

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

C. Chenu^{(1)*}, S. Abiven^(2a), M. Annabi^(4b), S. Barray⁽⁵⁾, M. Bertrand⁽⁶⁾, F. Bureau⁽⁷⁾, D. Cosentino^(1, 4c), F. Darboux⁽⁸⁾, O. Duval⁽⁸⁾, L. Fourrié⁽⁹⁾, C. Francou⁽¹⁰⁾, S. Houot⁽⁴⁾, C. Jolivet⁽¹¹⁾, K. Laval⁽¹²⁾, Y. Le Bissonnais⁽¹³⁾, L. Lemée⁽³⁾, S. Menasseri⁽²⁾, J.-P. Pétraud⁽¹⁴⁾ et B. Verbègue⁽¹⁵⁾

- (1) AgroParisTech, UMR 7618 CNRS Bioemco, Bâtiment EGER, 78850 Thiverval Grignon, France
 - (2) AgroCampus Ouest - INRA, UMR 1069 SAS, 65 Rue de Saint Brieuc, 35042 Rennes Cedex, France
 - (3) CNRS - Université de Poitiers, UMR 6514 Synthèse et Réactivité des Substances Naturelles, 4 Rue Michel Brunet, 86022 Poitiers Cedex, France
 - (4) INRA - AgroParisTech, UMR 1091 Environnement et Grandes Cultures, Bâtiment EGER, 78850 Thiverval Grignon, France
 - (5) Université de Rouen - CNRS, UMR 0211 Microbiologie du Froid, Place Emile Blondel, 76821 Mont Saint Aignan Cedex, France
 - (6) INRA - AgroParisTech, UMR Agronomie, Bâtiment EGER, 78850 Thiverval Grignon, France
 - (7) Université de Rouen, UR Ecodiv, Place Emile Blondel, 76821 Mont Saint Aignan Cedex, France
 - (8) INRA, UR 272 Science du Sol, 2163 Avenue de la Pomme de Pin, CS 40001, Ardon, 45075 Orléans Cedex 02 France
 - (9) ACTA (Association de coordination Techniques, Agricoles), 149 rue de Bercy, 75595 Paris Cedex 12, France
 - (10) CREED (Centre de Recherche pour l'Environnement, l'Energie et le Déchet), Zone portuaire de Limay, 291 avenue Dreyfous-Ducas, 78520 Limay, France
 - (11) INRA, US 1106 INFOSOL - 2163, Avenue de la Pomme de Pin, CS 40001, Ardon, 45075 Orléans Cedex 02 France
 - (12) ESITPA, UR Agri'Terr, 3 rue du Tronquet, Mont Saint Aignan, France
 - (13) INRA - IRD - SupAgro Montpellier, UMR 1221 Lisah, 2 place Viala, 34060 Montpellier Cedex 1, France
 - (14) INRA, UR 0251 Pessac, Route de Saint Cyr, 78026 Versailles Cedex, France
 - (15) Chambre d'Agriculture du Loiret, 13 avenue des droits de l'homme, 45921 Orléans, France
- * Auteur correspondant : Claire.Chenu@grignon.inra.fr

Adresses actuelles : a- Department of Geography, University of Zurich, 8050 Suisse, b- INRAT, Laboratoire d'analyse des sols, plantes et eau, rue Hedi Karray, 2049 Ariana, Tunisie, c- Departamento de Recursos Naturales y Ambiente, Facultad de Agronomía (UBA), Avenida San Martin, C1417DSE Buenos Aires, Argentine

RÉSUMÉ

La stabilité structurale est une propriété physique des sols importante, indicatrice de leur sensibilité à la battance et à l'érosion. Les sols limoneux, qui couvrent des surfaces importantes en France et dans le Nord de l'Europe ont, du fait de leur texture et de leur faible teneur en matières organiques, une stabilité structurale faible. Dans un contexte où l'on se préoccupe de la diminution de la teneur en matière organique des sols, où se développe l'apport de produits résiduels organiques au sol et où se diversifient les pratiques culturales et les systèmes de culture, il apparaît nécessaire de développer des outils de prédiction de la stabilité structurale en fonction de la quantité et de la qualité des matières organiques.

Nous avons développé une relation statistique qui relie la stabilité de la structure à la constitution des sols, en particulier à leur teneur en carbone organique (C), à partir d'une base de données AGRESTA de 480 sols assemblée pendant cette étude. Cependant sa faible capacité prédictive ne permet pas de l'utiliser comme fonction de pédotransfert. L'examen de 7 essais de longue durée ou réseaux de parcelles sur sols limoneux a montré des améliorations de la stabilité de la structure en quelques années avec des pratiques qui permettent une augmentation de la teneur en C dans l'horizon de surface (non labour, prairies temporaires, semis direct sous couvert végétal (SCV), apports répétés de composts). La teneur en C totale de l'horizon est souvent un meilleur prédicteur de la stabilité structurale que des fractions organiques (carbohydrates solubles à l'eau chaude, matières organiques particulaires) ou que la biomasse des microorganismes. Des expérimentations réalisées en laboratoire d'apport de matières organiques (résidus de culture, composts) à des sols limoneux, nous ont permis de confirmer que le rôle de ces apports était essentiellement indirect, par la stimulation des microorganismes du sol que leur décomposition entraîne. Les microorganismes agrègent les particules de sols par leur sécrétions ou mécaniquement. Nous avons proposé un modèle prédictif de la stabilité structurale suite à des apports organiques dont on connaît la qualité biochimique: CANTIS-STAB, qui couple un modèle de décomposition des matières organiques à une fonction statistique.

Comme la gestion des matières organiques constitue un volant d'action majeur pour agir sur la sensibilité de sols limoneux à la battance et à l'érosion, les outils proposés doivent être développés, afin de servir de base à des préconisations agronomiques ou à l'apport raisonné de produits résiduels organiques au sol.

Mots clés

Sol, matière organique, structure du sol, stabilité structurale, battance, modélisation, fonction de pédotransfert, microorganismes du sol, matières organiques exogènes.

SUMMARY

DEVELOPPING TOOLS TO PREDICT SOIL AGGREGATE STABILITY AS INFLUENCED BY SOIL ORGANIC MATTER MANAGEMENT

Aggregate stability is a major soil physical property, which is a good indicator of the sensitivity of soils to crusting and erosion. Silty soils, which cover large surface areas in France and Northern Europe, have a low aggregate stability, because of their texture and of their frequent low organic matter contents. In the present context of (i) soil organic matter content depletion, (ii) development of organic wastes application to soils and (iii) diversification of cropping systems, it is necessary to have tools to predict changes in soil aggregate stability with changes in soil organic matter content and quality.

Using a data base of 480 soils, established during this study, we developed a statistical relationship which relates soil aggregate stability with soil characteristics, in particular with its organic carbon (C) content. However, its low predictive capacity does not allow to use it as a pedotransfer function.

Based on 7 in situ long term experiments or cultivated plots series, we found rapid increased of soil aggregate stability when practices that increases the soil C content in the surface layer are implemented (no till, rotations with leys, permanent coverage of soil with plants, repeated compost additions). The total C content of soil was often better correlated to aggregate stability than other organic variables, such as hot water soluble polysaccharides, particulate organic matter contents, or microbial biomass C.

Laboratory experiments, in which a wide range of organic materials (crop residues, composts) were added to soil showed that the effect of the organic materials was indirect, through the stimulation of the microbial decomposers, which aggregated the soil. We proposed a new model to simulate the temporal changes in aggregate stability after organic matter additions of given biochemical qualities and in controlled amounts. "CANTIS-STAB" couples a decomposition model with a statistical function. Managing organic matter in soils is a powerful option to decrease the sensitivity of silty cultivated soils to crusting and erosion. The different tools proposed in this program will be developed further, to serve as a basis to optimize agronomic practices and organic wastes addition in this perspective.

Key-words

Soil, organic matter, soil structure, aggregate stability, crusting, pedotransfer function, model, microorganism, cropping system, organic wastes.

RESUMEN

DESARROLLO DE HERRAMIENTAS DE PREVISIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE LA ESTABILIDAD ESTRUCTURAL DE LOS SUELOS BAJO EFECTO DE LA GESTIÓN ORGÁNICA DE LOS SUELOS

La estabilidad estructural está una propiedad física importante de los suelos, indicadora de su sensibilidad al sellado superficial del suelo y a la erosión. Los suelos limosos, que cubren superficies importantes en Francia y en el norte de Europa tienen debido a su textura y a su bajo contenido en materias orgánicas, una baja estabilidad estructural. En un contexto donde hay preocupación de la disminución de contenido en materia orgánica y donde se diversifica prácticas y sistemas de cultivo, aparece necesario desarrollar herramientas de predicción de la estabilidad estructural en función de la cantidad y de la calidad de materias orgánicas.

