

Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion

Y. Le Bissonais (1), Christine Le Souder (2)

1 : Institut National de la Recherche Agronomique, Service d'Étude des Sols et de la Carte Pédologique de France, Centre de Recherche d'Orléans, 45160 Olivet, France

2 : Institut Technique des Céréales et des Fourrages, 91720 Boigneville, France

RÉSUMÉ

La battance et la sensibilité à l'érosion des sols cultivés résultent essentiellement de la désagrégation des mottes de terre et du détachement de particules sous l'action des pluies. La mesure de la stabilité structurale devrait donc pouvoir permettre une évaluation rapide de la sensibilité des sols à la battance et à l'érosion hydrique. On peut distinguer quatre principaux mécanismes de désagrégation qui dépendent des conditions physico-chimiques de l'interaction eau-sol et des caractéristiques des sols. Après un rappel sur ces mécanismes, cet article analyse leurs relations avec la battance et l'érosion puis décrit les caractéristiques des principales méthodes existant. On propose, à partir de cette analyse, un cadre méthodologique cohérent permettant d'évaluer la stabilité structurale des sols en relation avec la battance et l'érosion, ainsi que l'influence de traitements ou amendements des sols sur cette stabilité structurale. Un exemple d'application de cette méthode à l'étude de l'effet d'un conditionneur de sol sur la stabilité structurale est présenté.

Mots clés

Stabilité structurale, battance, érosion, méthodologie, conditionneur de sol.

SUMMARY

MEASUREMENT OF AGGREGATE STABILITY FOR THE ASSESSMENT OF SOIL CRUSTABILITY AND ERODIBILITY

Crusting and erosion on cultivated or bare soils are mainly due to aggregate breakdown and particle detachment under rainfall action (figure 1). Therefore, it may be interesting to assess soil crustability and interrill erodibility by measuring aggregate stability. However, several various methods are used around the world for the measurement of soil aggregate stability. This shows both a fundamental interest of this property and a lack of satisfactory standard methods that could have been used by all. In fact, aggregate stability represents a key property of soil that influences several aspects of its behaviour. Aggregate breakdown itself depends on many parameters, and the processes involved are so numerous and complex that no general agreement exists today about the measurement of this property and its relationships with crusting and erosion. Therefore, despite the amount of literature dealing with aggregate stability, there is a need for clearing this subject from a theoretical as well as a methodological point of view.

In a first part of this paper, we review the theory concerning the mechanisms of aggregate breakdown and the soil properties influencing aggregate stability. We distinguish four main mechanisms of aggregate breakdown (table 1). They depend on the physical and chemical parameters of the water action on soil and on the soil elementary physical and chemical properties. The most important among these properties are the sodium exchangeable percentage, the organic carbon content and the iron and aluminium oxides content. Then, we

discuss the relationships between aggregate stability, crusting and erosion in the light of mechanistic studies of these processes.

The second part of the paper is a review and a discussion of the various existing methods for the assessment of aggregate stability to water action (table 2). We propose a unified methodological framework for the measurement of aggregate stability, in order to assess soil crustability and interrill erodibility. The method combines three treatments corresponding to various wetting conditions and energy levels. It allows comparison of a large range of soil types and climatic conditions. It also allows the study of the effects of soil amendments or chemical treatments on aggregate stability.

Finally, an example of application of this method to the study of the role of a mineral conditioner on aggregate stability is presented (figures 4, 5, 6). Results show that the conditioner reduce both the breakdown by slaking, by microcracking and by raindrop impact. Therefore it delays all the successive crusting processes and the formation of a depositional crust. The influence of the application rate of the conditioner is discussed as well as the mechanisms of its effect.

Key-words

Aggregate stability, crusting, erosion, methodology, soil conditioner.

Il existe au niveau international de très nombreuses méthodes de mesure de la stabilité structurale, ce qui montre à la fois l'intérêt porté à cette notion et l'absence d'une standardisation pour son évaluation. De fait, il s'agit d'une propriété fondamentale des sols pour de nombreux aspects de leur comportement, particulièrement en ce qui concerne l'hydrodynamique et l'érosion (Yoder, 1936; Bryan, 1968 ; Boiffin, 1984 ; De Ploey et Poesen, 1985). Cependant la complexité des mécanismes et le nombre des paramètres impliqués font qu'il existe une certaine confusion en ce qui concerne les processus de la dégradation structurale et ses relations avec l'érosion des sols.

Le but de cet article est, après un rappel théorique sur les mécanismes de désagrégation et les paramètres qui l'influencent, d'analyser les relations existant entre la désagrégation, la battance et la sensibilité à l'érosion des sols. On examine ensuite les caractéristiques des méthodes existantes et on propose un nouveau cadre méthodologique utilisable par tous. Un exemple d'utilisation de cette méthode est ensuite proposé.

