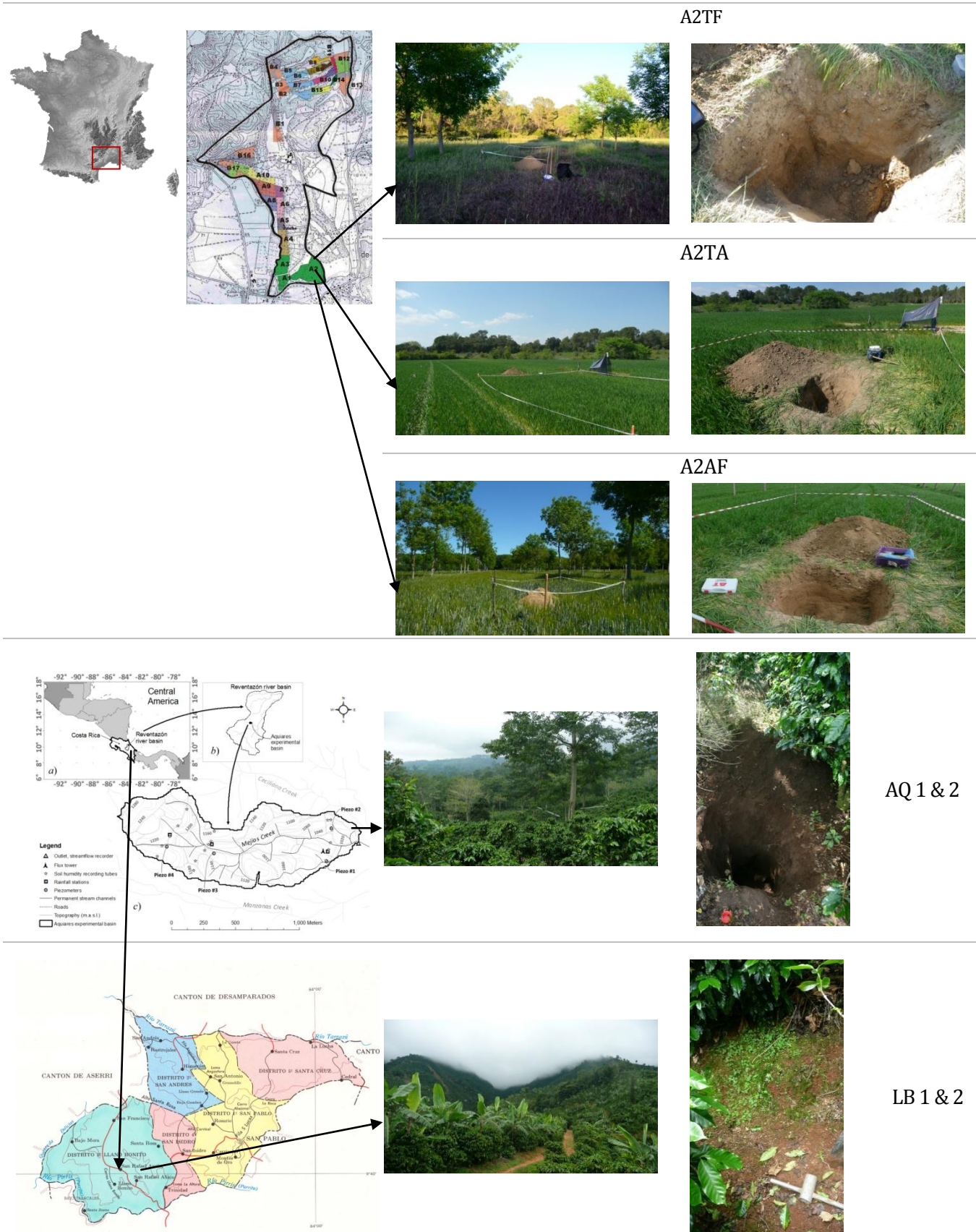
L'une des difficultés est la composante multiple et parfois contradictoire des facteurs régissant ces processus d'érosion. Dans certains cas où les conditions sont réunies, sur les pentes raides pendant les événements de fortes précipitations, une bonne stabilité structurale peut réduire le ruissellement et les risques d'érosion de surface, mais l'infiltration peut également augmenter, favorisant ainsi le risque de glissements de terrain superficiels (Ghestem et al., 2011). Il existe des exemples où en soignant l'érosion en nappe les risques de glissements de terrain ont augmentés (cas des marnes) (Roose, 1994). La seule façon de résoudre ce conflit apparent est de s'assurer que la stabilité structurale et la cohésion sont améliorées simultanément (Fattet et al., 2011). Un petit nombre d'études au cours des 30 dernières années ont suggéré un lien entre les processus d'érosion de surface et les glissements de terrain superficiels, mais les données quantitatives relatives aux deux

¹ <http://www.agropolis.fr/actualites/2011-programme-Systerra-ecosfix.php>

sont limitées (Al-Durrah and Bradford, 1981; Watson and Laflen, 1986; Nearing and West, 1988; Ghidry and Alberts, 1997; Frei et al., 2003; Fattet et al., 2011). Ces études ont montré l'importance de l'action de l'eau et du système racinaire sur ces deux indicateurs, des relations ont été trouvées entre la stabilité structurale et la cohésion effective mais n'apparaissent que pour des cas spécifiques (type de sol, mesures et tests spécifiques, peu de répétitions). C'est pourquoi il est encore nécessaire d'approfondir les connaissances sur cette thématique.

Pour mieux comprendre cette relation, il convient tout d'abord de relever et comparer les influences des propriétés physico-chimiques des sols pouvant jouer un rôle stabilisant. Les principales caractéristiques pouvant être retrouvées dans les différents types de sol de cette étude sont l'influence de la densité racinaire, le taux de matières organiques (MO), la texture du sol et les teneurs en oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium. Le système racinaire joue divers rôles dans la stabilisation des sols. Il peut créer un renforcement physique dans la zone de cisaillement (Stokes et al., 2009) et générer des apports stabilisants tel que des matières organiques (litières, mortalité des racines) (Angers and Caron, 1998), des exsudats racinaires (dont le carbone) et des rhizodépôts (Gyssels et al., 2005; Pohl et al., 2009; Fattet et al., 2011). Cette étude se cantonnera aux propriétés intrinsèques du sol, ainsi le renforcement physique des racines sera exclu des tests de cisaillement pour observer les éventuels autres effets racinaires. Le carbone organique du sol (SOC) est un liant temporaire entre microagrégats et macroagrégats (Gale et al., 2000; Wander and Yang, 2000). Les différentes formes du carbone n'ont pas les mêmes comportements. Ainsi le SOC permet d'observer les effets généraux mais il est intéressant de mesurer les fractions labiles du carbone qui ont une intensité plus forte et une fugacité plus faible sur la stabilité structurale (Guérif, 1982). Deux fractions ont été mesurées en fonction de la température de dissolution : le carbone soluble à 20°C (WSC) qui correspond essentiellement à la fraction organique fraîche tel que les déjections, les litières ... (Ghani et al., 2003) et le carbone extractible à 80°C (HWE) qui comporte 20-60% de carbohydrates dont les polysaccharides du carbone qui jouent un rôle important dans la cimentation (Haynes and Francis, 1993; Gijsman and Thomas, 1995; Haynes and Beare, 1997; Kouakoua et al., 1997; Angers and Caron, 1998). La texture du sol joue un rôle, notamment par sa teneur en argiles et sa minéralogie (Stern et al., 1991). Les oxydes et hydroxydes de fer (Fe) et d'aluminium (Al) peuvent agir comme flocculant en établissant des ponts entre argiles et polymères ou comme ciment après avoir précipité sous forme de gel sur les surfaces d'argiles (Römken et al., 1977; Le Bissonnais and Singer, 1993; Barthes et al., 2008).

L'objectif de cette étude est avant tout d'effectuer un diagnostic large sur différentes modalités, des relations entre la stabilité structurale, la résistance au cisaillement et les propriétés du sol qui peuvent les influencer. Pour cela, l'objectif sera de comprendre, cibler et hiérarchiser les variabilités de résultats en fonction de ces modalités d'étude qui sont i) le type de sol au travers de trois sites d'études différents (un en France et deux au Costa Rica), ii) l'agrosystème (agroforesterie ou monoculture) et le type de végétation (blé/noyer ; caféier/érythrine), iii) la profondeur et l'évolution inter-horizons.

Fig. 1 Situation des sites – Sites location

2. Matériel et méthodes

2.1. Sites d'étude

L'étude a été menée sur trois sites (Fig. 1), un en France (mai 2011) et deux au Costa Rica (juin 2011). Trois types de sols sont concernés : un alluviosol, un andosol et un ferralitisol. Un descriptif de site et de profils détaillés sont joints respectivement en Annexe 1, Annexe 2 et Annexe 3. Chacun des sites correspond à des parcelles de cultures agroforestières sur lesquelles les mesures ont été effectuées i) à proximité de l'association arbre/culture, représentatives de l'agrosystème agroforestier; ii) dans des monocultures correspondant à des sous-parcelles spécifiques ou zones suffisamment éloignées du système racinaire de l'arbre.

En France, le site est localisé dans le département de l'Hérault (34), sur le domaine de Restinclières. C'est un site expérimental Européen sur lequel différents projets dirigent leurs recherches concernant l'agroforesterie. Les mesures ont été effectuées au sud-est du domaine, sur la parcelle « A2 » combinant les cultures de noyer (*Juglans regia* L. et *Juglans nigra*) et de blé (*Triticum turgidum*). Ce terrain est subdivisé en trois sous-parcelles conjointes comprenant l'agrosystème : « forestier » (TF) correspondant à une monoculture de noyer avec une strate herbacée dense et non entretenue; agricole (TA) correspondant à une monoculture de blé; et agroforestier (AF) correspondant à la polyculture de blé plus noyer. Le sol étudié est un alluviosol profond (Annexe 1) (Rapport d'étude PIRAT, 2005; FAO, 2006; AFES et al., 2008). Ce site ne rassemble pas toutes les conditions érosives (pentes) mais il est prédisposé aux études expérimentales.

Au Costa Rica, un premier site est localisé sur la ferme de café d'Aquiores, dans le Canton de Turrialba, au pied du volcan de Turrialba et à proximité de la ville de Turrialba. Un bassin versant d'1 km² au sein des plantations agroforestières de café (*Coffea arabica*) plus érythrine (*Erythrina poeppigiana*), est étudié dans le cadre du projet Coffee Flux. Ainsi, des parcelles déjà équipées ont été mises à notre disposition. Deux sous-parcelles ont été choisies : la monoculture de café (AQ1) et l'agroforesterie de café plus érythrine (AQ2). Le sol étudié correspond à un andosol (Annexe 2) (FAO, 2006; AFES et al., 2008; Gómez Delgado, 2010) mis en place sur les coulées volcaniques du Turrialba. Ce site présente des conditions potentiellement érosives avec de fortes pentes en amont dans le bassin versant, et des précipitations abondantes en période de moussons, liées au climat tropical humide. Cependant aucune trace d'érosion hydrique n'apparaît rendant celui-ci d'autant plus intéressant.

Le deuxième site du Costa Rica se situe dans le canton de Leone Cortes, dans les montagnes du district de Llano Bonito. Il est composé par les mêmes plantations de café plus érythrine qu'à Aquiores. La parcelle agroforestière est appelée LB1 et la monoculture LB2. Le sol étudié est un sol ferralitique (Annexe 3) (FAO, 2006; AFES et al., 2008). Les conditions d'érodibilité sont ici encore plus accentuées avec des pentes et des précipitations plus fortes. De plus, le nombre important de glissements de terrain observables dans tout le district montre la sensibilité du ferralitisol à l'érosion en masse.

2.2. Prélèvements et préparation des échantillons

Afin de quantifier la variabilité de la stabilité structurale, de la cohésion effective et des propriétés physico-chimiques du sol en fonction de la profondeur, les prélèvements ont été effectués aux extrémités du profil. Ceci correspond pour les fosses de Restinclières et de Llano Bonito, à la partie supérieure de l'horizon A et à la base de l'horizon B, avec pour chacune d'elles une épaisseur comparable (horizon minéral C à 1m). Le profil d'Aquières présente une distinction moins marquée entre les deux horizons et la hauteur de la couche pédologique est d'environ 4m. Cependant, l'abondance de blocs de basalte à environ 1m de profondeur limite d'intérêt de réaliser l'étude plus en profondeur. Ainsi, les zones de prélèvement pour les trois fosses correspondent aux hauteurs respectives 0-30 cm et 80-100cm (Annexe 1, Annexe 2, Annexe 3).

Pour les mesures de densité apparente, six échantillons par horizon ont été prélevés avec un cylindre de 100 cm³ (Baize, 2000). Ces échantillons ont été réutilisés ensuite en laboratoire pour les mesures d'humidité (n=3 échantillons) et les mesures de densité racinaire (n=3 échantillons).

Pour la stabilité des agrégats, les tests de cisaillement et les analyses physico-chimiques, environ 4.5 dm³ (≈3.5kg) de sol ont été extraits par horizon. Afin de ne pas affecter l'agrégation en place il est important d'effectuer ce prélèvement avec précaution en retirant les effets de la pelle et en transportant les sols jusqu'au laboratoire dans des boîtes rigides.

Sur l'ensemble des échantillons sont retirés manuellement les cailloux (>2cm) et effectués un tamisage adapté. Le tamisage permet de travailler sur une fraction relativement homogène et d'extraire les graviers (2mm – 2cm) et les racines lorsqu'elles ne sont pas nécessaires à l'analyse. Les échantillons destinés à la stabilité des agrégats et aux analyses physico-chimiques sont préparés par séchage à l'air libre jusqu'à ce qu'ils aient un comportement suffisamment friable (T≈1 semaine) pour être tamisés respectivement à [5 - 3.15] mm et 2 mm, avec un minimum de modification de la structure des agrégats. Les sols destinés aux tests de cisaillement sont préparés à l'état frais par un émottage homogène (broyage prohibé) jusqu'à environ 2 mm. Ces derniers ne doivent pas perdre d'humidité et sont donc conservés hermétiquement en chambre froide à environ 4°C pendant la durée comprise entre le prélèvement et le test (T≈1 mois).

2.3. Propriétés mécaniques et hydriques

Densité apparente

Cette mesure de densité apparente (da) se calcule par le rapport entre la masse de sol (m) et son volume apparent (Va) (NF X31-501, 1992) :

$$da = \frac{m}{Va} \quad (\text{en g/cm}^3) \quad (\text{équation 1})$$

Le calcul peut s'effectuer à partir de la masse fraîche (m_w) ou sèche (m_s). La densité apparente fraîche (da_w), représentative de la densité sur site à l'humidité du jour de prélèvement, est utilisée pour les tests de cisaillement.

Humidité et potentiel hydrique

L'humidité pondérale est obtenue par le rapport entre la masse de sol frais (m_w) et la masse de sol séché (m_s) à 105°C pendant 24h (NF ISO 11465, 1994) :

$$Hp = \frac{(m_w - m_s)}{m_s} \times 100 \quad (\text{en \%massique}) \quad (\text{équation 2})$$

L'humidité pondérale a été mesurée à plusieurs stades de l'étude : suite au prélèvement (Hp_{site}), elle est représentative de l'humidité du site au moment du prélèvement ; puis lors de la mesure de pF citée ci-après ; et enfin à la fin du test de cisaillement (Hp_{ST}), elle est alors représentative de l'humidité de l'échantillon lors de ce test.

Le potentiel hydrique (pF) est un indicateur définissant la capacité de rétention en eau du sol à une humidité donnée. Cette méthode de mesure consiste à soumettre l'échantillon de sol saturé à une pression d'expulsion de l'eau qui est équivalente à la capacité de rétention choisie. L'humidité pondérale est alors calculée avec la masse obtenue à ce pF et la masse sèche (NF ISO 11274, 1998). L'humidité des échantillons a été mesurée au pF 2.5 (30 kPa) correspondant à leur capacité au champ¹.