Desarrollamos una función de pedotransferencia (o relación estadística) que liga estabilidad de la estructura a su constitución, en particular el contenido en carbono orgánico, a partir de una base de datos Agresta de 480 suelos reunidos durante el proyecto. El examen de 7 ensayos de larga duración o de redes de parcelas sobre suelos limosos mostró mejoramientos de la estabilidad de la estructura en algunos años con prácticas que permiten un aumento del contenido en C en el horizonte de superficie (no laboreo, praderas temporarias, scv, aportes repetidos de compostas). El contenido en C total del horizonte está así un mejor indicador de la estabilidad estructural que las fracciones orgánicas (azúcares solubles al agua caliente, materias orgánicas en partículas) o que la biomasa de los microorganismos. Experimentaciones de aporte de materias orgánicas (residuos de cultivos, compostas...) en suelos al laboratorio permitieron confirmar que el papel de estos aportes estuvo esencialmente indirecto, por la estimulación de los microorganismos del suelo que su descomposición lleva; estos microorganismos que agregan las partículas de los suelos por sus secreciones o mecánicamente. Propusimos un modelo predictivo de la estabilidad estructural seguido a aportes orgánicos cuyos se conoce la calidad bioquímica: Cantis-Stab, que copia un modelo de descomposición de materias orgánicas con una función estadística.

Como la gestión de las materias orgánicas constituye un volante de acción mayor para actuar sobre la sensibilidad de los suelos limosos al sellado superficial y a la erosión, las herramientas propuestas pueden servir de base a preocupaciones agronómicas o al aporte razonado de productos residuales orgánicos al suelo.

Palabras clave

Suelo, materia orgánica, estructura del suelo, estabilidad estructural, sellado superficial, modelización, función de pedotransferencia, microorganismos del suelo, materias orgánicas exógenas.

INTRODUCTION

Parmi les menaces pesant sur les sols et identifiées par la communauté européenne, l'érosion et la diminution de teneur en matières organiques (MO) des sols occupent une place importante; menaces qui sont étroitement liées, en raison du rôle des matières organiques dans la stabilité de la structure du sol. La stabilité de la structure est l'aptitude des agrégats du sol à résister à l'action désagrégante de l'eau lors d'épisodes pluvieux. C'est un bon indicateur de la sensibilité des sols à la battance et à l'érosion hydrique (Amezketta *et al.*, 1996; Bissonnais *et al.*, 2002; Leguédou et Le Bissonnais, 2004), et une composante reconnue de la qualité des sols. Les sols limoneux cultivés sont particulièrement instables et sensibles à la battance. En effet, leur texture leur confère une faible cohésion et les matières organiques y sont le principal agent agrégant (Le Bissonnais et Arrouays, 1997). Or, ces sols sont souvent pauvres en matière organique en raison d'une longue histoire de culture intensive. De plus, les pratiques culturales qui affinent les agrégats du sol et laissent le sol nu une partie de l'année l'exposent particulièrement à la battance. Les sols limoneux cultivés sont aujourd'hui caractérisés par des aléas érosifs élevés (Le Bissonnais *et al.*, 2002b), et apparaissent donc comme des objets d'étude prioritaires.

Plusieurs éléments de contexte réactualisent la question des relations matières organiques-structure dans ces sols. D'une part, différents travaux ont montré une diminution des teneurs en matières organiques de sols cultivés depuis les dernières décennies (Balesdent, 1996; Walter *et al.*, 1997; Wylleman *et al.*, 2001). Ces constats ont réactivé, au sein de la profession agricole comme au sein de diverses institutions, la demande de critères objectifs d'évaluation de la teneur en matières organiques de sols. En France, la seule référence disponible est un abaque, développé par Rémy et Marin-Lafliche (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 utilisé largement au-delà de son domaine de validité.

Par ailleurs, on assiste à une remise en cause des systèmes de culture traditionnels et à la diversification des pratiques et systèmes de culture (modalités de travail du sol, intercultures, agriculture à faibles intrants, agriculture biologique, etc). Ces modes de gestion peuvent avoir un impact sur les matières organiques des sols. Il s'ensuit une demande d'évaluation de leurs effets sur la stabilité structurale et des interrogations quant aux relations entre qualité des matières organiques des sols et stabilité de la structure.

Enfin, la valorisation agronomique de produits résiduels organiques est une pratique en plein essor. De nombreux déchets, compostés ou non, ont des effets positifs sur la stabilité de la structure, mais la diversité des produits est très grande (Lashermes *et al.*, 2009), comme est celle de leurs effets sur la stabilité structurale (Abiven *et al.*, 2009). De plus, les études accessibles dans la littérature sont réalisées dans des contextes pédologiques différents, avec des déchets organiques divers et en utilisant des méthodes différentes de mesure 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, laboratoires 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, dates d'apport, sols visés), tout en maîtrisant les effets négatifs. De tels outils de préconisation ne sont pas disponibles aujourd'hui.

Le rôle positif des matières organiques sur la structure des sols, et en particulier sur sa stabilité, est décrit et analysé depuis longtemps. Cependant, on ne dispose pas d'outils, statistiques ou mécanistes, pour prévoir l'évolution de la stabilité structurale des sols en fonction de variations de son statut organique (quantité et qualité de matières organiques du sol), ni de sa gestion organique (quantité, qualité, fréquence des apports organiques au sol). De tels outils seraient particulièrement pertinents pour les sols limoneux. Le projet « MOST (pour Matières Organiques et Structure des sols): 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 », avait donc trois objectifs principaux :

- **O1** : la construction de fonctions de pédotransfert, ou relations statistiques reliant la stabilité structurale aux caractéristiques du sol ;
- **O2** : l'établissement de corrélations entre stabilité structurale et fractions organiques du sol dans des situations marquées par des changements récents de gestion organique des sols ;
- **O3** : la construction d'un outil de prévision des variations de stabilité structurale suite à un apport de matière organique au sol.

Schématiquement, ces trois objectifs correspondent à l'appréhension de trois échelles de temps différentes de l'effet de la gestion organique sur la stabilité structurale (*figure 1*) : effets à court terme (intra annuel) des apports organiques (O3), effets à l'échelle de quelques années lors de transitions de pratiques (O2) et effets à plus long terme, lorsque sous l'effet de pratiques les teneurs en MO des sols se sont différenciées (O1).

RELATIONS MATIÈRES ORGANIQUES, MICROORGANISMES, STABILITE STRUCTURALE : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Deux synthèses bibliographiques ont été réalisées dans le cadre du projet (Abiven *et al.*, 2009 ; Chenu et Cosentino, 2011). Certains de leurs résultats sont rapportés ici.

Une première synthèse, focalisée sur le rôle des microorganismes dans la formation et la stabilisation de la structure des sols et des mécanismes mis en jeu (Chenu et Cosentino, 2011),

Figure 1 : Représentation schématique des variations intra-annuelles ou inter-annuelles de teneur en MO des sols et des questions relatives en termes de stabilité structurale. Les trois objectifs du projet MOST cherchent à répondre à ces questions.

Figure 1 : Schematic representation of intra -annual or inter-annual variations of soil organic matter contents and related questions regarding aggregate stability. The aims of the MOST project are to address these questions.