LES MÉCANISMES DE LA DÉSAGRÉGATION

La désagrégation par l'eau résulte de différents mécanismes physiques et physico-chimiques et peut affecter différents niveaux de la structure des sols depuis les interactions entre les particules d'argiles jusqu'aux mottes de terre. On peut identifier quatre principaux mécanismes (tableau 1)

(Emerson, 1967 ; Boiffin, 1984 ; Le Bissonnais, 1988) : (1) l'éclatement, c'est à dire la désagrégation par compression de l'air piégé lors de l'humectation, (2) la désagrégation mécanique sous l'impact des gouttes de pluie, (3) la microfissuration par gonflement différentiel, (4) la dispersion physico-chimique.

Ces mécanismes de désagrégation se différencient du point de vue de la nature des interactions en jeu et de l'énergie nécessaire à leur rupture, des conditions physico-chimiques nécessaires pour leur mise en œuvre, de la cinétique des processus, de la nature et la taille des particules résultant de la désagrégation (tableau 1). Il est donc nécessaire d'adapter les méthodes de mesure à cette variabilité.

L'éclatement

Il se produit lorsque des agrégats secs sont immergés dans l'eau ou rapidement réhumectés (Yoder, 1936 ; Hénin *et al.*, 1958 ; Emerson, 1967). L'éclatement se produit même sans agitation bien que celle-ci augmente la désagrégation. Il diminue lorsque la teneur en eau des agrégats augmente du fait de la diminution du volume d'air piégé. Les sols argileux sont donc moins sujets à l'éclatement du fait de leur porosité réduite et aussi parce qu'ils retiennent plus d'humidité pour une contrainte hydrique donnée (Le Bissonnais, 1990).

L'éclatement produit des particules élémentaires et des microagrégats de petite taille (< 500 µm). Un éclatement partiel peut intervenir lorsque les agrégats sont partiellement saturés ou que la vitesse d'humectation est lente. Dans ce cas, les particules produites sont plus grossières.

Tableau 1 : Principales caractéristiques des différents mécanismes de désagrégation**Table 1** : The main breakdown mechanisms and their characteristics

Mécanisme	Eclatement	Désagrégation mécanique	Désagrégation par gonflement différentiel	Dispersion physico-chimique
<i>Nature des forces en jeu</i>	Pression interne de l'air piégé lors de l'humectation	Impact des gouttes de pluie	Pression interne par gonflement différentiel de l'argile	Réduction des forces d'attraction entre les particules
<i>Intensité de la désagrégation</i>	Totale	Cumulative	Partielle	Totale
<i>Propriétés du sol en jeu</i>	Porosité, mouillabilité, cohésion interne	Cohésion humide (argile, matière organique, oxydes)	Gonflement potentiel, cohésion, conditions d'humectation	Statut ionique, minéralogie de l'argile
<i>Particules Résultantes</i>	Petits microagrégats (< 500 µm)	Particules élémentaires et microagrégats	Macro et microagrégats	Particules élémentaires

La désagrégation mécanique sous l'impact des gouttes de pluie

L'impact des gouttes de pluie peut fragmenter les agrégats et surtout détacher des particules de leur surface. Ce mécanisme intervient en général conjointement aux autres mécanismes et nécessite une pluie d'une certaine énergie variable selon les sols. Il joue un rôle prédominant à partir du moment où les sols sont saturés, du fait de la diminution de résistance mécanique des agrégats et du changement de nature des chocs lié au ralentissement de l'infiltration. L'énergie cinétique des gouttes n'est plus absorbée mais est transformée en force de cisaillement qui provoque détachement et splash (Al-Durrah et Bradford, 1982).

Cette action combinée de détachement et déplacement du splash des gouttes d'eau est probablement la raison pour laquelle on l'a souvent considéré comme le seul processus à l'origine de la battance et de l'érosion ; cependant il ne faut pas oublier le fait que pour de nombreux sols, la désagrégation et la battance peuvent intervenir, même sans impact des gouttes, sous le simple effet de l'humectation (éclatement, dispersion). De plus, il ne faut pas forcément assimiler splash et dégradation structurale car le splash peut dans certains cas déplacer des agrégats sans qu'aucune désagrégation intervienne. Les particules détachées par les gouttes sont généralement des microagrégats ou des particules élémentaires < 100 µm (Farres, 1987).

La désagrégation par gonflement différentiel

Les phénomènes de gonflement-retrait qui interviennent lors des cycles d'humectation-dessiccation des sols argileux entraînent une microfissuration des agrégats (Kheyrabi et Monnier, 1968 ; Le Bissonnais, 1990), et contribuent donc à la réduction du diamètre moyen de ceux-ci à la surface du sol avec cependant des conséquences directes moins importantes que les autres mécanismes.