2.4. Indicateurs d'érodibilité

Test de stabilité des agrégats

La préparation et les tests de stabilité des agrégats ont été réalisés selon la méthode normalisée NF X31-515 (2005) développée par Le Bissonnais (1996) (Fig. 2). Cette méthode combine trois tests destructifs, effectués sur les agrégats de 3-5 mm de diamètre : i) l'humectation rapide par immersion dans l'eau (FW: Fast Wetting), ii) l'humectation lente par capillarité (SW: Slow Wetting), et iii) la désagrégation mécanique par agitation après immersion dans l'éthanol (MB: Mechanical Breakdown). Les tests s'effectuent sur environ 5 à 10 g d'agrégats secs et calibrés. Pour le test d'humectation rapide, les agrégats sont immergés dans 50 ml d'eau déminéralisée pendant 10 min. Pour le test d'humectation lente, les agrégats sont disposés pendant 60 min sur un papier filtre (type « Durieux », seuil de rétention 2 μm) posé sur une table à succion ($\rho=30\text{kg/m}^3$; $h=3\text{cm}$) elle-même plongée dans l'eau sur une hauteur de 2.5 cm. Pour le test de désagrégation mécanique, des quantités similaires d'agrégats sont immergées délicatement dans de l'éthanol pendant 10 min. Après 30 min, l'éthanol est éliminé et les agrégats sont agités dans 200 ml d'eau. La solution est ensuite laissée à décantation durant 30 min. Après chaque test, les agrégats plus ou moins désagrégés sont transférés sur un tamis de 50 μm immergés dans de l'éthanol. Un mouvement hélicoïdal répétitif et identique est appliqué, permettant une première séparation granulométrique tout en stabilisant l'état obtenu des agrégats avec l'éthanol. La fraction $>50\mu\text{m}$ est séchée à 40°C pendant 48 h. Les agrégats secs sont alors transférés dans une colonne de six tamis successifs : 2.00, 1.00, 0.50, 0.20, 0.10 et 0.05 mm et chacune des fractions obtenues par le tamisage est pesée. L'indice de stabilité des agrégats est exprimé par le diamètre moyen pondéré (MWD : Mean Weight Diameter) défini par la formule suivante :

$$MWD = \frac{\sum d \times m}{100} \quad (\text{en mm}) \quad (\text{équation 3})$$

où d est le diamètre moyen des agrégats entre 2 tamis (mm) ; et m est la masse de la fraction d'agrégats entre 2 tamis

Cet indice est calculé pour chacun des trois traitements. On obtient donc MWD_{FW} , MWD_{MB} , et MWD_{SW} , correspondant respectivement à l'humectation rapide, l'humectation lente et la désagrégation mécanique. Le test MWD_{FW} est le plus destructif et donc le premier indicateur à observer parmi les trois. Les deux autres servent par la suite à discriminer les sols moins stables.

La stabilité du sol étudié ainsi que sa sensibilité à la battance et à l'érosion peuvent alors être caractérisés à l'aide du tableau des classes de diamètre moyen pondéré (MWD) Table 1.

¹ Capacité au champ : teneur maximale en eau non mobilisable par la seule force de gravité (Baize, 2000)

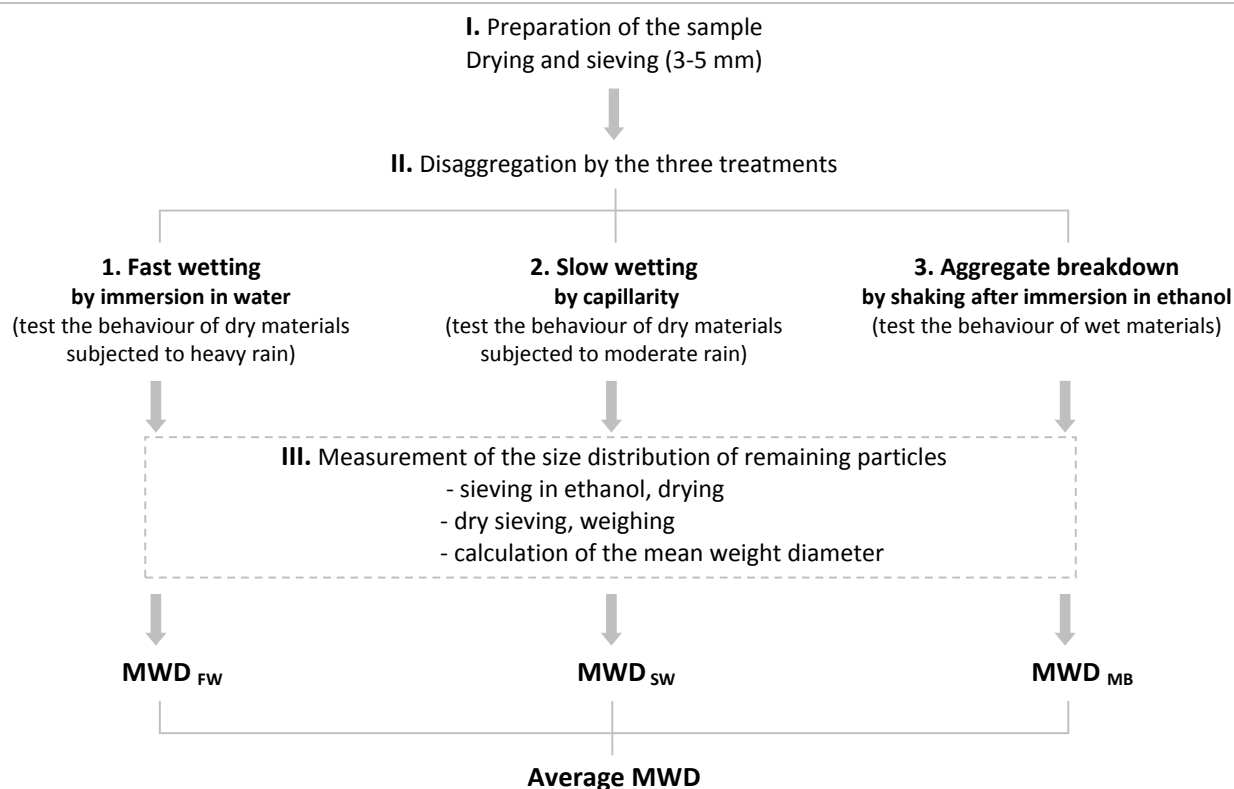


Fig. 2 Mode opératoire du test de stabilité des agrégats (Le Bissonnais, 1996), figure provenant de l'annexe A de la méthode standardisée (NF X31-515, 2005).

Operational diagram of aggregate stability test (Annexe A on standard method NF X31-515, 2005).

Table 1 Classes de stabilité, de battance et d'érosion en fonction de valeurs du diamètre moyen pondéral après désagrégation (MWD) - *Stability classes, surface crusting and water erosion, depending on the MWD after disaggregation*

MWD (mm)	Stabilité	Battance	Ruissellement et érosion diffuse
<0.4	Très instable	Systématique	Risque important et permanent en toutes conditions topographiques
0.4 - 0.8	Instable	Très fréquente	Risque fréquent en toutes situations
0.8 - 1.3	Moyennement stable	Fréquente	Risque variable en fonction des paramètres climatiques et topographiques
1.3 - 2.0	Stable	Occasionnelle	Risque limité
>2.0	Très stable	Très rare	Risque très faible

Test de cisaillement

Le test de cisaillement direct correspond à une déformation contrôlée d'un échantillon de sol soumis à une force normale constante (N) et à une force tangentielle (T).

L'objectif est de tester les propriétés intrinsèques des sols sujets aux glissements de terrain dans des conditions comparables à celles in situ. L'échantillon est donc saturé à un potentiel de rétention hydrique faible et équivalent pour chacun des sites : entre 7 et 20 % d'humidité inférieure à la capacité au champ (comportement trop plastique au pF 2.5). Il est ensuite reconsolidé à la densité apparente mesurée sur site, dans une boîte de cisaillement drainée de 72 cm³. La force tangentielle entraîne le châssis inférieur mobile à une vitesse constante de 1 mm.min⁻¹ et l'échantillon transmet alors une force de résistance au cisaillement sur le châssis supérieur fixé à un capteur de force. Deux capteurs de déplacements permettent de mesurer la déformation verticale et horizontale. La déformation verticale (dilatation ou compaction) doit être théoriquement nulle. On considère le test homogène si l'échantillon maintient la charge normale à 2 % près de la valeur sélectionnée initialement, pendant toute la durée de l'essai (Schuppener et al., 1998). Les charges normales appliquées sont de 20, 51, 102 et 204N. On procède à 3 répétitions de chacun des tests, soit [4 charges normales × 3 répétitions = 12 tests par horizon]. Le test se prolonge jusqu'à la rupture de l'échantillon correspondant à la résistance de pic ($T_{\max}$). Les valeurs N et $T_{\max}$ sont retranscrites respectivement en contraintes normale σ_n et tangentielle σ_t par la formule :

$$\sigma = \frac{N}{S} \quad (\text{kPa}) \quad (\text{équation 4})$$

La série de tests à différentes charges permet de tracer une régression linéaire correspondant à une portion de la courbe de Mohr Coulomb. De cette courbe sont relevés la cohésion effective (c') et l'angle de friction interne du sol (φ), permettant d'amener au facteur de résistance au cisaillement (τ) par l'équation de Mohr-Coulomb (Timoshenko, 1983) :

$$\tau = c' + \sigma_n \cdot \tan \varphi \quad \text{où } \sigma_n : \text{contrainte normale effective} \quad (\text{équation 5})$$

Immédiatement après chaque essai une mesure de contrôle de l'humidité pondérale (H_{pST}) de l'échantillon est réalisée.

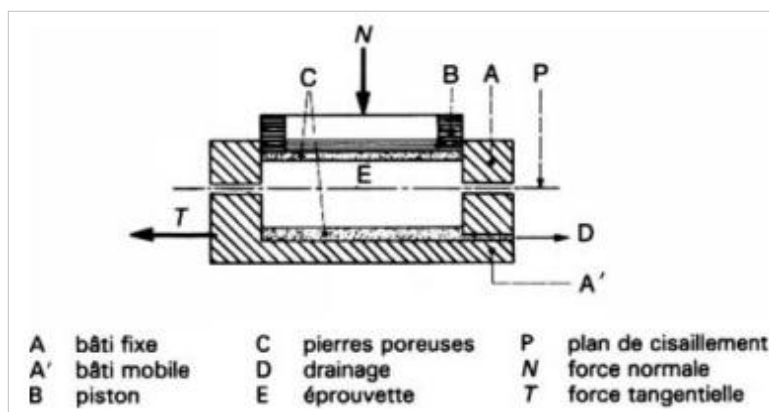
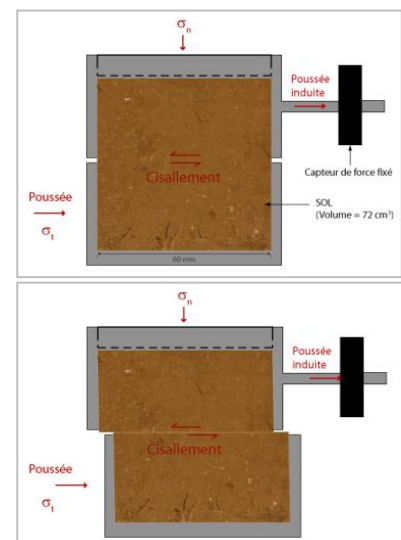


Fig. 3 Boîte de cisaillement – *Shear box diagram* (Magnan, 1991).

$V_{\text{échantillon}} = [60 \times 60 \times 20] \text{ mm}$.



2.5. Propriétés organiques

Implantation racinaire – Root Length Density (RLD) et Specific Root Length (SRL)

Trois des volumes de sol prélevés pour la densité ($n=3$ par horizon ; $n=12$ par site) sont réutilisés pour l'analyse racinaire. Une fois leurs masses connues ils peuvent être émiettés pour extraire les racines. Celles-ci sont colorées au bleu de toluidine à une concentration de 0.02% par immersion pendant 10 min. (Costa et al., 2001). Les racines sont ensuite numérisées dans 1 cm d'eau avec une résolution de 600 dpi puis analysées à l'aide du logiciel WinRHIZO (version Pro 3.0, Régent Instruments, Canada) (Zobel, 2008). De la base de données obtenue sont relevées les longueurs racinaires par classe de diamètre : ≤ 0.5 mm;]0.5 ; 1.0] mm,]1.0 ; 2.0] mm et > 2 mm. Elles permettent de calculer la densité de longueur racinaire (RLD : Root Length Density) totale et par classe de diamètre qui est une expression plus pertinente pour évaluer les effets des racines sur les processus d'érosion (Gyssels et al., 2005; De Baets et al., 2006; Osman and Barakbah, 2006). Le RLD est la longueur racinaire (mm) totale ou relative à chaque classe de diamètre, divisée par le volume de l'échantillon de sol (cm^3). Un second indicateur, la longueur spécifique des racines (SRL : Specific Root Length) est la longueur racinaire (mm) par unité de masse racinaire sèche (mg). Une haute valeur de SRL implique une abondance de racines fines alors qu'une faible valeur de SRL signifie qu'il y a une quantité de racines moins importante mais à des diamètres plus gros (Stokes et al., 2009).

Carbone organique du sol : Soil Organic Carbon (SOC), Water Soluble Carbon (WSC) et Hot Water Extractable Carbon (HWE/C)

Le carbone organique total (SOC, %) a été obtenu selon la norme NF ISO 10694 (1995). La méthode consiste à mesurer la quantité de dioxyde de carbone (CO_2) émise par la combustion de la totalité du carbone contenue dans le sol. Pour les sols contenant une quantité trop importante de carbone minéral, un prétraitement d'élimination (NF ISO 10694, 1995) de celui-ci a été effectué. Les analyses ont été effectuées avec un auto-analyseur CHN Thermo Finnigan. Pour les sols de Restinclières (France), les résultats ont été apportés par l'entreprise VALORHIZ, cependant les mesures correspondant à nos fosses de prélèvement (juin 2011) n'ont pas encore été effectuées et dans l'attente, ont été utilisées les données obtenues l'hiver précédent (déc. 2010). Pour les sols du Costa Rica, les mesures ont été déléguées au laboratoire du Catie (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza).

Le carbone soluble à l'eau (WSC, g.kg^{-1}) et le carbone extractible à l'eau chaude (HWE/C, g.kg^{-1}) ont été déterminés selon la méthode modifiée de Haynes and Francis (1993). Ces analyses ont été déléguées au laboratoire d'analyses des sols d'Arras (INRA). L'extraction de HWE/C a été menée en deux étapes (Fig. 1). La première étape supprime le carbone facilement soluble du sol (WSC) provenant en général d'un chaulage récent du sol ou de déjections animales et de résidus végétaux solubles (litières). La deuxième étape extrait le HWE/C correspondant aux composants labiles du carbone dans de l'eau à 80°C pendant 16h (Ghani et al., 2003). Des deux extractions sont relevés le carbone total (TC) et le carbone organique (OC).

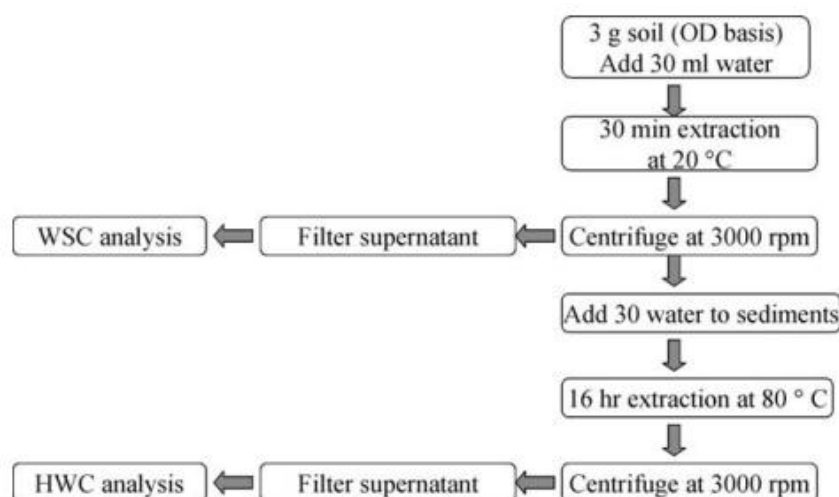


Fig. 4 Procédure d'extraction du carbone soluble à l'eau (WSC) et du carbone extractible à l'eau chaude (HWE/C = HWC sur figure) selon Ghani et al. (2003).

