

**Mise au point d'outils de prévision de l'évolution de la
stabilité de la structure de sols sous l'effet de la gestion
organique des sols
« *MOST* » (*Matières Organiques et STructure des sols*)**

Unités et personnes impliquées

UMR Bioemco Grignon G Bardoux, D Cosentino, E Coucheney, V Pouteau

UMR Environnement et Grandes Cultures, INRA-INAPG, Grignon M. Annabi, G. Bodineau, P. Garnier, S Houot, C. Peltre, JN Rampon

UR Science du Sol INRA, Orléans F. Darboux, O. Duval, K. Fusiyaqi, H Gaillard, Y le Bissonnais, F. Lebugle

UMR SAS INRA ENSAR, Rennes S Abiven, S Busnot, S Menasseri

UMR Agronomie INRA-INAPG, Grignon M Bertrand L. Guichard, P Saulas,

UR Pessac INRA, Versailles M Balabane, JP Pétraud, D Tessier

UR Biosol ESTIPA, Rouen C Gangneux, I. Gattin, K. Laval, M. Legras

UMR Synthèse et Réactivité des Substances Naturelles, CNRS-Université de Poitiers A Amblès, J Célérier, L Lemée, C Rodier, MP Som

ACTA (Association de coordination Techniques Agricoles), Paris L Fourrié, C Beaufreton

CREED (Centre de Recherche pour l'Environnement, l'Energie et le Déchet), Limay C. Francou

Chambre d'Agriculture du Loiret B Verbeque, M Carrière

UR Ecodiv, Université de Rouen M Akpa, F Bureau

UMR Microbiologie du Froid CNRS-Université de Rouen S Barray

(les noms des doctorants et étudiants de master ou autres formations sont soulignés)

Responsable scientifique

Claire Chenu

AgroParisTech, UMR Bioemco, 78850 Thiverval Grignon

1. Introduction : contexte et enjeux

Parmi les menaces pesant sur les sols et identifiées par la communauté européenne figurent l'érosion et la diminution de teneur en matières organiques (MO) des sols, menaces qui sont étroitement liées du fait du rôle des matières organiques dans la stabilité de la structure du sol.

Erosion et stabilité structurale

L'érosion hydrique concerne aujourd'hui 26 millions d'hectares en Europe. Cinq millions d'hectares sont concernés en France dont 3,4 millions en sols limoneux. La carte d'aléa érosif établie par l'INRA et IFEN (2002) est étroitement corrélée à la carte des textures de sols et à la carte des teneurs en MO des sols du territoire français. Les zones à aléa érosif le plus élevé sont les sols limoneux cultivés, à faible teneur en matières organiques. Ces sols se caractérisent en effet par une faible stabilité structurale, laquelle est l'aptitude des agrégats du sol à résister à l'action désagrégeante de l'eau lors d'épisodes pluvieux. Les sols limoneux ont une grande fragilité constitutive, du fait de leur texture, et les matières organiques y sont le principal agent agrégeant (Le Bissonnais and Arrouays, 1997; Tessier et al., 1998). De plus, les pratiques culturales qui affinent les agrégats du sol et laissent le sol nu exposé à la pluie, le rendent particulièrement sensible à la battance. Du fait de cet encroûtement, l'infiltrabilité des sols devient très faible et se développent alors des problèmes de ruissellement et d'érosion. Il en résulte de nombreux préjudices aux cultures et à la qualité des eaux superficielles (King and Le Bissonnais, 1992). La stabilité structurale du sol est un bon indicateur de la **sensibilité à la battance et à l'érosion hydrique des sols (Amezketta et al., 1996 ; Bissonnais et al., 2002 ; Leguédois and Le Bissonnais, 2004).**

La stabilité structurale est mesurée par des tests appliqués au laboratoire. Une très grande diversité de test est aujourd'hui utilisée dans la littérature, en l'absence de protocole normalisé. Cette diversité constitue un handicap dès lors que l'on veut faire une synthèse quantitative sur les relations entre type de sols et stabilité de la structure ou évaluer l'effet de pratiques culturales sur cette stabilité. Une démarche de standardisation a été entreprise en France. Elle porte sur le test mis au point par Le Bissonnais (Le Bissonnais, 1996). Cette méthode connaît en effet un développement certain en France, où la méthode de référence (Hénin et al., 1958) a été abandonnée pour diverses raisons. Une opération d'intercalibration intra-laboratoires et inter-laboratoires a été menée en 2002-2003 et a donné des résultats très satisfaisants (Le Bissonnais et al., 2003). Il est donc désormais possible d'effectuer une synthèse des données issues des laboratoires participants à cette opération.

Bien que la relation entre stabilité structurale et texture ou teneur en matières organiques du sol soit reconnue depuis longtemps et fasse l'objet de très nombreuses publications (environ 450 articles recensés par (Chenu and Damoy, 2001)), il n'existe pas aujourd'hui de relation statistique, ou fonction de pédotransfert (FPT), permettant de prévoir la stabilité structurale de sols en fonction de leurs caractéristiques constitutives.

Matières organiques et qualité des sols

Différents programmes nationaux, congrès et réunions témoignent de la reconnaissance, en France, depuis quelques années, du rôle central des matières organiques des sols et de leur contribution à qualité des sols. Les bilans récents sur les stocks organiques des sols montrent une diminution de la teneur en MO des sols (Balesdent, 1996; Walter et al., 1997 ; Wylleman et al., 2001), liée à l'agriculture intensive, caractérisée par de faibles entrées organiques au sol et un travail du sol énergique et fréquent. Ces constats ont fait naître ou ont réactivé, au sein

de la profession agricole comme au sein de diverses institutions¹, une demande pour des critères objectifs pour évaluer les changements de teneur en MO des sols et son influence... En France, la seule référence disponible est un abaque, développée par (Rémy and Marin Laflèche, 1976), qui définit des teneurs seuil en matières organiques, selon la texture et la teneur en carbonates des sols. Cet abaque établi pour les sols de l'Aisne est aujourd'hui utilisée largement au-delà de son domaine de validité. Dans un contexte où se diversifient les systèmes de culture (développement des systèmes de culture intégrés, de la simplification du travail du sol, de l'agriculture biologique), et où se développe la valorisation agricole des déchets organiques, il apparaît nécessaire de reprendre cette problématique. Il est donc nécessaire de réexaminer la notion de teneur seuil et de définir, de manière objective, de tels seuils pour des propriétés et fonctions des sols fortement dépendants de la teneur en matières organiques. C'est le cas de la stabilité structurale pour les sols limoneux.

Valorisation agricole des déchets organiques

Le recyclage en agriculture des déchets organiques ou produits résiduels organiques par épandage sur les sols est une pratique ancienne. Cependant, les volumes épandus comme la diversité des déchets et celle des filières de traitement ont nettement augmenté depuis quelques années. En effet de plus en plus de déchets organiques sont produits ou collectés, en provenance de l'agriculture (effluents d'élevage), des zones urbaines et de l'industrie, en raison de l'effort entrepris par différents secteurs du traitement des eaux et des déchets en général. De nombreuses études ont porté et doivent encore porter sur l'innocuité de ces déchets pour les sols et les eaux (teneurs en ETM, en micropolluants organiques, en pathogènes). Cependant, établir un bilan environnemental complet du recyclage agricole des déchets organiques suppose d'établir également leur efficacité, c'est-à-dire, leurs effets sur les propriétés des sols. De nombreux déchets, compostés ou non, ont des effets positifs sur la structure du sol et sa stabilité (Roldan et al., 1996). Cependant ces études sont réalisées dans des contextes pédologiques différents, avec des déchets organiques différents et souvent insuffisamment caractérisés et utilisent des méthodes différentes de mesures de la stabilité de la structure. Il est donc difficile d'en faire la synthèse. Or, les différentes catégories d'acteurs, producteurs et transformateurs de déchets organiques, laboratoire d'analyse, agriculteurs, conseillers techniques, ont besoin de guides pour orienter l'utilisation des déchets organiques afin d'en optimiser les effets positifs (choix des produits, doses, date d'apport, sols visés), tout en maîtrisant les effets négatifs. De tels outils de préconisation ne sont pas disponibles aujourd'hui.

Effet des systèmes de culture sur la qualité des sols

Du fait du contexte économique et réglementaire, mais aussi du souci de préservation de l'environnement et de qualité des produits, des systèmes et culture et pratiques agricoles variés se développent : systèmes de culture intégrés, pratiques de simplification du travail du sol, agriculture biologique. La bibliographie indique que ces systèmes de culture sont susceptibles en quelques années d'affecter les quantités, qualités et localisation des MO du sol et la stabilité de la structure. Les effets sur la structure peuvent se manifester en quelques années alors que les teneurs en C des sols n'ont pas été modifiées. Des indicateurs organiques de la stabilité structurale ont été proposés dans certains contextes. Cependant, on ne dispose pas d'outils permettant de prédire la stabilité de la structure, dans de telles situations, en fonction de la qualité des matières organiques. L'absence de références dans le contexte

¹ Activité des groupes de travail « Erosion » et « Matières organiques » de la communauté européenne mis en place suite à la communication sur les sols.

pédoclimatique français a généré divers programmes en cours, notamment au sein de GESSOL.

2. Etat de l'art et objectifs

La stabilité structurale, une propriété physique indicatrice

Lorsque les agrégats de la surface du sol sont soumis à l'action de la pluie, plusieurs mécanismes peuvent s'exercer (Concaret, 1967):

- l'énergie cinétique des gouttes de pluie peut entraîner une désagrégation mécanique (Kay and Dexter, 1990);
- le piégeage d'air dans les pores des agrégats rapidement réhumectés peut provoquer leur éclatement, si la cohésion interne de l'agrégat est inférieure aux forces développées par l'air comprimé (Sullivan, 1990);
- les argiles gonflent et le gonflement différentiel des argiles selon leur nature et leur orientation peut provoquer une microfissuration du matériau ;
- si les cations de la CEC sont des monovalents l'apport d'eau entraîne dispersion physico-chimique des argiles du sol (Helalia and Letey, 1989).

Cohésion interparticulaire, mouillabilité des surfaces des constituants et propriétés de retrait gonflement sont donc les propriétés physiques élémentaires qui déterminent ce comportement global qu'est la stabilité structurale. La stabilité structurale est une des composantes de la résistance des sols à la battance et à l'érosion. Elle est bien corrélée à la granulométrie des croûtes de battance, à la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol et à la quantité de ruissellement sous pluie simulée

(Amezketta et al., 1996; De Noni et al., 2002 ; Le Bissonnais et al., 2002 ; Leguédois and Le Bissonnais, 2004).

Les méthodes de mesure de la stabilité structurale

Une très grande diversité de méthodes existe. Ces tests consistent toujours à exposer des agrégats de sol ou du sol à l'action de l'eau et à mesurer le résultat de la désagrégation : c'est donc un potentiel de désagrégation que l'on mesure, en conditions standard. Les différences entre tests portent en particulier sur (Le Bissonnais, 1996) :

Les caractéristiques initiales des échantillons : leur granulométrie initiale (sol total ou agrégats calibrés), leur teneur en eau initiale (sec, humidité du sol au prélèvement, potentiel de l'eau déterminé). Ce dernier aspect est particulièrement important (Kemper and Rosenau, 1984; Le Bissonnais, 1988 ; Rasiah et al., 1992).

Le traitement subi par l'échantillon : humectation brutale dans l'eau, application d'une énergie mécanique (agitation, ultrasons) et tamisage, le plus souvent dans l'eau, ou bien application de gouttes de pluie. Des pré-traitements permettent éventuellement de distinguer les mécanismes mis en jeu (Hénin et al., 1958 ; Le Bissonnais, 1996)

La méthode de mesure de la désagrégation et le mode d'expression des résultats. Après tamisage sont mesurés le taux d'agrégats stables de taille supérieure à un certain seuil, ou le diamètre moyen pondéré des agrégats stables (Kemper and Rosenau, 1986)). D'autres méthodes quantifient le taux de particules du sol dispersées lors du test, par turbidimétrie ou sédimentation (ex. (Curtin et al., 1994)

Ainsi, pour la seule étude de l'effet des matières organiques sur la stabilité structurale nous avons pu dénombrer 14 méthodes différentes de mesure (Chenu and Damoy, 2001). Cette diversité empêche toute synthèse quantitative des résultats.

En France, le test de stabilité structurale mis au point par Hénin et al. (1958) a été à la base à de nombreux travaux, et servait de méthode de référence pour porter un jugement sur la stabilité structurale de sols. Cette méthode n'est aujourd'hui plus utilisée dans les laboratoires (abandon du benzène comme prétraitement, développement des recherches montrant la nécessité de faire évoluer ce test). L'établissement de synthèses de données nationales passe donc par l'utilisation de nouvelles méthodes, comme celle de (Le Bissonnais, 1996).

Agents de stabilité structurale

La stabilité structurale dépend de facteurs intrinsèques et extrinsèques. Les facteurs de stabilité structurale intrinsèque sont les constituants du sol et les caractéristiques physicochimiques (force ionique, pH), susceptibles d'affecter la cohésion entre particules. Les argiles, les matières organiques, les oxyhydroxydes de fer et d'aluminium et les carbonates, sont donc des agents de stabilité structurale (Kay, 1997; Kemper and Koch, 1966). Le climat est un agent extrinsèque essentiel : la teneur en eau du sol au moment de la pluie, la durée et l'intensité de périodes antérieures sèches ou humides affectent fortement la stabilité structurale, notamment parce qu'ils modifient l'intensité de l'éclatement et du gonflement des argiles (Caron and Kay, 1992; Caron et al., 1992; Perfect et al., 1990; Rasiah and Kay, 1995).

Effet des matières organiques sur la stabilité structurale

Les matières organiques ont un rôle de premier plan dans la stabilité de la structure car (i) dans de nombreux sols, comme dans les sols limoneux tempérés c'est le principal agent de stabilité structurale et (ii) c'est un constituant du sol susceptible de varier en quantité et qualité en quelques années en fonction du mode de gestion par l'homme (mode d'occupation, pratiques culturales) (Kay, 1990; Kay, 1997). Les matières organiques agissent en augmentant la cohésion interparticulaire (Chenu and Guérif, 1991; Kay, 1997), ce qui augmente la stabilité vis-à-vis de l'éclatement, de la microfissuration et de la désagrégation mécanique, et en diminuant la mouillabilité des agrégats, ce qui limite le phénomène d'éclatement (Chenu et al., 2000; Haynes and Swift, 1990; Monnier, 1965; Sullivan, 1990).

L'effet des matières organiques sur la stabilité dépend de leur nature. Ainsi, certains changements de systèmes de culture généraient une amélioration rapide de la stabilité structurale et des modifications de la qualité des MO du sol, sans évolution de la teneur en C totale du sol (Angers et al., 1993; Baldock et al., 1987). Les fractions organiques les mieux corrélées à la stabilité structurale sont celles liées à l'abondance et à l'activité des microorganismes et des racines :

- biomasse microbienne (Angers et al., 1993; Carter, 1992) ;
- longueur développée par les hyphes fongiques (Bethlenfalvay et al., 1999; Drury et al., 1991; Miller and Jastrow, 1990; Tisdall and Oades, 1980) ;
- longueur développée par les racines (Bethlenfalvay et al., 1999; Miller and Jastrow, 1990) ;
- polysaccharides solubles aux acides dilués (Angers et al., 1999; Angers et al., 1993) polysaccharides solubles à l'eau chaude, correspondant aux polysaccharides extracellulaires microbiens et racinaires (Angers et al., 1999; Angers et al., 1993; Haynes, 1999)
- lipides (Capriel et al., 1990).

Les fractions actives sont en effet celles qui augmentent la cohésion par pontage (champignons, racines), par adsorption et pontage polymérique (polysaccharides), ou qui peuvent diminuer la mouillabilité des agrégats (lipides, substances humiques) (Chenu and Stotzky, 2001; Robert and Chenu, 1992).

Relations quantitatives matières organiques - stabilité structurale

Nous avons pu recenser une trentaine de relations statistiques entre abondance des matières organiques, généralement exprimée par une teneur en C et stabilité de la structure (Chenu and Damoy, 2001). Toutes mettent en évidence un effet positif des matières organiques, avec le plus souvent des relations linéaires (par ex (Carter, 1992; Chaney and Swift, 1984; Haynes and Swift, 1990; Tisdall and Oades, 1980)). Dans certains travaux un plateau est cependant observé pour les très fortes teneurs en MO (Haynes, 2000; Jastrow, 1996). La comparaison précise des différents travaux montre qu'il n'est pas possible d'en inférer un outil de type relation statistique entre les caractéristiques du sol et la stabilité de la structure, essentiellement du fait de la diversité des méthodes utilisées. De plus, le nombre d'échantillons sur lequel portent les régressions est souvent faible. Contrairement à des propriétés physiques, telles que la rétention de l'eau, on ne dispose donc pas aujourd'hui d'outil de prévision de la stabilité structurale, ni intégrant la teneur en carbone des sols, ni a fortiori la nature des matières organiques.

Evolution de la stabilité de la structure lors d'apports organiques

Les effets positifs des apports organiques sur la stabilité structurale, connus depuis longtemps, varient beaucoup en amplitude et en durée, selon la nature des matières organiques et selon leur biodégradabilité (Baldock, 2001; Monnier, 1965). Les travaux nombreux de la littérature ont porté sur des MO très diverses : fumiers , résidus de culture (Bossuyt et al., 2001; Kiem and Kandeler, 1997), boues résiduaire et déchets divers (Chantigny et al., 1999 ; Diaz et al., 1994 ; Metzger et al., 1987), composts (Giusquiani et al., 1995; Guidi et al., 1988; Roldan et al., 1996). Bien qu'une relation entre biodégradation des matières organiques et dynamique de la stabilité structurale a été relevée précocement (Monnier, 1965), il reste aujourd'hui très difficile de prévoir à partir d'un apport organique (quantité, nature), comment va évoluer la stabilité structurale au cours du temps.