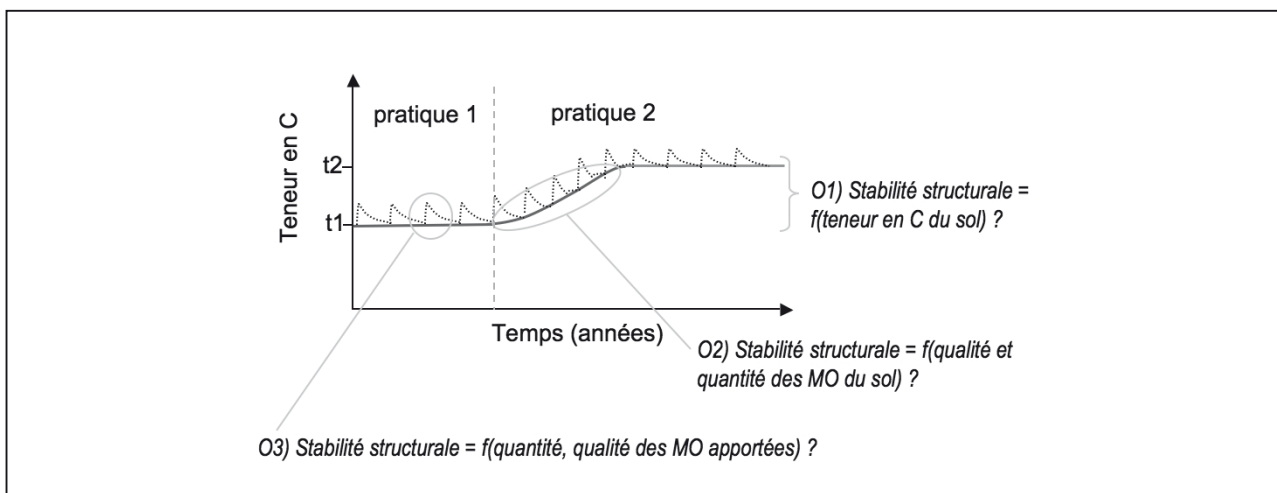
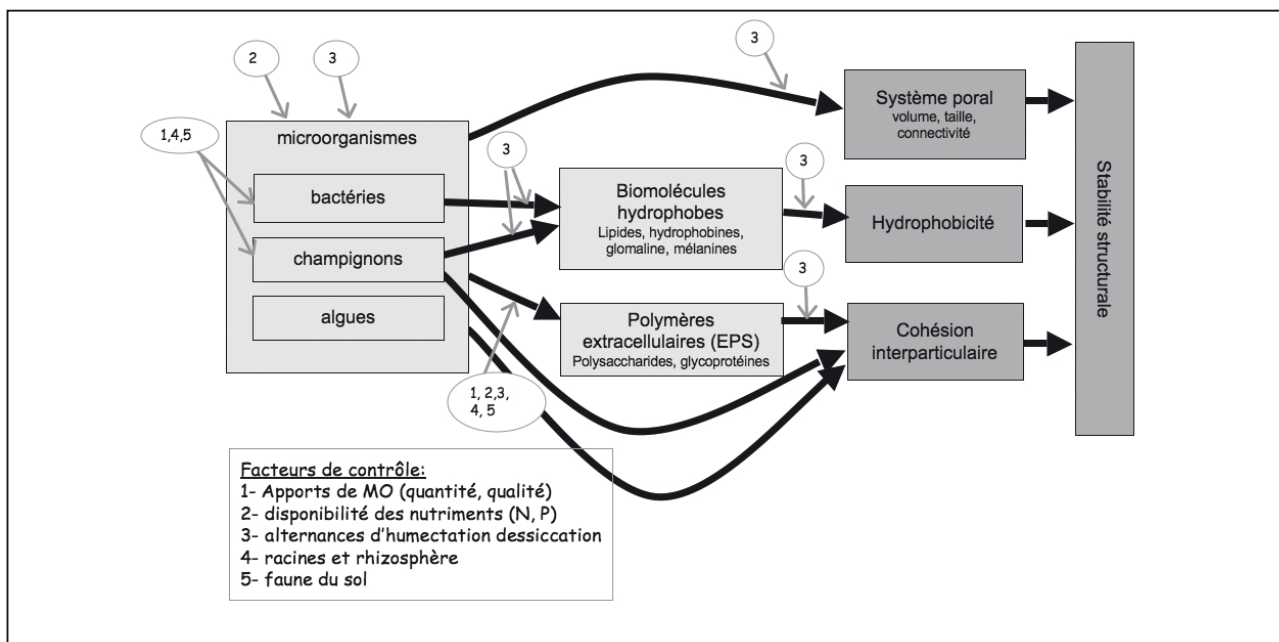


Figure 2: Schéma de l'effet des microorganismes sur la stabilité de la structure des sols. L'action des microorganismes est directe (effets d'augmentation de la cohésion par les hyphes fongiques par exemple) ou indirecte, *via* la sécrétion de substances hydrophobes ou agrégeantes (traduit de Chenu et Cosentino, 2011).

Figure 2: Schematic representation of the effects of microorganisms of soil aggregate stability. Microorganisms may have a direct action (e.g. fungal hyphae increasing aggregate cohesion) or indirect effects through the secretion of hydrophobic molecules (adapted from Chenu and Cosentino, 2011).



a permis de dégager un schéma conceptuel qui a servi de base dans le projet, à la mise en place et à l'interprétation d'expérimentations conduites en conditions contrôlées de laboratoire, ainsi qu'à la construction d'un modèle numérique prédictif (objectif O3) (figure 2). L'examen des corrélations rapportées dans la littérature entre stabilité structurale et facteurs agrégeants (biomolécules, substances humiques, matières organiques particulières, biomasse microbienne, bactéries, champignons.) n'a fait par ailleurs apparaître aucune hiérarchie entre les différents agents d'agrégation et montre que peu d'études ont considéré simultanément différents agents d'agrégation.

Une seconde synthèse bibliographique a porté sur l'effet des matières organiques apportées sur la stabilité structurale des sols dans des expérimentations en laboratoire ou au champ (Abiven *et al.*, 2009). Les résultats de 143 apports organiques différents ont pu être comparés, et ce malgré la diversité des méthodes de mesure de la stabilité structurale. La synthèse (figure 3) confirme le schéma conceptuel proposé par Monnier (1965) : l'intensité et la durée de l'effet des matières organiques apportées au sol sur la stabilité de la structure dépendent de la décomposabilité des matières organiques. Cependant, aucune relation quantitative directe ou universelle n'a, là, été trouvée entre les facteurs agrégeants et la stabi-

lité structurale. La synthèse a fait apparaître des manques de connaissances. Ainsi peu de travaux ont porté sur l'effet de la dose de MO apportée, ou pris en compte la teneur initiale en MO des sols ou leur texture.

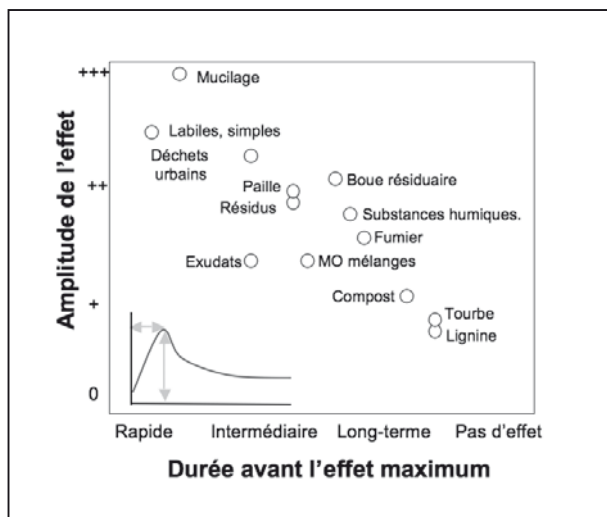
DÉMARCHE, MATÉRIEL ET MÉTHODOLOGIES

Mesure de la stabilité structurale

La stabilité structurale est classiquement mesurée par des tests appliqués au laboratoire, qui reproduisent l'action de l'eau sur les éléments structuraux du sol. Une très grande diversité de tests est utilisée dans la littérature, ce qui rend toute synthèse difficile. En France, une démarche de standardisation a été entreprise depuis presque dix ans, avec normalisation d'un protocole de stabilité structurale (AFNOR X31-5, juin 2005 ; et maintenant ISO/DIS 10930, 2011) et mise en place d'opérations d'intercalibration entre laboratoires sur un échantillon de sol issu du même prélèvement et réparti entre les différents laboratoires. Nous avons utilisé cette méthode appliquée à des agrégats de 3-5 mm séparés du sol par tamisage, puis

Figure 3: Relations, pour des MO apportées au sol, entre l'amplitude de l'effet sur la stabilité de la structure (cf schéma en bas à gauche) et la durée avant observation de l'effet maximum. Synthèse de 143 résultats rapportés dans la littérature. On peut constater que les catégories de produits se classent, de gauche à droite, selon un gradient de décomposabilité (traduit de Abiven et al., 2009).

Figure 3: Relations, for organic materials added to soil, between time to maximal effect on aggregate stability and magnitude of the effect (see scheme at the bottom left). A synthesis of 143 results analysed from the literature. The magnitude of the effect decreases when the time to maximum increases (adapted from Abiven et al., 2009).



séchés à l'air (Le Bissonnais, 1996). Trois tests sont appliqués, qui ont pour objectif de rendre compte du comportement du sol dans les différentes conditions climatiques et hydriques que l'on peut rencontrer à la surface du sol: (i) humectation rapide (immersion d'agrégats secs dans l'eau), (ii) réhumectation lente (humectation à l'eau 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 (DMP, exprimé en mm).

Dans le cadre de ce projet, une opération d'intercalibration centrée sur les conditions de prélèvement et de prétraitement des échantillons de sol a été entreprise. Elle a montré en particulier un effet du mode de prélèvement (tout venant, mottes, profondeur de prélèvement). Une fiche décrivant les protocoles de prélèvement et de préparation des sols, et une fiche de renseignements du contexte dans lequel a été réalisé le prélèvement (climat, cultures, opérations culturales récentes, etc) ont été proposées et sont accessibles (Unité de Science du Sol, INRA Orléans).

Caractérisation du statut organique des sols

La littérature met en avant plusieurs fractions organiques comme étant des agents d'agrégation des sols, car souvent bien corrélées à la stabilité de la structure (Chenu et Cosentino, 2011). Nous avons ainsi mesuré, outre la teneur en carbone et azote organique total des échantillons de sols, leur teneur en carbohydrates, et particulièrement en carbohydrates solubles à l'eau chaude, qui approximaient bien les mucilages microbiens et racinaires qui sont de nature polysaccharidique (Puget et al., 1999), leur biomasse microbienne par la méthode de fumigation-extraction (Vance et al., 1987) et leur biomasse fongique par dosage d'ergostérol (Gong et al., 2001), mesure de la longueur des hyphes (Frey et al., 1999) ou PCR quantitative (Martin-Laurent et al., 2003). Ces déterminations sont considérées dans notre projet comme renseignant la capacité agrégante des matières organiques ou « qualité des matières organiques du sol » vis-à-vis de la stabilité structurale. Les matières organiques apportées au sol (fumiers, composts), ont été caractérisées par leur analyse élémentaire (C, N) et par leur composition biochimique (van Soest, 1963).