Extraction procedure of Water Soluble Carbon (WSC) and Hot Water Extractable Carbon (HWE/C) by Ghani et al. (2003).

Les quantités utilisées ont été modifiées à 10 g de sol pour 100 ml d'eau (proportion d'extraction 1/10) ; l'extraction à 80°C a été produite dans une étuve au lieu d'un bain marie.

2.6. Propriétés minéralogiques

Granulométrie

La mesure de granulométrie a été effectuée selon la norme NF X31-107 (2003) en France et la méthode de Bouyoucos (1926) au Costa Rica. Elle détermine les proportions entre trois fractions granulométriques : sables ($50\ \mu\text{m}$ à $2\ \text{mm}$ de diamètre), limons (2 à $50\ \mu\text{m}$), argiles ($<2\ \mu\text{m}$). Ces proportions sont exprimées en pourcentage de la fraction minérale totale inférieure à 2mm . Les deux fractions les plus fines sont prélevées à la pipette de Robinson dans une suspension de sol en cours de sédimentation. La fraction des sables est séparée par passage sur tamis de $50\ \mu\text{m}$ et sous courant d'eau de la suspension après prélèvements des fractions fines. Pour les sols contenant un taux de matière organique (MO) important ($> 5\%$), une destruction de celle-ci a été effectuée à l'eau oxygénée (H_2O_2) avant les premiers tamisages (NF X31-107, 2003). Dans le cas contraire, la fraction de sables peut-être surestimée par l'influence de la MO sur l'aggrégation des fractions inférieures.

Eléments fer (Fe) et aluminium (Al)

Il est possible de séparer et donc de quantifier les différentes formes du fer et de l'aluminium par des extractions sélectives (Jeanroy, 1983) : une extraction par de l'oxalate d'ammonium permet d'extraire les formes associées à la matière organique et les formes amorphes (Tamm, 1922; Schwertmann, 1964; McKeague and Day, 1966) ; l'extraction CBD avec du citrate (complexant), du bicarbonate (tampon) et du dithionite de sodium (réducteur) permet d'extraire en plus des formes précédentes, le fer et l'aluminium sous forme cristallisée (Mehra and Jackson, 1960). La différence entre les valeurs obtenues pour l'extraction CBD et pour l'extraction Tamm (oxalate d'ammonium) donne une bonne estimation des oxydes de fer et d'aluminium bien cristallisés (Delvaux et al., 1989).

L'extraction effectuée ici a été la méthode CBD déléguée au laboratoire d'analyses des sols d'Arras (INRA). Au final, cette dernière sera bien adaptée pour les alluviosols et les ferralitisols où le fer et l'aluminium sont en grande partie sous forme d'oxy-hydroxydes de fer ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) et d'aluminium ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) cristallisés. En revanche, les andosols sont majoritairement composés de formes amorphes résultants notamment de l'altération de verres volcaniques. Elles correspondent à des aluminosilicates hydratés (allophanes) qui sont généralement associés à des hydroxydes de fer (Segalen, 1968a). Ces formes auraient justifiées d'utiliser d'avantage la méthode Tamm.

2.7. Analyse des données

Tout d'abord, une sélection des variables les plus pertinentes a été effectuée en écartant selon les objectifs de l'analyse, les séries de données de corrélation évidente, c'est-à-dire les variables obtenues par le même type de mesures, représentant la même propriété. Ainsi, parmi les mesures d'humidité, seul le $\text{pF } 2.5$ sera utilisé pour l'analyse des données, Hp_{site} et Hp_{ST} n'étaient mesurées qu'à titre de contrôle voir de comparaison. Concernant les trois tests de stabilité structurale, seules les valeurs de MWD_{FW} (test d'humectation rapide) ont été retenues. En effet, les deux autres variables MWD_{SW} et MWD_{MB} sont incomplètes pour l'andosol qui présentait un MWD_{FW} très élevé et n'impliquait pas d'affiner les résultats par ces deux autres tests.

Ensuite, une ACP (Analyse en Composantes Principales) a été réalisée afin de rapidement mettre en visuel la hiérarchisation des effets des trois modalités sur l'ensemble des mesures. Puis un descriptif plus précis de la variabilité des résultats par modalités a permis de caractériser les différents sols. Enfin, l'interprétation et la discussion de ces variabilités nous amène à comprendre certaines des interactions recherchées entre la stabilité structurale, la résistance au cisaillement et les propriétés physico-chimiques du sol.

3. Résultats

3.1. Analyse en composantes principales (ACP)

Parmi les ACP, l'observation recherchée ressort de la projection des individus sur le plan factoriel le mieux représenté F1×F2 (Annexe 4 ▼ Fig. 8a). Elle confirme que l'effet de premier ordre est l'effet de site dépendant principalement des trois types de sols. Elle démarque dans un second ordre l'effet de profondeur. L'effet du type d'agrosystème n'est pas perçu sur cette analyse et n'apparaîtra qu'en analysant dans les détails certaines propriétés. La quantité de fosses de prélèvement n'apporte pas une base de données suffisante qui permettrait de continuer l'analyse des résultats de manière statistique et nécessite donc de revenir aux valeurs initiales. L'analyse est poursuivie par étapes en suivant la hiérarchisation des effets obtenus.

3.2. Variabilité de sites - Propriétés des types de sol

Indicateurs d'érodibilité

Le test de stabilité structurale FW apporte une différence significative entre Aquiares et les deux autres sites (Fig. 5a). L'andosol correspond à un sol en moyenne très stable avec un MWD_{FW} de 3.06 ± 0.16 mm alors que les valeurs moyennes du sol alluvial et du ferralitisol sont inférieures à 1.

La cohésion effective est significativement plus élevée à Restinclières (29.79 ± 4.59 kPa) qu'à Aquiares (11.63 ± 0.99 kPa), et il n'y a pas de différence significative entre ces deux premiers sites et Llano Bonito (Fig. 5b). Il n'y a pas de variation significative de l'angle de frottement interne en fonction des sites (Annexe 5) ainsi cet indicateur ne sera pas pris en compte dans les résultats.

Propriétés mécaniques et hydriques

La variabilité entre chacun des sites est nettement significative pour l'ensemble des valeurs moyennes de densité apparente et d'humidité (Fig. 5c et d). L'alluviosol est assez dense (1.70 ± 0.05) et sec avec une faible capacité de rétention hydrique ($29.80 \pm 1.71\%$). L'andosol arrive à des valeurs extrêmes typiques de ce type de sol, à la fois très lâche (1.11 ± 0.05) et avec un très fort potentiel de rétention hydrique ($94.90 \pm 2.10\%$). Le ferralitisol a une densité apparente moyenne (1.40 ± 0.06) et un potentiel de rétention hydrique assez fort ($57.56 \pm 6.59\%$).

Propriétés organiques

La variabilité de l'implantation racinaire est liée avant tout au type d'agrosystème. Une forte variabilité de la densité racinaire (RLD) est relevée entre les sites (Fig. 5e ; Annexe 5). Le site de Restinclières présente une grande abondance de racines fines (diamètre ≤ 0.5 mm ; $RLD = 142.66 \pm 80.25 \text{ mm.cm}^{-3}$) liées aux espèces herbacées. Les deux sites costa ricains présentent d'avantage des racines plus grossières (entre 1 et 3,5 mm de diamètre) appartenant aux caféiers, une espèce arbustive. Quant aux racines observées des espèces arborescentes sur les trois sites, elles étaient à ces profondeurs très grossières (1 à 5 cm de diamètre) et en faibles nombre, ce qui ne permet pas d'apporter davantage d'informations sur leurs effets.

Le plus faible taux de carbone organique (SOC) se retrouve dans les alluviosols avec $0.96 \pm 0.10\%$ et le plus fort dans les andosols $5.55 \pm 0.86\%$. Les ferralitisols sont intermédiaires avec $2.19 \pm 1.02\%$. La différence du taux de SOC est significative entre l'andosol et les deux autres (Fig. 5f). Pour les teneurs en WSC, Restinclières est significativement plus fort que les deux sites costa ricains (Fig. 5f). Il n'y a pas de différences significatives observées dans les valeurs de HWE.

Propriétés minérales

Concernant la texture, les alluviosols sont limoneux, les andosols sont plus limono-sableux et les ferralitisols beaucoup plus argileux (le fort écart type pour le ferralitisol s'explique par un échantillon en profondeur qui contenait un taux important de graviers-sables) (Fig. 5g ; Annexe 7).

Une différence significative très nette se note pour la teneur en fer et en aluminium entre chaque site (Fig. 5h). L'andosol d'Aquiares, par sa forte composition en allophanes, présente une teneur moyenne en aluminium de $29.61 \pm 0.69 \text{ g.kg}^{-1}$ qui est beaucoup plus élevée que les deux autres sites avec seulement $1.33 \pm 0.11 \text{ g.kg}^{-1}$ à Restinclières et $10.30 \pm 2.08 \text{ g.kg}^{-1}$ à Llano Bonito. Le ferralitisol de Llano Bonito présente la teneur en Fer la plus élevée avec $46.82 \pm 7.11 \text{ g.kg}^{-1}$ pour seulement $10.51 \pm 0.47 \text{ g.kg}^{-1}$ sur Restinclières et $31.94 \pm 0.11 \text{ g.kg}^{-1}$ sur Aquiares.

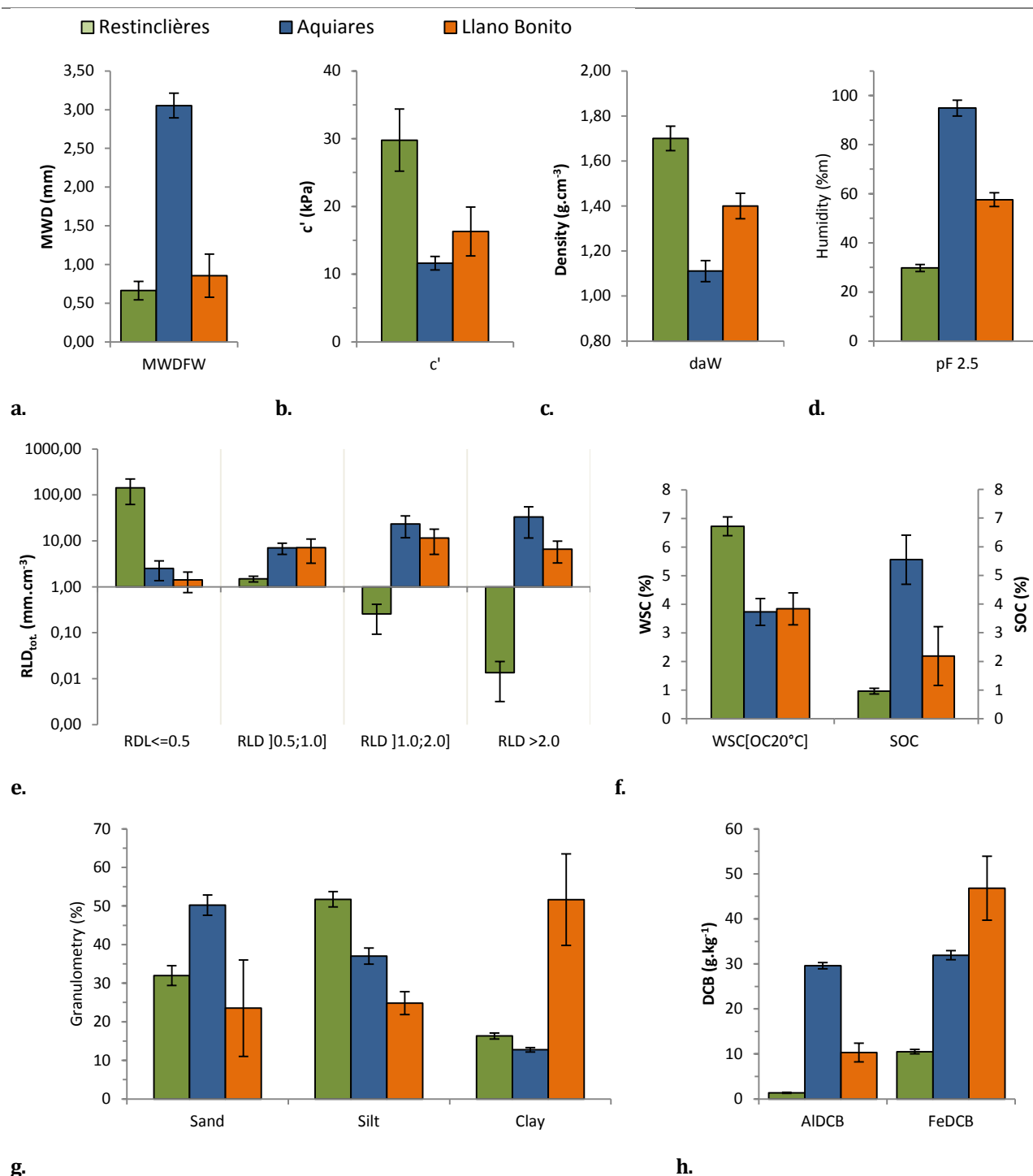


Fig. 5 Graphiques des valeurs moyennes par site - *Graphs of mean values per site. (Annexe 5).*

Représentation des principales variabilités inter-sites pour : a. La stabilité des agrégats avec le diamètre moyen pondéré au test d'humectation rapide (MWD_{FW}) ; b. La cohésion effective du sol ; c. La densité de longueur racinaire (RLD) par classes de diamètres (en cm) ; d. Le carbone soluble à l'eau (WSC) et le carbone total (SOC) ; e. La teneur en oxydes de d'aluminium et de fer (méthode CBD). Un code de couleur permet de rapidement différencier les trois sites représentés (cf. légende ci-dessus).

Representation of the major inter-site variability for: a. Aggregate stability with the mean weight diameter for the fast wetting test (MWD_{FW}) b. Effective soil cohesion c. Root length density (RLD) by diameter classes (cm) d. Water soluble carbon (WSC) and soil organic carbon (SOC) e. Oxides and hydroxides content of aluminum and iron (DCB method). A color code allows you to quickly differentiate the three sites shown (cf. legend above).

3.3. Variabilité de profondeur - Effets de profondeur

En analysant les valeurs moyennes par profondeur, nous pouvons constater un décalage quasi systématique pour l'ensemble des mesures entre les échantillons prélevés à 0-30cm et 80-100cm. Cette analyse permet d'expliquer certaines caractéristiques précédemment évoquées.

Indicateurs d'érodibilité

La stabilité structurale est significativement plus forte en surface qu'en profondeur pour les trois types de sols (Fig. 6a ; Table 2).

Inversement pour la cohésion, elle est plus faible en surface qu'en profondeur (Fig. 6b).

Propriétés mécaniques et hydriques

La densité est plus faible en surface qu'en profondeur avec une variation nettement significative et importante pour la sous-parcelle forestière TF de Restinclières (Fig. 6c).

Le profil du potentiel de rétention hydrique à capacité au champs est variable selon les sites : l'alluviosol en climat tempéré a une capacité de rétention plus faible en surface qu'à 1m de profondeur alors que les sols tropicaux ont une capacité inverse sur le premier mètre (Fig. 6d). Sur les andosols, la présence de la nappe au fond de la fosse ainsi que des relevés plus précis permettent de dire que le profil humidimétrique diminue d'environ 0 à 1m et réaugmente jusqu'à 1,80 m.