La dispersion physico-chimique

La dispersion physico-chimique résulte de la réduction des forces d'attraction entre les particules colloïdales lors de l'humectation (Emerson, 1967 ; Sumner, 1992). Elle dépend de la taille et de la valence des cations présents qui peuvent former des ponts entre les particules chargées négativement. Dans les sols, cette dispersion est surtout liée à la présence de sodium échangeable qui est monovalent, alors que l'ion calcium divalent favorise plutôt la stabilité (Shainberg, 1992). La dispersion est le mécanisme de désagrégation le plus efficace car il concerne les particules élémentaires et il décuple les effets des autres mécanismes (Bresson et Boiffin, 1990).

LES PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DES SOLS QUI INFLUENCENT LA STABILITÉ STRUCTURALE

Les caractéristiques des sols les plus souvent évoquées sont la texture, la teneur en matière organique (MO), la minéralogie des argiles, les cations, les oxydes de Fe et Al, le CaCO_3 (Wischmeier et Mannering, 1969), avec de nombreuses interactions possibles entre ces paramètres dont il faut tenir compte pour l'interprétation des résultats.

Parmi ces caractéristiques, trois jouent un rôle prédominant. La première est le taux de sodium échangeable. On considère qu'à partir de 10 % de la CEC, les sols sont très sensibles à la dispersion, mais celle-ci peut intervenir dès 2 % (Emerson, 1967 ; Kazman *et al.*, 1983). Par ailleurs, la dispersion est d'autant plus importante que les argiles sont gonflantes.

Le second paramètre important est la teneur en **oxydes et hydroxydes de fer et aluminium**. Ils peuvent agir comme flocculants, en établissant des ponts entre argiles et polymères ou comme ciment après avoir précipité sous forme de gel sur les surfaces des argiles. La cohésion qui en résulte augmente la résistance à l'éclatement et à la désagrégation mécanique. Leur effet dépend du pH des sols, mais il peut induire dans certains cas des agrégats très résistants et des sols très peu érodibles (Römken *et al.*, 1977 ; Le Bissonnais et Singer, 1993).

Cependant ces deux paramètres ne concernent que relativement peu les sols de grande culture des régions tempérées d'Europe de l'ouest. Pour ces sols, c'est le plus souvent la **matière organique** qui est le paramètre déterminant de leur stabilité structurale (Monnier, 1965 ; Tisdall et Oades, 1982 ; Churchman et Tate, 1987 ; Gollany *et al.*, 1991 ; Haynes, 1993). La matière organique est un agent de liaison entre les particules minérales du sol (Chenu, 1989). D'autre part, elle peut rendre hydrophobes les surfaces des particules minérales, ce qui a pour effet de ralentir la vitesse d'humectation des agrégats et donc de réduire l'éclatement (Jouany *et al.*, 1992). L'effet de la MO dépend de l'état et de l'histoire hydrique du sol (Boiffin, 1984 ; Haynes et Swift, 1990), ce qui rend nécessaire un contrôle attentif de ces conditions pour la mesure de la stabilité. Il existe en fait différents types de MO qui agissent différemment. La litière joue un rôle physique (mulch, protection contre le splash) et peut augmenter l'activité microbologique. Les racines et champignons peuvent stabiliser les macroagrégats (Tisdall et Oades, 1982), alors que les microorganismes et leurs sécrétions augmentent la stabilité des microagrégats par des actions physico-chimiques (Chenu et Guérif, 1991 ; Roberson *et al.*, 1991).

Lorsque aucun de ces trois paramètres n'est déterminant pour la stabilité d'un sol, la texture joue certainement un rôle important et en particulier la **teneur en argile** ainsi que sa

minéralogie (Stern *et al.*, 1991). D'un point de vue chimique, il faut également considérer la teneur en CaCO_3 , mais son effet dépend de la taille de ses particules ainsi que de la présence d'argile.