Construction de fonctions de pédotransfert

Pour établir des relations statistiques entre caractéristiques constitutives des sols et stabilité de la structure, nous avons mis en place une base de données de stabilité structurale (AGRESTA). Elle est constituée des analyses de 480 échantillons de sols, provenant essentiellement de l'horizon de surface de sols métropolitains (dont 80 issus de la pédothèque du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (Jolivet et al., 2006)), ayant des textures variées (bien que centrées autour des textures limoneuses), des teneurs en C, pH, teneurs en CaCO₃ variées et qui sont sous des usages divers. Les variables disponibles dans cette base AGRESTA sont reportées dans le *tableau 1*. Après réalisation de statistiques descriptives de la base de données, une modélisation linéaire de l'influence des variables de constitution et d'usage des sols a été entreprise, à l'aide du logiciel R.

Relations entre stabilité structurale et fractions organiques du sol

Afin d'analyser les relations entre quantité et qualité des matières organiques et stabilité de la structure, nous avons considéré un ensemble d'essais de longue durée ou réseaux de parcelles agricoles sur sols limoneux, mis en place depuis au moins 4 années, dans lesquels les pratiques ou systèmes de culture testés étaient susceptibles de modifier le statut organique des sols et la stabilité de la structure. Il s'agit d'un système de grandes cultures avec des variantes agriculture biologique, intégré et semis direct sous couvert végétal (Es-

Tableau 1 : Variables renseignées dans la base de données AGRESTA.**Table 1 :** Variables present in the AGRESTA database.

Données environnementales, parcelle et sol	Données physico-chimiques	Tests de stabilité structurale
Date	Argile %	Test immersion rapide: DMP (mm) Test réhumectation lente: DMP (mm) Test de désagrégation mécanique par agitation dans l'éthanol: DMP (mm) + Distributions de tailles de particules résultantes pour chacun des tests
Identification (lieu du prélèvement)	Limons fins et grossiers (%)	
Localisation (département, région naturelle)	Sables fins et grossiers (%)	
Occupation du sol	Refus à 2 mm (%)	
Pratiques (labour/non labour, apports de MO, chaux...)	C organique (%)	
Roche mère	CEC (cmol kg ⁻¹)	
Nom du sol	Cations échangeables (Ca, Na) (cmol kg ⁻¹)	
Source des données	pH _{eau}	
Laboratoire ayant fait les tests de stabilité structurale	CaCO ₃ (%)	
	Fer total HF (%)	
	Fer libre Tamm (%)	
	Fer libre Mehra-Jackson (%)	

sai INRA de La Cage, à Versailles, Yvelines (Debaeke *et al.*, 2009)), d'un système de grandes cultures avec alternance de prairies temporaires (Essai du Lycée agricole d'Yvetot, Yvetot, Seine Maritime), d'un système de cultures fourragères avec différentes modalités de travail du sol et de fertilisation organique (Essai de Kerguéhenec (Morbihan), et de systèmes de grandes cultures ou de cultures légumières avec différents apports organiques (Essai QualiAgro, Feucherolles, Yvelines; Essai du Défend, Vienne; Essai de la Plaine de Caen, Calvados; parcelles légumières du Nord Finistère).

L'horizon de surface de ces sols a été échantillonné et leur stabilité structurale ainsi que leurs caractéristiques organiques ont été mesurées selon les méthodes citées en amont.

Effet à court terme des apports organiques sur la stabilité de la structure : expérimentation et modélisation

Dans le cadre du projet, des expérimentations d'incubation d'échantillons de sols limoneux après apport de matières organiques ont été réalisées (Cosentino *et al.*, 2006, 2010), et comparées à des expérimentations antérieures d'équipes du projet (Abiven *et al.*, 2007, Annabi *et al.*, 2007). Les conditions d'incubation et les méthodes d'analyse étaient standardisées. Les matières organiques apportées étaient des résidus de culture céréalière ou légumière, des composts de différentes qualités et maturités et des fumiers (Abiven, 2005, Annabi, 2005, Cosentino, 2006). Ces expérimentations permettaient d'analyser l'effet de la qualité biochimique, de la dose apportée, de la disponibilité de l'azote sur l'évolution temporelle de la stabilité de la structure.

La minéralisation des MO apportées, la dynamique des agents agrégeants: populations microbiennes (biomasse microbienne, abondance des champignons) et leurs sécrétions (mucilages microbiens et racinaires), ont été quantifiées, afin d'en tirer des relations utilisables à des fins prédictives.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Essai de construction d'une fonction de pédotransfert reliant la stabilité structurale aux caractéristiques du sol

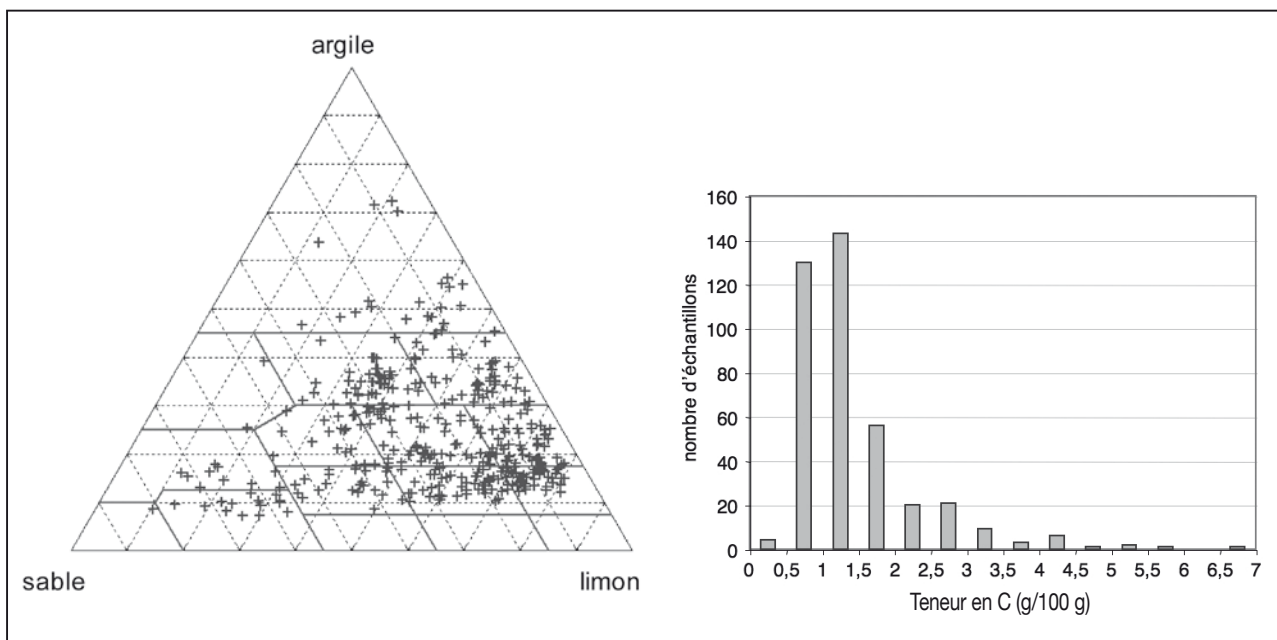
La base de données AGRESTA couvre une large gamme de textures, la teneur en argile variant de 8 à 72 %, les limons moyens étant les plus représentés, et les teneurs en carbone organique allant de 0,3 à 6,7 % avec une moyenne à 1,44 % (figure 4). Une première modélisation linéaire, sur une version intermédiaire de la base, comprenant 380 échantillons, a montré que pour les trois tests de stabilité structurale, les variables teneur en C, teneur en argile et usage permettaient une bonne description des résultats (Darboux *et al.* 2008). Les autres variables explicatives disponibles (en particulier, pH, CEC, teneurs en limons, en CaCO₃ ou en fer) n'amélioreraient pas la régression. Cette première modélisation a fourni pour le test d'immersion (correspondant à une réhumectation rapide des agrégats) la relation statistique suivante:

$$\text{DMP} = 0,34 \text{ C} + 0,008 \text{ Argile} + \text{Usage} \quad R^2 = 0,87$$

Où le DMP est exprimé en mm, Corg et Argile en %. La variable

Figure 4: Caractéristiques texturales et teneur en carbone organique des sols de la base de données AGRESTA.

Figure 4: Texture and organic carbon contents of the soils from the AGRESTA database.



« usage » est renseignée comme suit: Usage = 0,34 si l'occupation est une prairie, une jachère ou une forêt et Usage = -0,17 si l'occupation est une culture (grandes cultures, cultures légumières, vigne).

L'analyse statistique d'une version plus récente, et donc plus complète, de la base n'a pas confirmé cette relation: seule la teneur en carbone organique apparaissait significative, mais la modélisation linéaire ne produisait pas de relations robustes permettant de prédire le DMP. L'analyse a cependant confirmé que la teneur en carbone organique est un facteur explicatif majeur de la stabilité structurale.