Propriétés organiques

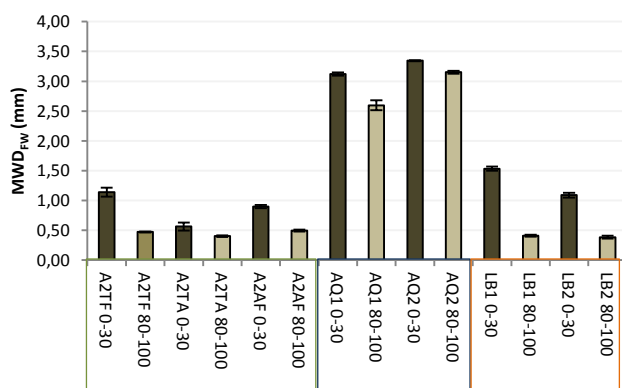
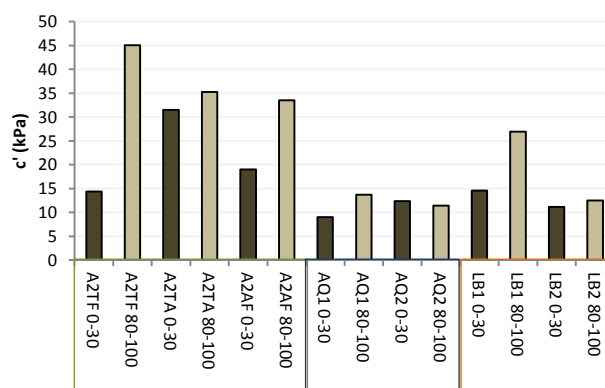
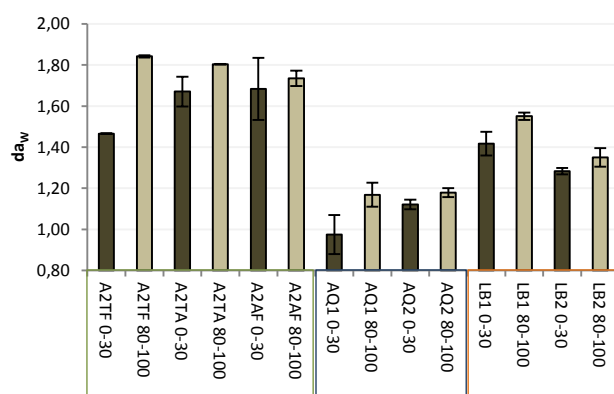
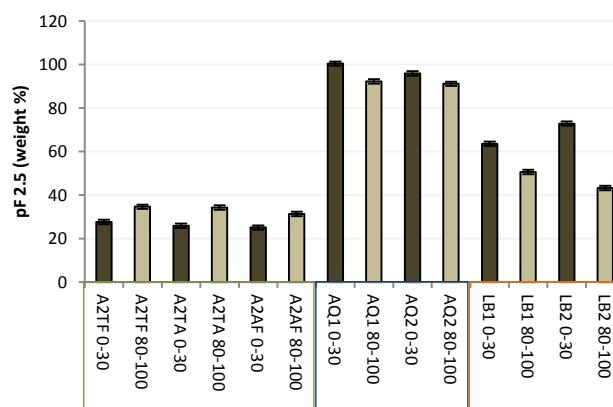
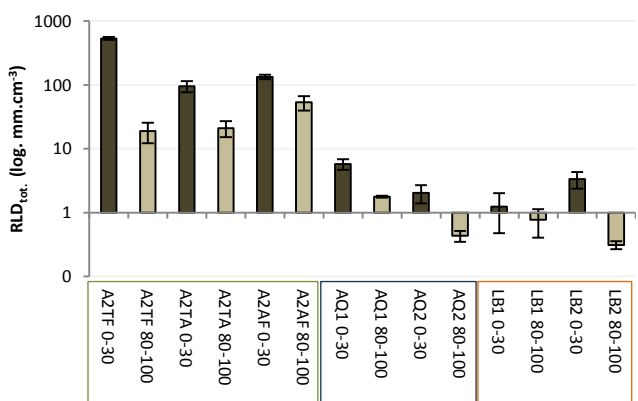
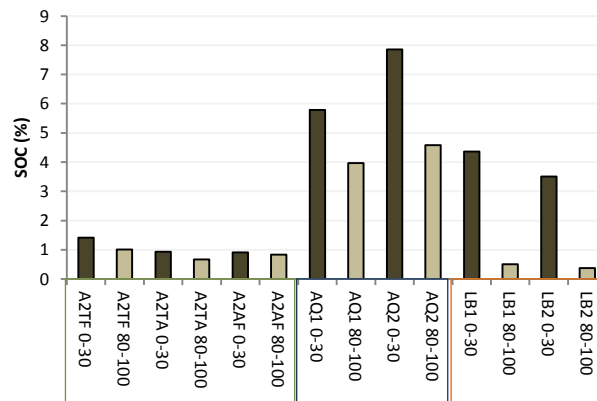
L'abondance de racines fines ($\leq 0.5\text{mm}$ de diamètre) est beaucoup plus importante sur la parcelle avec la strate herbacée non entretenue (A2TF en surface - Fig. 6e) que sur les deux autres parcelles cultures de blé. Il n'y a pas de variabilité forte entre les parcelles costa ricaines.

La variabilité plus importante en surface qu'en profondeur du taux de carbone organique total (SOC) et soluble à l'eau chaude (80°C) (HWE) est nettement plus marquée sur les deux sols tropicaux (Fig. 6f, g, h). Le taux en HWE est également plus élevé que le taux en WSC pour les horizons de surface des sols tropicaux. Ainsi, la forte variabilité de stabilité structurale relevée sur les sols tropicaux est certainement d'avantage influencée par les formes du carbone solubles à l'eau chaude.

Propriétés minérales

Les alluviosols sont limoneux et n'ont pas de variabilité en fonction de la profondeur. Les andosols également limoneux évoluent vers une texture plus limono-sableuse en profondeur. Ces deux sols ont donc un faible taux d'argiles ($>20\%$) (Table 2 ; Annexe 7) qui est un paramètre important dans la stabilité structurale. Le ferralitisol en revanche, est beaucoup plus argileux avec une augmentation de ce taux en profondeur. L'épaisseur de sol formé sur ce site semblait variable entre les deux fosses avec une roche mère très altérée plus proche de la surface sur LB2. Ceci explique la forte variabilité entre LB1 et LB2 avec notamment un horizon très graveleux en profondeur sur LB2. Cette dernière remarque est importante car les échantillons prélevés en LB2 ont été difficilement exploitables sur certains tests et justifie que certains résultats ne soient pas commentés ou pris en compte pour cet échantillon.

Les taux en fer et en aluminium des sols ferralitiques sont plus forts en surface qu'en profondeur (Fig. 6 i, j). Les deux autres sols ne présentent pas de grande variabilité.

a. Aggregate stability**b. Shear Test****c. Soil density****d. Soil moisture****e. Root analysis - RDL_{<0.5}***Echelle logarithmique***f. Organic matter**

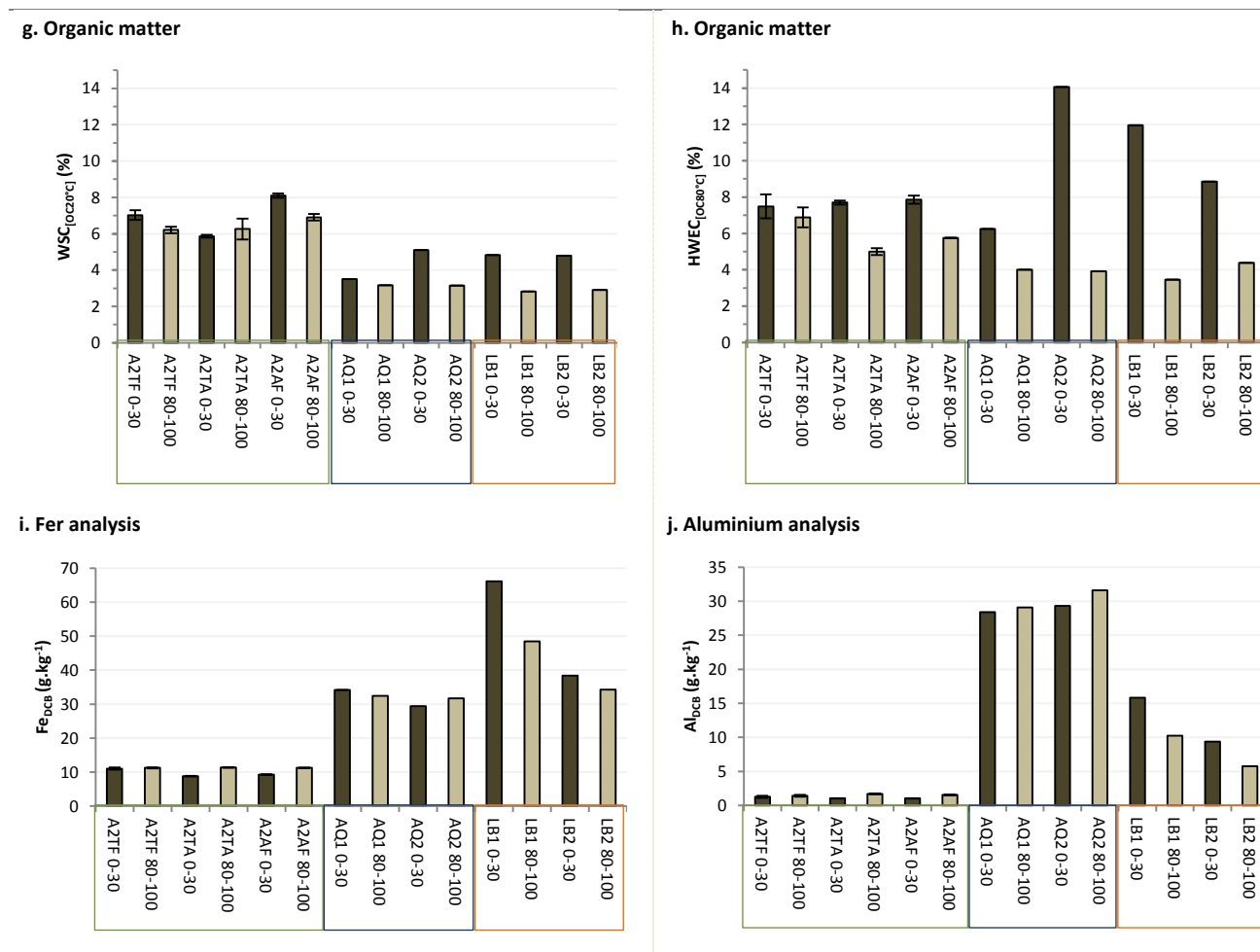


Fig. 6 Graphiques des valeurs moyennes par profondeur - *Graphs of mean values per depth.*

Table 2 Résultat de granulométrie et du test de stabilité structurale - *Results of granulometry and aggregate stability tests.*

Identification			Granulométrie	Résultats des tests de stabilité structurale (FW)		
Site	Parcelle	Profondeur	Texture	Stabilité	Battance	Ruissellement et érosion diffuse
Restinclières	A2TF	0-30 cm	Limoneux fins	Moy_Stable	Fréquente	Risque variable
		80-100 cm	Limoneux fins	Instable	Très fréquente	Risque fréquent
	A2TA	0-30 cm	Limoneux	Instable	Très fréquente	Risque fréquent
		80-100 cm	Limoneux	Instable	Très fréquente	Risque fréquent
	A2AF	0-30 cm	Limoneux fins	Moy_Stable	Fréquente	Risque variable
		80-100 cm	Limoneux fins	Instable	Très fréquente	Risque fréquent
Aquiares	AQ1	0-30 cm	Limoneux	Très Stable	Très rare	Très faible
		80-100 cm	Limono-sableux	Très Stable	Très rare	Très faible
	AQ2	0-30 cm	Limoneux	Très Stable	Très rare	Très faible
		80-100 cm	Limono-sableux	Très Stable	Très rare	Très faible
Llano Bonito	LB1	0-30 cm	Argileux	Stable	Occasionnelle	Limité
		80-100 cm	Argileux	Instable	Très fréquente	Risque fréquent
	LB2	0-30 cm	Argileux	Moy_Stable	Fréquente	Risque variable
		80-100 cm	Limono-sableux	Très instable	Systématique	Risque permanent

4. Discussion

4.1. La stabilité structurale

La stabilité structurale est améliorée plus ou moins fortement selon les sites, par le taux de fer et d'aluminium, de carbone organique, d'argile et par l'exsudation racinaire (Le Bissonnais and Le Souder, 1995).

Sur Restinclières, l'alluviosol ne présente pas une bonne stabilité des agrégats pour le test d'humectation rapide (FW) (Table 2). La teneur en oxydes de fer et d'aluminium dans ces sols de climat tempérés d'Europe de l'Ouest est trop faible pour avoir un effet notable. C'est le plus souvent la teneur en matière organique qui est le paramètre déterminant de la stabilité structurale (Monnier, 1965; Tisdall and Oades, 1982; Churchman and Tate, 1987; Gollany et al., 1991; Haynes, 1993; Le Bissonnais and Le Souder, 1995). En présence d'une texture limoneuse, le seuil de carbone en dessous duquel les risques d'instabilité structurale apparaissent est sujet à discussion, mais il est généralement admis comme étant compris entre 1 et 1,5 % de carbone (Greenland et al., 1975; Grieve, 1980; Newbould, 1980; De Ploey and Poesen, 1985; Albrecht et al., 1992; Le Villio et al., 2001). Ici les meilleurs teneurs sont retrouvées sur la parcelle A2TF et restent faibles : 1.04 % en surface, et 1.01 % en profondeur (Annexe 8). Il s'ajoute au niveau textural l'importance du taux d'argiles. Des risques d'érosion diffuse ressortent en général si celui-ci est inférieur à 15 % (Robert, 1996). Pour l'alluviosol, les teneurs sont comprises entre 14.00 et 18.80 % d'argile (Annexe 8). Enfin, l'intérêt du système racinaire est remarquable sur la parcelle A2TF. En effet, la variabilité entre la surface et la profondeur est plus forte sur cette parcelle (**Fig. 6d**) et ce décalage est également perceptible sur les valeurs de stabilité structurale (**Fig. 6a**). L'abondance de racines fines ($\leq 0.5\text{mm}$ de diamètre) en surface de la strate herbacée (A2TF) joue un rôle supplémentaire de stabilisation des agrégats par ses exsudats (Eynard et al., 2004; Pohl et al., 2009; Fattet et al., 2011; Gyssels et al., 2005).

Sur les sols tropicaux les teneurs en fer et aluminium prennent une plus grande importance.

Sur Aquiares, l'andosol présente une excellente stabilité structurale. Les fortes teneurs relevées concernent les formes de l'aluminium, du fer et du carbone organique. Celles-ci sont communes aux andosols et s'expliquent par des proportions élevées en allophanes, auxquels s'associent les hydroxyde de fer (Segalen, 1968b) et une grande quantité de carbone organique (Boudot et al., 1986; Afif et al., 1995; Dubus, 1997; Woigner, 2007). L'influence du carbone organique semble ici être majoritairement due à des formes solubles à l'eau chaude. Il est à noter que les propriétés de structure (agrégation et porosité) des allophanes sont totalement dépendantes de l'état hydrique du milieu. Ainsi le séchage de ces sols conduit à des modifications irréversibles de l'organisation du matériau, ce qui peut avoir des incidences sur de nombreuses propriétés de ces sols comme la stabilité structurale (Feller and Beare, 1997; AFES et al., 2008).

Sur Llano Bonito, le ferralitisol apparaît comme « stable » à « moyennement stable » en surface, et « instable » en profondeur. Les propriétés relevées ici pour leur fort taux sont : le carbone organique, la teneur en oxy-hydroxyde de fer et d'aluminium et le taux d'argiles. La variabilité marquée entre chaque échantillon pour la stabilité est très similaire à celle relevée pour le taux de carbone organique, ce qui est moins le cas pour le taux en oxy-hydroxydes de fer et d'aluminium et pas du tout pour le taux d'argiles. Ainsi, l'influence du carbone organique, avec des quantités plus fortes en carbone soluble à l'eau chaude, semble prédominante par rapport à celle des oxy-hydroxydes et des argiles. Il est toutefois nécessaire de rappeler que les deux horizons de profondeur étaient très graveleux et ont nécessité un tamisage plus soutenu ce qui a pu perturber les résultats de profondeur.

4.2. La résistance au cisaillement

La cohésion est en premier lieu influencée par la charge normale, l'humidité et la densité (Zhang et al., 2001). Le choix était d'obtenir une résistance au cisaillement représentative de conditions réelles de site. Ainsi les charges normales et la densité in-situ ont été reproduites ; et l'effet d'humidité a été réduit en ramenant les échantillons testés à un potentiel hydrique proche. Les charges normales ont été définies à de faibles valeurs ce qui est peu commun en mécanique des sols. Ceci ne permet pas d'effectuer de comparaisons bibliographiques et il devient donc difficile de ramener les résultats à degré référent de résistance au cisaillement du sol. Les cohésions obtenues peuvent donc uniquement être comparées entre les trois types de sols. La grande

variabilité de la densité est très similaire à la variabilité de la cohésion avec un coefficient de corrélation de 0.88 (chapitre 3.2 ; Fig. 6b/c ; Table 3). Cependant, plus en détail, les variabilités de profondeur les plus fortes permettent de faire ressortir quelques hypothèses de l'influence indirecte de certaines propriétés du sol sur sa densité et donc sa résistance au cisaillement.