L'analyse de ce contexte, nous a permis de définir trois objectifs, chacun correspondant à un volet du projet :

- **Construction de fonctions de pédotransfert reliant la stabilité structurale aux caractéristiques du sol (volet 1)**
- **Etablissement de relations entre stabilité structurale et fractions organiques du sol (volet 2)**
- **Construction d'un outil de prévision des variations de stabilité structurale suite à un apport de MO (volet 3)**

3. Méthodes partagées

3.1 Stabilité de la structure

La méthode Le Bissonnais est appliquée à des agrégats 3,15 –5 mm séparés du sol par tamisage, séchés à l'air et conservés à sec (Le Bissonnais, 1996). Trois tests sont appliqués à ces agrégats, qui ont pour objectif de rendre compte du comportement du sol dans les différentes conditions climatiques, hydriques et structurales que l'on peut rencontrer à la surface du sol : (i) humectation rapide (immersion d'agrégats secs dans l'eau), (ii) réhumectation lente (immersion dans l'eau d'agrégats préalablement réhumectés par capillarité), (iii) désagrégation mécanique (agitation dans l'eau d'agrégats préalablement humectés dans l'éthanol). La granulométrie des produits de la désagrégation est ensuite

déterminée par tamisage ou par granulométrie laser. Les résultats sont exprimés sous la forme de Diamètre Moyen Pondéré (MWD exprimé en mm).

3.2 Fractions organiques et biologiques impliquées dans la stabilité de la structure

Nous ne présentons ici que les méthodes communes aux volets 2 et 3 du projet.

3.2.1 Matières organiques et activité biologique du sol

Carbohydrates solubles à l'eau chaude

Cette fraction, essentiellement constituée de polysaccharides d'origine microbienne et racinaire, a été quantifiée après solubilisation dans de l'eau à 80°C (Puget et al., 1999), par dosage des sucres totaux par colorimétrie (Dubois et al., 1956).

Substances humiques

Les acides fulviques et humiques ont été quantifiés par extraction à la soude et traitement acide (Calderoni and Schnitzer, 1984).

Biomasse microbienne

Elle a été mesurée par deux approches : la technique de fumigation-extraction (Vance et al., 1987), et le dosage de l'ADN microbien par spectrofluorométrie (Hoest 33258 –Biorad.

Biomasse fongique

La quantification de la biomasse fongique a été menée par trois méthodes qui ont été comparées : dosage de l'ergostérol (Gong et al., 2001), par mesure de la longueur d'hyphes fongiques en microscopie (Frey et al., 1999) et par PCR quantitative avec amorces universelles (Martin-Laurent et al., 2003) (Viaud et al., 2000).

3.2.2. Matières organiques apportées

La caractérisation biochimique des MO apportées a inclu les déterminations de C total, N organique et minéral, rapport C/N, lipides, fractions solubles, hemicelluloses, cellulose et lignine d'après la méthode Van Soest (1963).

4. Développements méthodologiques sur la stabilité structurale

4.1 Travaux sur l'intercalibration entre laboratoires de la méthode de mesure de la stabilité structurale

Les activités méthodologiques concernant la stabilité de la structure ont été coordonnées par l'unité de Science du sol d'Orléans.

Une intercalibration a eu lieu entre novembre 2005 et février 2006 (Figure 1). Elle a concerné 9 laboratoires. Le test d'immersion directe d'agrégats dans l'eau apparaît comme le plus reproductible, et le test de désagrégation mécanique comme le moins.

Les différences observées sont pour partie attribuées à la présence de graviers dans les échantillons. Il a été décidé de se reporter au protocole Afnor (2005) qui indique que lors de « la présence de graviers dans la fraction 2-5 mm, il est nécessaire de prendre en compte ces graviers par lavage de la fraction > 2 mm résultant des tests et de calculer un diamètre moyen pondéral en tenant compte des graviers... »

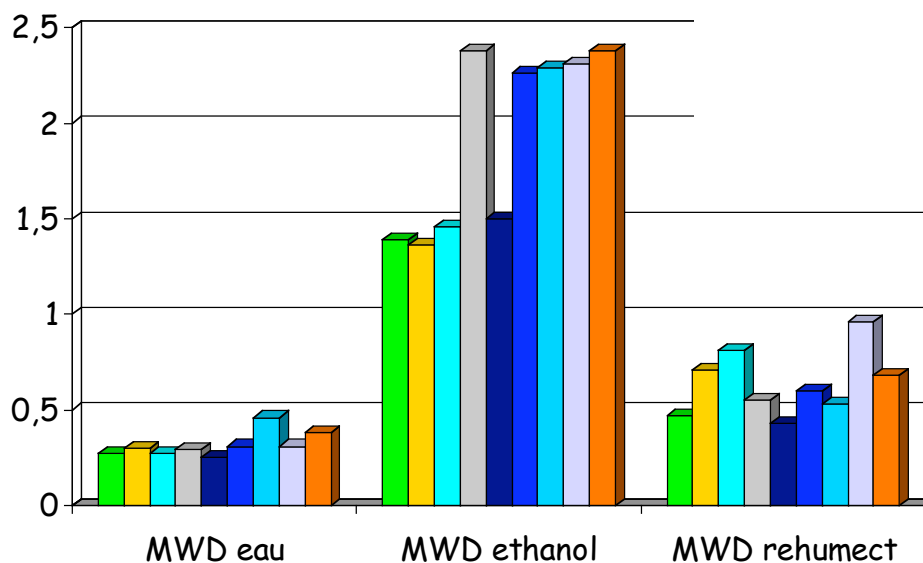


Figure 1. Tests de comparaison entre laboratoires sur un sol limoneux (Champ Noël)
MWD en mm.

4.2 Travaux concernant le renseignement des parcelles lors de l'échantillonnage sur le terrain

Il est apparu le besoin de décrire le mode de prélèvement des échantillons à soumettre aux tests de stabilité structurale. Une fiche de prélèvement a été mise au point (cf. annexe 1) par l'unité de Science du Sol d'Orléans et proposée aux partenaires, afin de disposer, pour les prochains prélèvements, du maximum de renseignements sur l'état du sol lors du prélèvement.

4.3 Travaux concernant les méthodologies de prélèvement sur le terrain et de préparation des échantillons

Une partie de la variabilité observée entre résultats de différentes équipes pourrait être due à des différences dans la manière de prélever le sol, de le préparer, conditionner et stocker avant le test. Une opération d'intercalibration a donc été organisée sur ces opérations sur une journée en novembre 2006 conjointement par l'unité de science du sol Inra d'Orléans et la Chambre d'agriculture du Loiret (annexe 2). Cinq laboratoires partenaires y ont participé.

Une parcelle semée en blé, en rotation betterave-blé, a été choisie en limite entre le pourtour de l'Orléanais et la Beauce chartraine, près d'Artenay.

Afin d'illustrer au mieux les différences observées dans les résultats des tests, des statistiques ont été effectuées avec le logiciel R. L'analyse de variance a été choisie, en prenant un seuil de 5 %. La comparaison multiple de moyenne a été effectuée avec le test de Tukey. A noter que l'analyse statistique n'est pas très puissante car nous ne disposons que de 3 valeurs (3 répétitions) par test de stabilité structurale.

Nous avons étudié les sources de variation possibles, depuis la localisation du prélèvement jusqu'à la réalisation de la mesure au laboratoire.

Les sources de variation identifiées sont :

- l'effet variabilité spatiale (aux échelles métriques et décamétriques) ;
- l'effet mode de prélèvement (tout venant, mottes, profondeur dans l'horizon labouré) ;

- l'effet combiné des types de prélèvement (lieu et mode) et de préparation ;
- l'effet opérateur.

L'étude statistique a permis de mettre en évidence des différences dans les résultats des indices MWD pour tous les facteurs envisagés. A ce stade, les facteurs ne semblent pas pouvoir être hiérarchisés en terme d'influence sur les MWD. On notera aussi qu'aucune de ces différences n'est systématique, ce qui limite en partie l'importance de la variabilité observée (tests statistiques peu puissants, laissant la possibilité d'un effet uniquement aléatoire).

Selon les facteurs de variation envisagés, on peut conclure que :

- l'influence de la variabilité spatiale ne se manifeste pas pour tous les tests ;
- le mode de prélèvement n'affecte pas le résultat du test à l'eau ;
- l'effet combiné types de prélèvements-mode de préparation amène à des différences liées soit à la variabilité spatiale métrique, soit au type de prélèvement « tout venant ».

Si la présente étude ne permet pas d'expliquer les différences observées (ce n'était pas son but), ses résultats permettent cependant de formuler quelques préconisations lorsque des comparaisons sont envisagées :

- il faut veiller à ce que les méthodes de prélèvement et de préparation soient similaires ;
- il vaut mieux qu'un même opérateur effectue tous les tests ;
- il faut pouvoir compenser la variabilité spatiale, soit explicitement (plusieurs échantillons au sein du domaine d'étude), soit implicitement (un échantillon composite).

En termes de comparaison, lorsque les différences entre les MWD sont faibles en amplitude, il sera prudent de ne pas conclure uniquement en se basant sur l'aspect « statistiquement significatif ».

Une fiche de protocole de prélèvement et de préparation des échantillons est proposée en annexe 1. Elle complète la norme Afnor X31-515 de juin 2005 qui traite essentiellement de la mesure de la stabilité.

L'effet opérateur pouvant être mesuré par l'intercalibration (et donc compensé lors de l'analyse des résultats) et les méthodes de prélèvement et de préparation pouvant être standardisées, la variabilité spatiale serait le facteur le plus pertinent à analyser dans une prochaine étude qui devra alors utiliser un nombre plus grand de répétitions afin d'augmenter la puissance statistique des tests.

4.4 Travaux concernant la variabilité de la stabilité de la structure liée au climat.

Le suivi de deux des essais situés en Ile de France a mis en évidence d'importantes variations interannuelles de la stabilité de la structure (Figure 2). Une analyse de l'histoire hydrique récente des parcelles a été entreprise afin d'expliquer ces variations (Table 1) (Coucheney, 2005).

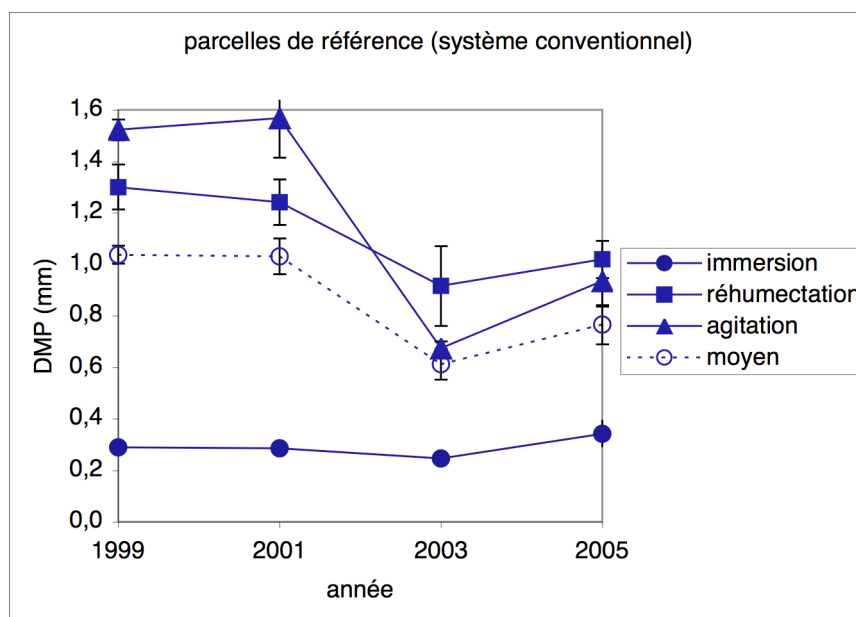


Figure 2. Variations interannuelles de la stabilité structurale sur le site de La Cage

Table 1. Précipitations dans la période précédant les prélèvements pour mesure de stabilité structurale. La Cage, Versailles.

année du prélèvement		1999	2001	2003	2005
date des prélèvements		26-avr	23-avr	25-avr	24-mars
2 mois avant	nb jours de pluie	22	33	9	15
	pluie cumulée (mm)	118,0	177,2	44,8	59,7
	nb d'intervalles entre 2 pluies > 1,5 mm	2	0	3	3
1 mois avant	nb jours de pluie	13	15	5	7
	pluie cumulée (mm)	79,0	76,2	14,4	27,5
DMP (mm, test de réhumectation lente)		0,872+/-0,002	0,883+/-0,046	0,631+/-0,011	0,620+/-0,013

Des hypothèses, non exclusives, ont été formulées :

H1 : L'histoire hydrique affecte le tri des agrégats ;

H2 : Les périodes sèches renforcent la cohésion ;

H3 : Les réhumectations fragilisent les agrégats (car créent des fissures) ;

H4: L'effet des alternances d'humectation dessiccation est plus marqué si les activités microbiennes sont intenses.

L'analyse de l'histoire hydrique des parcelles montre que les deux années pour lesquelles le DMP en réhumectation lente est plus élevé correspondent à des années sèches (H2 non vérifié), mais la structure a pu être fragilisée par des fissures formées par une réhumectation rapide (pluies tombant sur un sol sec, cf table 1) (H3 possible). Ces hypothèses ont été testées par des expérimentations en laboratoire présentées dans la section 7 de ce rapport (Cosentino et al. 2006 ; Coucheney, 2005).

Cette analyse confirme l'importance lors de suivis pluriannuels de prélever le sol à des dates comparables et de noter l'état hydrique du sol au moment du prélèvement, voire les jours antécédents.

5. Construction de fonctions de pédotransfert reliant la stabilité structurale aux caractéristiques du sol (volet 1)

L'objectif est ici d'établir une relation statistique, ou fonction de pédotransfert, entre les caractéristiques constitutives du sol (texture, teneur en C, teneur en carbonates...) et la stabilité de la structure.

5.1 Base de données

Une **base de données** nommée **Agresta** a été constituée. Elle comprend actuellement 480 échantillons de sol provenant essentiellement de la surface des horizons cultivés. Une quarantaine de variables (tableau 2) renseignent le sol, sa localisation, ses caractéristiques physico-chimiques et la valeur du test de stabilité structurale (Le Bissonnais, 1996, Afnor, 2005).

Tableau 2. Variables disponibles dans la base Agresta

Données environnementales, parcelle et sol	Tests de stabilité structurale	Données physico-chimiques
date Identif. Sol (endroit du prélèvement) Localisation (dépt, région naturelle) Typicité (Labour/non labour, Apports de MO, chaux...) Occupation du sol Roche mère Nom du sol	Test rapide : MWD + s Test humectation lente : MWD + s Test par agitation dans l'éthanol : MWD + s Distributions de tailles de particules résultantes pour chacun des tests	Argile % Limons fins et grossiers % Sables fins et grossiers % Refus à 2 mm C % C.E.C. Ca ²⁺ Na ⁺ pH (eau) CaCO ₃ % Fer total HF Fer libre Tamm Fer libre Mehra-Jackson
Source des données Laboratoire ayant fait les tests		

Certaines caractéristiques sont systématiquement mesurées puisqu'elles sont des agents intrinsèques potentiels de la variation de la stabilité de la structure entre les sols (granulométrie, carbone, calcaire, CEC, etc.).

L'origine des données est variée : plusieurs laboratoires, dont ceux qui sont partenaires au programme, participent à l'alimentation de la base, qui est gérée par l'unité de recherche d'Orléans.

Les sols de la base couvrent une large gamme de texture (Figure 3). Les textures les plus représentées sont les limons moyens, les limons argileux et les argiles limoneuses. Le pourcentage de limon est majoritairement compris entre 40 et 70.

Le carbone total est compris entre 0,30 et 6,72 avec une moyenne de 1,44 %.

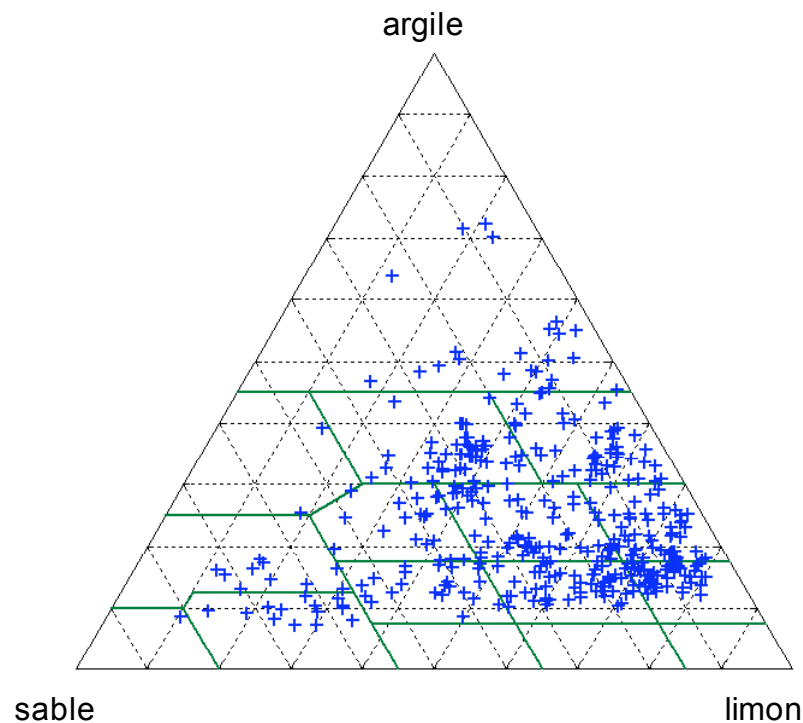


Figure 3 : Texture des échantillons présents dans la base Agresta d'après le triangle de texture de Jamagne, 1967

Durant le projet, le travail ci-après a été mené sur la base :

- Enrichissement de la base par rajout de nouveaux échantillons,
- homogénéisation de la base,
- insertion des données élémentaires de la mesure de la stabilité (distribution de taille des particules résultant de chaque test)
- nettoyage des données afin de permettre leur traitement sous R.

5.2 Construction de relations statistiques

5.2.1. Mise au point de la méthodologie

Un stagiaire de Master 2 « Mathématiques pour l'Aide à la Décision » de l'université d'Orléans a été encadré sur le thème de l'analyse statistique des variables pédologiques contrôlant la stabilité structurale des sols, avec proposition d'une méthodologie (Lebugle, 2006). La base de données Agresta a été le support de travail.

Le stage a abouti à la définition de la méthodologie à suivre et comporte 3 phases : 1) vérification de la cohérence des données ; 2) statistiques descriptives (boxplot, analyse en composantes principales) et 3) modélisation linéaire de l'influence des variables sur la stabilité structurale (diamètre moyen pondéral). Presque toute la procédure est effectuée avec le logiciel R. Elle permet de prendre en compte à la fois des variables quantitatives (pH) et qualitatives (type de culture). Un script a été développé ; cette approche permet de reproduire

facilement l'ensemble des traitements sur de nouvelles données (nouvelle version de la base de données au fur et à mesure de son alimentation), tout en laissant la possibilité d'adapter la procédure (nouvelle variable par exemple).