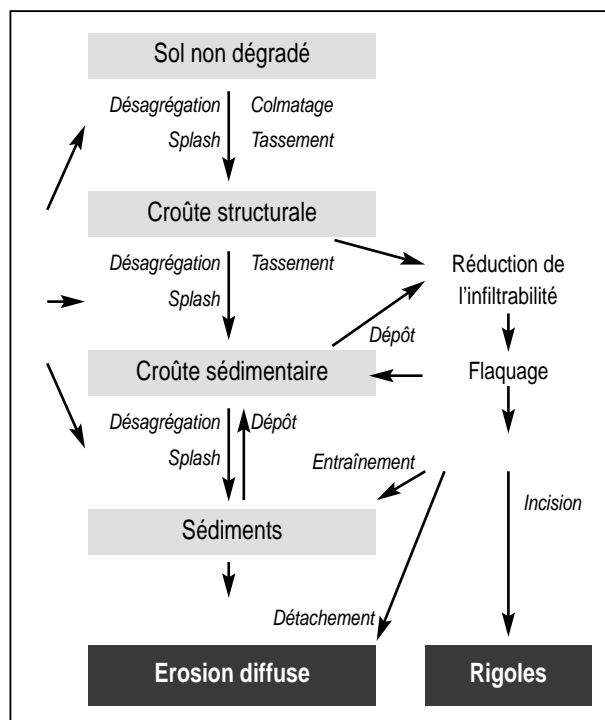
En conclusion, on rappellera la nécessité de prendre en compte les effets de seuil et les interactions entre les paramètres mentionnés ci dessus.

RELATION ENTRE LA DÉSAGRÉGATION, LA BATTANCE ET L'ÉRODIBILITÉ

L'érodibilité d'un sol peut être définie comme son aptitude intrinsèque à être détaché et transporté sous l'action des pluies et du ruissellement (on ne discutera pas ici du cas de l'érosion éolienne). Il est clair qu'une relation existe entre cette sensibilité à l'érosion et la désagrégation et la battance (De Ploey et Poesen, 1985 ; Bradford *et al.*, 1987 ; Le Bissonnais *et al.*, 1993), mais elle est complexe, multiforme et probablement difficile à mettre en équation (*figure 1*).

Figure 1 : Diagramme illustrant les relations qui existent entre la désagrégation, la battance et l'érosion.

Figure 1 : Diagram of the relationships between aggregate breakdown, crusting and erosion.



Pour une grande partie des sols cultivés les plus fertiles, qui sont souvent de texture limoneuse, limono-argileuse ou limono-sableuse, l'érosion résulte du ruissellement lié à la diminution de l'infiltrabilité consécutive à la dégradation structurale superficielle sous l'action des pluies (Moore et Singer, 1990 ; Le Bissonnais, 1990 ; Bradford et Huang, 1992). La capacité d'infiltration peut dans certains cas être réduite jusqu'à des valeurs d'environ 1 mm/h (Boiffin, 1984). Dans ces situations, la désagrégation est à l'origine de la formation des croûtes et l'érodibilité doit donc être directement fonction de la stabilité structurale. On peut distinguer deux types morphologiques de croûtes. Les croûtes structurales résultent d'une réorganisation in-situ des fragments et particules produits par éclatement et désagrégation mécanique, sans déplacements importants ni tri granulométrique. Les croûtes sédimentaires ou de dépôt résultent d'un déplacement et d'une ségrégation des particules en présence d'un excès d'eau (flaquage et ruissellement). Les mécanismes en cause sont essentiellement la dispersion et la désagrégation mécanique. Bresson et Boiffin (1990) ont montré que ces deux morphologies correspondaient à deux stades successifs dans un schéma général de l'évolution structurale sous l'action des pluies. Le rôle important joué par les fragments et particules de dimension < 100 µm dans la réduction de l'infiltrabilité a également été montré (Loch, 1989 ; Le Bissonnais *et al.*, 1989). De plus, la dimension des particules

résultant de la désagrégation détermine également leur aptitude à être transportées par le ruissellement (Hairsine et Rose, 1991). Il est donc très important que la mesure de la stabilité structurale donne une indication précise sur la distribution dimensionnelle des fragments et particules produits.

Il est cependant clair que, dans certains cas de fortes pluies, le ruissellement peut intervenir même sans la formation de croûtes et que de gros agrégats ou fragments peuvent être transportés. La mesure de la stabilité structurale n'est alors pas un bon indicateur de l'érodibilité.

LES MÉTHODES DE MESURE DE LA STABILITÉ STRUCTURALE

La coexistence de nombreuses méthodes peut s'expliquer par la multiplicité des mécanismes en cause, mais aussi par des aspects méthodologiques. Les différences entre méthodes peuvent être liées aux caractéristiques de l'échantillon soumis au test, au traitement appliqué, à la mesure du résultat ou à son mode d'expression. Par ailleurs, celui-ci peut être plus ou moins synthétique et avoir une signification physique plus ou moins directe (*tableau 2*). Les combinaisons entre tous ces paramètres sont donc nombreuses. Nous allons en examiner quelques unes, en rappelant que l'objectif du test est de don-