Sur Restinclières, l'alluviosol a la meilleure des trois cohésions moyennes. On constate que l'écart le plus important de la valeur de cohésion entre la surface et la profondeur sur ce site (parcelle A2TF) correspond à l'écart de densité qui lui-même peut-être associé à la différence de RLD. Il pourrait s'expliquer par l'abondance de racines fines ($\leq 0.5\text{mm}$) qui ameublissent le sol et diminuent la cohésion interparticulaires.

Sur Aquiares, la résistance au cisaillement dépend directement de la très faible densité apparente et de la grande porosité de l'andosol (McNabb and Boersma, 1993). Sa cohésion est faible et il est donc typiquement difficile sur ce cas de déceler les effets des propriétés du sol. De plus, ce sol est mécaniquement à la limite du protocole de mesure des tests en cisaillement direct avec un sur-compactage du sol sous les fortes charges. Ceci signifie que ces résultats de cohésion sont peut-être encore plus faibles.

Sur la parcelle CLB1 de Llano Bonito, l'augmentation avec la profondeur du taux d'argiles est très similaire à celle de la densité et de la cohésion. Le taux d'argiles pourrait donc avoir une influence positive sur la cohésion du sol (Léreau, 2005). Cependant, rappelons que l'angle de frottement interne (Φ) est un autre paramètre important dans la résistance au cisaillement dont les résultats ici sont difficilement interprétables. Or l'angle de frottement interne est plus faible pour un sol argileux que sableux (GCI 730, 2008). Ainsi, avec les résultats et incertitudes actuelles sur ce site, nous ne pouvons pas tirer d'avantage d'hypothèses sur les effets du taux d'argiles sur la résistance au cisaillement.

Les éventuels effets de la matière organique (Ekwue and Stone, 1995) et de formes de fer et d'aluminium ne sont pas remarquables ici sur la résistance au cisaillement.

Il est important de rappeler que la résistance au cisaillement testée correspond à un comportement mécanique intrinsèque du sol. Seulement une partie des effets additionnels¹ est testée (exsudation racinaire) et les variabilités d'échelles ne sont pas prises en compte. La cohésion additionnelle apportée par l'interposition des racines dans le plan de cisaillement pourrait compenser voir dépasser l'effet ameublissant (A2TF, Restinclières) de celles-ci. De plus l'échelle de travail des tests (boîte de 72 cm^3) amène à un résultat spécifique à ce volume. L'idée d'extrapoler ces résultats à l'ensemble du sol ou de l'horizon pourrait-être faite uniquement si le sol était homogène, ce qui n'est pas le cas. A l'échelle du profil, certains éléments tels que la présence de blocs rocheux (décimétrique) sont présents dans la matrice de sol (Aquiares) et peuvent également améliorer la résistance au cisaillement en s'interposant de la même manière que les racines. Tout ceci démarque cette mesure de laboratoire, qui ressort un comportement intrinsèque du sol, par rapport à la représentation de terrain. Mais cette échelle de mesure reste néanmoins la première étape nécessaire qui permet de comparer, pour des tests équivalents, la cohésion par rapport à l'angle de frottement interne et également de comprendre d'avantage la relation de la résistance au cisaillement du sol avec la stabilité structurale.

4.3. Relation entre la stabilité structurale et la résistance au cisaillement

La relation entre la stabilité et la cohésion apparaît ici comme négative (Table 3) et se ressent sur les trois sites. L'alluviosol subi le double effet du système racinaire qui est nettement remarquable sur la parcelle de noyer plus herbacés (A2TF). D'une part les racines fines favorisent la stabilité structurale mais d'autre part elles ameublissent le sol et diminuent sa cohésion. L'andosol a des propriétés exceptionnelles de stabilité structurale avec une très bonne agrégation mais la grande porosité de la matrice de sol ne lui apporte qu'une très faible cohésion inter-agrégats. Le ferralitisol a une meilleure stabilité structurale en surface influencée par l'augmentation du taux de carbone organique alors que sa cohésion augmente avec la profondeur notamment avec celle du taux d'argiles. Ainsi, la relation entre la stabilité structurale et la résistance au cisaillement reste complexe. Elle dépend fortement de l'ensemble des interactions, répartitions et effets de seuils des propriétés physico-chimiques du sol.

¹ Correspond à tout effet pouvant s'ajouter aux propriétés intrinsèques du sol et influencer la résistance au cisaillement.

La relation négative n'implique pas systématiquement que l'effet des propriétés physico-chimique améliore un des paramètres d'érodibilité pour dégrader l'autre. Sur Restinclières l'effet racinaire améliore la stabilité et diminue la cohésion effective du sol, mais sur Llano Bonito bien que la relation soit négative, le taux de carbone et d'argile améliore conjointement la stabilité structurale et la cohésion effective. Cette dernière relation apparaît uniquement suite à une évolution divergente de ces deux propriétés.

4.4. L'agroforesterie

La mise en place des systèmes de mesure sur différents modes de culture avait pour objectif de percevoir éventuellement les effets de l'agrosystème sur l'érodibilité du sol. Des différences ont été relevées entre la culture de blé et les herbacées. Cependant les protocoles de mesure mis en place n'ont pas suffi à dégager l'effet du caféier et des arbres (érythrine et noyer) dans le système agroforestiers.

5. Conclusion et perspectives

L'étude a permis i) de décrire la sensibilité de trois types de sols face l'érosion hydrique de surface et l'érosion en masse; ii) d'en ressortir l'influence de leurs propriétés physico-chimiques sur la stabilité structurales et la cohésion effective et de mieux comprendre la relation entre ces deux indicateurs d'érodibilité.

Pour la stabilité structurale ont été relevés les effets du carbone organique, des formes du fer et de l'aluminium, de l'argile et de l'exsudation racinaire. Pour la résistance au cisaillement, l'interprétation s'est axée sur la cohésion effective qui se retrouve fortement corrélée avec la densité et plus en détail avec le système racinaire et l'argile.

L'alluviosol (Restinclières, France) présente une mauvaise stabilité structurale liée à de faibles taux en carbone organique et en argiles. Elle se voit toutefois améliorée par l'exsudation des racines fines (≤ 0.5 mm de diamètre) sur une des parcelles. L'alluviosol a en revanche une bonne cohésion effective liée à sa forte densité apparente. Celle-ci est cependant dégradée par l'ameublissement du sol provoqué par les racines fines. L'andosol (Aquiaries, Costa Rica) a une excellente stabilité structurale liée aux propriétés et teneurs élevées en allophanes (silicates d'alumine), oxy-hydroxydes de fer et carbone organique. Sa très faible densité apparente ne lui apporte pas une bonne cohésion effective. Le ferrallisol (Llano Bonito, Costa Rica) a une bonne stabilité structurale liée par de fort taux en oxy-hydroxydes de fer et d'aluminium, de carbone organique et d'argiles. Sa cohésion n'est pas meilleure que celle de l'andosol excepté pour l'horizon très argileux.

L'effet des racines fines et du taux d'argiles sont relevés à la fois sur la stabilité structurale et la cohésion du sol et permettent d'expliquer plus en détail la relation entre ces deux indicateurs d'érodibilité. Les racines fines ont un effet opposé alors que le taux d'argiles à un effet positif commun sur ces deux formes d'érosion hydrique.

La répétitivité des résultats n'est pas suffisante pour permettre de considérer toutes ces conclusions comme solides et il devient donc important d'effectuer d'avantage de mesures sur chacun des sites. Cela permettra d'effectuer des comparaisons intra-site plus précises et pourrai éventuellement confirmer ou infirmer les effets du carbone organique et des formes du fer et de l'aluminium sur la cohésion. L'ensemble de ces données restent représentatives du comportement intrinsèque du sol à une petite échelle. Il serait donc intéressant d'effectuer des tests de cisaillement avec les racines afin de calculer la résistance au cisaillement réelle du site. De même pour mesurer l'effet d'un système agroforestier, il serait important d'utiliser d'avantage de travaux portant sur l'importance du système racinaire de l'arbre dans la résistance au cisaillement du sol et d'effectuer des mesures plus en profondeur sur chacune des fosses. Par ailleurs, d'autres paramètres stabilisants tels que la macrofaune n'ont pas du tout été pris en compte (Citeau et al., 2008; Lavorel et al., 2008). Enfin, spécifiquement au site de Llano Bonito, un grand nombre de glissements de terrain est observable. Il serait intéressant d'y relever la profondeur de la zone de fragilité, d'en identifier la nature et la structure du sol et éventuellement d'effectuer des tests de cisaillement de laboratoire à titre comparatif.

REFERENCES

- AFES, Baize, D., Girard, M.-C., 2008. Référentiel pédologique 2008, Association Française pour l'Etude du Sol. Editions Quae.
- Afif, E., Chaplot, V., Torrent, J., 1995. Organic matter delays but does not prevent phosphate sorption by cerrado soils from Brazil. *Soil Science AIASR* 207-211.
- Albrecht, A., Rangon, L., Barrte, P., 1992. Effets de la matière organique sur la stabilité structurale et la détachabilité d'un vertisol et d'un ferrisol (Martinique). *Cahier ORSTOM, Série Pédologie* 121-133.
- Al-Durrah, M., Bradford, J.M., 1981. New Methods of Studying Soil Detachment due to Waterdrop Impact1. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45, 949-953.
- Angers, D.A., Caron, J., 1998. Plant-induced Changes in Soil Structure: Processes and Feedbacks. *Biogeochemistry* 42, 55-72.
- De Baets, S., Poesen, J., Gyssels, G., Knapen, A., 2006. Effects of grass roots on the erodibility of topsoils during concentrated flow. *Geomorphology* 76, 54-67.
- Baize, D., 2000. Guide des analyses en pédologie: choix, expression, présentation, interprétation. Editions Quae.
- Barthes, B.G., Kouakoua, E., Larre-Larrouy, M.-C., Razafimbelo, T.M., de Luca, E.F., Azontonde, A., Neves, C.S.V.J., de Freitas, P.L., Feller, C.L., 2008. Texture and sesquioxide effects on water-stable aggregates and organic matter in some tropical soils. *Geoderma* 143, 14-25.
- Le Bissonnais, Y., 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *Eur J Soil Science* 47, 425-437.
- Le Bissonnais, Y., Singer, M.J., 1993. Seal formation, runoff, and interrill erosion from seventeen California soils. *Soil Science Society of America journal* 57, 224-229.
- Le Bissonnais, Y., Le Souder, C., 1995. Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. *Etude et Gestion des Sols (France)* 2, 43-56.
- Boudot, J.P., Bel Hadji, B.A., Choné, T., 1986. Carbon mineralization in Andosols and aluminium-rich highlands soils. *Soil Biology & Biochemistry* 457-461.
- Bouyoucos, G.J., 1926. Estimation of the colloidal material in soils. *Science* 64, 362-362.
- Churchman, G.J., Tate, K.R., 1987. Stability of aggregates of different size grades in allophanic soils from volcanic ash in New Zealand. *Journal of Soil Science* 38, 19-27.
- Citeau, L., Bispo, A., Bardy, M., King, D., 2008. Gestion durable des sols. Editions Quae.
- Costa, C., Dwyer, L.M., Hamel, C., Muamba, D.F., Wang, X.L., Nantais, L., Smith, D.L., 2001. Root contrast enhancement for measurement with optical scanner-based image analysis. *Can. J. Bot.* 79, 23-29.
- Craig, W., 2004. Soil mechanics. Librairie Lavoisier 480.
- Delvaux, B., Herbillon, A.J., Vielvoye, L., 1989. Characterization of a weathering sequence of soils derived from volcanic ash in Cameroon. Taxonomic, mineralogical and agronomic implications. *Geoderma* 45, 375-388.
- Dubus, I., 1997. La rétention du phosphore dans les sols principes d'étude, modélisation, mécanismes et compartiments du sol impliqués. *Cahier ORSTOM, Série Pédologie*.
- Ekwue, E.I., Stone, R.J., 1995. Organic matter effects on the strength properties of compacted agricultural soils. *ASABE, Agricultural soil* 38, 357-365.
- Eynard, A., Schumacher, T.E., Lindstrom, J., Malo, D., 2004. Aggregate sizes and stability in cultivated South Dakota prairie Ustolls and Usterts. *Soil Science Society of America* 68, 1360-1365.
- FAO, 2006. World reference base for soil resources: a framework for international classification, correlation and communication., 2nd ed. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Fattet, M., Fu, Y., Ghestem, M., Ma, W., Foulonneau, M., Nespoulous, J., Le Bissonnais, Y., Stokes, A., 2011. Effects of vegetation type on soil resistance to erosion: Relationship between aggregate stability and shear strength. *CATENA* 87, 60-69.
- Feller, C., Beare, M.H., 1997. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma* 79, 69-116.
- Frei, M., Boll, A., Graf, F., Heinemann, H.R., Springman, S., 2003. Quantification of the influence of vegetation on soil stability. Presented at the International Conference on Slope Engineering, Lee, C. F. Tham, L. G., Hong-Kong, pp. 872-877.
- Gale, W.J., Cambardella, C.A., Bailey, T.B., 2000. Root-Derived Carbon and the Formation and Stabilization of Aggregates. *Soil Science Society of America Journal* 64, 201.
- GCI 730, 2008. Chapitre 4 Résistance au cisaillement des argiles.
- Ghani, A., Dexter, M., Perrott, K.W., 2003. Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and cultivation. *Soil Biology and Biochemistry* 35, 1231-1243.
- Ghestem, M., Sidle, R.C., Stokes, A., 2011. The Influence of Plant Root Systems on Subsurface Flow: Implications for Slope Stability. *BioScience* 61, 869-879.
- Ghidey, F., Alberts, E.E., 1997. Plant root effects on soil erodibility, splash detachment, soil strength, and aggregate stability, in: ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers. pp. 129-135.
- Gijsman, A., Thomas, R., 1995. Aggregate size distribution and stability of an oxisol under legume-based and pure grass pastures in the eastern Colombian savannas. *Soil Res.* 33, 153-165.