5.2.2. Etude statistique

L'analyse statistique par modélisation linéaire a porté sur les 3 tests de stabilité. Dans chaque cas, des coefficients de régression ajustés satisfaisants ont été obtenus. Deux exemples de FTP (fonctions de pédotransfert) pour le test humectation rapide sont indiqués ci-dessous, en prenant l'indice classique MWD (diamètre moyen pondéré après désagrégation) et un indice correspondant à la fraction cumulée inférieure à 0,1 mm :

MWD = 0,34 Corg + 0,008 Argile + Type_culture	R ² = 0,87
Fraction <0,1mm = -7,18 Corg - 0,23 Argile + Type_culture	R ² = 0,98

Il ressort de cette étude que le Corg (carbone organique) est le facteur principal pour la prédiction de la stabilité. La texture (teneur en argile) et le type de culture (grande culture ou forêt-prairie) sont aussi des facteurs explicatifs, mais de moindre importance. Le signe des régresseurs confirme l'effet positif des teneurs en carbone organique et en argile sur la stabilité structurale.

Le MWD (diamètre moyen pondéré) est bien expliqué ($R^2=0,87$) par les trois variables ci-dessus. L'analyse a aussi porté sur d'autres indices de la stabilité structurale : pourcentage des fractions individuelles et pourcentage des fractions cumulées. La fraction cumulée inférieure à 0,1 mm est celle qui obtient le meilleur coefficient de régression ajusté ($R^2 = 0,98$). Au contraire, les pourcentages en fractions grossières sont beaucoup moins bien expliqués par les variables introduites dans la base de données Agresta. Pour la fraction cumulée inférieure à 0,1 mm, les mêmes régresseurs que pour le MWD ressortent. On note que le signe des régresseurs est inversé ; en effet une valeur importante de Fraction<0,1 mm signifie une faible stabilité.

On pourrait donc, dans certains cas, avoir intérêt à utiliser un autre indice que le MWD. Cependant, cela reste à préciser car pour certains processus (érosion des sols en particulier), le MWD a montré un pouvoir explicatif plus important qu'une fraction cumulée.

Enfin, on prendra soin de noter que si le coefficient de régression peut apparaître comme très élevé, l'intervalle de prédiction reste large (Figure 4). Cela signifie que le pouvoir prédictif des fonctions de pédotransfert produites pourrait être amélioré, en prenant en compte de nouvelles variables. En particulier, si l'analyse de la base Agresta montre l'influence prépondérante de la teneur en matières organiques, aucune information n'était disponible sur les types de matière organique. Ce résultat est à compléter par les études menées dans le volet 2. En effet, alors que ce volet fournit une valeur de référence pour la stabilité structurale à partir des analyses classiques de sol, le volet 2 s'intéresse à la prédiction de la stabilité structurale en fonction de la spéciation des matières organiques.

La deuxième source pouvant expliquer le large intervalle de prédiction pourrait être l'hétérogénéité des modes de prélèvement des échantillons intégrés à la base. Un début de

description et de standardisation était l'un des objectifs du projet. En intégrant ces informations à la base, on pourra peut-être à l'avenir améliorer la valeur prédictive des FPT. La troisième source pouvant être responsable de la largeur de l'intervalle de prédiction pourrait être le climat. Si des suivis de terrain ont déjà montré une forte variabilité de la stabilité structurale au cours de l'année (Blackman, 1992 ; Annabi, 2005), le déterminisme reste à rechercher. Seule une étude spécifique pourra préciser cet aspect et éventuellement définir les nouvelles variables à prendre en compte pour améliorer les FPT de la stabilité structurale.

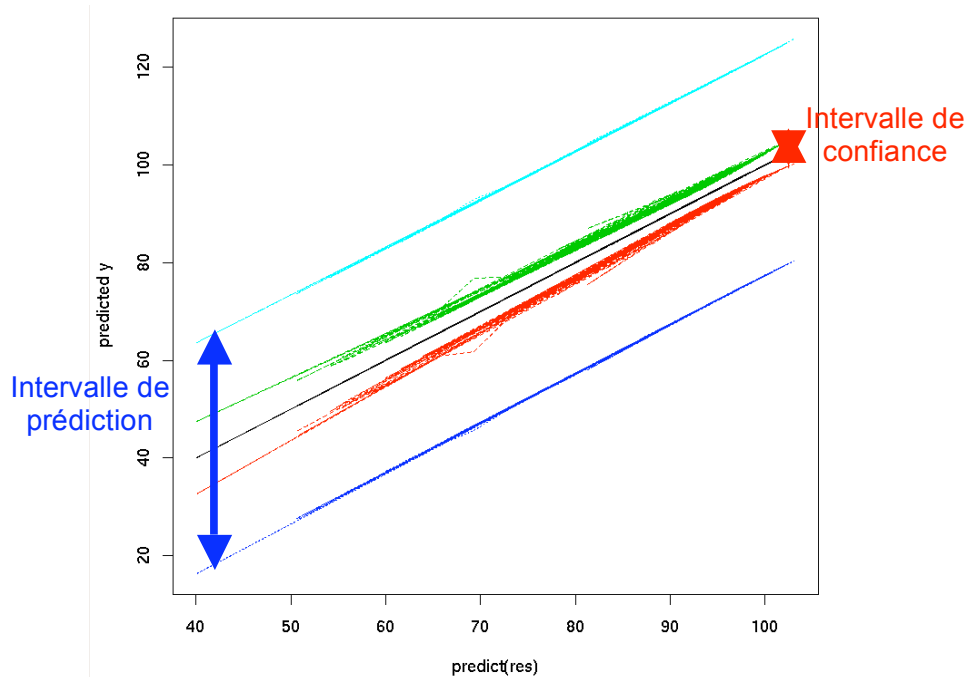


Figure 4 : Intervalle de confiance et de prédiction pour la FPT

« Fraction <0,1mm = -7,18 Corg - 0,23 Argile + Type_culture » (humectation rapide)

6. Etablissement de relations prédictives entre stabilité structurale et fractions organiques du sol (Volet 2)

Lors de changements de système de culture ou de pratique culturale, on observe des modifications de la stabilité de la structure, parfois sans changement de la teneur en carbone des sols, que l'on attribue à des modifications de la qualité des MO (Angers et al., 1993; Baldock et al., 1987). Cependant les données de la littérature sont très fragmentaires dans ce domaine. Six essais de longue durée ou réseaux de parcelles agricoles sur sols limoneux cultivés sont considérés, dans lesquels les traitements différenciés correspondent à des systèmes de culture différents ou sont caractérisés par des pratiques particulières (simplification du travail du sol, apports de MO résiduels). Sur chacun de ces essais, nous établissons des relations statistiques entre un certain nombre de variables biologiques et organiques (C-biomasse microbienne, abondance des champignons, teneur en matières organiques particulières, teneurs en polysaccharides, teneurs en substances humiques...) et la stabilité structurale, afin d'identifier les meilleurs descripteurs des variations de stabilité structurale.

6.1 Réseaux de parcelles en culture légumière (UMR SAS)

Mesures de la stabilité structurale, des sucres, de la biomasse microbienne, du C et N dans un réseau de 30 parcelles en zone légumière prélevées en 2005, en sol limoneux, dont l'historique est connu, caractérisées par différents niveaux d'intensification de travail du sol, d'occupation du sol, de fertilisation minérale et des modes de gestion organique des parcelles (choix des produits, fréquence d'apport, quantité apportée).

Il n'est pas ressorti de corrélation entre polysaccharides extractibles à l'eau et la stabilité structurale. Dans les parcelles recevant annuellement du fumier (cas des parcelles « mixtes »), le taux de MO est plus faible que dans les parcelles qui reçoivent du compost tous les 3-5 ans (cas des parcelles « légumes spécialisés »). Par contre le niveau de stabilité structurale y est significativement plus élevé.

Tableau 3. Résultats des analyses biologiques et physiques des parcelles des différents systèmes de culture et effets des systèmes de culture sur les différentes variables

	Biomasse μ (mg/kg sol sec)	[glucose] (mg/g sol sec)	[Csucré] (mg/g sol)	dapp	Hp (%)	Hp CC (%)	HR (mm)	DM (mm)	HL (mm)	MWD (mm)
Moyenne	144	0,30	0,12	1,4	22,7	21,0	0,48	1,24	0,68	0,80
Ecart type	39	0,10	0,04	0,1	3,4	2,9	0,13	0,40	0,17	0,19
Système	NS	NS	NS	*	NS	***	*	***	NS	*
Endivier	127	0,33	0,13	1,5 ^A	19,7	17,8 ^B	0,59 ^A	1,02 ^B	0,71	0,78 ^B
LSpé	156	0,32	0,13	1,4 ^B	24,3	23,3 ^A	0,42 ^B	1,07 ^B	0,61	0,70 ^B
LCéréale	144	0,23	0,09	1,3 ^B	22,5	20,5 ^A	0,45 ^{AB}	1,23 ^B	0,66	0,78 ^B
Mixte	142	0,36	0,14	1,3 ^B	23,3	21,3 ^A	0,50 ^{AB}	1,77 ^A	0,77	1,01 ^A

NS Non significatif ($P > 0,05$) ; Différence significative (*si $P < 0,05$; **si $P < 0,01$ et *** si $P < 0,001$)

Les systèmes avec lettres différentes sont significativement différents ($P < 0,05$; Test Newman-Keuls)

6.2 Essai de longue durée en système fourrager Kerguéhennec (UMR SAS) :

Nous avons caractérisé la stabilité structurale et de la biomasse microbienne sur un essai en système fourrager combinant différents traitements organiques (M : minéral ; LP : lisier de porc ; FV : Fumier de volailles ; FB : fumier de bovins) et différentes modalités de travail du sol (L (Labour), TS (technique simplifiée) et Semis direct (SD)). Le niveau initial de MO est élevé (4 %) et le sol est de ce fait relativement stable. C'est donc le test le plus agressif (test d'immersion dans eau) qui est le plus discriminant. Il permet, en effet, de mettre en évidence un effet positif de la simplification du travail du sol sur la stabilité structurale. Après 7 années d'expérimentation, une différenciation entre traitements est mise en évidence. Les premiers résultats montrent également une corrélation entre stabilité structurale ($MWD_{\text{immersion}}$) et le C du sol et celui de la biomasse microbienne (Figure 5).

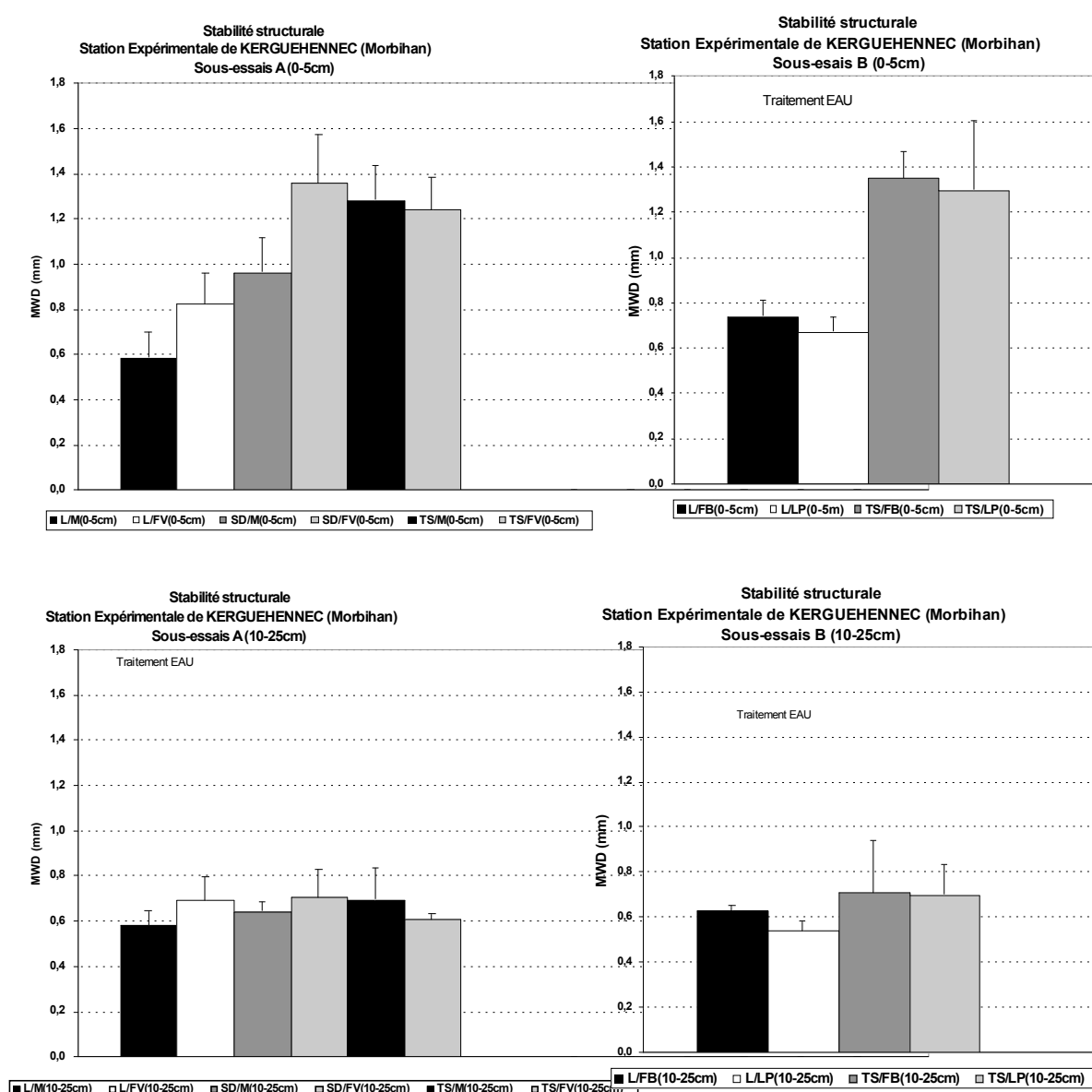


Figure 5. Stabilité structurale ($DMP_{\text{immersion}} = MWD$) pour deux horizons du sol à 0-5 et 10-25 cm.

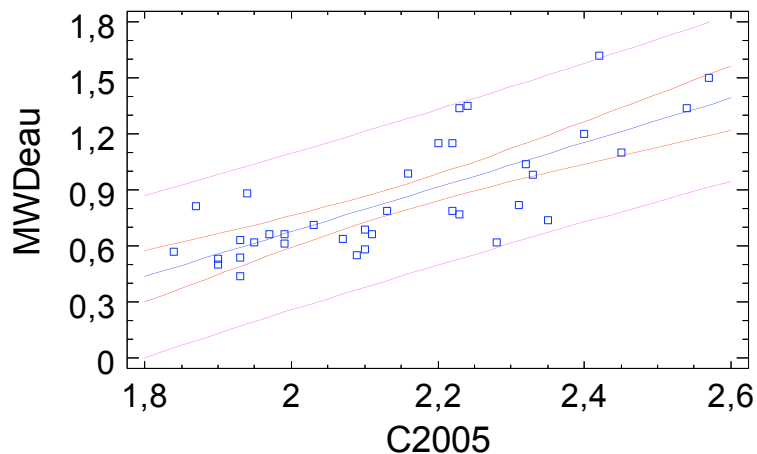


Figure 6 : $MWDi_{mmersion}$ en fonction de la teneur en C du sol et de la biomasse microbienne.
 Axe bleu : droite de régression linéaire, Axes rouges : Confiance à 95%, Axes rose : limite de prévision.

6.3 Essai de longue durée de systèmes de culture innovants en céréaliculture. La Cage (UMR Bioemco et Science du Sol Versailles).

Nous avons poursuivi l'analyse entreprise dans le cadre du programme GESSOL1 – Dmostra sur des parcelles caractérisées par différents systèmes de culture alternatifs en grande culture (intégré, biologique, travail du sol simplifié avec couverture végétale) en référence au système conventionnel. Les résultats obtenus sur le prélèvement de 2005 montrent que les systèmes continuent à se différencier du point de vue de la stabilité structurale et des variables biologiques et biochimiques mesurées (biomasse microbienne, teneur en ergostérol, teneur en sucres). (Figure 7).

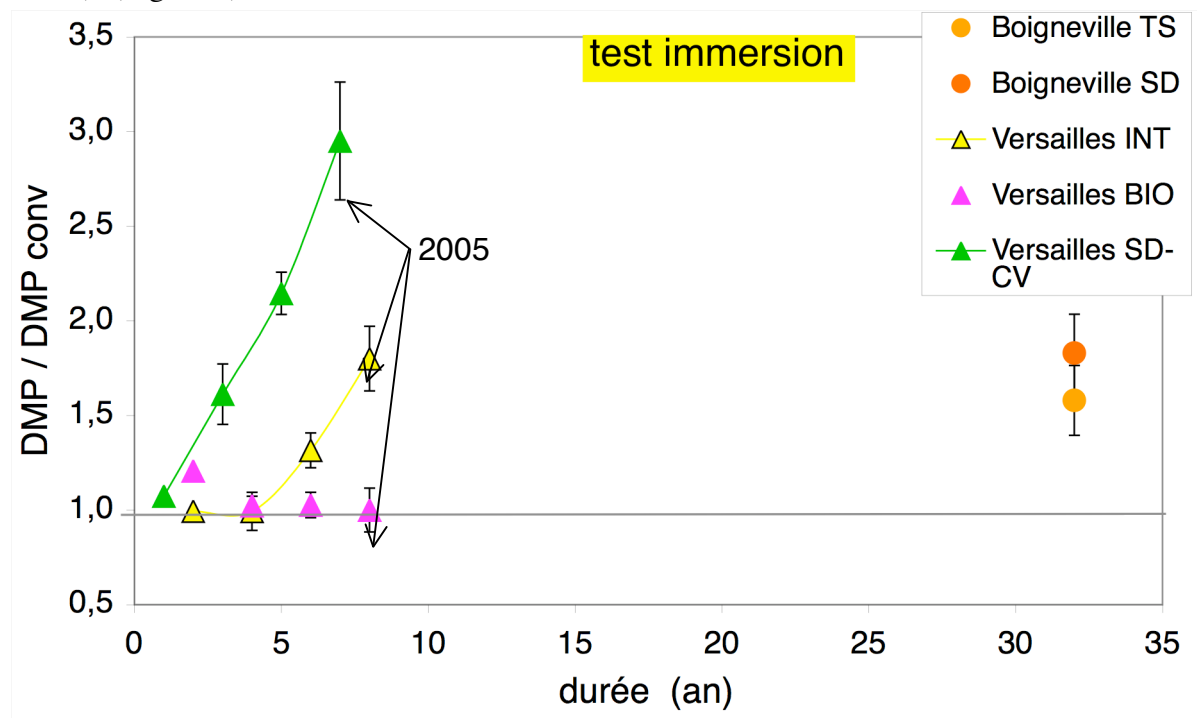


Figure 7. Evolution de la stabilité structurale dans l'essai de la Cage, relativement à la valeur mesurée pour le témoin (système productif).