Des essais de mise au point de fonction de pédotransfert ont également été développés à l'échelle d'une petite région. Ainsi, pour le Gatinais, où l'on rencontre des sols de type limoneux sur argiles à silex, hydromorphes souvent drainés et à tendance acide, la relation suivante a été trouvée:

$$\begin{aligned} \text{DMP} = & -0,383 + 0,354 \text{ C} + 0,026 \text{ Argile} \\ & - 0,006 \text{ Limons grossiers} + 0,09 \text{ pH} \\ R^2 = & 0,54, n = 44 \end{aligned}$$

Cependant, en l'état, le coefficient de détermination faible limite l'utilisation de cette relation pour prédire la stabilité de la structure.

En fait, la modélisation linéaire pourrait ne pas être adaptée aux données à analyser. D'autres méthodes, telles que les arbres de régressions multiples, pourraient s'avérer plus pertinentes. La cause de la difficulté à établir une fonction de pédotransfert pourrait aussi être recherchée dans l'hétérogénéité de l'origine des données, l'hétérogénéité des modes

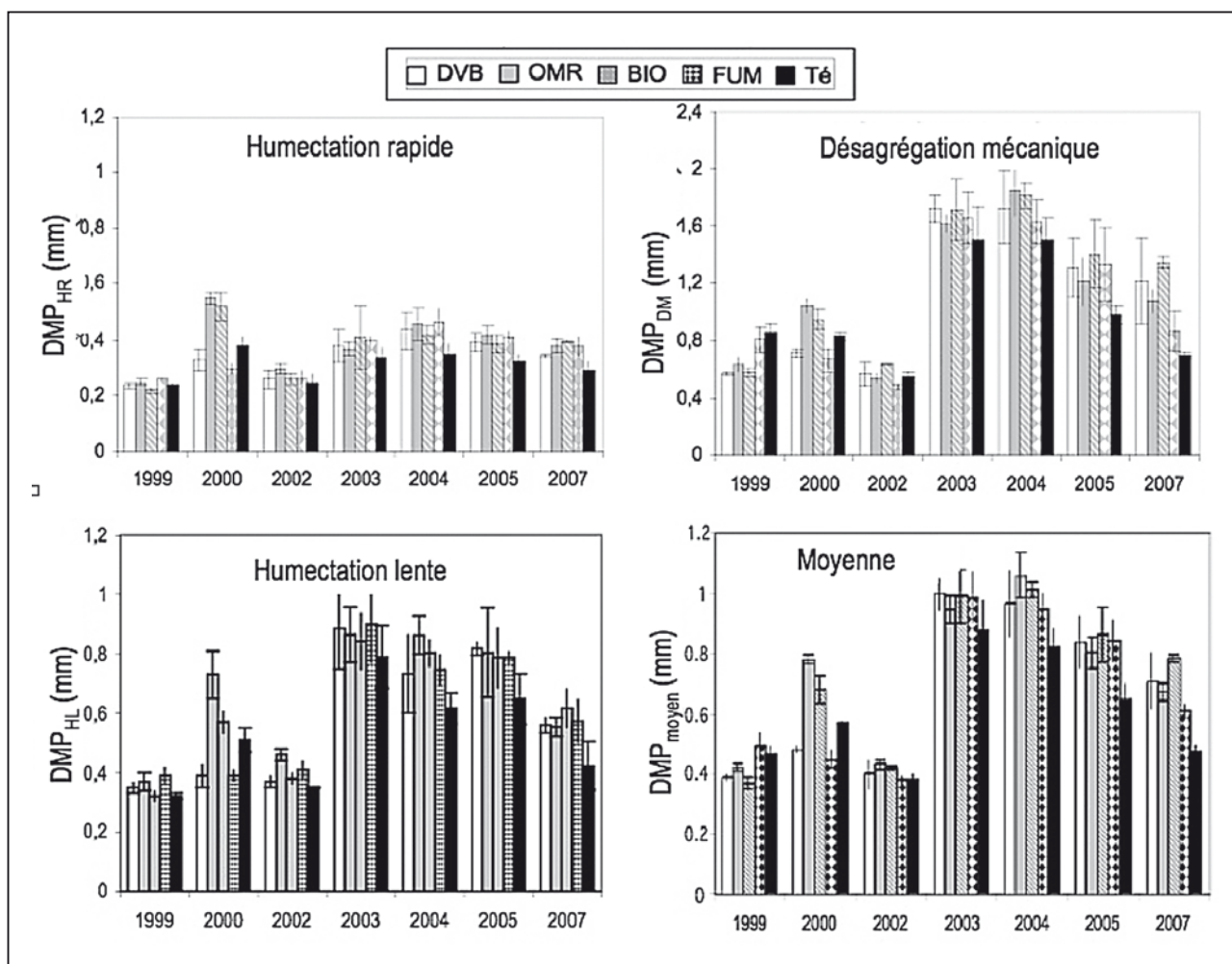
de prélèvement et de préparation des sols avant mesure de la stabilité structurale (cf. opération d'intercalibration), et dans l'histoire hydrique des sols dans les semaines précédant le prélèvement. Enfin, des différences de qualité des matières organiques des sols, dues au mode d'occupation, pourraient n'être qu'insuffisamment traduites par la variable « Usage ». Des travaux complémentaires restent donc nécessaires pour établir une fonction de pédotransfert opérationnelle.

Relations entre stabilité structurale et fractions organiques du sol

L'analyse effectuée par site a montré des effets contrastés des systèmes de culture et pratiques sur la stabilité structurale, selon les modalités de travail du sol et selon les quantités apportées et qualités biochimiques des produits résiduaux organiques. Par exemple, dans l'essai QualiAgro, à Feucherolles, la stabilité structurale a été mesurée systématiquement 7 mois après apport des produits résiduaux organiques (apport septembre année n, prélèvement et mesure en avril année n+1). On constate une augmentation significative ($P < 0,05$) de la stabilité des agrégats à partir de 2003, pour tous les apports organiques et toutes les modalités du test de stabilité (figure 5). L'effet des apports organiques est peu sensible au test utilisé, ce que nous avons aussi noté pour les autres essais suivis, mais s'accroît avec la durée de l'essai. Pendant les premières années de l'essai, à dose de C apporté similaire, l'effet des produits, mesuré 7 mois après l'apport, augmente avec leur décomposabilité

Figure 5: Evolution de la stabilité des agrégats dans les différents traitements suivis de l'essai Qualiagro à Feucherolles. Les résultats sont exprimés sous forme de DMP pour chacun des tests de stabilité structurale. La moyenne des 3 tests est également présentée (DMPmoyen). L'effet de différents apports organiques, compost de déchets verts + boues (DVB), compost d'ordures ménagères résiduelles (OMR), compost de biodéchets (BIO), fumier de bovins, apportés tous les deux ans à 4 t C/ha, est comparé à celui des parcelles témoins, sans apports organiques. Les prélèvements ont été réalisés chaque année en avril, sur la couche 0-10 cm (d'après Annabi *et al.*, 2011).

Figure 5: Changes in aggregate stability in relation to organic amendments in the Qualiagro long term experiment at Feucherolles. Results are given as mean weight diameters (DMP) for each test of aggregate stability assessment, as well as the mean of results for the three tests. The impact of different amendments: green wastes + sewage sludge compost (DVB), compost from municipal solid waste (OMR), compost of biological wastes (BIO) and manure, all added at 4 t C/ha is compared to reference plots. Sampling was performed in april of each year, in the 0-10 cm soil layer (from Annabi *et al.*, 2011).



(figure 5). L'amélioration de la stabilité des agrégats serait donc due en grande partie à une stimulation de l'activité microbienne due à la décomposition des MO apportées, en accord avec le modèle de Monnier (1965) et en cohérence avec notre analyse de la littérature (figure 3). Puis, à partir de 2005 on constate que l'ordre se modifie: les parcelles ayant les stabilités structurales les plus élevées sont celles dans lesquelles la teneur en matière

organique des sols a le plus augmenté. A long terme, l'effet des apports organiques sur les teneurs en C du sol devient prépondérant, et ce sont donc les matières organiques les moins biodégradables (c'est-à-dire celles qui ont le rendement en humus le plus élevé) qui sont les plus efficaces (Annabi *et al.*, 2011).

Cependant, les variations inter-annuelles de la stabilité structurales, observables dans tous les traitements y compris

dans les parcelles témoin (*figure 5*), sont plus importantes que l'effet de l'apport des produits organiques. On observe ainsi une forte augmentation de la stabilité structurale de l'ensemble des traitements entre 2002 et 2003, qui pourrait être due à la longue période de sécheresse du printemps 2003, mais les mécanismes mis en jeu ne sont pas encore bien expliqués.

Un fort effet des pratiques de simplification du travail du sol, qui permet en quelques années la concentration des matières organiques dans les premiers centimètres de surface du sol, a pu être observé par exemple dans l'essai de Kerguehenec en système fourrager. Cette couche superficielle du sol est celle qui intercepte la pluie et qui dans nos travaux était prélevée pour les mesures de stabilité structurale. Les effets les plus marqués sur la stabilité structurale ont été mis en évidence pour les pratiques associant à la fois absence de labour et implantation d'un couvert végétal permanent (prairies temporaires à Yvetot, système en semis direct sous couvert végétal à Versailles).