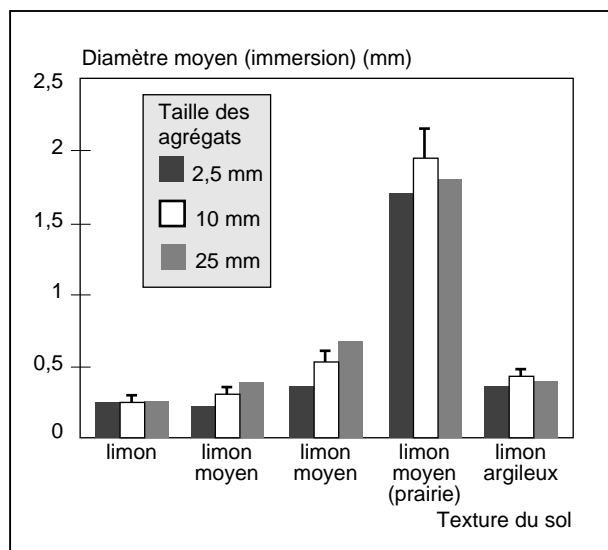
Tableau 2 : Caractéristiques de quelques méthodes classiques de mesure de la stabilité structurale des sols (plusieurs de ces méthodes utilisent différents pré-traitements).

Table 2 : Characteristics of some main methods of aggregate stability (several of these methods include various pretreatments).

Auteurs	Date	Caractéristiques de la méthode		
		Echantillon	Traitement	Expression du résultat
Yoder	1936	3-5 mm	tamissage à l'eau	MWD
Hénin et al.	1958	< 2 mm	tamissage à l'eau	% > 0,200 mm
De Leehneer et De Boodt	1959	sol entier	tamissage à l'eau	deltaMWD
Low	1967	4-5 mm	gouttes de pluie	nombre de goutte
Edwards et Bremner	1967	4-5 mm	ultrasons	taux de dispersion
Emerson	1967	3-5 mm	immersion	notation qualitative
Grieve	1980	4-5 mm	ultrasons	porosité inter-agrégats
Young	1984	2-9 mm	gouttes de pluie	MWD
Kemper et Rosenau	1986	1-2 mm	tamissage à l'eau	% > 0,250 mm
Churchman et Tate	1987	2-3,4 mm	tamissage à l'eau	MWD
Farres	1987	5-8 mm	gouttes de pluie	temps jusqu'à rupture
Loch	1989	sol entier	pluie simulée	% < 0,125 mm
Pojasok et Kay	1990	1-2 mm	tamissage à l'eau	% > 0,250 mm

Figure 2 : Influence du calibre initial des agrégats sur l'intensité de l'éclatement pour différents sols limoneux du Nord de la France.

Figure 2 : Effect of initial aggregate size on slaking for various silty and loamy soils from northern France.



ner une description et un classement du comportement structural des sols sous l'action de l'eau. Il doit être facile à réaliser, reproductible et suffisamment précis. Il doit également rendre compte des différentes conditions que l'on peut rencontrer à la surface du sol et être utilisable avec la gamme la plus large possible de sols.

Caractéristiques de l'échantillon soumis au test

Les conditions au champ lors du prélèvement peuvent être très variables, et il est nécessaire pour établir des comparaisons de respecter une standardisation de l'état physique de l'échantillon avant de le soumettre au test. Les points cruciaux sont l'état hydrique et l'état structural du sol (Truman *et al.*, 1990 ; Le Bissonnais et Singer, 1992, Haynes, 1993). On cherchera à prélever au maximum les échantillons dans les mêmes conditions de terrain en évitant les conditions extrêmes (gel, sol saturés ou très secs). On amènera tous les échantillons à un état standard par un séchage à l'air, tout en sachant que l'histoire hydrique et culturale de l'échantillon peut toujours avoir une influence sur le résultat du test (Kemper et Rosenau, 1984). En ce qui concerne l'état structural, certains tests utilisent l'ensemble de l'échantillon sans préparation spécifique et comparent la distribution dimensionnelle des fragments avant et après le test (De Leenheer et De Boodt, 1959), mais la plu-

part utilisent une fraction spécifique (par exemple < 2 mm pour Hénin *et al.* en 1958), ou des agrégats calibrés; ce qui permet la comparaison de sols dans des états initialement très différents. Cette dernière solution semble préférable car elle évite d'intégrer une désagrégation préalable incontrôlée de l'échantillon. Cependant, on doit veiller à ce que la fraction soumise au test soit le plus possible représentative de l'ensemble du matériau. On utilise le plus souvent des agrégats situés dans la gamme de 1 à 10 mm de diamètre. Il semble que, dans cette gamme, le résultat d'un test d'immersion est peut sensible au calibre initial (figure 2). Il est parfois difficile de collecter suffisamment d'agrégats de ce calibre dans des sols très fragiles, mais dans ce cas la stabilité est connue d'avance!