6.3 Essais au champ : apports de composts au sol. Sites du Défend et de Lusignan (Université de Poitiers)

6.3.1 Matériel et méthodes

Sol : L'essai au champ a été étudié sur un sol d'une parcelle cultivée, d'une superficie de 0.5 ha située sur le site des Verrines de l'INRA de Lusignan (86 – France). Il s'agit d'un sol limoneux qualifié de peu stable, parfaitement adapté à cette étude. La rotation de cultures mise en place est la suivante : blé-orge-colza.

Compost : Le compost épandu, composé de déchets végétaux (80%) et de bio-déchets (20%), provient de la plate-forme de la Villedieu du Clain (lot L3-04). Il a été criblé à 20 mm après 305 jours de compostage puis épandu selon les normes agricoles soit 25 T/ha (5 T/ha de Corg). Il a été caractérisé tout au long de sa fabrication depuis l'arrivée des déchets verts jusqu'à l'obtention d'un compost mature : composition élémentaire, composés humiques, lipides (Som, 2006, Célérier, 2007). Il fait par ailleurs l'objet de contrôles rigoureux (tests de germination, phytotoxicité, métaux lourds, ...) avant sa commercialisation.

Essai au champ : L'épandage a été réalisé sur deux bandes de 10 m de large et 100 m de long. Chaque bande épandue est séparée par une bande de sol non amendé. Chaque parcelle a été échantillonnée en trois points et les trois carottes ont été regroupées afin de composer un échantillon représentatif de la parcelle. Les prélèvements ont été effectués sur l'horizon superficiel (0-20 cm). Chaque échantillon, prélevé à la tarière est lyophilisé, broyé et tamisé à 2 mm puis congelé avant d'être analysé. Les analyses ont été réalisées à 4 jours, 7 mois, 12 mois, 18 mois, 24 mois et 36 mois.

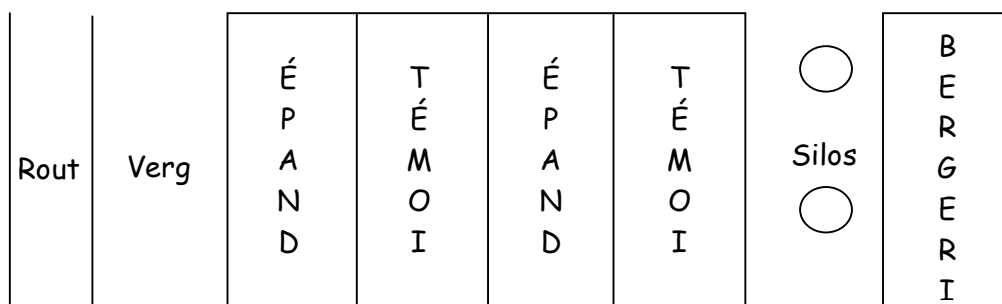


Figure 8 : Disposition de l'épandage sur le sol de l'INRA de Lusignan

Extraction et fractionnement des différentes formes de MO : La MO du sol est séparée en 4 fractions (lipides, acides fulviques (AF), acides humiques (AH) et humine). Les lipides sont extraits avec un extracteur automatique sous pression par un mélange dichlorométhane/méthanol (2/1 v/v). Les acides fulviques et humiques sont ensuite obtenues par des extractions acides et alcalines successives. L'humine est la fraction insoluble.

Thermochimie : En présence d'hydroxyde de tétraméthylammonium en solution dans le méthanol, l'échantillon est chauffé à 650°C pendant 10s. Le pyrolyseur est couplé à un chromatographe en phase gazeuse Trace GC couplé à un spectromètre de masse AUTOMASS (Thermo).

Les analyses de carbone et azote totaux ont été réalisées sur un analyseur élémentaire de type CHN.

6.3.2 Résultats et discussion

Les taux de carbone organique et d'azote total du sol témoin (tableau 4) ne varient pas au cours du temps. Par contre, sur le sol amendé, l'apport de compost se traduit dès 4 jours par une augmentation d'environ 28% des taux de C et N. L'azote est ensuite immobilisé tandis que le carbone semble minéralisé par l'activité bactérienne.

	Témoin	4 jours	7 mois	1 an	18 mois	2 ans	3 ans
TOC	21.6	27.8	24.5	24.0	25.9	25.2	25.1
Ntot	2.1	2.7	2.6	2.8	2.5	2.5	2.4
C/N	10.1	10.2	9.5	8.6	10.2	10.1	10.2
OM	37.3	48.0	42.5	41.5	44.8	43.4	43.1
pH	6.4	6	5.7	5.7	5.7	5.6	6.1

Tableau 4. Caractéristiques du sol suite à un apport de compost

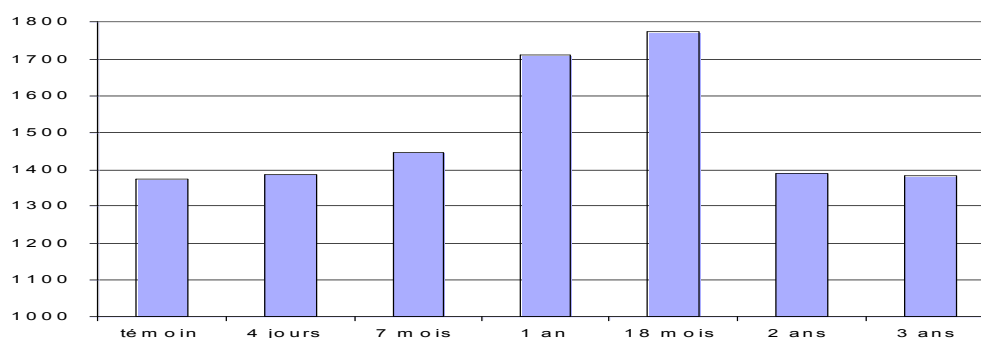


Figure 10 : Evolution de la quantité de lipides (ppm) dans le sol de Lusignan après apport de compost

Cependant l'apport du compost sur un sol influence la quantité et la qualité de la fraction lipidique. En effet la quantité de lipides, qui est une MO biodégradable et susceptible d'avoir un effet direct sur la stabilité structurale en affectant l'hydrophobie des agrégats augmente entre 7 et 18 mois (Figure 10). De plus l'évolution du rapport acides gras ramifiés / acides gras linéaires (Figure 11) confirme l'influence d'un apport de compost sur l'activité biologique du sol.

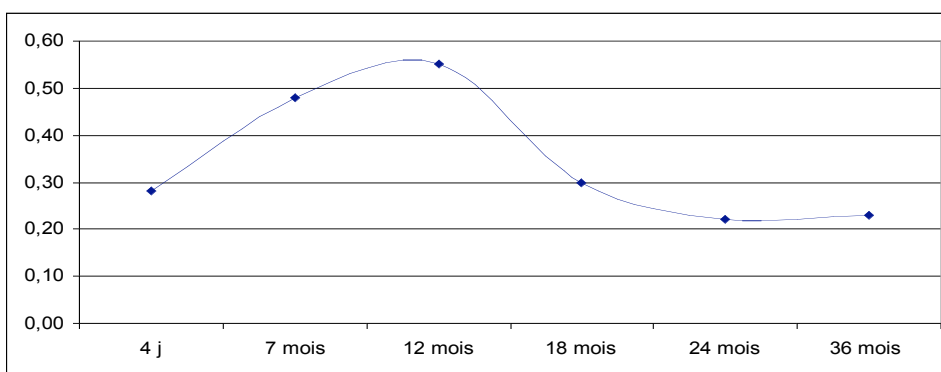


Figure 11 : Rapport acides gras ramifiés / acides gras linéaires (lipides) dans le sol suite à un apport de compost

Ce même rapport déterminé après thermochimiolysse des substances humiques montre que la cinétique d'incorporation et d'élimination des marqueurs bactériens est plus lente dans les AH que dans les lipides (Figure 12).

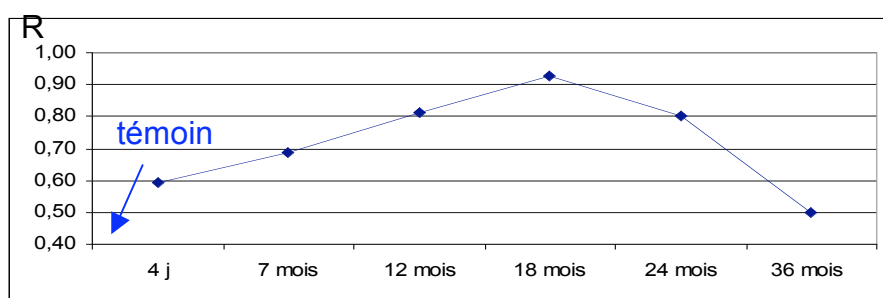


Figure 12 : Rapport acides gras ramifiés / acides gras linéaires (acides humiques) dans le sol suite à un apport de compost

Le suivi de la stabilité structurale montre une nette augmentation du DMP moyen 1 zn après apport de compost (Figure 13). L'effet du compost s'estompe à 2 ans. De plus, la stabilité des sols amendés semble être affaiblie par le non renouvellement d'un apport (Figure 13).

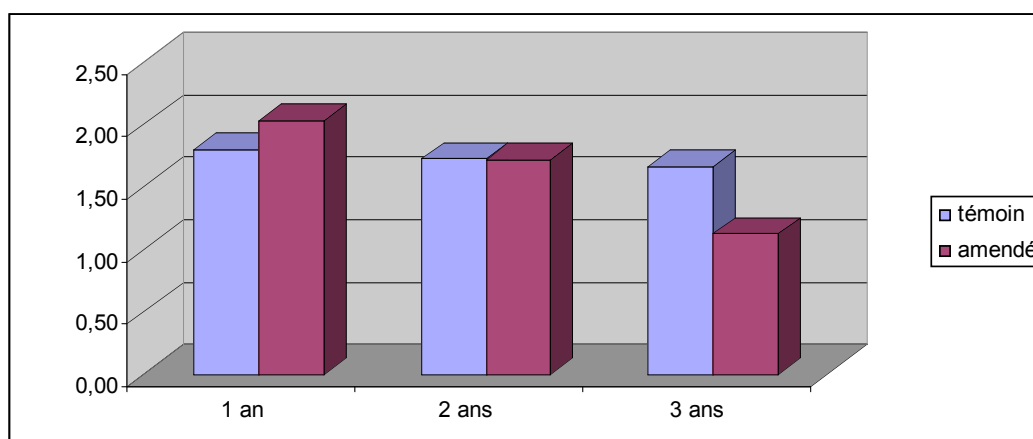


Figure 13 : Evolution du diamètre moyen pondéré moyen (mm) suite à l'apport de compost

Le suivi de l'amendement pendant 3 ans (depuis novembre 2004) a donc montré une amélioration de la stabilité structurale. Nous avons pu mettre aussi en évidence l'interaction entre la MO du compost et celle du sol (par notamment la présence de marqueurs lipidiques issus du compost dans le sol, témoignant d'une augmentation de l'activité biologique). D'après les analyses effectuées, l'effet du compost s'estompe après 24 mois.

6.5 Conclusion et perspectives

Le suivi d'essais au champ par les différents partenaires a permis de rassembler des données relatives d'une part à la qualité des matières organiques apportées au sol, d'autre part à la qualité des matières organiques du sol et à l'activité microbienne de ceux ci et enfin , relatives à la stabilité structurale. Une dernière activité du projet doit consister en la synthèse de ces données afin de déterminer :

- si certaines variables biologiques sont de bons prédicteurs de variations à court et moyen terme (de quelques mois à 1-4 ans) de la stabilité de la structure, en particulier dans les situations où la teneur en carbone total du sol ne varie pas ou très peu (et où l'on sort donc du champ d'application de la fonction de pédotransfert proposée dans la section 3 (volet 1 du projet).
- les limites d'application de cette fonction de pédotransfert pour des changements de systèmes de culture (durée minimale d'application, effet minimal sur la teneur en C du sol.

7. Construction d'un outil de prévision des variations de stabilité structurale suite à un apport de MO (Volet 3)

Les activités sur ce thème sont basées sur :

- des travaux expérimentaux antérieurs : thèses de S. Abiven (UMR SAS Rennes) et de M Annabi (UMR EGC Grignon)
- des travaux expérimentaux et de modélisation menés dans le cadre du projet : thèse de D. Cosentino (UMR EGC et Bioemco), master M2 d'Elsa Coucheney (UMR Bioemco) et de C. Peltre (UMR EGC).
- des synthèses à caractère bibliographique, synthèses des données acquises et travaux de modélisation.

7.1 Synthèse de la littérature

Une première synthèse a porté sur l'effet des matières organiques apportées au sol sur la stabilité de la structure (Abiven et al. 2009). L'analyse des données de la littérature a permis de confirmer le modèle de Monnier (1973) suggérant que l'intensité et la durée de l'effet des matières organiques sur la stabilité de la structure dépend de leur décomposabilité (Figure 14). L'étude a aussi montré que les relations entre la quantité de matières organiques apportées au sol et stabilité de la structure et avaient été très peu étudiées qu'il en s'en dégageait pas de tendance claire.

Une seconde synthèse focalisée sur rôle des microorganismes dans la stabilisation de la structure (Chenu et Cosentino 2009) a permis :

- de dégager un schéma conceptuel sur le rôle des microorganismes dans la stabilité structurale, schéma qui a servi de base à l'interprétation d'expérimentations au laboratoire et à la construction d'un modèle numérique (Figure 15) ;
- de montrer que la littérature ne faisait apparaître aucune hiérarchie entre les différents agents d'agrégation et que peu d'étude en avaient considéré plusieurs simultanément (Tableau 5);
- de montrer le rôle prédominant des champignons dans la stabilité structurale, d'une part par leur capacité à retenir mécaniquement les particules, d'autre part par la sécrétion de substances à caractère hydrophobe.

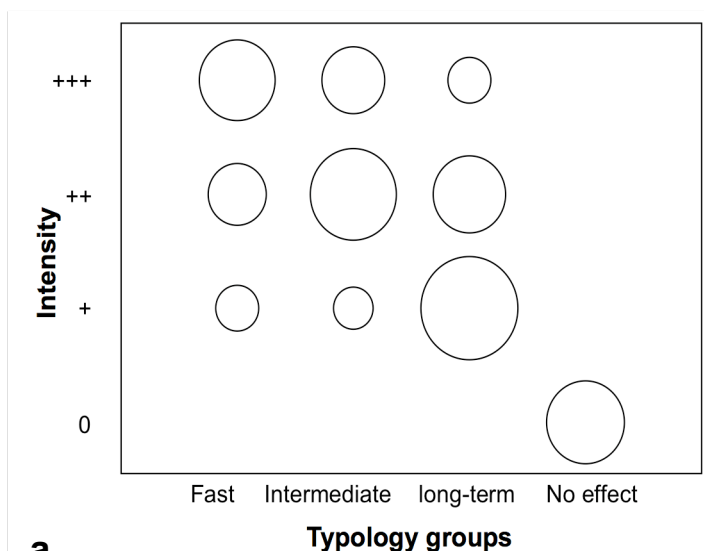
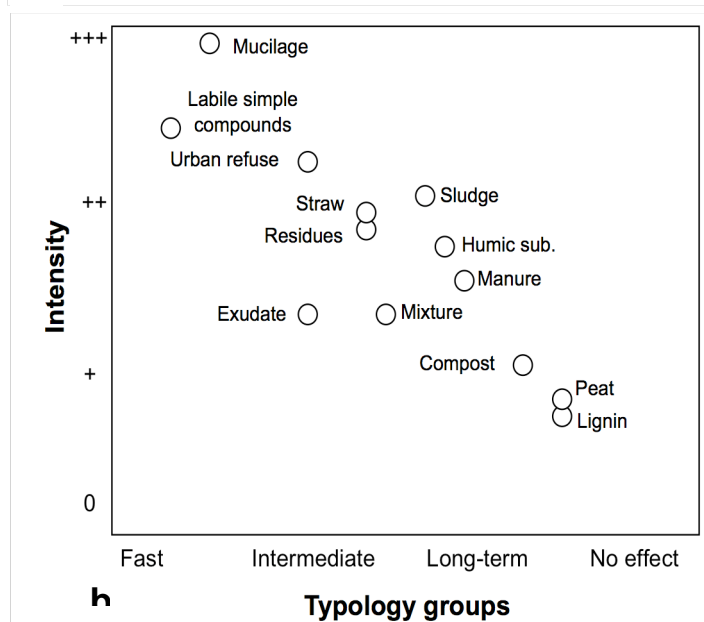


Figure 14 Effet des MO apportées sur la stabilité structurale (Abiven et al. 2009)

a) Relation entre des cinétiques d'effet des MO (rapide, intermédiaire, à long terme et sans effet) et l'intensité de cet effet sur la stabilité structurale (de 0, aucun effet à +++ , fort effet). La taille des cercles est proportionnelle au nombre d'échantillons dans le groupe.



b) Relations entre groupe cinétique (cf a) et intensité de l'effet pour différents produits organiques introduits dans la base de données de Abiven et al. 2009