Dans la plupart des situations, la teneur en C organique total du sol était la ou une des variables les mieux corrélées à la stabilité structurale, même si la plupart des fractions organiques et microbiennes mesurées étaient aussi significativement et positivement corrélées à la stabilité structurale (*tableau 2*). La multiplicité des mécanismes d'action et des agents agrégants intervenant simultanément semble en être l'explication (*figure 2*). Une autre explication, plus conjoncturelle, est qu'aucun des changements de pratiques étudiés ne présentait de changement de la qualité des matières organiques ou de l'abondance des microorganismes sans s'accompagner également d'une augmentation de la teneur en C du sol, au moins dans l'horizon de surface. Enfin, les stabilités structurales observées pourraient résulter de l'abondance des agents agrégants, non à la date de l'analyse, mais antérieurement. Ainsi par exemple, la quantification des champignons par la mesure

de la teneur en ergostérol du sol ne peut rendre compte de l'action qu'exercent encore des hyphes de champignons morts, qui eux ne sont pas quantifiés par cette méthode. Il apparaît, à l'issue de ce programme, plus pertinent de quantifier les flux d'entrée de carbone au sol antérieurs à la date du prélèvement pour la mesure de stabilité structurale, que la qualité des matières organiques à la date du prélèvement. Ces entrées organiques sont en effet ce qui conditionne l'activité des êtres vivants agrégants, microorganismes et faune (*figure 2*).

En l'état actuel, nous ne proposons donc pas d'indicateur organique ou microbien qui permettrait de mieux prédire la stabilité de la structure de l'horizon du sol considéré. Ceci confirme l'intérêt du développement d'une fonction de pédotransfert qui prendrait en compte l'effet de l'occupation du sol (la variable « Usage ») et ses changements récents.

Construction d'un outil de prévision des variations de stabilité structurale suite à un apport de MO exogènes

L'effet des matières organiques apportées est-il essentiellement direct et abiotique, ou indirect et biologique? Nos expérimentations d'apport de matières organiques au sol en conditions de laboratoire n'ont pas montré d'effet direct sur la stabilité de la structure, dès leur apport, si ce n'est dans le cas de composts matures (*figure 6*). Cet effet abiotique pourrait être dû à la diffusion de composés solubles augmentant la cohésion des agrégats, composés qui restent à identifier sur le plan biochimique.

L'effet des apports organiques sur la stabilité de la structure est donc essentiellement indirect, *via* une stimulation des populations microbiennes de décomposeurs. L'abondance de celles-

Tableau 2: Relations entre fractions organiques du sol et stabilité structurale. Coefficient de détermination des régressions linéaires établies, pour trois des essais échantillonnés dans le projet, entre le diamètre moyen pondéré à l'issue du test d'humectation lente et les teneurs en C, en C de la biomasse microbienne et en C des carbohydrates extractibles à l'eau chaude.

Table 2: Relationships between soil organic fraction and aggregate stability. Determination coefficient of the linear regression found, for three of the sampled sites, between the mean weight diameter for the slow rewetting test on the one hand and the soil C content, microbial biomass-C content and hot water extractible carbohydrates-C content on the other hand.

	Kerguehenec	Yvetot	Versailles
	R ²		
C total	0,723	0,859	0,943
C-Biomasse microbienne	0,734	0,879	0,496
C-carbohydrates	0,666	0,823	ND
année prélèvement	2006	2007	2005
nombre de situations étudiées	6	5	4
nombre de répétitions terrain	3	5	3

Figure 6: Effet direct, abiotique, des produits organiques. La stabilité de la structure est mesurée dans les deux heures après leur incorporation. Sols : F= Feucherolles , V= Versailles, Te= témoin. Produits organiques BIO= compost de biodéchets, DVB= compost de déchets verts + boues, OMR= compost d'ordures ménagères résiduelles. i= compost immature, m = compost mature, Pm= paille de maïs.

Figure 6: Direct abiotic effect of organic amendments. Aggregate stability is measured two hours after their incorporation. Sols : F = Feucherolles, V = Versailles. Organic products BIO = compost of biological wastes, DVB = green wastes + sewage sludge compost, OMR = compost from municipal solid waste. i = immature compost, m = mature compost, Pm = maize straw.

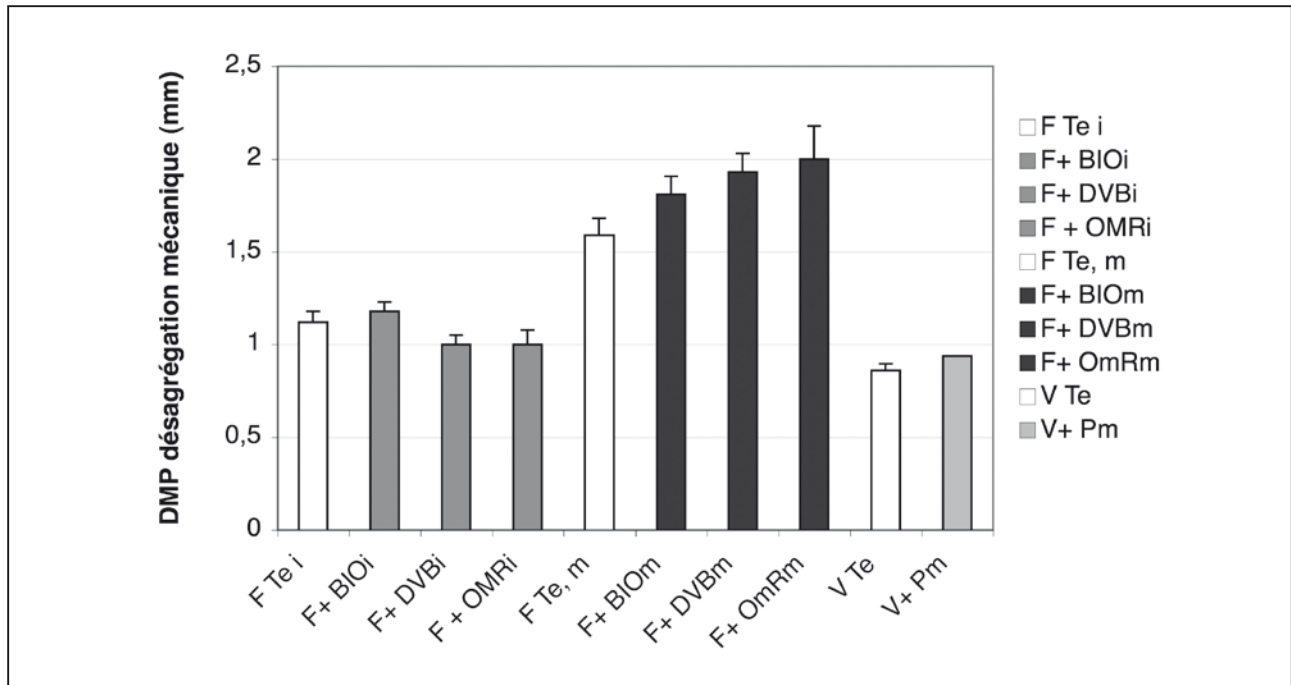


Figure 7: Relation entre stabilité structurale et biomasse microbienne pour différents apports organiques (11 types différents d'apports organiques), en différentes doses (2,5 à 20 gC.g⁻¹) mesurées à différentes dates (entre 3 jours et 1 an).

Figure 7: Relationship between aggregate stability and microbial biomass for different organic matter additions (11 different organic amendments), at different doses (2.5 to 20 gC.g⁻¹) and measured between 3 days and 1 year after addition.