- Gollany, H.T., Schumacher, T.E., Evenson, P.D., Lindstrom, M.J., Lemme, G.D., 1991. Aggregate stability of an eroded and desurfaced Typic Argiustoll. *Soil Science Society of America journal* 55, 811-816.
- Gómez Delgado, F., 2010. Hydrological, ecophysiological and sediment processes in a coffee agroforestry basin: Combining experimental and modelling methods to assess Hydrological environmental services.
- Greenland, D.J., Rimmer, D., Payne, D., 1975. Determination of the Structural Stability Class of English and Welsh Soils, Using a Water Coherence Test. *Journal of Soil Science* 26, 294-303.
- Grieve, I.C., 1980. The magnitude and significance of soil structural stability declines under cereal cropping. *CATENA* 7, 79-85.
- Guérif, J., 1982. La matière organique du sol et son évolution B.T.I., 443-450.
- Gyssels, G., Poesen, J., Bochet, E., Li, Y., 2005. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: a review. *Progress in Physical Geography* 29, 189 -217.
- Haynes, R.J., 1993. Effect of sample pretreatment on aggregate stability measured by wet sieving or turbidimetry on soils of different cropping history. *Journal of Soil Science* 44, 261-270.
- Haynes, R.J., 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.
- Haynes, R.J., Francis, G.S., 1993. Changes in microbial biomass C, soil carbohydrate composition and aggregate stability induced by growth of selected crop and forage species under field conditions. *Journal of Soil Science* 44, 665-675.
- Jeanroy, E., 1983. Diagnostic des formes du fer dans les pédogenèses tempérées: évaluation par les réactifs chimiques d'extraction et apports de la spectrométrie.
- Kouakoua, E., Sala, G.-H., Barthes, B., Larre-Larrouy, M.-C., Albrecht, A., Feller, C., 1997. La matière organique soluble à l'eau chaude et la stabilité de l'agregation. Aspects méthodologiques et application à des sols ferrallitiques du Congo. *Eur J Soil Science* 48, 239-247.
- Lavorel, S., Sarthou, J.-P., Carré, G., Chauvel, B., Cortet, J., Dajoz, I., Dupraz, C., Farruggia et coll., A., Lavergne, S., Liagre, F., Lumaret, J.-P., Quétier, F., Roger-Estrade, J., Schmid, B., Simon et coll., S., Steinberg, C., Tichit, M., Vaissière, B., Tuinen, D. van, Villenave, C., 2008. Chapitre 2. Intérêts de la biodiversité pour les services rendus par les écosystèmes, in: ESCo "Agriculture Et Biodiversité". p. 226.
- Legout, C., Leguedois, S., Le Bissonnais, Y., 2005. Aggregate breakdown dynamics under rainfall compared with aggregate stability measurements. *Eur J Soil Science* 56, 225-238.
- Léreau, J., 2005. Chapitre 4 La résistance au cisaillement - Etude en Laboratoire, in: Cours INSA - Géotechnique 1.
- Magnan, J.-P., 1991. Résistance au cisaillement. *Techniques de l'Ingénieur, traité Construction*, Ed. Techniques Ingénieur 1-25.
- McKeague, J.A., Day, J.H., 1966. Dithionite-and oxalate-extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils. *Canadian Journal of Soil Science* 46, 13-22.
- McNabb, D.H., Boersma, L., 1993. Evaluation of the relationship between compressibility and shear strength of andisols. *Soil Science Society of America journal* 57, 923-929.
- Mehra, O.P., Jackson, R.B., 1960. Iron Oxide Removal from Soils and Clays by a Dithionite-Citrate System Buffered with Sodium Bicarbonate. *Clays and Clay Minerals* 7, 317-327.
- Monnier, G., 1965. Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols.
- Mulia, R., Dupraz, C., 2006. Unusual Fine Root Distributions of Two Deciduous Tree Species in Southern France: What Consequences for Modelling of Tree Root Dynamics? *Plant and Soil* 281, 71-85.
- Nearing, M.A., West, L.T., 1988. Soil Strength Indices as Indicators of Consolidation, in: ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers. pp. 471-476.
- Newbould, P., 1980. Losses and accumulation of organic matter in soils, in: D. Boels, DB Davies and AE Johnston (Eds.). Presented at the Land Use Seminar on Soil Degradation, Wageningen.
- Osman, N., Barakbah, S.S., 2006. Parameters to predict slope stability--Soil water and root profiles. *Ecological Engineering* 28, 90-95.
- De Ploey, J., Poesen, J., 1985. Aggregate stability, runoff generation and interrill erosion. *Geomorphology and Soils* 99-120.
- Pohl, M., Alig, D., Körner, C., Rixen, C., 2009. Higher plant diversity enhances soil stability in disturbed alpine ecosystems. *Plant Soil* 324, 91-102.
- Rapport d'étude PIRAT, 2005. Programme Intégré de Recherches en Agroforesterie à ResTinclières. Projet AGROOF.
- Robert, M., 1996. Le Sol : Interface dans l'environnement ressource pour le développement. Masson, Paris 244.
- Römkens, M.J.M.R., Roth, C.B., Nelson, D.W., 1977. Erodibility of Selected Clay Subsoils in Relation to Physical and Chemical Properties. *Soil Science Society of America Journal* 41, 954-960.
- Roose, E., 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES), 70th ed. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome.
- Schuppener, B., Boháč, J., Dysli, M., 1998. Laboratory methods for direct shear tests, in: Recommendation of the ISSMGE (International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering) for Geotechnical Testing. Beuth Verlag GmbH, Germany.
- Schwertmann, U., 1964. Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit Ammoniumoxalat-Lösung. *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde* 105, 194-202.

- Segalen, P., 1968a. Note méthode détermination produits minéraux amorphes dans sols à hydroxydes tropicaux. Cahier ORSTOM, Série Pédologie 6, 105-126.
- Segalen, P., 1968b. Les sols Ando ou Andosols. Cahier ORSTOM, Série Pédologie 2-8.
- Stern, R., Ben-Hur, Shainberg, I., 1991. Clay mineralogy effect on rain infiltration, seal formation and soil losses. Soil science 152.
- Stokes, A., Atger, C., Bengough, A.G., Fourcaud, T., Sidle, R.C., 2009. Desirable plant root traits for protecting natural and engineered slopes against landslides. Plant Soil 324, 1-30.
- Tamm, O., 1922. Eine Method zur Bestimmung der anorganischen Komponenten des Golkomplex in Boden. Medd. Statens skogforsoksanst 19, 385-404.
- Terzaghi, K., 1943. Theoretical Soil Mechanics. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA.
- Timoshenko, S.P., 1983. History of strength of materials: with a brief account of the history of theory of elasticity and theory of structures. Courier Dover Publications.
- Tisdall, J.M., Oades, J.M., 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. European Journal of Soil Science 33, 141-163.
- Le Villio, M., Arrouays, D., Deslais, W., Daroussin, J., Le Bissonnais, Y., Clergeot, D., 2001. Estimating the amounts of exogenous organic matter needed to restore and maintain French loamy soils to a given organic level. Etude et Gestion des Sols (France) 8, 47-63.
- Wander, M.M., Yang, X., 2000. Influence of tillage on the dynamics of loose- and occluded-particulate and humified organic matter fractions. Soil Biology and Biochemistry 32, 1151-1160.
- Watson, D.A., Laflen, J.M., 1986. Soil Strength, Slope, and Rainfall Intensity Effects on Interrill Erosion, in: ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers. pp. 98-102.
- Woigner, T., 2007. Relation entre la structure poreuse des sols à allophanes et le stockage du carbone: caractérisation expérimentale et modélisation. IRD ; UR Seqbio "Séquestration du carbone et bio fonctionnement des sols."
- Zhang, B., Zhao, Q.G., Horn, R., Baumgartl, T., 2001. Shear strength of surface soil as affected by soil bulk density and soil water content. Soil and Tillage Research 59, 97-106.
- Zobel, R.W., 2008. Hardware and software efficacy in assessment of fine root diameter distributions. Computers and Electronics in Agriculture 60, 178-189.

Normes

- NF ISO 10694, 1995. Qualité du sol - Dosage du carbone organique et du carbone total après combustion sèche (analyse élémentaire). Afnor. Paris.
- NF ISO 11465, 1994. Qualité du sol - Détermination de la teneur pondérale en matière sèche et en eau - Méthode gravimétrique. Afnor. Paris.
- NF X31-107, 2003. Qualité du sol - Détermination de la distribution granulométrique des particules du sol - Méthode à la pipette. Afnor. Paris.
- NF X31-501, 1992. Qualité des sols - Méthodes physiques - Mesure de la masse volumique apparente d'un échantillon de sol non remanié - Méthode du cylindre. Afnor. Paris.
- NF X31-515, 2005. Qualité du sol - Mesure de la stabilité d'agrégats de sols pour l'évaluation de la sensibilité à la battance et à l'érosion hydrique. Afnor. Paris.

ANNEXES

Annexe 1 - Descriptif du site Restinclières – Restinclières site description

Domaine de Restinclières (Hérault (34), France), Parcelle sud « A2 »

Sous-parcelles

- agricole TF : monoculture de noyer + tapis d'herbacées
- agricole TA : monoculture de blé
- agroforestière AF : association noyer + blé

Espèces cultivées

- noyer hybride (*Juglans regia* L. et *Juglans nigra* L.)
- blé dur (*Triticum turgidum ssp durum*)

Sols alluviaux profonds (CPCS)

Eutric fluvisol (FAO)

Entisols – udifluvents (USDA)

Localisation des fosses de prélèvements

A2TF	N 43°42'20.1"	E 003°51'43.3"
A2TA	N 43°42'17.2"	E 003°51'41.4"
A2AF	N 43°42'15.7"	E 003°51'38.1"

Coordonnées Lambert II



Sous-parcelle agroforestière A2AF (JN.16.05.11)



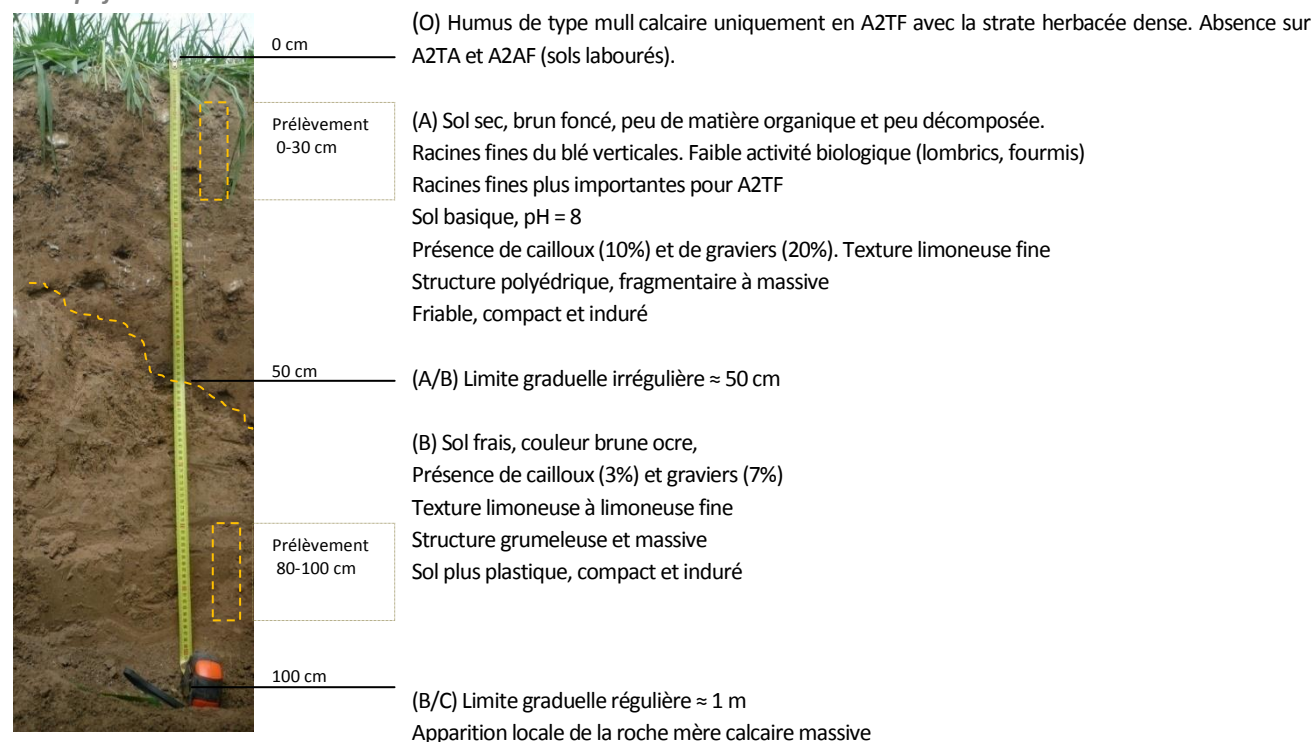
Fosse de prélèvement A2AF (JN.16.05.11)

Situation du profil

Climat méditerranéen. Précipitations annuelles moyennes : estimées à 495mm .an-1 de 1972 à 2005. Précipitation antécédente à l'échantillonnage : >48h. États hydrique de surface sec. Léger encroûtement.

Topographie : plaine étendue, altitude≈96m ; pente ouest <5%. Géologie : alluvions fines (Holocène), marnes-calcaires (Valanginien). Conduite de culture : Labour et semis direct en novembre.

Descriptif des horizons



Profil A2AF (JN - 16.05.11)

Références utilisées pour la description : (Rapport PIRAT, 2005; WRB, 2006; Référentiel pédologique, 2008)

Annexe 2 - Descriptif du site Aquiares – *Aquiares site description*

Aquiares (Turrialba, Costa Rica) – Parcelle « AQ »

(sur le bassin versant du projet Coffee Flux)

Sous-parcelles et espèces cultivées

- agricole n°1 : monoculture de café Arabica (*Coffea arabica* L)
- agroforestière n°2 : association érythrine (*Erythrina poeppigiana*) + café

Situation du profil

Climat tropical humide. Précipitations annuelles moyennes estimées à 3014mm.an-1 entre 1973-2009. Précipitation la veille du prélèvement (après-midi). État hydrique de surface très humide. Sol pulvérulent. Hydrogéologie : grande capacité d'infiltration, faible ruissellement (projet Coffee Flux). Topographie : zone de transfert du bassin versant, 1050m d'altitude ; vallonnée ; pentes locales 10%. Géologie : basaltes (coulées, lahars, cendres, agglomérats du Quaternaire issues du volcan Turrialba). Géomorphologie : aucune trace d'érosion n'est relevée sur le terrain bien qu'il y ait des conditions propices à cela. Conduite de culture : rangées de sol nue entre plantations (sol déshebé, varie selon la litière).

Descriptif des horizons

(O) Humus de type mull eutrophe à mésotrophe (litière foliaire du caféier et de l'érythrine)

(A) Sol humide tixotrope

Couleur noir, matière organique humifiée et peu décomposée. Racines millimétriques du café. Forte activité biologique (lombrics, nématodes parasites de racines de café (*Meloidogyne exigua*), fourmis, termites)

Sol acide, pH = 5 à 6

Environ 2% de cailloux et 5% de graviers

Texture limoneuse

Structure aérée, grumeleuse, particulière à fragmentaire

Sol plastique, meuble et non induré

Il n'y a pas de distinction nette d'un horizon inférieur jusqu'à 1m. Des variations s'observent toutefois à partir de 50 cm avec une transition vers un horizon plus sableux, et une augmentation du pourcentage en éléments grossiers (10 à 15 % de cailloux et graviers), et de la biomasse racinaire.

Abondance de blocs basaltiques métriques à environ 1m.

Andosols (CPCS)

Mollic Andosols (FAO)

Andisols (Eutrandepts) (USDA)

Localisation des fosses de prélèvements

AQ1	N 09°56'16.18"	E 083°43'45.9"
AQ2	N 09°56'16.7"	E 083°43'46.4"

Coordonnées Lambert II



Sous-parcelle agroforestière AQ2 (JN.08.06.11)



Profil AQ1 (Calicata 1 – OR.2010)

Références utilisées pour la description : Gómez Delgado et al., 2011; Gómez Delgado, 2010; WRB, 2006; Référentiel pédologique, 2008

Annexe 3 - Descriptif du site Llano Bonito –Llano Bonito site description

Llano Bonito (Leon Cortes, Costa Rica) - Parcelle « LB » (de Oldemar)

Sous-parcelles et espèces cultivées

- agricole n°2 : monoculture de café Arabica (*Coffea arabica* L)
- agroforestière n°1 : association érythrine (*Erythrina poeppigiana*) + café



Parcelle de Oldemar – LB : colline au premier plan (JN.16.05.11)

Ferrallisol désaturé et rajeuni (CPCS)

Ferrallitic cambisol (FAO)

Dystropepts (latosols) (USDA)

Localisation des fosses de prélèvements

LB1	N 09°40'14.6"	E 084°05'42.3"
LB2	N 09°40'15.2"	E 084°05'41.7"

Coordonnées Lambert II



Association Erythrine + café (MV.2010)

Situation du profil

Climat tropical humide. Précipitations annuelles du même ordre de grandeur que celles d'Aquaires, (346 mm.mois⁻¹ entre le 22 juin et le 28 juillet 2011). Dernière précipitation la veille du prélèvement (après-midi). États hydrique de surface très humide. Sol consistant et collant. Hydrogéologie : infiltration, faible ruissellement (études menées en cours – Mario Villatoro). Topographie : sur le versant, 1495 m, pentes >20%. Géologie : formation Terraba Schistes du Miocène. Géomorphologie : paysage marqué par de nombreux glissements de terrain, sol sensible à l'érosion.

Conduite de culture : rangées de sol nue entre plantations (sol désherbé, variable selon la litière).

Descriptif des horizons



Profil A2AF (JN - 16.05.11)

Sol peut épais (≈1m)

(O) Humus de type mull (litière foliaire du caféier et de l'érythrine)

(A) Sol frais à humide.

Couleur rouge orangée, très peu de matière organique.

Racines millimétriques du café. Faible activité biologique des organismes du sol.

Sol acide

Environ 10% de cailloux et 20% de gravier. Altération marquée (roche friable et oxydée).