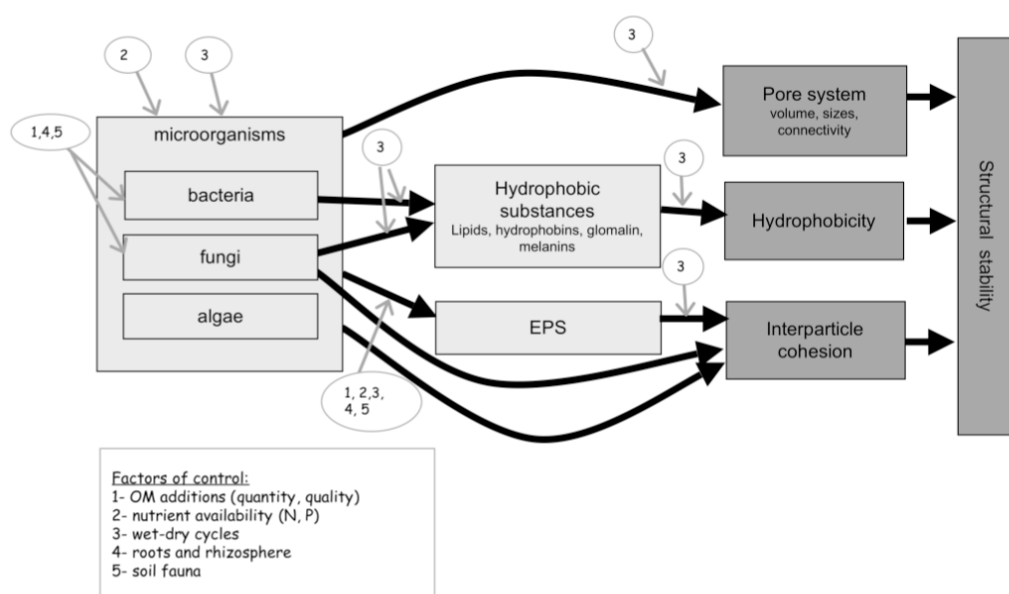


Figure 15. Schéma conceptuel de l'effet de matières organiques apportées sur la stabilité structurale

reference	Soil type or texture	Total Organic C	Total polysaccharides	Dilute acid soluble polysaccharides	Hot water soluble polysaccharides	Microbial biomass	Hyphal length	Comments or other fractions
(Angers & Mehuys, 1989)	Clay soil fallow			0.63				
(Angers <i>et al.</i> , 1993)	Clay	0.001ns		0.28	0.43	0.33		
(Angers, 1992)	Loam	0.6				0.4 ns		
(Angers <i>et al.</i> , 1999)	Sandy Loam, Podzol	0.77		0.8		0.57		
(Ball <i>et al.</i> , 1996)	Loam	0.83	0.97	ns	0.98			
(Bethlenfalvay <i>et al.</i> , 1999)	Silt Loam						0.565	
(Bissonnette <i>et al.</i> , 2001)	Silty clay	0.95		0.89		0.9		
(Capriel <i>et al.</i> , 1990)	20% Clay 63% Silt					0.82		Lipids
(Carter, 1992)	Sandy Loam, Podzol	0.942				0.947		
(Carter <i>et al.</i> , 1994)	Sandy Loam	ns		< 0.25	< 0.25	ns		
(Chan & Heenan, 1999)	Oxic Paleustalf	ns				0.64		
(Chantigny <i>et al.</i> , 1997)	SiClLoam and Clay Loam			0.42/0.05		ns		Fungal glucosamine (r=0.68). Bacterial muramic acid (r=0.48).
(Degens <i>et al.</i> , 1994)	Sandy Loam	ns		ns	0.05	ns	ns	
(Degens & Sparling, 1996)	Sandy, Podzol			ns	ns	0.83-0.54		
(Degens <i>et al.</i> , 1996)	Sandy						0.41	
(Drury <i>et al.</i> , 1991)						0.26		
(Denef & Six, 2005)	Loam, illitic					0.59		after 46 days of incubation
	Clayey, ferralsol					0.21		after 46 days of incubation
(Haynes & Swift, 1990)	Silt Loam	0.58	0.57 ns		0.74			

	Sandy Loam	0.66	0.67	0.56ns	0.83			
(Haynes <i>et al.</i> , 1991)	Silt Loam	0.77	0.75	0.76	0.84	0.957*		* calculated
	Clay Loam	0.72	0.76	0.6ns	0.79			
(Haynes, 1999)	Silt Loam	0.92			0.72 ns	0.8		mineralizable C
(Haynes, 2000)	Silt Loam	0.61	0.66		0.99			
(Jastrow <i>et al.</i> , 1998)	Silt loam	0.43			0.55	0.65	0.89	
(Kiem & Kandeler, 1997)	Entre 6 et 30% argile	0.34				0.59 - 0.87		
Kinsbursky <i>et al.</i> , 1989	Sewage sludge (clay 3 à 44%)				0.58 to 0.85			
Lax and García-Orenes, 1993	Clay loam		0.88					
Metzger <i>et al.</i> 1987	Sandy clay loam		0.5		0.68		0.74	
(Perfect <i>et al.</i> , 1990)						0.11		
(Roberson <i>et al.</i> , 1991)	Loam	ns				0.71		Heavy fraction carbohydrates: r = 0.9 / LF carbohydrates: r = ns
(Roberson <i>et al.</i> , 1995)	Sandy Loam	ns				ns. in summer: 0.52		H.F carbohydrates with Slacking resistance: r= 0.74/0.81
(Roldan <i>et al.</i> , 1994)	Loamy clay			0.66-0.28				
(Sparling, 1992)						0.88		
(Tisdall & Oades, 1980)		0.93					0.77	
(Wright & Upadhyaya, 1998)	37 soils	0.65						0.84 easily extractable glomalin

Table 5 Relations entre stabilité de la structure et attributs microbiens. Les études examinées rapportent soit des expérimentations d'apport de MO au sol au laboratoire ou au champ, soit des études au champ comparant différentes pratiques culturales. Sont reportés les coefficients de corrélations r, ns= non significatif (Chenu et Cosentino 2009).

7.2 Matériel et méthodes

Nous avons standardisé autant que possible les conditions expérimentales afin de pouvoir comparer les données issues des différentes expérimentations (Table 6). Les méthodes utilisées sont celles décrites au chapitre 3, auxquelles se sont ajoutées différentes déterminations : dans tous les cas une mesure du CO₂ respiré, dans certains cas d'autres propriétés physiques, composantes de la stabilité de la structure (porosité, hydrophobicité, cohésion).

Table 6 Apport de matières organiques au sol et stabilité de la structure : conditions expérimentales

		Abiven 2004	Annabi 2005	Cosentino 2006	Coucheney 2005	Peltre
Variable privilégiée		Qualité biochimique de la MO	Qualité biochimique de la MO (origine et maturité des composts)	Quantité apportée, alternances d'humectation dessiccation	Alternances d'humectation dessiccation	Effet de fractions solubles et humiques des composts
Sols		Saint Méloir	Feucherolles	Versailles (La Cage)	Versailles (La Cage)	Feucherolles
	Texture	Sable 39% Limon 52% Argile, 10%	Sable 7%, limons 76% Argile 17%	Sable 27% Limon 56% Argile 17%		Sable 7%, limons 76% Argile 17%
	Teneur en C	1%	1%	1%	1%	1%
	pH	7,5	6,9	7		6,9
	conditionnement	Agrégats 3-5 mm	Agrégats 3-5 mm	Agrégats 3-5 mm	Agrégats 3-5 mm	Agrégats 3-5 mm
Apport de MO	Préincubation du sol	oui	non	oui	oui	non
	Mélange MO- sol	au sol frais	au sol sec	au sol frais	au sol frais	au sol sec
	Etat physique de la MO	Broyée < 1mm	Broyée < 1mm	Broyée < 1mm	solution	Broyée < 1mm
	Doses apportées (g/kg)	4	5,2	2,5- 4- 5- 10- 15- 20	4	3
	Type de MO	Paille de blé, résidus de choux fleur, fumier de bovin, compost de déchets verts et fientes	Composts de déchets verts + boues, compost d'ordures ménagères grises, compost de biodéchets chacun frais et mur	Paille de maïs	Glucose	Compost ordures ménagères grises immature et mature, fractions solubles à l'eau, résidus H ₂ O, tétraborate, NDF
Incubation	température	25°	4°, 28°	20°	20°	28°C
	humidité	Capacité au champ	Capacité au champ	Capacité au champ et alternances sec-capacité au champ	Capacité au champ et alternances sec-capacité au champ	Capacité au champ
	Disponibilité de l'azote	Non limitant	limitant	Non limitant	Non limitant	limitant
	durée	1 an	1 an	1 an	22 jours	21 jours

7.2 Dynamiques microbiennes et stabilité de la structure suite à des apports organiques

Les travaux antérieurs à MOST avaient montré expérimentalement le fort poids des caractéristiques biochimiques initiales et de la décomposabilité des matières organiques apportées dans la dynamique temporelle de la stabilité de la structure (Abiven et al. 2007, Annabi et al. 2007). Nous nous sommes ici attachés à la relation quantité de MO apportées – variables biologiques – stabilité structurale. Lors d'apport de paille de maïs en quantité croissante, on constate que les cinétiques de respiration, et des teneurs en biomasse microbienne-C, ergostérol et sucres solubles à l'eau chaude sont distinctes mais qu'à une date donnée, ces variables augmentent linéairement avec la quantité de C apportée, ainsi que la stabilité structurale (Figure 16) (Cosentino, 2006 ; Cosentino et al. 2009). La teneur en ergostérol est la plus corrélée aux variations de stabilité de la structure, mais sans hiérarchie claire du pouvoir prédictif des variables biologiques.

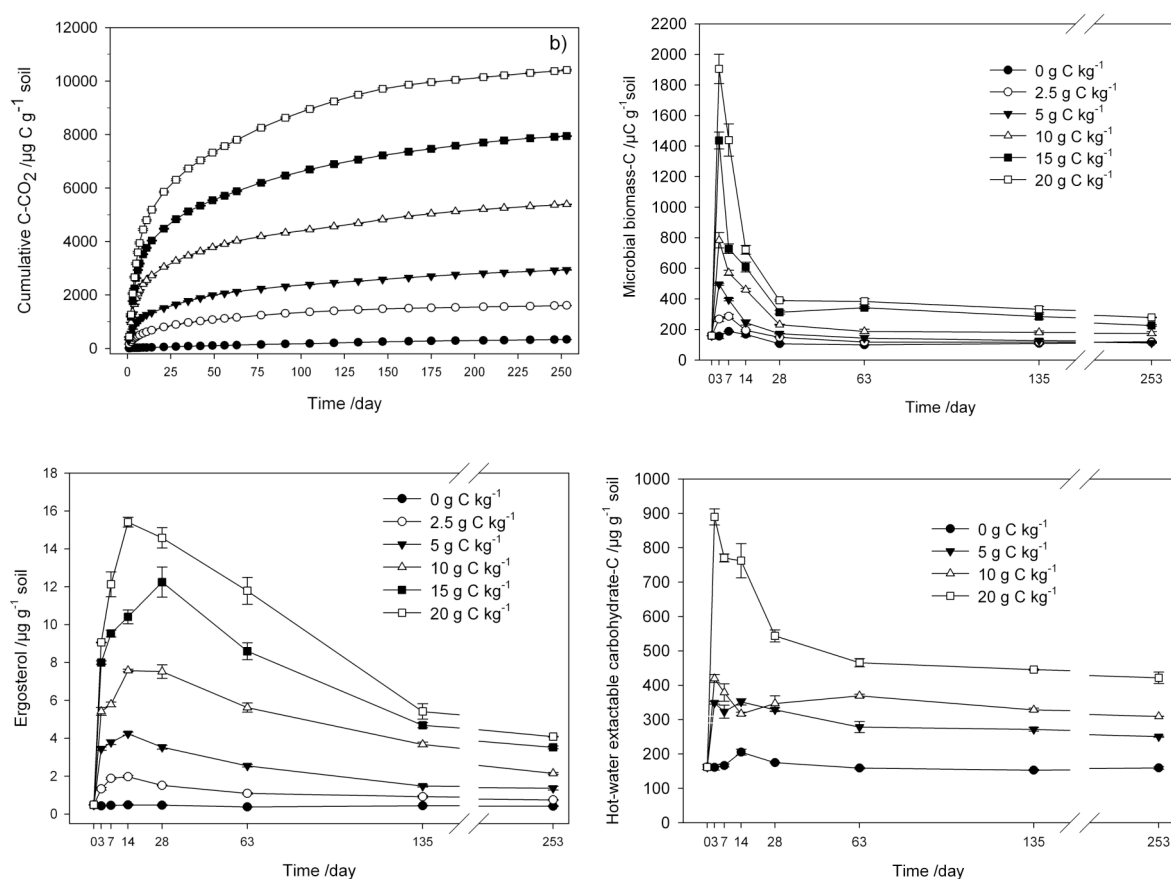


Figure 16. Evolution des variables biologiques lors de l'apport de paille en quantité croissante à des agrégats de sol limoneux (Cosentino et al. 2009)

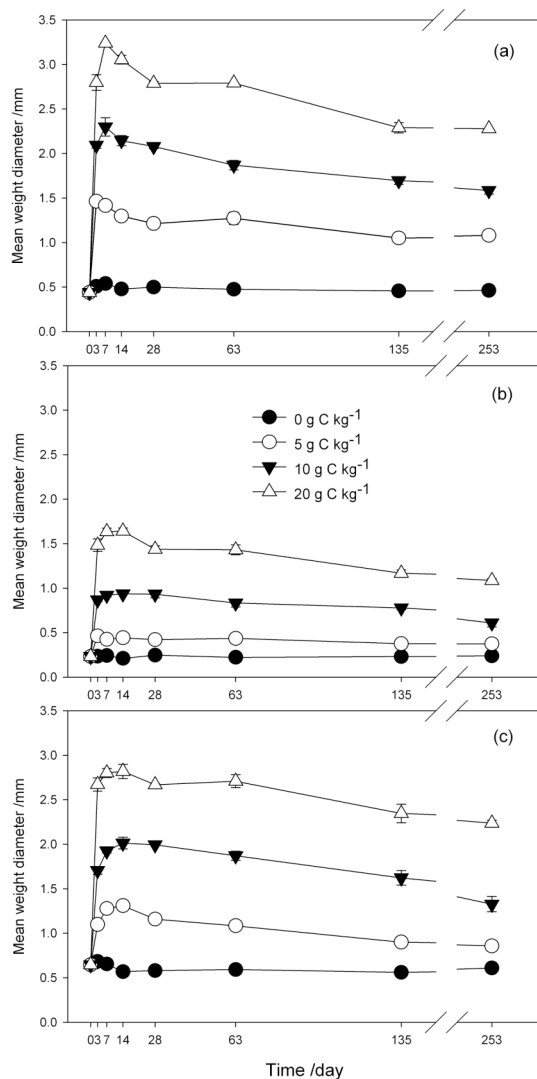


Figure 17 Evolution de la stabilité structurale suite à des l'apport de paille en quantité croissante à des agrégats de sol limoneux

7.3 Composantes physiques de la stabilité de la structure

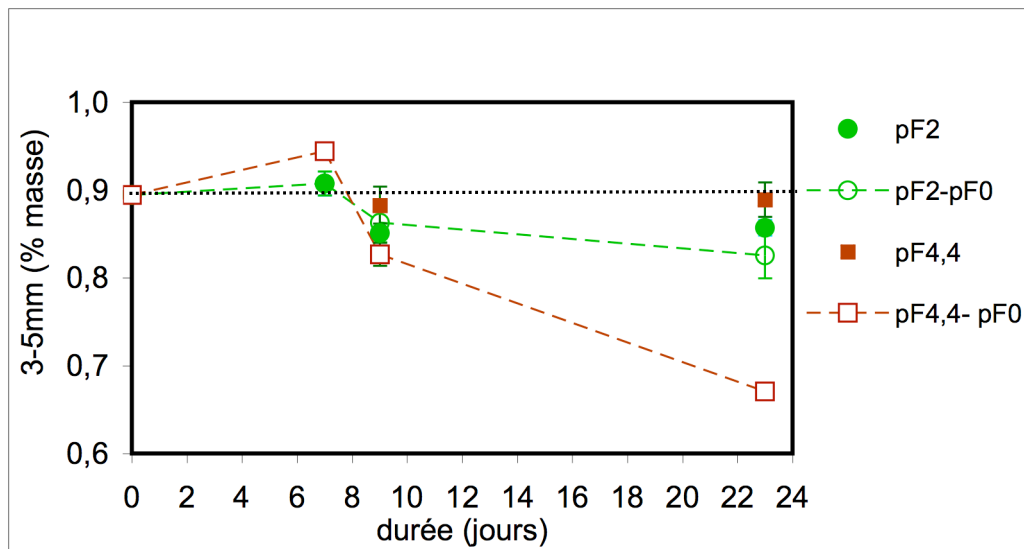
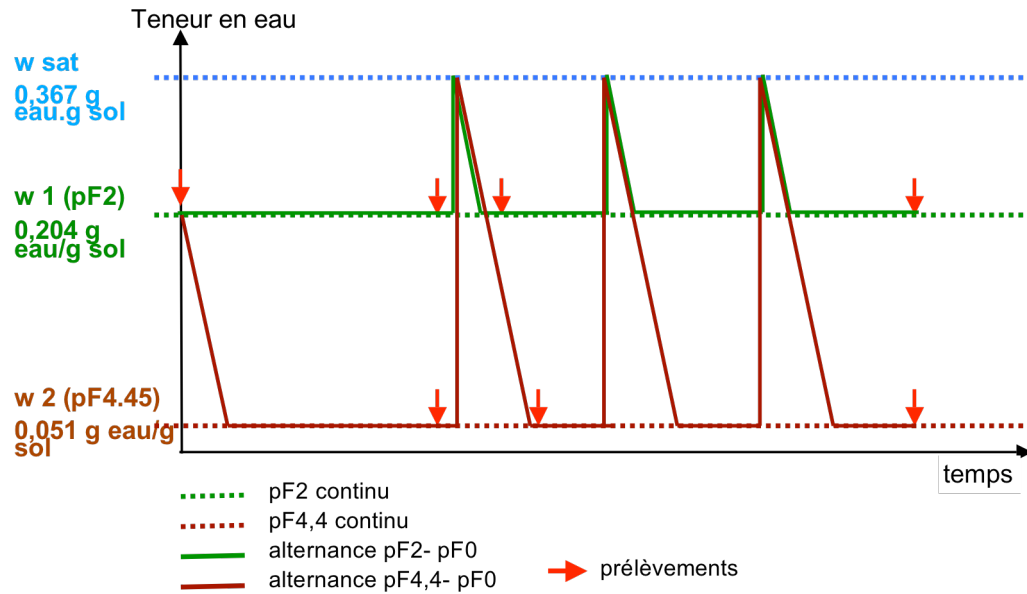
L'augmentation de la stabilité structurale est dans ces systèmes concomitante d'une augmentation de l'hydrophobicité (Cosentino et al., en préparation) et de porosité. Une étude méthodologique a permis de comparer différentes méthodes de mesure de l'hydrophobicité d'agrégats de sol (Cosentino et al. en préparation).