Le traitement appliqué à l'échantillon

Les traitements appliqués sont très variables, depuis l'immersion dans l'eau suivie ou non d'une agitation mécanique ou ultrasonique (Yoder, 1936 ; Edwards et Bremner, 1967), jusqu'à l'application de gouttes calibrées (Low, 1967; Young, 1984). Dans la majorité des cas, le traitement consiste en une combinaison d'une humectation et d'une action mécanique, avec des niveaux d'énergie très variables. Les différents niveaux d'énergie employés dans les tests permettent d'évaluer la stabilité des différents niveaux de structuration des matériaux. Certains auteurs distinguent les tests de stabilité d'agrégats (comportement macroscopique) des tests de dispersion (comportement microscopique) qui impliquent l'emploi d'un niveau d'énergie plus élevé (Quirk et Murray, 1991). Cependant, on peut considérer que le comportement des matériaux correspond toujours à une combinaison des deux niveaux, leur part respective étant fonction de la nature des agents de liaison dominants (Tisdall et Oades, 1982).

Il semble donc nécessaire de combiner différentes procédures pour pouvoir comparer des sols variés et rendre compte de conditions de terrain diversifiées. Il est, dans tous les cas, prudent de confronter les résultats à des observations de terrain.

La mesure de la désagrégation et l'expression des résultats

La mesure de la désagrégation doit être le plus possible distincte du traitement lui-même. Elle consiste souvent en un tamisage sous l'eau et un calcul de la fraction de matériau restant de dimension supérieure à un seuil arbitraire (Yoder, 1936 ; Hénin *et al.*, 1958). Le problème est que ce tamisage est destructif et qu'il ne permet pas de classer entre eux des sols très fragiles. D'autres méthodes utilisent une classification qualitative parfois très pertinente (Emerson, 1967), ou une mesure indirecte comme le nombre de goutte nécessaire pour briser un agrégat posé sur un tamis (Low, 1967), ou encore la turbidité d'une suspension (Pojazok et Kay, 1990).

L'expression des résultats du test dépend de la méthode de mesure, et elle peut être plus ou moins synthétique. Lorsque

l'on mesure la distribution de la taille des particules en plusieurs classes, on peut ensuite calculer le diamètre moyen pondéré (MWD pour Mean Weight Diameter des anglo-saxons) (Kemper et Rosenau, 1986) ou le diamètre médian (D50) (Truman *et al.*, 1990). L'intérêt de ces indices est qu'ils sont peu sensibles au nombre et aux limites des classes retenues.

Comparaison entre les résultats des différents tests et l'érosion

De nombreux articles ont cherché à comparer les résultats de différents tests entre eux et avec l'érosion. Il existe le plus souvent de bonnes corrélations mais les gammes de variation sont parfois très différentes.

Pauwels *et al.* (1976) ont comparé les résultats de plusieurs tests avec l'érosion mesurée sur des petites parcelles expérimentales sous des pluies simulées. Parmi les tests comparés, seul celui de Hénin *et al.* (1958) était corrélé avec les pertes en terre. La méthode de De Leenheer et De Boodt (1959) était valable uniquement pour des sols de même classe de texture. Chisci *et al.* (1989), ont mesuré la stabilité de 13 sols italiens avec différentes méthodes et ont observé que les indices les plus simples pouvaient être utilisés du fait des corrélations qui existaient entre tous les résultats. Matkin et Smart (1987), avec 70 échantillons, ont observé à la fois des corrélations et des différences systématiques entre les différents tests, et recommandent l'utilisation de différents protocoles en fonction des sols.

Ces comparaisons permettent de dégager et de retenir les aspects les plus intéressants des différents tests et ceux qui leur sont communs.

PROPOSITION POUR UN CADRE MÉTHODOLOGIQUE COMMUN DE MESURE DE LA STABILITÉ STRUCTURALE

Description de la méthode

L'objectif de la méthode proposée est de donner une description réaliste du comportement des matériaux-sols soumis à l'action de la pluie, et de permettre un classement relatif des matériaux vis-à-vis de ce comportement.

La méthodologie est largement inspirée du test classique de Hénin *et al.* (1958), mais elle intègre également certains aspects d'autres méthodes (Yoder, 1936 ; Grieve, 1980 ; Kemper et Rosenau, 1986) ainsi que les résultats des dernières recherches réalisées dans ce domaine à l'INRA. Les trois tests proposés ont pour objectif de rendre compte de ce comportement dans les différentes conditions climatiques, hydriques et structurales que l'on peut rencontrer à la surface

du sol. Les traitements ont été choisis dans l'esprit suivant : séparer les différents mécanismes les uns des autres; bien séparer la phase de désagrégation de la mesure du résultat de cette désagrégation ; exprimer les résultats sous une forme explicite et facilement interprétable par rapport au comportement physique in-situ. Dans la continuité de la méthode de Hénin *et al.* (1958), la méthode proposée fait une place importante à l'utilisation de l'éthanol qui permet, d'une part, de bien contrôler la désagrégation et, d'autre part, limite la réaggrégation des particules durant le séchage.