Texture argileuse à très argileuse pour LB1 0-30

Structure fine, granulaire, fragmentaire.

Sol plastique, résistant et non induré

(A/B) Transition très graduelle vers un horizon beaucoup plus minéral

Les évolutions observables du profil concernent la texture. et il y a une différence entre LB1 et LB2. Dans les deux cas la quantité en éléments grossiers augmente avec 15% de cailloux et 30% de graviers pour LB1 et 25% de cailloux et 50% de graviers pour LB2.

La texture est également bien plus argileuse pour LB1.

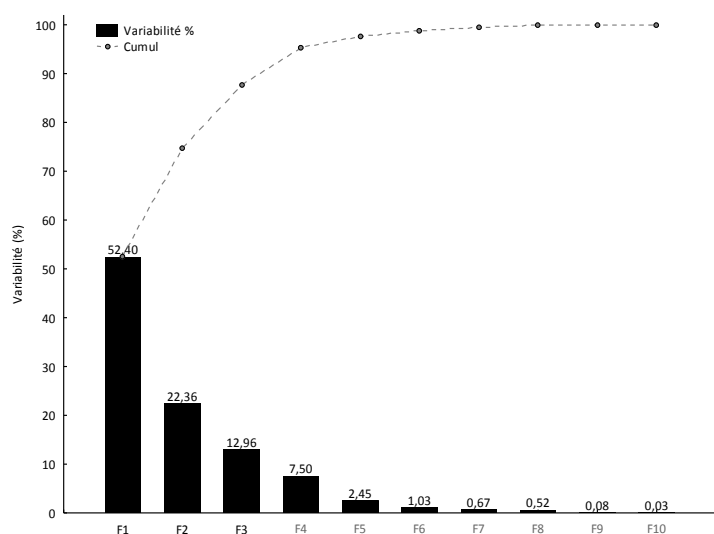
Apparition de la roche mère très altérée à 1m chez LB2.

La différence de profondeur entre les deux profils peut expliquer la variabilité entre le taux d'argiles et d'éléments grossiers.

Tâches d'oxydo-réduction dans le profil liées aux écoulements des eaux d'infiltrations dans la direction de la pente.

Références utilisées pour la description : 2010; WRB, 2006; Référentiel pédologique, 2008

Annexe 4 - Analyse en Composantes Principales et matrice de corrélation –ACP and correlation matrix

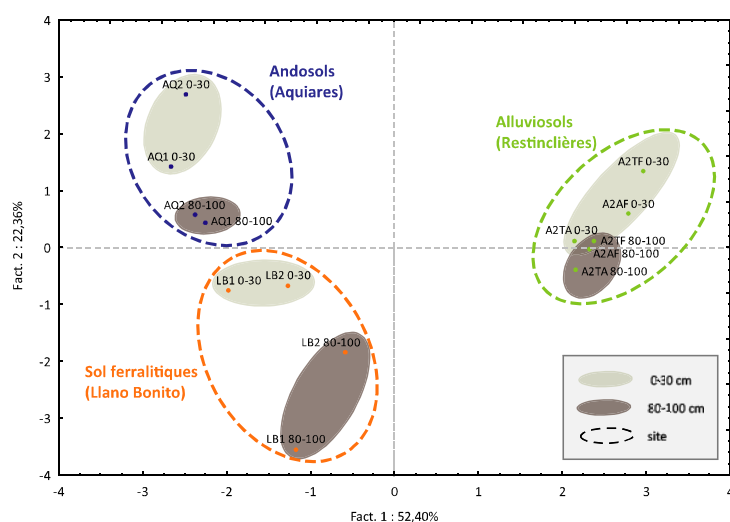


◀ **Fig. 7** Diagramme des valeurs propres et courbe de la variance cumulée – « Scree Plot ».

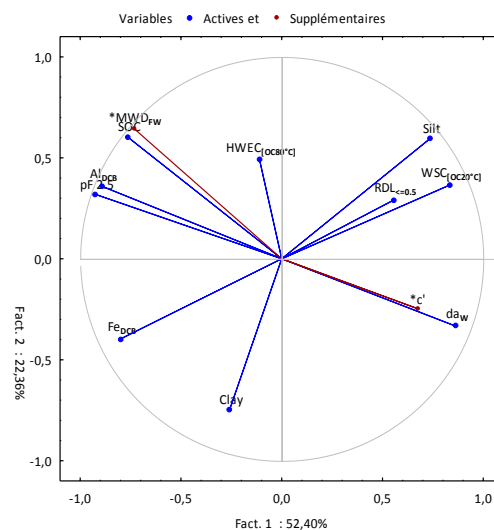
Les valeurs propres sont classées en ordre décroissant, représentant l'importance des facteurs respectifs pour expliquer la dispersion des données.

▼ **Fig. 8** Analyse en composante principale : projection sur le plan factoriel F1xF2. Il représente 73.42 % de l'inertie totale des données et suffit à ressortir la hiérarchisation recherchée.

Principal component analysis (ACP) : F1xF2 projection



a. Projection des individus (F1xF2)



b. Projection des variables (F1xF2)

Table 3 Matrice de corrélation des indicateurs d'érodibilité c' et MWDFW et des propriétés physico-chimiques du sol. Les corrélations significatives sont marquées en vert à $p < 0.05$.

Correlation matrix of erodibility indicators c' and MWDFW and physico-chemical properties of soil. The significant correlations are marked in green at $p < 0.05$.

Variables	c'	MWDFW	da_W	pF 2.5	RLD	$RD_{L<0.5}$	$RD_{L[0.5;1.0]}$	$RD_{L[1.0;2.0]}$	$RD_{L>2.0}$	SRL	SOC	$WSC_{[0.20^*c]}$	$WEC_{[0.80^*c]}$	Sand	Silt	Clay	Al_{DCB}	Fe_{DCB}
c'																		
MWDFW	-0.66																	
da_W	0.88	-0.85																
pF 2.5	-0.65	0.89	-0.90															
RLD	-0.23	0.02	-0.05	-0.24														
$RD_{L<0.5}$	-0.06	-0.17	0.18	-0.45	0.95													
$RD_{L[0.5;1.0]}$	-0.56	0.42	-0.63	0.63	0.00	-0.23												
$RD_{L[1.0;2.0]}$	-0.53	0.60	-0.73	0.72	0.05	-0.27	0.82											
$RD_{L>2.0}$	-0.42	0.58	-0.64	0.62	0.12	-0.20	0.56	0.93										
SRL	-0.27	-0.04	-0.19	0.18	0.03	-0.05	0.78	0.34	0.03									
SOC	-0.62	0.92	-0.81	0.89	-0.06	-0.27	0.61	0.70	0.59	0.13								
$WSC_{[0.20^*c]}$	0.45	-0.40	0.66	-0.67	0.42	0.52	-0.29	-0.35	-0.32	-0.03	-0.34							
$HWE_{[0.80^*c]}$	-0.20	0.26	-0.14	0.15	0.13	0.07	0.37	0.28	0.11	0.17	0.54	0.35						
Sand	-0.33	0.49	-0.41	0.35	-0.14	-0.17	-0.14	0.07	0.17	-0.36	0.31	-0.21	-0.13					
Silt	0.48	-0.13	0.47	-0.45	0.52	0.55	-0.28	-0.17	-0.04	-0.16	-0.19	0.82	0.14	-0.02				
Clay	-0.02	-0.32	0.05	-0.01	-0.20	-0.19	0.28	0.04	-0.11	0.38	-0.14	-0.33	0.02	-0.80	-0.59			
Al_{DCB}	-0.63	0.94	-0.87	0.96	-0.22	-0.40	0.43	0.57	0.53	-0.04	0.87	-0.66	0.10	0.44	-0.41	-0.11		
Fe_{DCB}	-0.52	0.30	-0.53	0.56	-0.34	-0.43	0.45	0.36	0.23	0.18	0.43	-0.69	0.17	-0.21	-0.83	0.67	0.51	

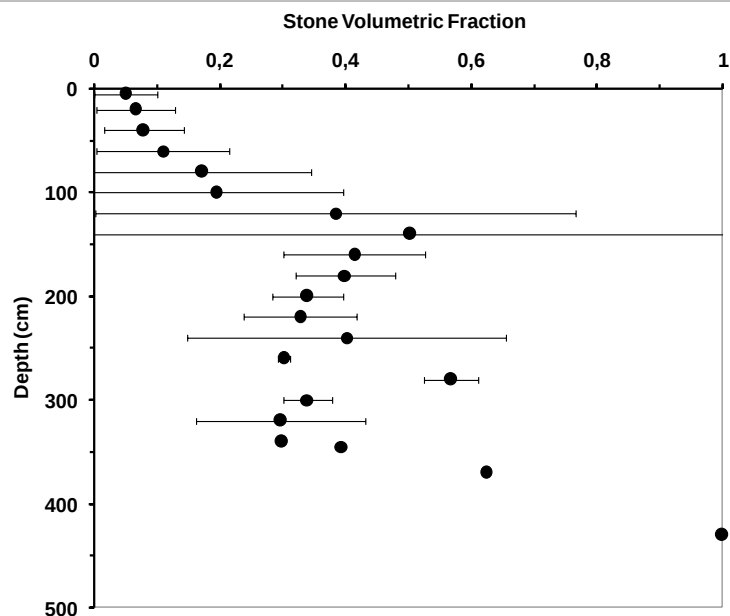
Annexe 5 - Tableau de données moyennes par sites – *Table of mean value per site*

Valeur moyenne par site des variables mesurées pour différents agrosystèmes à deux profondeurs – Valeur moyenne $\pm$ erreur standard – Résultats des tests post-hoc de Tukey ($p < 0.05$) : les valeurs avec les mêmes lettres (a,b,c) représentent des groupes homogènes sous le niveau significatif de $p = 0,5$.

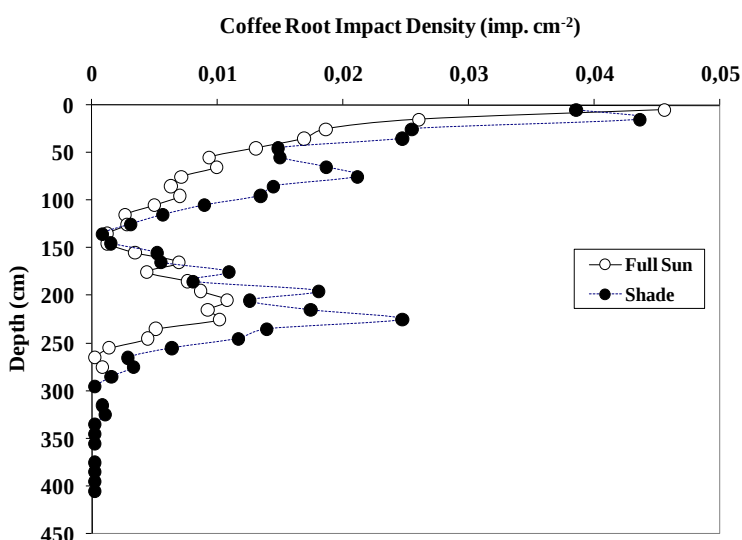
Mean value per site of the variables measured for different agro-ecosystems at two depths - Mean value $\pm$ standard error - Results of tests post-hoc Tukey ($p < 0.05$): values with the same letters (a, b, c) represent homogeneous groups under the significant level of $p = 0.5$.

Parameters	Site		Mean $\pm$ Standard error			
	France		Costa Rica			
	Restinclières	n	Aquiares	n	Llano Bonito	n
<i>Erodibility indicator</i>						
c' (kPa)	29.79 $\pm$ 4.59	6 a	11.63 $\pm$ 0.99	4 b	16.31 $\pm$ 3.61	4 ab
Φ (°)	37.54 $\pm$ 3.66	6 a	41.31 $\pm$ 2.90	4 b	42.17 $\pm$ 3.11	4 ab
MWD _{FW} (mm)	0.66 $\pm$ 0.12	6 a	3.05 $\pm$ 0.16	4 b	0.86 $\pm$ 0.28	4 a
<i>Mechanic property</i>						
da _w (g.cm ⁻³)	1.70 $\pm$ 0.05	6 a	1.11 $\pm$ 0.05	4 b	1.40 $\pm$ 0.06	4 c
<i>Hydric property</i>						
Hp _{site} (%m)	13.50 $\pm$ 1.43	6 a	77.52 $\pm$ 3.25	4 b	38.22 $\pm$ 2.82	4 c
Hp _{ST} (%m)	17.42 $\pm$ 0.29	6 a	82.02 $\pm$ 1.24	4 b	43.41 $\pm$ 5.86	4 c
pF 2.5 (%m)	29.80 $\pm$ 1.71	6 a	94.90 $\pm$ 2.10	4 b	57.56 $\pm$ 6.59	4 c
<i>Organic property</i>						
RLD _{tot.} (mm.cm ⁻³)	144.42 $\pm$ 80.48	6 a	66.25 $\pm$ 36.07	4 a	26.67 $\pm$ 14.23	4 a
RDL _{≤ 0.5} (mm.cm ⁻³)	142.66 $\pm$ 80.25	6 a	2.51 $\pm$ 1.14	4 b	1.42 $\pm$ 0.67	4 b
RLD _[0.5;1.0] (mm.cm ⁻³)	1.49 $\pm$ 0.21	6 a	7.02 $\pm$ 1.91	4 a	7.12 $\pm$ 3.83	4 a
RLD _[1.0;2.0] (mm.cm ⁻³)	0.26 $\pm$ 0.16	6 a	23.39 $\pm$ 11.69	4 a	11.53 $\pm$ 6.45	4 a
RLD _{>2.0} (mm.cm ⁻³)	0.01 $\pm$ 0.01	2 a	33.33 $\pm$ 21.71	4 a	6.60 $\pm$ 3.30	4 a
SRL _{tot.} (mm.mg ⁻¹)	142.23 $\pm$ 34.41	6 a	161.68 $\pm$ 27.41	4 a	678.45 $\pm$ 582.34	4 a
SOC (%)	0.96 $\pm$ 0.10	6 a	5.55 $\pm$ 0.86	4 b	2.19 $\pm$ 1.02	4 a
WSC _[OC20°C] (g.kg ⁻¹)	0.67 $\pm$ 0.03	6 a	0.37 $\pm$ 0.05	4 b	0.38 $\pm$ 0.06	4 b
HWE _[OC80°C] (g.kg ⁻¹)	0.68 $\pm$ 0.05	6 a	0.71 $\pm$ 0.24	4 a	0.72 $\pm$ 0.20	4 a
<i>Mineral property</i>						
Sand (%)	31.98 $\pm$ 2.55	6 ab	50.23 $\pm$ 2.64	4 a	23.53 $\pm$ 12.48	4 b
Silt (%)	51.73 $\pm$ 1.98	6 a	37.03 $\pm$ 2.06	4 b	24.83 $\pm$ 2.95	4 c
Clay (%)	16.32 $\pm$ 0.76	6 a	12.75 $\pm$ 0.57	4 a	51.65 $\pm$ 11.84	4 b
Texture	Silt loam		Sandy loam		Clay	
Al _{DCB} (g.kg ⁻¹)	1.33 $\pm$ 0.11	6 a	29.61 $\pm$ 0.69	4 b	10.30 $\pm$ 2.08	4 c
Fe _{DCB} (g.kg ⁻¹)	10.51 $\pm$ 0.47	6 a	31.94 $\pm$ 1.00	4 b	46.82 $\pm$ 7.11	4 c

Annexe 6 - Profil de rochers et racines sur l'andosol d'Aquiaries, parcelle AQ1 - *Stones and roots profil in Aquiaries andisol, plot AQ1 (= Calicata 1) – Coffee Flux project data, O. ROUPSARD.*

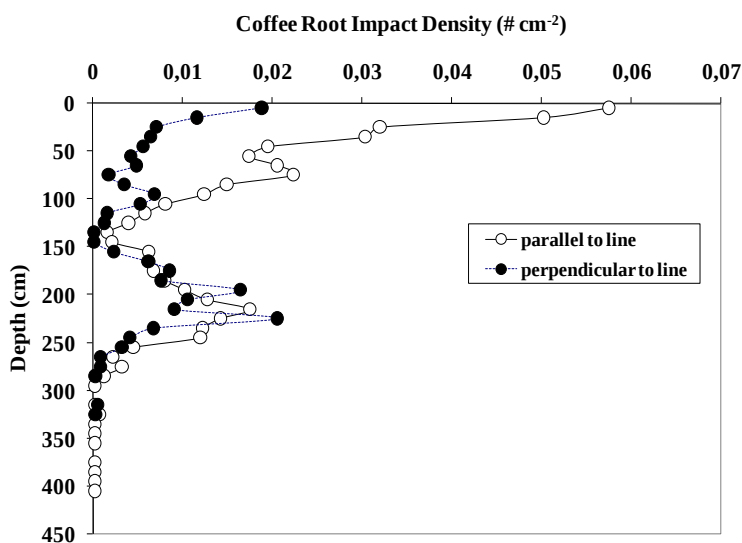


a. Fraction volumétrique de roche [volume de roche/volume de sol] en fonction de la profondeur.



b. Impact racinaire sur la face :

- « Full sun » : ensoleillée ;
- « Shade » : à l'ombre.