7.4 Interactions entre dynamiques microbiennes et histoire hydrique (alternances d'humectation-dessiccation)

Une expérimentation en laboratoire a été mise en place afin de tester les hypothèses formulées quant à l'importance de l'histoire hydrique dans la stabilisation de la structure. Nous avons incubé du sol en présence ou non de glucose et nitrate d'ammonium (stimulation ou non de l'activité microbienne) en appliquant différents scénarios, illustrés à la figure 18. Les résultats montrent (Coucheney 2005) :

- que le rendement en agrégats dépend du scénario hydrique, le % d'agrégats 3-5mm diminuant avec les alternances d'humectation dessiccation (Figure 19) en relation avec un fissuration de ceux ci. Ceci valide l'hypothèse H1. Cependant les agrégats ainsi sélectionnés ne sont pas plus stables.
- que l'application de réhumectations diminue plus le DMP sur sol « sec » (pF 4.45) qu'humide (pF2) sauf si les agrégats ont une cohésion préalablement augmentée par l'activité microbienne (apport de glucose) (hypothèse H3 vérifiée);

- Qu'il existe une forte interaction de l'effet des alternances d'humectations dessiccations et de l'activité microbienne sur la stabilité structurale (Coucheney 2005, Cosentino et al. 2006) .



7.5 Variables explicatives des variations temporelles de la stabilité structurale

7.5.1. Etat initial : sols de départ

La comparaison des conditions initiales montre que les sols sont très proches en termes de stabilité structurale, teneur en C, abondance des champignons et des sucres, et que la biomasse microbienne est plus abondante à Versailles (Table 6).

Table 6. Caractéristiques initiales des sols utilisés pour les expérimentations d'apport de matière organique

	DMP immersion (mm)	DMP réhumectatio n (mm)	DMP agitation (mm)	biomasse microbienne (mg C/kg sol)	Polysacchari des extractbles à l'eau chaude (mgC/kg sol)
moyennes					
Saint Meloir	0,50	0,64	1,02	37,6	176,5
Feucherolles	0,34	0,67	1,36	52,1	134,0
Versailles	0,25	0,69	0,73	157,4	150,1
écart types (n=6)					
Saint Meloir	0,08	0,04	0,02	3,3	9,4
Feucherolles	0,01	0,04	0,33	0,41	1,41
Versailles	0,06	0,28	0,16	5,8	17,2

7.5.2. Effet abiotique des matières organiques apportées

Nous n'avons pas observé d'effet direct des matières organiques apportées au temps 0 (donc effet abiotique (cf Figure 20), pour les tests d'immersion et de réhumectation lente et quelque soit le test, pour les résidus végétaux ou des composts immatures (Abiven 2005, Annabi 2005, Cosentino et al. 2006). Par contre une augmentation du DMP au test d'agitation mécanique a été observée dans le cas des composts matures. Cet effet a pu être optimisé par le mode d'apport : pour les composts seulement, le compost sec a été mélangé au sol sec, puis de l'eau ajoutée. Ce protocole a pu faciliter la diffusion de composés solubles, humifiés ou non, dans les agrégats, qui ont augmenté la cohésion interparticulaire. Dans un travail spécifique ((Peltre 2006), la fraction soluble de composts a été extraite par différentes méthodes (eau bouillante, tétraborate de Na, solvant organique, résine chélatante) et caractérisée, en particulier par pyrolyse. Aucun effet significatif de ces fractions sur la résistance des agrégats vis-à-vis de la désagrégation mécanique n'a été mise en évidence (mais après 21 jours d'incubation seulement).

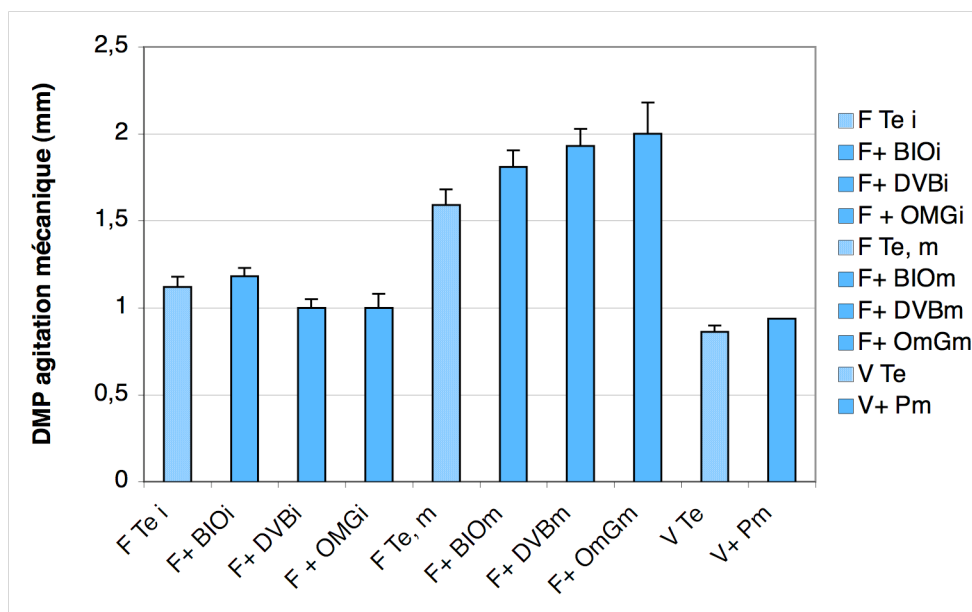


Figure 20. Effet au temps 0 des matières organiques apportées sur la stabilité structurale. F= Feucherolles, V= Versailles, Te= témoin, i= immature, m= mature, Bio= compost de biodéchets, OMG= compost d'ordure ménagères grises, DVB = compost de déchets verts + boues, Pm = paille de maïs. Annabi et al. 2008, Cosentino et al. 2006

7.5.3. Relations entre stabilité structurale et variables biologiques au cours des incubations

L'analyse des relations entre variables biologiques et stabilité structurale montrent que toutes (biomasse microbienne, abondance des champignons ou polysaccharides extractibles à l'eau chaude) sont positivement corrélées au DMP à l'issue des trois tests (par ex. Figures 21 et 22). Cependant une première analyse des données n'a montré, ni corrélations étroites, ni hiérarchie entre ces variables. Aucune ne paraît donc pouvoir être utilisée seule comme prédicteur de la stabilité structurale. Les différences sont peu marquées entre les tests de réhumectation lente et d'immersion rapide. Cependant, les corrélations sont plus faibles entre les variables biologiques et le DMP du test avec agitation. Dans le cas des tests de réhumectation lente, le profil des courbes tient en partie au « plafonnement » des résultats pour les valeurs supérieures, le DMP maximal possible étant de 4 mm.

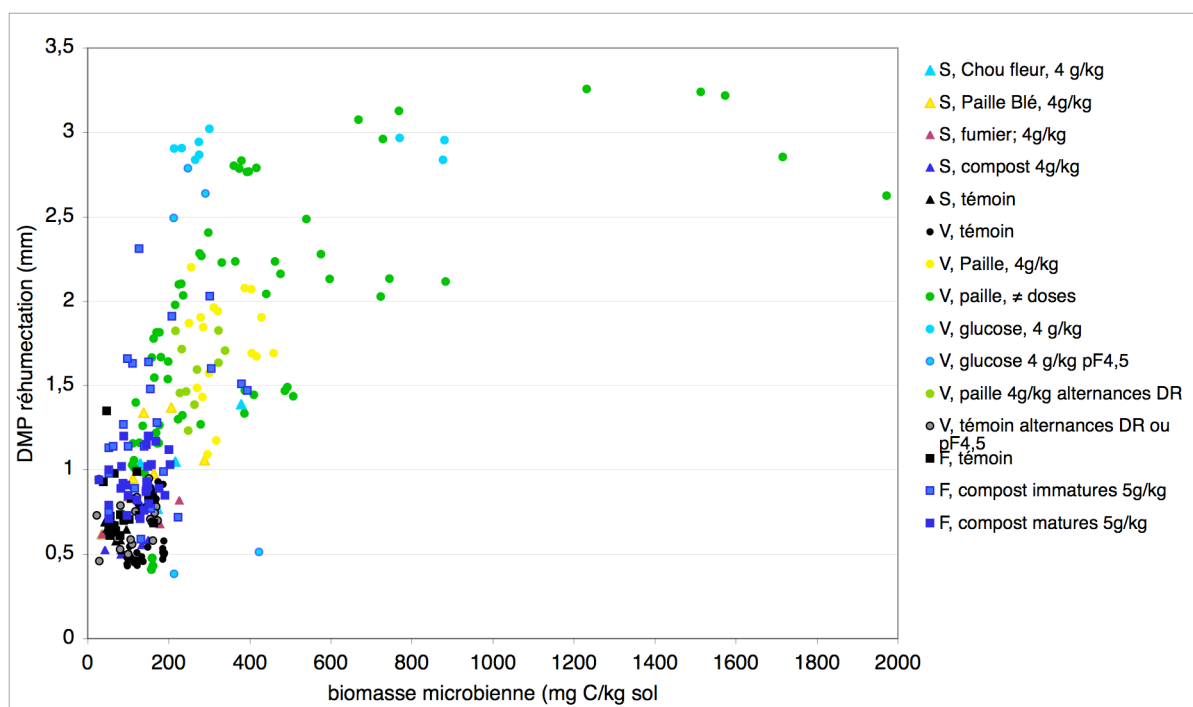


Figure 21. Relation entre la biomasse microbienne et le DMP lors du test de réhumectation, toutes incubations. S= Saint Méloir, F= Feucherolles, V= Versailles, DR= drying rewetting

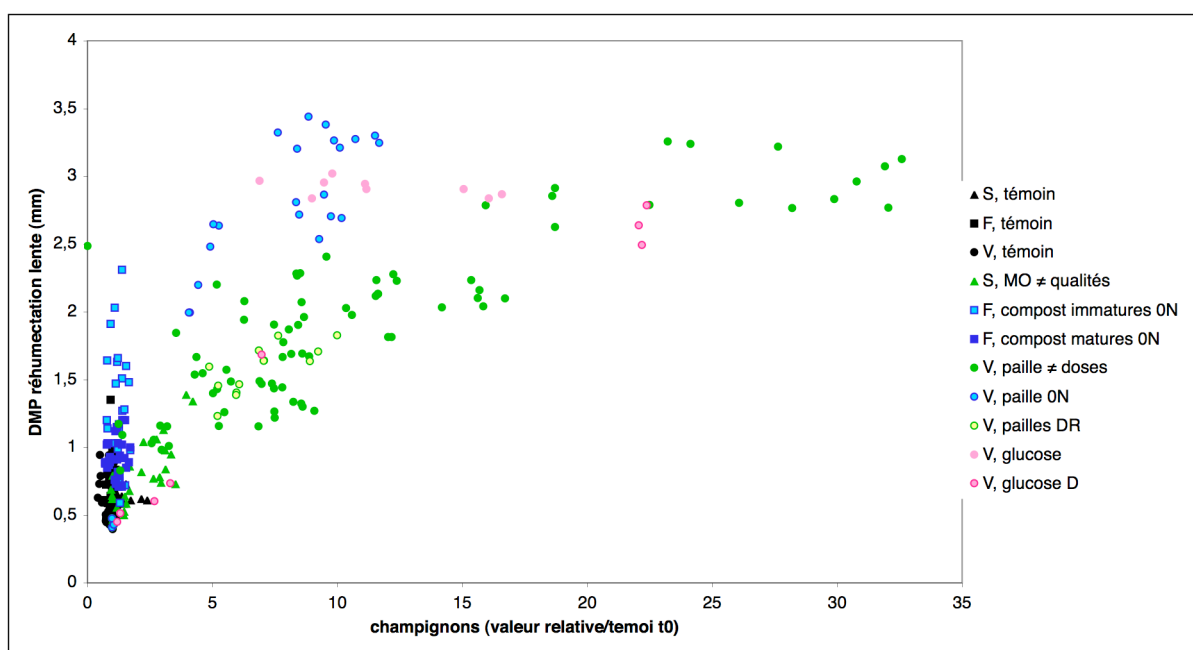


Figure 22. Relation entre l'abondance des champignons et le DMP lors du test de réhumectation, toutes incubations. S= Saint Méloir, F= Feucherolles, V= Versailles, 0N= 0 apport d'azote, DR= drying rewetting, D= dry (pF 4,45). Lorsque rien n'est spécifié les incubations sont avec apport d'azote en conditions continuellement humides (pF2)

7.5.4. Effet de la disponibilité en azote sur l'évolution de la stabilité structurale

La figure XXX montre que les points qui s'écartent le plus d'une relation linéaire générale entre abondance des champignons et DMP au test de réhumectation sont les matières organiques fraîches, paille de maïs ou compost immatures, incubées sans apport d'azote. L'incubation de fortes doses de paille sans azote apporté a montré des évolutions très particulières. En effet la stabilité de la structure augmente fortement au cours de l'incubation (Figure 23) alors que l'abondance relative des champignons et des sucres est moindre qu'en présence d'azote. Les résultats obtenus par Cosentino (2006) suggèrent que la distribution spatiale des champignons permettrait une meilleure stabilisation des agrégats sans azote.

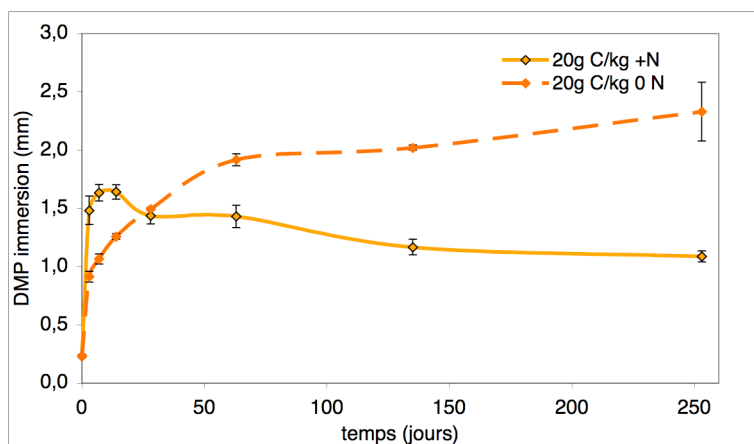


Figure 23. Evolution de la stabilité structurale en incubation de paille de maïs avec (C/N ajusté à 10) et sans azote apporté

7.6 Modélisation de l'évolution de la stabilité structurale suite à un apport organique

Deux démarches de modélisation ont été développées ou utilisées dans le projet pour prévoir l'évolution temporelle de la stabilité structurale : (i) le développement d'une fonction statistique corrélant caractéristiques biochimiques des résidus incorporés et facteurs de forme de la cinétique de stabilité structurale (Modèle Pouloud, Abiven, 2004) et (ii) le couplage entre un modèle prédictif de la décomposition des matières organiques CANTIS et une fonction statistique reliant biomasse microbienne, minéralisation du C et stabilité de la structure (Cosentino, 2006).

7.6.1. Le modèle Pouloud

Un modèle « Pouloud » a été proposé (Abiven et al. 2008). L'hypothèse est que l'évolution de la stabilité structurale dans un sol limoneux à faible teneur en MO initiale, en climat tempéré, est étroitement lié à la décomposition des produits organiques. Son développement nécessite l'acquisition de cinétiques d'évolution de la stabilité structurale suite à l'apport de différents produits organiques. Une loi log-normale permet de décrire l'évolution de la stabilité structurale réhumectation lente au laboratoire. Les paramètres de cette loi sont corrélés aux caractéristiques biochimiques des produits. Des fonctions de T° , H° et azote, associées à un modèle de Burns, permettent de transposer le modèle aux conditions de plein champ. Les premiers résultats de la simulation, comparés aux observations réalisées au champ, nous encouragent à poursuivre le développement de ce modèle, qui est, aujourd'hui, encore à l'état conceptuel.

La suite du travail passera par l'étude de produits ayant des profils biochimiques différents et l'étude des interaction avec les pratiques culturales passées (générant un profil particulier de MO du sol) et actuelles (modalités des apports, gestion des résidus, rotation). Ces travaux permettront par ailleurs de mettre en parallèle l'effet des produits sur la stabilité structurale et

sur les flux d'azote minéral de l'azote afin de poser les bases d'un cahier des charges d'utilisation des produits organiques.

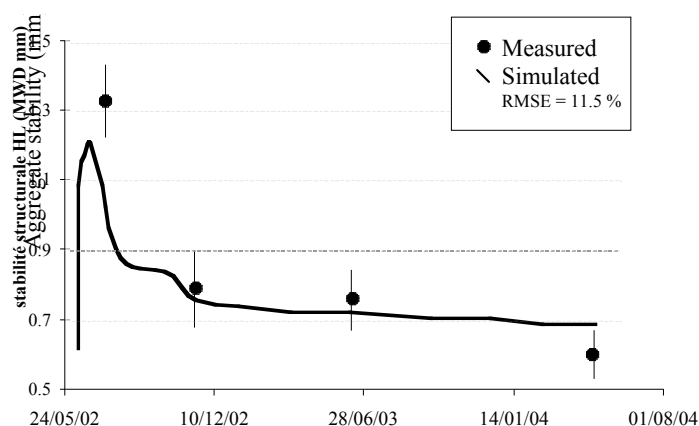


Figure 23. Comparaison des résultats de la simulation avec les observations réalisées suite à l'enfouissement de résidus de chou fleur.

7.6.2. Le modèle Cantis Stab

Le modèle CANTIS-stab est basé sur le couplage entre un modèle mécaniste de prédiction de la décomposition de matières organiques, CANTIS et une fonction statistique, à base mécaniste, établie sur une série d'expérimentations en incubation (Cosentino, 2006). La construction du modèle couplé Cantis-Stab est présentée dans la figure 24. Les variables d'entrée de ce modèle sont donc la quantité et l'analyse biochimique des MO apportées au sol, les conditions environnementales (température, teneur en eau, disponibilité de l'azote), et la stabilité structurale du sol auquel les MO sont apportées. La variable de sortie est l'évolution de la stabilité structurale au cours du temps.