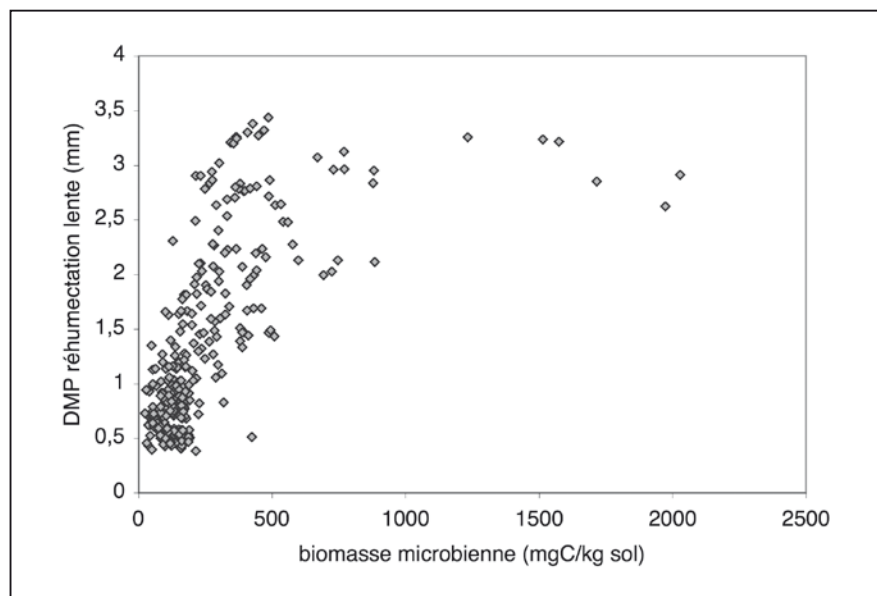
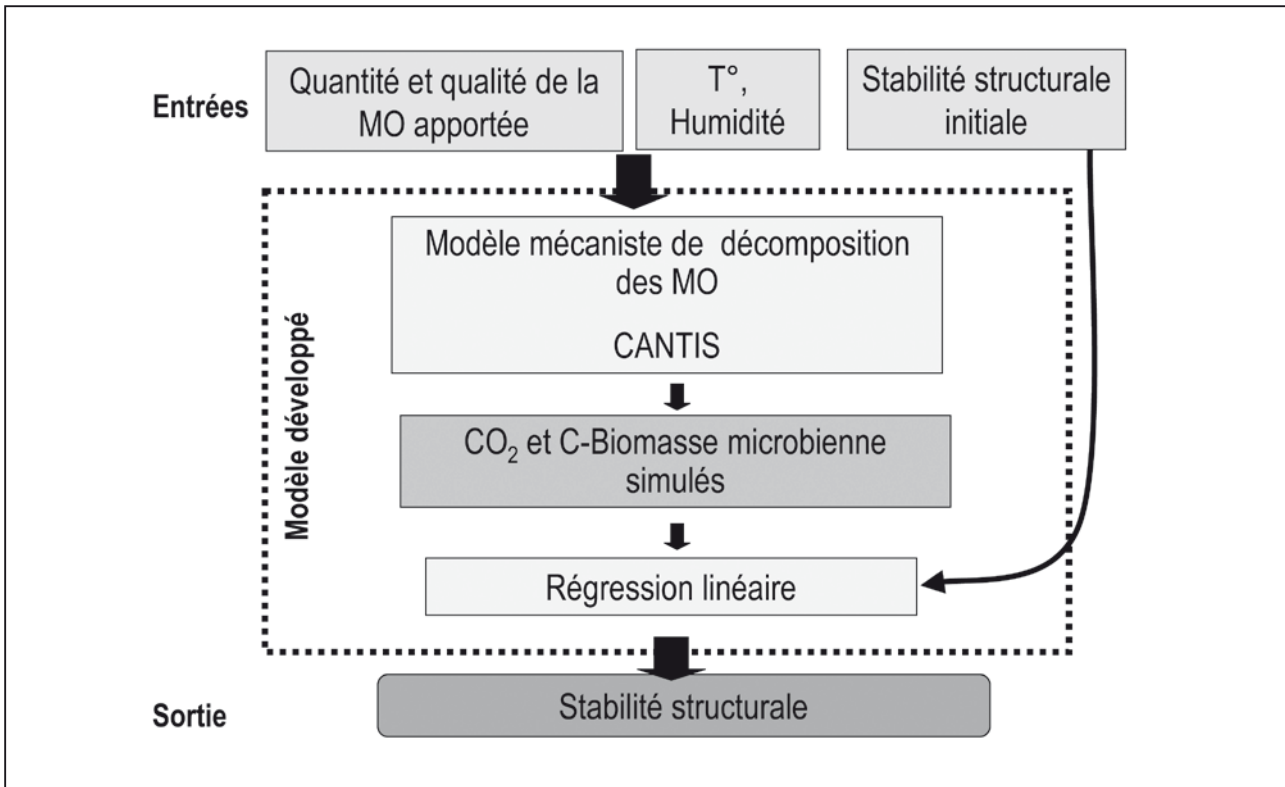


Figure 8: Représentation schématique du modèle CANTIS-STAB, permettant de prédire les variations de stabilité structurale en fonction de la quantité, qualité biochimique des apports, des conditions climatiques et de la stabilité structurale initiale.

Figure 8: Schematic representation of the CANTIS-STAB model, that allows to predict changes in aggregate stability as a function of the amounts, biochemical quality of organic amendments, climatic conditions and time-zero aggregate stability.



ci, comme celles de leurs exsudats, sont positivement corrélée à la stabilité structurale, la relation étant peu affectée par la nature biochimique de la matière organique apportée (figure 7).

L'analyse de ces relations a conduit à proposer un modèle prédictif de la stabilité structurale (figure 8) qui couple un modèle de décomposition des matières organiques apportées, le modèle CANTIS (Garnier et al., 2001) et une fonction statistique « STAB » qui relie l'abondance des populations microbiennes (Biomasse microbienne) et leur activité (CO_2 respiré) à la stabilité de la structure. Cette fonction a été obtenue par régression multiple entre les variables biologiques mesurées et la stabilité de la structure dans des expériences d'incubation du projet (Cosentino, 2006, Cosentino et al., soumis). Ce modèle, calibré avec une dose d'apport de paille de maïs ($5 \text{ g C kg}^{-1} \text{ sol}$), permet de décrire de manière assez satisfaisante l'évolution de la stabilité structurale lors d'un apport de paille pour des doses allant de $2,5$ à $20 \text{ g C kg}^{-1} \text{ sol}$ (figure 9).

Ce modèle doit être développé et il est en particulier nécessaire (i) d'intégrer une description de l'effet direct, abiotique, des matières organiques; effet qui peut être significatif

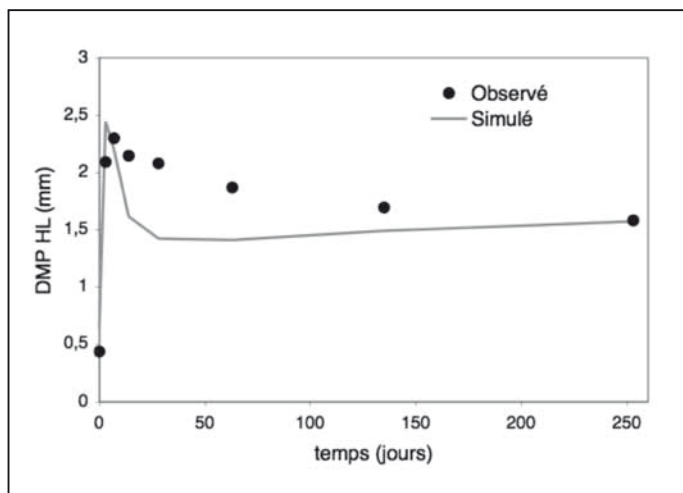
pour des MO humifiées comme des composts matures ou des MO exogènes très hydrophobes, (ii) de tester la validité de la fonction « STAB » proposée pour des sols limoneux de teneur en C et stabilité structurale initiale différentes, comme pour des conditions contrastées de disponibilité des nutriments (qui pourraient affecter la composition des communautés microbiennes), ou hydriques, afin (iii) d'améliorer cette fonction. Ce modèle devra être comparé à une démarche antérieure de modélisation de l'effet à court terme des matières organiques sur la stabilité de la structure. Dans le modèle « Pouloud », l'amplitude maximale d'augmentation de la stabilité structurale et la durée avant observation de cet effet (cf. figure 3) sont corrélées aux caractéristiques biochimiques des matières organiques apportées (Abiven et al., 2009).

CONCLUSION

Les travaux menés dans le cadre de MOST, à différentes échelles d'espace (incubations au laboratoire, parcelles d'un

Figure 9 : Evolution temporelle de la stabilité structurale (test d'humectation lente) après un apport de paille de maïs à 10 g C kg^{-1} sol. Les données expérimentales ont été simulées avec le modèle CANTIS-STAB (Cosentino 2006).

Figure 9 : Temporal evolution of aggregate stability (slow wetting test) after the addition of maize straw at a 10 g C kg^{-1} soil rate. Experimental data were simulated using the CANTIS-STAB model (Cosentino 2006).



essai, d'une petite région ou sols du territoire métropolitain), et de temps (incubations de quelques mois, essais au champ pluriannuels, parcelles différenciées depuis des décennies), ont montré et confirmé l'importance des matières organiques dans la stabilité de la structure des sols limoneux. La gestion des matières organiques constitue donc un volant d'action majeur pour agir sur la sensibilité de sols limoneux vis-à-vis de la battance et de l'érosion.

Ce travail a des implications méthodologiques: les conditions de prélèvement et les conditions climatiques récentes ont une forte influence sur la stabilité structurale. L'impact des premières peut être réduit par l'utilisation de la fiche de prélèvement et de préparation proposée et sera incorporé dans la future version de la norme AFNOR. L'effet des conditions climatiques apparaît plus complexe à appréhender et fait l'objet actuellement de travaux dédiés. L'utilisation dans ce projet des trois tests de stabilité structurale proposés par Le Bissonnais (1996) et la mesure directe de la mouillabilité et de la cohésion (Cosentino *et al.*, 2006, 2010, Cosentino 2006) montrent que les matières organiques agissent par différents mécanismes simultanés sur la stabilité structurale (figure 2). Une perspective opérationnelle est la possibilité d'utiliser un seul des trois tests de la norme AFNOR, en choisissant le plus représentatif des conditions expérimentées au champ.