Préparation de l'échantillon

Après prélèvement au champ dans des conditions d'humidité modérées, par exemple les conditions permettant la préparation des lits de semence, l'échantillon doit être ramené au laboratoire dans une boîte rigide et rapidement mis à sécher à l'air dans une atmosphère tempérée et ventilée. Durant cette période les plus grosses mottes peuvent être périodiquement brisées à la main pour produire, dans les conditions d'humidité optimales, le maximum d'agrégats de taille millimétrique. L'échantillon est ensuite passé au tamis et les agrégats de 3 à 5 mm sont sélectionnés pour les tests. Juste avant le test les agrégats sont mis à l'étuve à 40°C pendant 24 h pour supprimer d'éventuelles variations d'humidité et uniformiser les conditions de traitement.

Traitement 1: humectation rapide par immersion

Ce traitement permet de tester le comportement de matériaux secs soumis à des humectations brutales, du type irrigation par submersion, ou des pluies intenses (orages de printemps et été), bien que dans ce dernier cas le choc des gouttes joue également un rôle.

- Peser 5 g d'agrégats de 3-5 mm (poids initial),
- Verser 50 ml d'eau permutée dans un bécher,
- Verser les agrégats dans le bécher,
- Laisser reposer 10 mn (observation visuelle de l'éclatement),
- Évacuer l'excès d'eau (par pipetage),
- Transférer les agrégats sur un tamis de 50 µm immergé dans de l'éthanol (en s'aidant d'une pissette d'éthanol).

Traitement 2 : humectation lente par capillarité

Ce traitement permet de tester le comportement de matériaux secs ou peu humides soumis à des pluies modérées. Il est moins destructif que l'humectation rapide et permet donc de discriminer des sols très peu stables.

- Peser 5 g d'agrégats de 3-5 mm (poids initial),
- Disposer les agrégats sur un papier "filtre" de type kleenex deux épaisseurs posé sur une table à succion avec une dépression de 3 cm,
- Attendre la réhumectation des agrégats par capillarité (au

moins 30 mn),

- Transférer les agrégats sur le tamis de 50 μm immergé dans l'éthanol (en s'aidant d'une pissette d'éthanol).

Traitement 3 : désagrégation mécanique par agitation après réhumectation

Ce traitement permet de tester le comportement de matériaux humides (périodes hivernales humides). La réhumectation préalable a pour objectif de tester la cohésion des matériaux à l'état humide indépendamment de l'éclatement. Cette réhumectation sans éclatement peut être réalisée soit par réhumectation sous vide soit par l'utilisation d'un liquide non polaire et miscible à l'eau. L'éthanol convient très bien dans ce cas (Hénin *et al.*, 1958).

- Immerger les agrégats dans l'éthanol pendant 30 mn,
- Évacuer l'excès d'éthanol,
- Verser 50 ml d'eau permutée dans un erlenmeyer,
- Transférer les agrégats dans l'erlenmeyer (en s'aidant d'une pissette d'eau permutée),
- Ajuster le niveau d'eau permutée à 250 ml (en versant avec la pissette sur le bord de l'erlenmeyer),
- Agiter manuellement l'erlenmeyer en effectuant 10 retournements (on peut envisager de réaliser cette opération mécaniquement avec un agitateur adapté),
- Laisser reposer 30 mn. (observation visuelle de la décantation),
- Évacuer l'excès d'eau (par pipetage),
- Transférer les agrégats sur le tamis de 50 μm immergé dans l'éthanol (en s'aidant de la pissette d'éthanol).

Mesure de la distribution de la taille de particules résultantes

L'objectif de cette partie du test est de décrire le résultat de la désagrégation en évitant au maximum toute désagrégation supplémentaire. La procédure est identique pour les trois traitements et elle se fait en deux temps :

ζ la première étape consiste à appliquer cinq fois un mouvement hélicoïdale (avec l'appareil de Hénin ou de Yoder) au tamis de 50 μm immergé dans l'éthanol sur lequel on a disposé l'échantillon désagrégé, afin d'effectuer une première séparation granulométrique. On récupère ensuite la fraction > 50 μm dans une coupelle en verre (en s'aidant de la pissette d'éthanol) et on fait sécher à 105°C pendant 48 H. On peut également réaliser cette opération de tamisage dans l'eau si on ne dispose pas d'éthanol en quantité suffisante, mais dans ce cas une désagrégation supplémentaire risque d'intervenir.