Nous avons dans un premier temps calibré le modèle Cantis sur le témoin (V), puis sur l'apport de paille à 5gC/kg sol. Nous avons ensuite testé Cantis sur les autres doses de paille apportée. La simulation du CO₂ respiré comme de la biomasse microbienne se sont avérées satisfaisantes ($E_f > 0.983$, $R^2 > 0.992$ pour le CO₂, $E_f > 0.745$, $R^2 > 0.910$ pour la biomasse microbienne).

La fonction stab a été obtenue par régression linéaire mutiple entre les variables biologiques et la stabilité de la structure. Nous avons retenu une prédiction de la stabilité structurale (DMP réhumectation lente) à partir de la biomasse microbienne et du CO₂ dégagé.

$$\text{DMP}_t = \text{DMP}_{t_0} + (0.2783 + (0.00197 \Delta\text{C-biomasse}\mu_t) + (0.000149 \text{ cumCO}_2_t))$$

ou:

- DMP_t est le diameter moyen pondéré des agrégats à l'issue du test de réhumectation lente pour un temps t après un apport de MO au sol
- DMP_{t_0} est le diameter moyen pondéré des agrégats à l'issue du test de réhumectation lente du sol de départ
- $\Delta\text{C-biomasse}\mu$ est la variation de biomasse microbienne et cumCO_2 la respiration dûs à l'apport de MO.

Cette équation décrit correctement les relations entre ces variables expérimentales pour les différentes doses de MO apportées ($R^2 = 0.90$).

Le modèle CANTIS-stab, premier modèle prédictif d'une propriété physique basé sur un modèle mécaniste de décomposition de la MO, a été développé et testé sur un type de MO apportée, une paille de maïs. La simulation des données expérimentales en utilisant Cantis STAB est apparue satisfaisante (Figure 24).

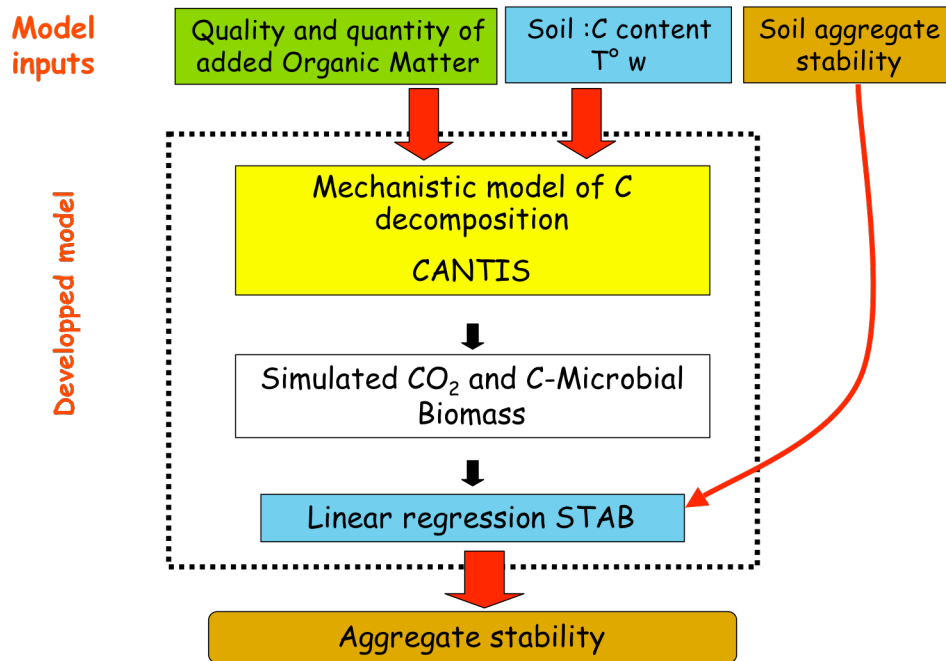


Figure 23. Construction du modèle prédictif proposé CANTIS-STAB

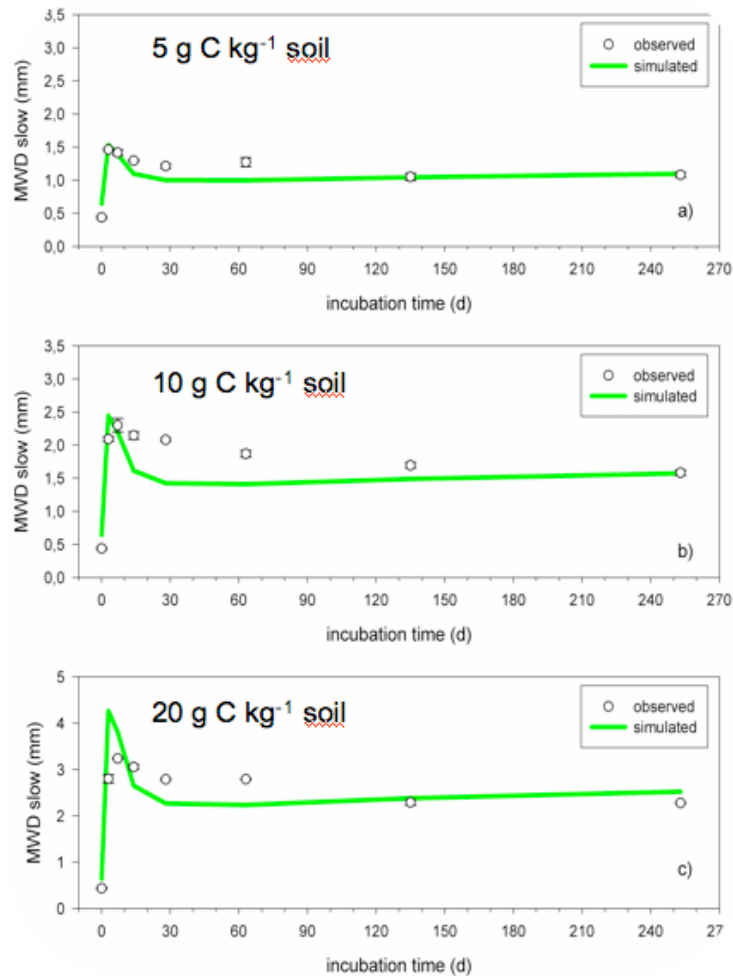


Figure 24 Modélisation de l'effet de l'apport de pailles de maïs sur la stabilité structurale par Cantis Stab. ($E_f > 0,70$)

7.6.3. Conclusion et perspectives

Le modèle Cantis-Stab est à son premier stade de développement. Les étapes suivantes apparaissent être :

- (i) d'intégrer dans le modèle une description de l'effet direct des matières organiques dès leur apport (effet abiotique, important par exemple pour des composts humifiés) ;
- (ii) d'analyser la robustesse de la fonction physique établie « STAB »,
 - a. pour d'autres types de sol de grande culture dans le domaine tempéré (granulométrie, teneur en MO, stabilité structurale initiale) ;
 - b. pour des variations de la composition de la microflore du sol (actuellement, c'est une variable globale, la biomasse microbienne, qui sert de descripteur des microorganismes) ;
 - c. pour d'autres conditions d'incubation. Ainsi les incubations de paille de maïs disponibles, sans azote ou incluant des alternances d'humecation- dessiccation pourront être utilisées à cet effet ;
- (iii) d'améliorer en conséquence la fonction « STAB », soit de manière statistique en s'appuyant sur des jeux de données antérieures accessibles, soit en lui développant une

- base mécaniste, puis de la calibrer pour une population élargie de sols et de matières organiques apportées (résidus de culture, composts, déchets de l'élevage..);
- (iv) de tester le modèle développé sur une large gamme de situations, qu'il s'agisse expérimentations au laboratoire ou au champ.
 - (v) d'aborder l'intégration de ce modèle dans un modèle plus général d'évolution de la structure des sols, prenant en compte les effets directs du climat sur l'agrégation des sols.

Par ailleurs les modèles Pouloud et Cantis stab devront être comparés utilisant les différents jeux de données obtenus au laboratoire (partie 7) ou dans des essais au champ (partie 2, comme par exemple l'essai de Lusignan).

8. Bibliographie citée

- Amblès, A., 2001. Methods to reveal the structure of humic substances. In: M. Hofrichter and A. Steinbüchel (Editors), *Biopolymers*, vol. I : Lignin, Humic Substances and Coal. Wiley-VCH, Weinheim, pp. 325-348.
- Amezket, E., Singer, M.J. and Le Bissonnais, Y., 1996. Testing a new procedure for measuring water-stable aggregation. *Soil Science Society of America Journal*, 60: 888-894.
- Angers, D.A., Edwards, L.M., Sanderson, J.B. and Bissonnette, N., 1999. Soil organic matter quality and aggregate stability under eight potato cropping sequences in a fine sandy loam of Prince Edward Island. *Canadian Journal of Soil Science*, 79(3): 411-417.
- Angers, D.A., Samson, N. and Légère, A., 1993. Early changes in water-stable aggregation induced by rotation and tillage in a soil under barley production. *Canadian Journal of Soil Science*, 73: 51-59.
- Baldock, J.A., 2001. Interactions of organic materials and microorganisms with minerals in the stabilization of soil structure. In: P.M. Huang, J.M. Bollag and N. Senesi (Editors), *Interactions between soil particles and microorganisms: impact on the terrestrial ecosystem*. UPAC Serie of Applied Geochemistry. Wiley and Sons, New York, pp. 85-131.
- Baldock, J.A., Kay, B.D. and Schnitzer, M., 1987. Influence of cropping treatments on the monosaccharide content of the hydrolysates of a soil and its aggregate fractions. *Canadian Journal of Soil Science*, 67: 489-499.
- Balesdent, J., 1996. Un point sur l'évolution des réserves organiques des sols en France. *Etude et Gestion des Sols*, 3: 245-260.
- Balesdent, J., Pétraud, J.P. and Feller, C., 1991. Effet des ultrasons sur la distribution granulométrique des matières organiques des sols. *Science du Sol*, 29: 95-106.
- Bethlenfalvay, G.J., Cantrell, I.C., Mihara, K.L. and Schreiner, R.P., 1999. Relationships between soil aggregation and mycorrhizae as influenced by soil biota and nitrogen nutrition. *Biology and Fertility of Soils*, 28(4): 356-363.
- Bissonnais, Y.I., Cros-Cayot, S. and Gascuel-Oudoux, C., 2002. Topographic dependence of aggregate stability, overland flow and sediment transport. *Agronomie*, 22(5).
- Blackman, J. D., 1992. Seasonal variation in the aggregate stability of downland soils. *Soil Use and Management*, 8: 142-150.
- Bossuyt, H. et al., 2001. Influence of microbial populations and residue quality on aggregate stability. *Applied Soil Ecology*, 16(3): 195-208.
- Calderoni, G. and Schnitzer, M., 1984. Effects of age on the chemical structure of paleosol humic acids and fulvic acids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48: 2045-2051.
- Capriel, P., Beck, T., Borchert, H. and Härter, P., 1990. Relationships between soil aliphatic fraction extracted with supercritical hexane, soil microbial biomass, and soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal*, 54: 415-420.
- Caron, J. and Kay, B.D., 1992. Rate of response of structural stability to a change in water content : influence of cropping history. *Soil & Tillage Research*, 25: 167-185.
- Caron, J., Kay, B.D. and Stone, J.A., 1992. Improvement of aggregate stability of a clay loam with drying. *Soil Science Society of America Journal*, 56: 1583-1590.
- Carter, M.R., 1992. Influence of reduced tillage systems on organic matter, microbial biomass, macroaggregate distribution and structural stability of the soil in a humid climate. *Soil and Tillage Research*, 23: 361-372.
- Chaney, K. and Swift, R.S., 1984. The influence of organic matter on aggregate stability in some British soils. *Journal of Soil Science*, 35: 223-230.
- Chantigny, M.H., Angers, D.A. and Beauchamp, C.J., 1999. Aggregation and organic matter decomposition in soils amended with de-inking paper sludge. *Soil Science Society of America Journal*, 63(5).
- Chenu, C. and Damoy, V., 2001. Rôle des matières organiques sur les propriétés physiques des sols. Etude bibliographique. Rapport final de contrat CREED., INRA.
- Chenu, C. and Guérif, J., 1991. Mechanical strength of clay minerals as influenced by an adsorbed polysaccharide. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55: 1076-1080.
- Chenu, C., Le Bissonnais, Y. and Arrouays, D., 2000. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal*, 64: 1479-1486.
- Chenu, C. and Stotzky, G., 2001. Interactions between microorganisms and soil particles : An overview. In: P.M. Huang, J.M. Bollag and N. Senesi (Editors), *Interactions between soil particles and microorganisms*. IUPAC Serie of Applied Geochemistry. Wiley and Sons, New York, pp. 3-40.
- Chevallier, M., 2003. Variation temporelle de la stabilité structurale d'un horizon limoneux : interactions entre activité biologique et alternance dessiccation-humectation, DEA National de Science du Sol. Univ Nancy-INPL-INAPG-ENSAR-ENSAM., 21 p. pp.
- Concarnet, J., 1967. Etude des mécanismes de la destruction des agrégats de terre au contact de solutions aqueuses. *Ann. Agron.*, 18: 65-90.
- Curtin, D., Campbell, C.A., Zenner, R.P. and Lafond, G.P., 1994. Long term management and clay dispersibility in two Haploborols in Saskatchewan. *Soil Science Society of America Journal*, 58: 962-967.
- De Noni, G., Blavet, D., Laurent, J.Y., Le Bissonnais, Y. and Asseline, J., 2002. Proposal of soil indicators for spatial analysis of carbon stocks evolution, 17th World Congress of Soil Science: Confronting new realities in the 21st Century, Bangkok, Thailand, pp. 11 p.

- Diaz, E., Roldan, A., Lax, A. and Albalajedo, J., 1994. Formation of stable aggregates in degraded soil by amendement with urban refuse and peat. *Geoderma*, 63: 277-288.
- Drury, C.F., Stone, J.A. and Filay, W.I., 1991. Microbial biomass and soil structure associated with corn, grasses and legumes. *Soil Science Society of America Journal*, 55: 805-811.
- Dubois, M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Rebers, P.A. and Smith, F., 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, 28: 350-356.
- Frey, S.D., Elliott, E.T. and Paustian, K., 1999. Bacterial and fungal abundance and biomass in conventional and no-tillage agroecosystems along two climatic gradients. *Soil Biology & Biochemistry*, 31(4): 573-585.
- Giusquiani, P.L., Pagliai, M., Gigliotti, G., Businelli, D. and Benetti, A., 1995. Urban waste compost: effects on physical, chemical, and biochemical soil properties. *Journal of Environmental Quality*, 24(1): 175-182.
- Gong, P., Guan, X. and Witter, E., 2001. A rapid method to extract ergosterol from soil by physical disruption. *Applied Soil Ecology*, 17: 285-289.
- Grasset, L. and Amblès, A., 1998a. Structural study of soil humic acids and humin using a new preparative thermochemolysis technique. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 47: 1-12.
- Grasset, L. and Amblès, A., 1998b. Structure of humin and humic acids from an acid soil as revealed by PTC-hydrolysis. *Organic Geochemistry*, 29: 881-891.
- Guidi, G., Pera, A., Giovannetti, M., Poggio, G. and Bertoldi, M., 1988. Variations of soil structure and microbial population in a compost amended soil. *Plant & Soil*, 106: 113-119.
- Guignard, C., Lemée, L. and Amblès, A., 2000. Structural characterization of humic substances from an acidic peat using thermochemolysis techniques. *Agronomie*, 20: 465-475.
- Haynes, R.J., 1999. Labile organic matter fractions and aggregate stability under short-term, grass-based leys. *Soil Biology & Biochemistry*, 31(13): 1821-1830.
- Haynes, R.J., 2000. Interactions between soil organic matter status, cropping history, method of quantification and sample pretreatment and their effects on measured aggregate stability. *Biology & Fertility of Soils*, 30(4): 270-275.
- Haynes, R.J. and Swift, R.S., 1990. Stability of soil aggregates in relation to organic constituents and soil water content. *Journal of soil science*, 41: 73-83.
- Helalia, A.W. and Letey, J., 1989. Polymer type and water quality effects on soils dispersion. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52: 243-246.
- Hénin, S., Monnier, G. and Combeau, A., 1958. Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Annales Agronomiques*, 9: 73-92.
- Hita, C., Parlanti, E., Jambu, P., Joffre, J. and Amblès, A., 1996. Triglyceride degradation in soil. *Organic Geochemistry*, 25: 19-28.
- Houot, S., Cadot, L. and Gnanalingam, V., 1997. Variations with pedoclimatic conditions of an anaerobically digested liquid sewage sludge C mineralisation and its N-NO₃- availability. In: D. Rosen, E. Tel-Or, Y. Hadar and Y. Chen (Editors), *Modern Agriculture and the Environment*. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, pp. 399-409.
- Jastrow, J.D., 1996. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter. *Soil Biology & Biochemistry*, 28: 665-676.
- Kay, B.D., 1990. Rates of change in soil structure under different cropping systems. *Advances in Soil Science*, 12: 1.
- Kay, B.D., 1997. Soil structure and organic carbon : A review. In: R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follet and B. Stewart (Editors), *Soil processes and the carbon cycle*. CRC Press, Boca Raton, pp. 169-198.
- Kay, B.D. and Dexter, A.R., 1990. Influence of aggregate diameter, surface area and antecedent water content on the dispersibility of clay. *Canadian Journal of Soil Science*, 70: 655-670.
- Kemper, W.D. and Koch, E.J., 1966. Aggregate stabilities of soils from Western United States and Canada.
- Kemper, W.D. and Rosenau, R.C., 1984. Soil cohesion as affected by time and water content. *Soil Science Society of America Journal*, 48: 1001-1006.
- Kemper, W.D. and Rosenau, R.C., 1986. Aggregate stability and size distribution, *Methods of soil analysis. Part I, Physical and mineralogical methods*. Agronomy monograph n°9. American Society of Agronomy, Madison.
- Kiem, R. and Kandeler, E., 1997. Stabilization of aggregates by the microbial biomass as affected by soil texture and type. *Applied Soil Ecology*, 5.
- King, D. and Le Bissonnais, Y., 1992. Role des sols et des pratiques culturales dans l'infiltration et l'écoulement des eaux. Exemple du ruissellement et de l'érosion sur les plateaux limoneux du nord de l'Europe. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, 78: 91-105.
- Le Bissonnais, Y., 1988. Analyse des mécanismes de la désagrégation et de la mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies. Ph D Thesis, Orléans.
- Le Bissonnais, Y., 1996. Aggregate stability and measurement of soil crustability and erodibility : I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 47: 425-437.
- Le Bissonnais, Y. and Arrouays, D., 1997. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility .II. Application to humic loamy soils with various organic carbon contents. *European Journal of Soil Science*, 48: 39-48.
- Le Bissonnais, Y., Cros-Cayot, S. and Gascuel-Oudou, C., 2002. Topographic variation of aggregate stability at field scale: effect on runoff and erosion. *Agronomie*, 22: 489-501.
- Le Bissonnais, Y., Duval, O. and Chenu, C., 2003. Comment mesurer la stabilité de la structure des agrégats du sol pour évaluer la sensibilité à la battance et à l'érosion. In: G. Thevenet and L. Faedy (Editors), *Fertilités du sol et systèmes de culture*, eds. Actes des xx journées du Comifer Gemas, Blois 18-19 Nov 2003. GEMAS COMIFER.
- Leguédois, S. and Le Bissonnais, Y., 2004. Size fractions resulting from an aggregate stability test, interrill detachment and transport. *Earth Surface Processes and Landforms*, in press.