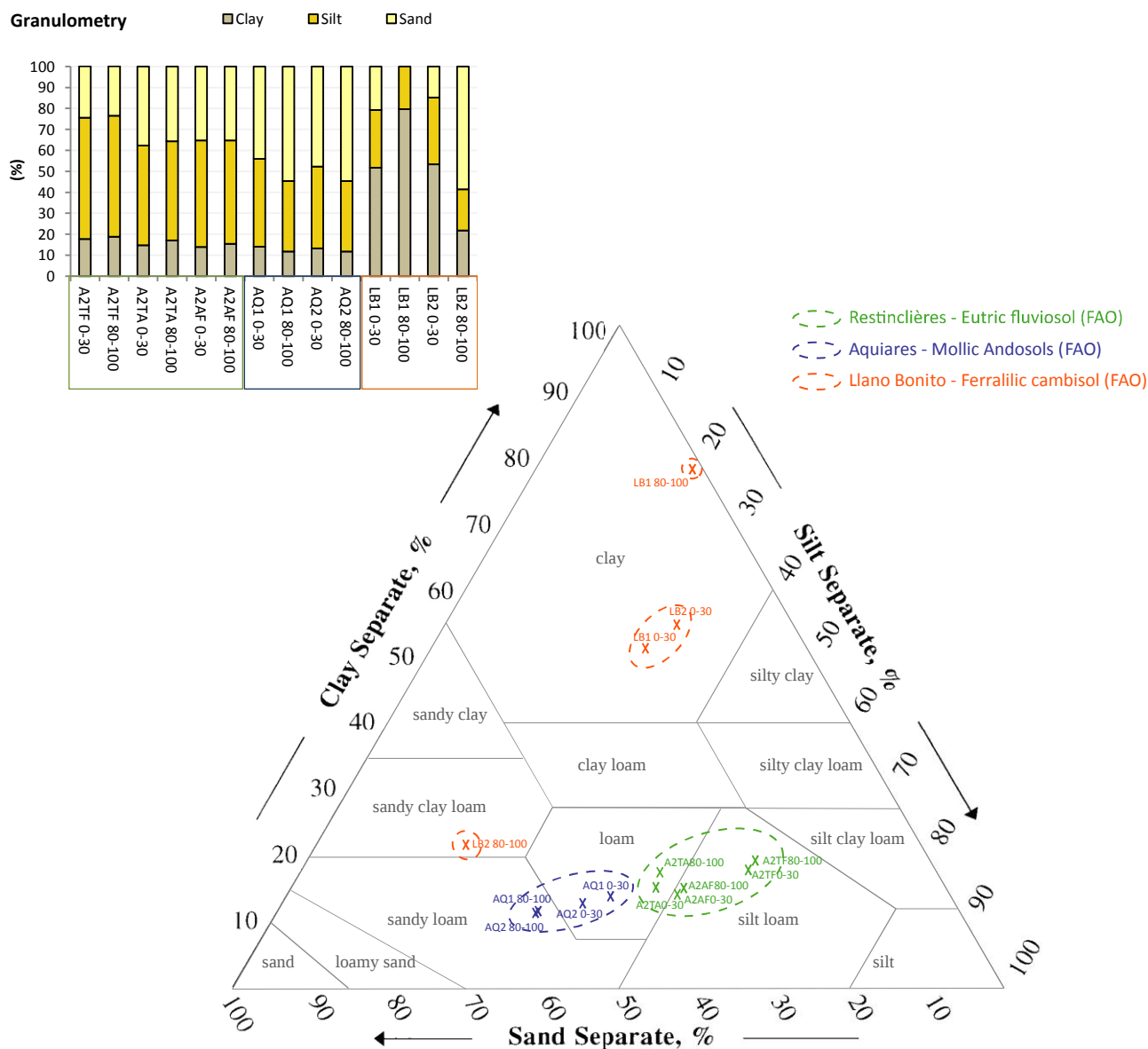


c. Impact racinaire sur la face :

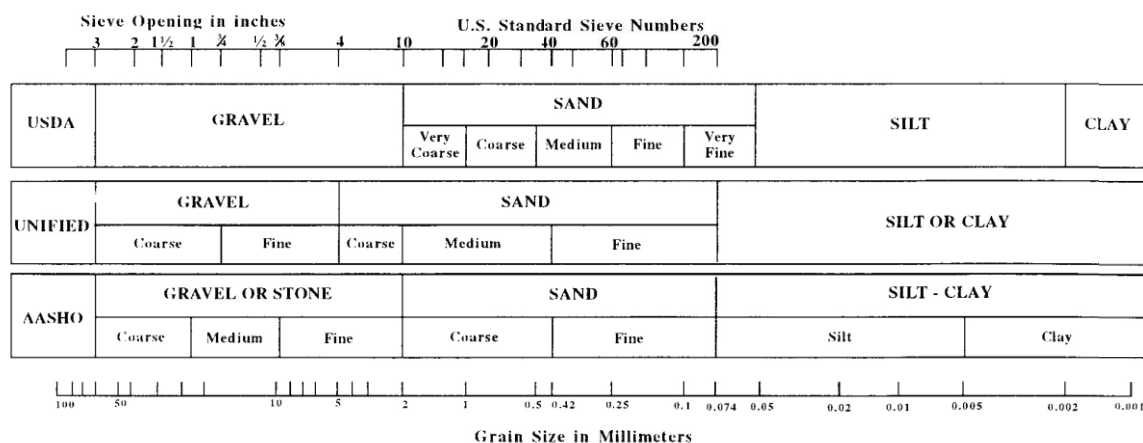
- « parallel to line » : parallèle à la ligne de culture ;
- « perpendicular to line » : perpendiculaire à la ligne de culture.

Annexe 7 - Granulométrie des échantillons - Représentation graphique et sur le triangle des textures.

Samples granulometry – Texture triangle and particle-size limits of AASHTO, USDA, and Unified Classification Systems;
source: NRCS site (Natural Resources Credit Trading Reference - <http://soils.usda.gov>).



COMPARISON OF PARTICLE SIZE SCALES



Annexe 8 - Tableau de données moyennes par profondeur – *Table of mean dataper depth*

Parameters	Mean ± Standard error						Plant species : France species - Walnut : <i>Juglans regia</i> L. et <i>Juglans nigra</i> L. , Wheat : <i>Triticum turgidum</i> ssp <i>durum</i> and Herbaceous ; Costa Rica species - Coffee : <i>Coffea arabica</i> L. , and Erythrina : <i>Erythrina poeppigiana</i>													
Identification																				
Country	France						Costa Rica				Costa Rica									
Site - soil	Restinclières - Eutric fluvisol (FAO)						Aquiares - Mollic Andosols (FAO)				Llano Bonito - Ferrallic cambisol (FAO)									
Agrosystem	Forestry (A2TF)		Agriculture (A2TA)		Agroforestry (A2AF)		Agriculture (AQ1)		Agroforestry (AQ2)		Agroforestry (LB1)		Agriculture (LB2)							
Vegetation	Herbaceous + walnut		Wheat		Wheat + walnut		Coffee		Coffee + Erythrina		Coffee + Erythrina		Coffee							
Depth (cm)	0-30 cm	80-100 cm	0-30 cm	80-100 cm	0-30 cm	80-100 cm	0-30 cm	80-100 cm	0-30 cm	80-100 cm	0-30 cm	80-100 cm	0-30 cm	80-100 cm						
Erodibility indicator																				
c' (kPa)	14.37 ± NA	45.04 ± NA	31.51 ± NA	35.25 ± NA	19.04 ± NA	33.52 ± NA	8.99 ± NA	13.69 ± NA	12.41 ± NA	11.43 ± NA	14.61 ± NA	26.94 ± NA	11.19 ± NA	12.51 ± NA						
MWD _{FW} (mm)	1.14 ± 0.07	0.47 ± 0.01	0.56 ± 0.07	0.40 ± 0.01	0.90 ± 0.03	0.50 ± 0.50	3.12 ± 0.03	2.60 ± 0.08	3.35 ± 0.01	3.15 ± 0.02	1.53 ± 0.04	0.41 ± 0.02	1.09 ± 0.04	0.39 ± 0.02						
MWD _{MB} (mm)	1.65 ± 0.24	1.75 ± 0.18	1.52 ± 0.03	1.81 ± 0.08	1.34 ± 0.05	1.90 ± 1.90	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	3.11 ± 0.01	2.31 ± 0.08	3.22 ± 0.01	0.00 ± 0.00						
MWD _{SW} (mm)	1.86 ± 0.03	0.97 ± 0.05	0.77 ± 0.05	1.08 ± 0.06	1.36 ± 0.07	1.14 ± 1.14	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	2.96 ± 0.15	0.91 ± 0.10	2.85 ± 0.11	0.00 ± 0.00						
Mechanic and hydric property																				
da _w (g.cm ⁻³)	1.47 ± 0.00	1.84 ± 0.01	1.67 ± 0.07	1.80 ± 0.00	1.68 ± 0.15	1.74 ± 1.74	0.97 ± 0.09	1.17 ± 0.06	1.12 ± 0.02	1.18 ± 0.02	1.42 ± 0.06	1.55 ± 0.02	1.28 ± 0.02	1.35 ± 0.05						
Hydric property																				
Hp _{site} (weight %)	9.99 ± 0.82	18.26 ± 0.43	10.01 ± 1.30	15.60 ± 0.62	11.39 ± 1.97	15.77 ± 15.77	72.89 ± 0.34	76.52 ± 1.31	87.00 ± 2.54	73.67 ± 1.67	43.22 ± 0.42	37.33 ± 0.57	41.69 ± 0.54	30.64 ± 0.77						
pF 2.5 (weight %)	27.65 ± 0.16	34.65 ± 0.45	25.84 ± 0.08	34.25 ± 0.53	25.10 ± 0.18	31.30 ± 31.30	100.41 ± 1.06	92.18 ± 0.81	95.87 ± 1.07	91.13 ± 0.26	63.52 ± 0.26	50.61 ± 0.43	72.85 ± 0.27	43.28 ± 0.38						
Organic property																				
RLD _{tot} (mm.cm ⁻³)	536.33 ± 27.46	19.98 ± 6.92	98.17 ± 19.03	22.16 ± 6.30	135.33 ± 9.97	54.56 ± 54.56	170.08 ± 11.62	27.46 ± 12.07	58.40 ± 18.19	9.07 ± 1.94	23.90 ± 11.43	10.25 ± 4.13	67.64 ± 20.22	4.88 ± 0.60						
RDL _{0.5} (mm.cm ⁻³)	533.58 ± 27.16	18.88 ± 6.68	95.36 ± 18.80	21.11 ± 5.84	133.75 ± 10.39	53.26 ± 53.26	5.77 ± 1.08	1.78 ± 0.07	2.04 ± 0.64	0.43 ± 0.09	1.24 ± 0.76	0.77 ± 0.36	3.35 ± 0.98	0.31 ± 0.04						
RLD _{0.5;1.0} (mm.cm ⁻³)	2.38 ± 0.49	1.04 ± 0.47	1.72 ± 0.79	1.03 ± 0.47	1.50 ± 0.40	1.29 ± 1.29	11.34 ± 1.33	6.62 ± 1.43	8.02 ± 2.56	2.12 ± 0.64	5.94 ± 2.51	2.63 ± 0.79	18.28 ± 7.44	1.61 ± 0.16						
RLD _{1;0.2;0} (mm.cm ⁻³)	0.35 ± 0.21	0.06 ± 0.06	1.02 ± 0.53	0.01 ± 0.01	0.08 ± 0.04	0.01 ± 0.01	55.81 ± 4.04	10.83 ± 5.90	24.29 ± 8.27	2.63 ± 0.20	9.96 ± 5.32	3.91 ± 1.68	30.20 ± 9.36	2.06 ± 0.48						
RLD _{>2.0} (mm.cm ⁻³)	0.02 ± 0.02	0.00 ± 0.00	0.06 ± 0.04	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	97.16 ± 9.58	8.23 ± 4.88	24.05 ± 6.86	3.89 ± 1.49	6.75 ± 2.90	2.94 ± 1.86	15.82 ± 7.44	0.90 ± 0.24						
SOC (%)	1.42 ± NA	1.01 ± NA	0.93 ± NA	0.67 ± NA	0.91 ± NA	0.83 ± NA	5.79 ± NA	3.97 ± NA	7.86 ± NA	4.58 ± NA	4.36 ± NA	0.51 ± NA	3.51 ± NA	0.37 ± NA						
WSC _[OC20°C] (%)	7.02 ± 0.27	6.21 ± 0.18	5.86 ± 0.08	6.26 ± 0.58	8.10 ± 0.12	6.91 ± 6.91	3.51 ± NA	3.16 ± NA	5.11 ± NA	3.14 ± NA	4.83 ± NA	2.82 ± NA	4.80 ± NA	2.92 ± NA						
HWEC _[OC80°C] (%)	7.49 ± 0.66	6.88 ± 0.55	7.70 ± 0.11	5.00 ± 0.18	7.86 ± 0.22	5.75 ± 5.75	6.25 ± NA	4.01 ± NA	14.06 ± NA	3.92 ± NA	11.95 ± NA	3.46 ± NA	8.85 ± NA	4.38 ± NA						
Mineral property																				
Sand (%)	24.50 ± NA	23.50 ± NA	37.70 ± NA	35.60 ± NA	35.30 ± NA	35.30 ± NA	44.00 ± NA	54.60 ± NA	47.70 ± NA	54.60 ± NA	20.70 ± NA	0.00 ± NA	14.80 ± NA	58.60 ± NA						
Silt (%)	57.80 ± NA	57.80 ± NA	47.50 ± NA	47.40 ± NA	50.70 ± NA	49.20 ± NA	41.90 ± NA	33.60 ± NA	39.00 ± NA	33.60 ± NA	27.60 ± NA	20.30 ± NA	31.80 ± NA	19.60 ± NA						
Clay (%)	17.80 ± NA	18.80 ± NA	14.80 ± NA	17.00 ± NA	14.00 ± NA	15.50 ± NA	14.10 ± NA	11.80 ± NA	13.30 ± NA	11.80 ± NA	51.70 ± NA	79.70 ± NA	53.40 ± NA	21.80 ± NA						
Al _{DCB} (g.kg ⁻¹)	1.26 ± 0.16	1.43 ± 0.14	1.03 ± 0.02	1.70 ± 0.05	1.03 ± 0.01	1.55 ± 1.55	28.39 ± NA	29.10 ± NA	29.34 ± NA	31.59 ± NA	15.81 ± NA	10.24 ± NA	9.37 ± NA	5.77 ± NA						
Fe _{DCB} (g.kg ⁻¹)	11.06 ± 0.31	11.26 ± 0.16	8.81 ± 0.07	11.37 ± 0.12	9.29 ± 0.13	11.28 ± 11.28	34.22 ± NA	32.47 ± NA	29.38 ± NA	31.68 ± NA	66.17 ± NA	48.49 ± NA	38.37 ± NA	34.24 ± NA						
Si _{DCB} (g.kg ⁻¹)	1.08 ± 0.05	1.11 ± 0.03	1.13 ± 0.02	1.37 ± 0.06	1.20 ± 0.05	1.20 ± 1.20	6.85 ± NA	7.98 ± NA	7.12 ± NA	8.84 ± NA	2.40 ± NA	2.06 ± NA	1.42 ± NA	2.10 ± NA						