Les matières organiques ont à la fois un effet direct, statique, sur la stabilité de la structure, et un effet indirect, dynamique, lié à l'activité des microorganismes les décomposant (et à l'activité des décompo-

seurs fauniques qui n'a pas été étudiée dans ce projet). Biomasse microbienne, abondance des champignons, CO_2 respiré, polysaccharides extracellulaires sont de bons descripteurs des variations de la stabilité structurale. Cependant, dans les essais ou parcelles suivies, la teneur en C organique s'est avérée être un prédicteur équivalent, voire meilleur, de la stabilité structurale que ces fractions organiques. Nous ne proposons donc pas d'indicateur organique ou microbien de changements de stabilité structurale.

Ce projet visait à proposer différents outils de prédiction de la stabilité structurale de sols limoneux en relation avec la gestion organique des sols à différentes échelles de temps (figure 1).

A court terme, c'est à dire à l'échelle intra-annuelle, nous avons proposé un modèle couplant la décomposition des matières organiques et l'effet des microorganismes, CANTIS-STAB, qui doit être développé en le calibrant sur une gamme plus large de situations. Un tel outil permettra de raisonner les apports de produits résiduels organiques au sol: choix des produits optimaux pour une situation donnée, conception de mélanges de produits organiques pour un effet recherché.

A moyen terme, c'est-à-dire pour prévoir l'impact en quelques années de changements de pratiques agricoles sur la stabilité structurale de sols limoneux, une approche plus holistique qui prendrait en compte d'une part la teneur en C des sols et le flux d'entrée de C dans la couche de surface du sol nous apparaît potentiellement plus riche que la recherche de variables organiques indicatrices de la qualité des matières organiques.

Enfin, à plus long terme, nous avons établi des relations statistiques entre caractéristiques des sols aisément mesurables par une analyse de routine et stabilité de la structure, mais ces relations nous apparaissent insuffisamment prédictives pour proposer aujourd'hui une fonction de pédotransfert générique. Ces relations ont été et pourront sans doute encore être améliorées en les stratifiant par exemple en fonction de l'usage ou de la texture des sols. Elles permettront de simuler l'impact sur la stabilité structurale d'un changement de teneur en MO et de servir de base à des préconisations. Ce type d'outil peut permettre, pour des sols sensibles à la battance, de fixer des teneurs-seuil en C par rapport à cette propriété et d'évaluer l'intérêt d'un relèvement de la teneur en matières organiques des sols par des pratiques appropriées.

En termes de pratiques, ce projet a montré également le bénéfice, vis-à-vis de la sensibilité à la battance, de toute pratique ou système qui permet une augmenta-

tion de la teneur en matière organique de l'horizon cultivé, ou la concentration des matières organiques dans les premiers centimètres de surface du sol.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été financée par le programme GESSOL du Ministère Français de l'Ecologie et du Développement durable. Les thèses de S. Abiven, M. Annabi et D. Cosentino ont été financées respectivement par l'ADEME, Véolia-Environnement et l'INRA. Les auteurs tiennent à remercier les collègues de leurs unités qui ont contribué au projet, par le maintien des expérimentations au champ, par la participation aux expérimentations et par leur collaboration scientifique.

BIBLIOGRAPHIE

- Afnor, 2005 - Norme NF X31-515 - Qualité du sol. Mesure de la stabilité d'agrégats de sols pour l'évaluation de la sensibilité à la battance et à l'érosion hydrique. 13 p.
- Amezketta E., Singer M.J. et Le Bissonnais Y., 1996 - Testing a new procedure for measuring water-stable aggregation. *Soil Science Society of America Journal*, 60: 888-894.
- Abiven S., 2005 - Relations entre caractéristiques des matières organiques apportées, dynamique de leur décomposition et évolution de la stabilité structurale du sol. Thèse de l'Université de Rennes. 262 p.
- Abiven S., Menasseri S. et Chenu C., 2009 - The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability - a literature analysis. *Soil Biology & Biochemistry*, 41: 1-12.
- Abiven S., Menasseri S., Angers D.A. et Leterme P., 2007 - Dynamics of aggregate stability and biological binding agents during decomposition of organic materials. *European Journal of Soil Science*, 58: 239-247.
- Abiven S., Menasseri S., Angers D.A. et Leterme P., 2008 - A model to predict soil aggregate stability dynamics following organic residue incorporation under field conditions. *Soil Science Society of America Journal*, 72: 119-125.
- 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. Thèse de l'Institut National Agronomique, Paris-Grignon. 279 p.
- Annabi M., Houot S., Francou C., Poitrenaud M. et Bissonnais Y.L., 2007 - Soil aggregate stability improvement with urban composts of different maturities. *Soil Science Society of America Journal*, 71: 413-423.
- Annabi M., Le Bissonnais Y., Le Villio-Poitrenaud M., Houot S., 2011 - Soil aggregate stability as affected by repeated applications of organic amendments in a cultivated loamy soil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. doi:10.1016/j.agee.2011.07.005.
- Balesdent J., 1996 - Un point sur l'évolution des réserves organiques des sols en France. *Etude et Gestion des Sols*, 3: 245-260.
- Chenu C. et Cosentino D., 2011 - Microbial regulation of soil structural dynamics. *In Architecture and biology of soils: Life in inner space*, Eds K. Ritz and I.M. Young. pp chapter 3. CABi.
- Cosentino D., 2006 - Contribution des matières organiques à la stabilité de la structure des sols limoneux cultivés. Effet des apports organiques à court terme. Thèse de l'Institut National Agronomique, Paris-Grignon. 214 p.
- Cosentino D., Le Bissonnais Y. et Chenu C. 2006 - Aggregate stability and microbial community dynamics under drying-wetting cycles in a silt loam soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 38: 2053-2062
- Cosentino D., Hallett P.D., Michel J.C. et Chenu C., 2010 - Do different methods for measuring the hydrophobicity of soil aggregates give the same trends in soil amended with residue? *Geoderma*, 159: 221-227.
- Darboux F., Le Bissonnais Y., Duval O. et Chenu C., 2008 - Improved assessment of interrill erodibility using structural stability. Recent developments and future directions. *AgroEnv 2008*. Antalya, Turkey, April 28- May 1, 2008. 8 pages
- Debaeke P., Munier-Jolain N., Bertrand M., Guichard L., Nolot J.M., Faloya V., Saulas P., 2009 - Iterative design and evaluation of rule-based cropping systems: methodology and case studies. *A review. Agronomy and Sustainable Development*, 29: 73-86.
- Frey S.D., Elliott E.T. et Paustian K., 1999 - Bacterial and fungal abundance and biomass in conventional and no-tillage agroecosystems along two climatic gradients. *Soil Biology & Biochemistry*, 31: 573-585.
- Garnier, P., Neel C., Mary B. et Lafolie F., 2001. Evaluation of a nitrogen transport and transformation model in a bare soil. *European Journal of Soil Science*, 52: 253-268.
- Gong P., Guan, X. et Witter, E., 2001 - A rapid method to extract ergosterol from soil by physical disruption. *Applied Soil Ecology*, 17: 285-289.
- Jolivet, C., Arrouays, D., Boulonne, L., Ratié, C. et Saby, N. 2006. Le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols de France (RMQS) - Etat d'avancement et premiers résultats. *Etude et Gestion des Sols*, 13: 149-164.
- Le Bissonnais Y. et Le Souder C., 1995 - Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. *Etude et Gestion des Sols*, 2: 43-55.
- 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. et 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. et Gascuel-Oudoux, C., 2002a - Topographic variation of aggregate stability at field scale: effect on runoff and erosion. *Agronomie*, 22: 489-501.
- Le Bissonnais Y., Thorette J., Bardet C., Daroussin J., 2002b - L'érosion hydrique des sols en France. <http://erosion.orleans.inra.fr/rapport2002/>
- Leguédois S. et Le Bissonnais Y., 2004 - Size fractions resulting from an aggregate stability test, interrill detachment and transport. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29: 1117-1129.
- Martin-Laurent, F., Piutti, S., Hallet, S., Wagschal, I., Philippot, L., Catroux, G., Soulas, G., 2003. Monitoring of atrazine treatment on soil bacterial, fungal and atrazine-degrading communities by quantitative competitive PCR. *Pest Management Science*, 59: 259-268.
- Monnier G., 1965 - Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. *Annales Agronomiques*, 16: 327-400.
- Puget P., Angers D.A. et Chenu C., 1999 - Nature of carbohydrates associated with water-stable aggregates of two cultivated soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 31: 55-63.
- Rémy J.C. et Marin Lafliche A., 1976 - L'entretien organique des terres. *Entreprises agricoles*, 13: 63-67.
- Unité de Science du Sol, INRA Orléans, 2007 - Fiche protocole de prélèvement et préparation d'échantillons de sol pour la mesure de stabilité de la structure. Fiche support de renseignement du prélèvement.
- Van Soest P.J., 1963 - Use of detergents in the analysis of fibrous feeds I: preparation of fiber residues of low nitrogen content. *Journal of the Association of Analytical Chemistry*, 46: 825-835.
- Vance E.D., Brookes P.C. et Jenkinson D.S., 1987 - An extraction method for measuring soil microbial biomass. *Soil Biology & Biochemistry*, 19: 703-707.
- Walter C., Schvartz C., Claudot B., Bouedo T. et Arousseau 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., Machel J.-M., Guérfi J.-G. et 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.