- Marstorp, H., Guan, X. and Gong, P., 2000. Relationship between dsDNA, chloroform labile C and ergosterol in soils of different organic matter contents and pH. *Soil Biology & Biochemistry*, 32: 879-882.
- Martin-Laurent, F. et al., 2003. Monitoring of atrazine treatment on soil bacterial, fungal and atrazine-degrading communities by quantitative competitive PCR. *Pest. Manag. Sci.*, 59: 259-268.
- Metzger, L., Levanon, D. and Mingelgrin, U., 1987. The effect of sewage sludge on soil structural stability : microbiological aspects. *Soil Science Society of America Journal*, 51: 346-351.
- Miller, R.M. and Jastrow, J.D., 1990. Hierarchy of root and microrhizal fungal interactions with soil aggregation. *Soil Biology and Biochemistry*, 22: 579-54.
- Monnier, G., 1965. Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. *Annales Agronomiques*, 16: 327-400.
- Perfect, E., Kay, B.D., Loon, W.K.P.v., Sheard, R.W. and Pojasok, T., 1990. Factors influencing soil structural stability within a growing season. *Soil Science Society of America Journal*, 54: 173-179.
- Puget, P., Angers, D.A. and Chenu, C., 1999. Nature of carbohydrates associated with water-stable aggregates of two cultivated soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 31: 55-63.
- Rasiah, V. and Kay, B.D., 1995. Characterizing rate of wetting : impact on structural destabilization. *Soil Science*, 160: 176182.
- Rasiah, V., Kay, B.D. and Martin, T., 1992. Variation of structural stability with water content : influence of selected soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 56: 1604-1609.
- Rémy, J.C. and Marin Laflèche, A., 1976. L'entretien organique des terres. *Entreprises agricoles*: 63-67.
- Robert, M. and Chenu, C., 1992. Interactions between microorganisms and soil minerals. In: G. Stotzky and J.M. Bollag (Editors), *Soil Biochemistry*. Marcel Dekker, New York, pp. 307-404.
- Roldan, A., Albaladejo, J. and Thornes, J.B., 1996. Aggregate stability changes in a semiarid soil after treatment with different organic amendments. *Arid Soil Research & Rehabilitation*, 10(2): 139-148.
- Sullivan, L.A., 1990. Soil organic matter, air encapsulation and water stable aggregation. *Journal of Soil Science*, 41: 529-534.
- Tessier, D., Bruand, A., Le Bissonnais, Y. and Dambrine, E., 1998. Chemical and physical properties of soils in France. Spatial context and evolution. *Geologica Carpathica*, 6: 121-131.
- Tisdall, J.M. and Oades, J.M., 1980. The effect of crop rotation on aggregation in a red brown earth. *Australian Journal of Soil Research*, 18: 423-433.
- Van Soest, P.J., 1963. Use of detergents in the analysis of fibrous feeds I: preparation of fiber residues of low nitrogen content. *J. Assoc. Off. Anal. Chem*, 46: 825-835.
- Vance, E.D., Brookes, P.C. and Jenkinson, D.S., 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 19: 703-707.
- Viaud, M., Pasquier, A. and Brygoo, Y., 2000. Diversity of soil fungi studied by PCR-RFLP of ITS. *Mycological Research*, 104: 1027-1032.
- Walter, C., Schwartz, C., Claudot, B., Bouedo, T. and Aurousseau, P., 1997. Synthèse nationale des analyses de terre réalisées entre 1990 et 1994. II. Descriptions statistique et cartographique de la variabilité des horizons de surface des sols cultivés. *Etude et Gestion des Sols*, 4: 205-219.
- Wylleman, R., Mary, B., Machet, J.M., J., G. and Degrendel, M., 2001. Evolution des stocks de matière organique dans les sols de grande culture : analyse et modélisation. *La dégradation du taux de matière organique est-elle une crainte justifiée ? Perspectives agricoles*, 206: 16-19.

9. Liste de publications du projet

Publications liées au projet mais relevant de travaux expérimentaux antérieurs

- Abiven, S., 2004. Relations entre caractéristiques des matières organiques apportées, dynamique de leur décomposition et évolution de la stabilité structurale du sol., ENSAR, Rennes, 262 pp.
- Annabi, M., 2005. Stabilisation de la structure d'un sol limoneux par des apports de composts d'origine urbaine: relation avec les caractéristiques de leur matière organique. PhD Thesis, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris. 270 p.
- Abiven, S., Menasseri, S., Angers, D.A. and Leterme, P., 2007. Dynamics of aggregate stability and biological binding agents during decomposition of organic materials. European Journal of Soil Science, 58
- Annabi, M., Houot, S., Francou, C., Poitrenaud, M. and Bissonnais, Y.L., 2007. Soil Aggregate Stability Improvement with Urban Composts of Different Maturities. Soil Sci Soc Am J 71(2): 413-423.

Thèses

- Cosentino, D., 2006. Contribution des matières organiques à la stabilité de la structure des sols limoneux cultivés. Effet des apports organiques à court terme. PhD Thesis, Institut National Agronomique, Paris, 214 pp.
- Célérier, J. 2008. Caractérisation moléculaire et dynamique de la matière organique de compost (déchets verts/ biodéchets) dans un sol. Thèse de l'Université de Poitiers, 327 p.

Rapports d'étudiants (2e et 3e cycle)

- Carrière Matthias, 2005. Etude de facteurs influençant la stabilité structurale d'une série de sols du Loiret. Mémoire de fin d'étude ENSA Rennes. 51 p. + annexes. (B. Verbèke)
- Coucheney, E., 2005. Etude des variations à court terme de la stabilité structurale d'un sol limoneux sous l'effet de facteurs climatiques. mémoire de master Fonctionnement physique chimique et biologique de la Biosphère continentale. Université de Paris 6 - INAPG, Paris, 35 pp.
- Fujisaki Kenji, 2008. Caractérisation physique de la structure des sols. Mémoire de licence 3, Université F. Rabelais, Tours. 30 p.
- Lebugle Fabien, 2006. Analyse statistique des variables pédologiques contrôlant la stabilité structurale des sols. Développement d'une méthodologie. Master professionnel M2 Mathématiques et aide à la décision, Univ. Orléans. 45 p. + annexes. (O. Duval, F. Darboux, S. Jacquot)
- Peltre, C., 2006. Caractérisation chimique de la matière organique humifiée de composts d'origine urbaine en relation avec leur rôle dans la stabilisation de la structure des sols limoneux. Mémoire de fin d'études Thesis, INH, Angers.

Articles dans des revues de rang A

- Abiven S., Menasseri S, Chenu C. 2009 The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability – A literature analysis. Soil Biology and Biochemistry, 2009, doi:10.1016/j.soilbio.2008.09.015
- Cosentino, D., Le Bissonnais, Y. and Chenu, C., 2006. Aggregate stability and microbial community dynamics under drying-wetting cycles in a silt loam soil. Soil Biology & Biochemistry.
- Cosentino D., Chenu C., Garnier P.. Short-term aggregate stability dynamics after a carbon input: quantitative relationships and modelling. En révision pour European Journal of Soil Science
- Cosentino D., Chenu C., Garnier P.. Short-term aggregate stability dynamics after a carbon input: quantitative relationships and modelling. En révision pour European Journal of Soil Science
- Cosentino D., Hallett, P.D, Michel J.C. and Chenu C.. Measuring small amounts of water repellency in soil: an appraisal of current methods. En préparation pour Soil Science Society of America Journal

Chapitres d'ouvrage

- C. Chenu and D. Cosentino, 2009. Microbial regulation of soil structural dynamics. Architecture and biology of soils : life in inner space. Ritz and Young eds. CABI, accepté,

Communications à des colloques ou congrès

- Chenu C., Cosentino D., Le Bissonnais Y., Houot S., and Balabane M. 2007 Labile organic matter fractions and aggregate stability under alternative cropping systems in unstable silty temperate soils. Séminaire international « Les sols tropicaux en semis direct sous couvertures végétales » Madagascar, 3-7 décembre 2007. Poster.
- Cosentino D., C. Chenu 2008. Efecto de la disponibilidad del nitrogeno sobre la dinamica de estabilidad de los agregados y las variables microbiologicas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, 13-16 mai, San Luis, Argentine, 6 pages. Poster.
- Cosentino D., Garnier P., C.Chenu (2007). Modelling changes in soil aggregate stability after organic matter addition to soils. International symposium "Organic matter dynamics in agro-ecosystems. Poitiers, France 16–19 july 2007, communication orale
- Cosentino, D., Chenu, C., Michel, J.C. et Tessier, D. 2006. Evolution de l'hydrophobie d'un sol et stabilisation de la structure suite à des apports de résidus de culture. Les matières organiques en France. Etat de l'art et prospectives. Organisée par le Groupe français de l'International Humic Substance Society (IHSS). 22-24 janvier, 2006, Carqueiranne, France. Poster.
- Cosentino, D., Chenu, C., Garnier, P. 2006. Dinamica de la estabilidad estructural luego del aporte de residuos de cultura. Hacia un modelo predictivo. XXX Congreso Argentino de la ciencia del Suelo y Reunion de los suelos de la Région Andina. 19-22 de septiembre 2006, Salta y Jujuy Argentina, poster.
- Cosentino, D., Chenu, C., Garnier, P. 2006. Predicting aggregate stability changes over time after organic matter inputs to soil : measuring and modelling rate addition effects. Annual meetings of the American Society of Soil Science (ASA, CSSA SSSA), 12-16 novembre 2006, Indianapolis, USA, communication orale.
- Cosentino, D., Chenu, C., Hallet, P. Michel, J.C. et Tessier, D. 2006. Predicting short-term aggregate stability after the addition of maize straw : the role of hydrophobicity. XVIII World Congress of Soil Science 9-15 juillet 2006, Philadelphia, USA, communication orale.
- Darboux F., Le Bissonnais Y., Duval O., 2008. Improved erodibility assessment using structural stability. Recent developments and future directions. 6th Intern. Symposium Agro Environ, 28/04-01/05/2008, Antalya, Turkey. (oral + résumé étendu)
- Duval O., Darboux F., Lebugle F., Jacquot S., Le Bissonnais Y., 2007. Prédiction de la stabilité structurale des sols cultivés. Analyse statistique de la base de données Agresta. Actes des 9e Journées Nationales de l'Etude des Sols, J.P. Rossignol (ed), 3-5/04/2007, Angers. AFES-INH. 331-332. (poster)

Rapport technique

- Darboux F., Duval O., Gaillard H., 2007. Stabilité structurale du sol : opération d'intercalibration prenant en compte le type de prélèvements sur le terrain. INRA, Unité de Science du sol d'Orléans. 9 p.

D:\odile\STRUCTURE\procedures\procedure-prelevt-stabilitepourAQ(v3).doc

I - Procédure de prélèvements au champ

Conditions et recommandations (cas général de sols cultivés)

Prélever environ 1 kg de terre dans la couche de sol à analyser, si possible dans des conditions d'humidité modérées, par exemple, les conditions permettant la préparation des lits de semence ou des conditions permettant d'avoir un rendement maximal d'agrégats à partir du prélèvement. (rendement = rapport entre masse d'agrégats 3 mm - 5 mm et prise initiale de terre).

Date de prélèvement : automne, fin d'hiver ou début de printemps

Cette date est fonction :

- de la date de préparation du lit de semence,
- de la teneur en eau du sol, conditions d'humidité modérées (inférieures à la capacité au champ)
- de la date de l'apport organique ou minéral (attendre au minimum 8 jours après un apport)

Remarque : préconiser une date n'a pas d'objet si il s'agit d'un suivi saisonnier.

Procédure de prélèvement

Outils préconisés : transplantoir et bêche
(ne pas prendre les parties de terre lissées par l'outil)

Profondeur

Profondeur de prélèvement : à partir de la surface ou à la profondeur choisie dans le cas d'études particulières.

Remarque : dans le cas de la présence d'une croûte, d'un mat racinaire dense ou d'une litière à la surface du sol, prélever en-dessous.

Manière de prélever

Prélever l'ensemble de la terre (mottes, agrégats, terre fine), sans opérer de sélection particulière.

Épaisseur

Épaisseur moyenne du prélèvement = 10 cm

Remarque : en fonction du type de travail du sol, et du but de l'étude, l'épaisseur peut être modifiée. Par exemple, pour une étude portant sur le travail superficiel, on prélèvera sur l'épaisseur correspondant au travail superficiel, même si ce travail concerne moins de 10 cm

Localisation

Localisation du prélèvement : prélever en plusieurs endroits (au minimum 5 prises) sur une surface homogène de l'ordre de 10 m² pour avoir un échantillon composite. La surface ne doit pas avoir subi de contraintes de type piétinement, ou stockage de débris organiques... S'éloigner des bordures de parcelle.



Conditions de transport et de stockage

Récipient de transport et de stockage : boîte en plastique rigide hermétique (par exemple de 1 à 2 litres de contenance).

Si possible, transporter les boîtes dans une glacière jusqu'au laboratoire, afin d'éviter l'exposition à la chaleur.

Stocker les boîtes dans une chambre froide à 4 °C afin de minimiser l'activité biologique et éviter les variations de température.

Traiter les échantillons le plus tôt possible.

II - Procédure de préparation des échantillons

Au retour du terrain, stocker les boîtes dans une chambre froide à 4 °C afin de minimiser l'activité biologique et éviter les variations de température.

La mesure porte sur des agrégats de 3 à 5 mm (ou 3,15 à 5 mm selon le type de tamis disponible).

Préparer rapidement les agrégats : les échantillons sont mis à sécher à l'air, dans une atmosphère tempérée (environ 20 °C) et ventilée, étalés dans des récipients plats posés par exemple sur des rayonnages.

« Durant cette période de séchage, qui en général prend quelques jours, les plus grosses mottes peuvent être périodiquement émietées entre les doigts (1 fois par jour) ou brisées à la main pour produire, dans les conditions d'humidité optimales, le maximum d'agrégats de taille millimétrique. Cette opération de fractionnement n'est faisable que si elle ne modifie pas la porosité structurale des agrégats. »* On cherche alors à intervenir à l'humidité correspondant à une rupture facile.

Les échantillons sont ensuite passés au tamis et les agrégats de calibre 3 – 5 mm sont récupérés.

Lors du tamisage, il est conseillé de ne pas trop « forcer » les agrégats à passer à travers le tamis de 3 mm. En tout cas, ne pas opérer d'abrasion.

Si les tests ne sont pas effectués tout de suite, faire sécher à 40 °C les agrégats calibrés puis les replacer dans leur boîte en chambre froide.

Matériel nécessaire

Récipients plats permettant le séchage à plat des échantillons émiettés

Tamis de diamètre 20 cm à mailles carrées de 3 mm (ou 3,15 mm) et 5 mm

Etuve

* Extrait de la norme AFNOR NF X31-515 juin 2005

III - Fiche de renseignements : prélèvements au champ

identification de l'échantillon

Prélèvement

 Par l'expéditeur :
Dans la base :

Date du prélèvement (jj/mm/aaaa)
 Nom du préleveur¹ et Organisme
 Profondeur de prélèvement (mini-maxi en cm) (ex. 0-10).....
 Antécédents climatiques (les 48 heures précédents) :
 pluie ☐ orage ☐ neige ☐ gel ☐ sec ☐ variable ☐
 Etat hydrique de la surface : sec ☐ frais ☐ humide ☐ saturé ☐
 Etat structural de la surface : non dégradé ☐ (agrégats ☐ mottes ☐
 croûte structurale ☐ croûte sédimentaire ☐ graviers (2-20 mm) en surface%
 Stade de la végétation : sol nu ☐ lit de semence ☐ autre ☐
 Type de sol* (nom selon le Référentiel Pédologique)
 Commentaires sur le prélèvement*

Localisation géographique

Département Commune
 Coordonnées géographiques* en Lambert II étendu (en mètres) :
 longitude latitude
 Position topographique dans la parcelle : haut ☐ milieu ☐ bas ☐ plateau ☐ vallon ☐
 Région agricole* (en toutes lettres, selon INSEE)

Caractérisation agronomique de la parcelle

1. Occupation du sol : culture ☐ prairie ☐ forêt ☐ vignoble ou arboricult ☐ autre ☐
 culture en place date de la dernière prairie
 2. Rotation (sur 5 ans)
 3. Travail du sol et renseignements complémentaires :
 labour ☐ fréquence date du dernier labour
 travail superficiel ☐ fréquence date du dernier travail
 semis direct ☐ fréquence date du dernier semis
 4. Gestion des résidus et des apports :
 résidus enfouis ☐ exportés ☐
 - apports organiques ☐ forme fréquence date du dernier
 quantité t/ha
 - amendement calcaire ☐ forme fréquence date du dernier
 quantité t/ha
 5. Interculture : non ☐ oui ☐ type
 6. Mode de production : conventionnel ☐ intégré ☐ raisonné ☐ bio ☐
 Commentaires sur la parcelle*

Divers

Cadre de l'étude : thèse ☐ Master ☐ programme de recherche ☐ autre ☐
 nom du programme* (ex. RMQS)
 responsable (nom et coordonnées) :

¹ Renseignements facultatifs