ζ Cette fraction > 50 μm est ensuite passée sur une colonne de 6 tamis de 2000 μm , 1000 μm , 500 μm , 200 μm , 100 μm , 50 μm . La fraction < 50 μm est obtenue par déduction par rapport au poids initial et on peut ensuite calculer le % de chaque

fraction par rapport au poids initial. On calcule ensuite le diamètre moyen pondéral après désagrégation (MWD) (valeur comprise entre 0.025 mm et 4 mm).

Le résultat s'exprime donc soit sous la forme d'histogrammes représentant la distribution de la taille des particules pour chacun des tests ou bien sous forme de diamètres moyens pondéraux (MWD). On peut également faire la moyenne des 3 MWD, pour avoir une valeur synthétique, ou bien calculer des rapports entre les MWD des différents tests, pour déterminer la part respective de chacun des mécanismes.

Traitement supplémentaire

Les sols affectés par la dispersion physico-chimique présentent en général la même distribution de taille des particules pour les trois traitements avec une fraction < 50 μm prédominante. Dans ce cas, il peut être intéressant de mesurer plus précisément le taux de dispersion du matériau sur la suspension obtenue pour l'un des trois tests en utilisant la méthode de la pipette ou la turbidimétrie (Pojazok et Kay, 1990; Haynes, 1993).

Interprétation des résultats

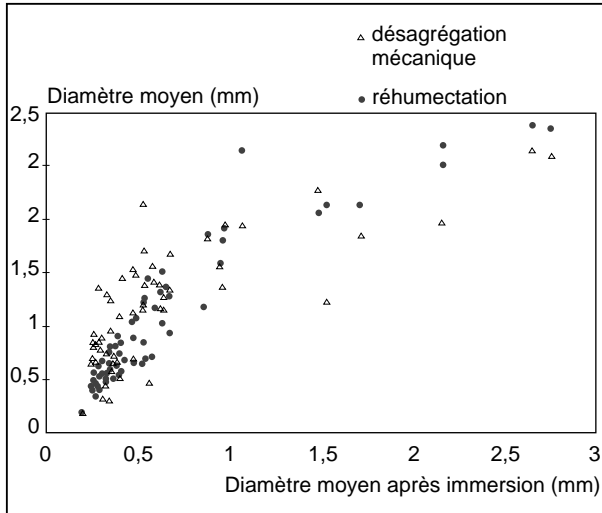
Les résultats de ces tests peuvent facilement être comparés avec ceux obtenus par d'autres méthodes (Kemper et Rosenau, 1986 ; Hénin *et al.*, 1958), et bien qu'il existe quelques différences de protocole, un équivalent des indices AgE et AgA (taux d'agrégats > 200 μm après prétraitement eau et éthanol dans la méthode Hénin *et al.*, 1958) peut être calculé à partir de la distribution de la taille des particules. On peut également directement comparer les valeurs des MWD des trois tests avec les MWD obtenus par différents auteurs (Haynes, 1993) avec la méthode Yoder modifiée.

Comme chaque traitement correspond à des conditions spécifiques en terme de condition hydrique, de vitesse d'humectation et d'énergie appliquée, il est possible d'utiliser soit le résultat de l'un des traitements, soit une combinaison des trois traitements, selon le contexte de l'étude. Bien que les résultats des trois traitements soient souvent corrélés entre eux (*figure 3*), des classements différents de série de sols indiquent que ceux-ci se comportent de manière différente les uns par rapport aux autres selon les conditions. De plus, à cause des effets de seuil, il est possible que seul l'un des traitements permette une bonne ségrégation des échantillons au sein d'une série de sols donnés. La *figure 3* montre que pour les sols les plus stables, la discrimination est meilleure avec le traitement par immersion, alors que dans la gamme de stabilité plus faible, les deux autres tests donnent une meilleure discrimination. (*tableau 3*)

Bien que le calcul des MWD soit le meilleur moyen de faire facilement des comparaisons entre sols (*tableau 3*), il est parfois intéressant de comparer certaines fractions pour des interprétations spécifiques. Par exemple, la limite de 250 μm

Figure 3 : Résultats des tests de réhumectation et de désagrégation mécanique par rapport aux tests d'immersion, pour différents sols cultivés de France, Afrique et Amérique du Sud.

Figure 3 : Relationship between the results of the three treatments for various cultivated soils from France, Africa and South America.



est souvent considérée comme la limite entre des micro- et macro-agrégats ayant des propriétés différentes (Tisdall et Oades, 1982). De plus, la transportabilité des particules ou la porosité des croûtes peut, dans certains cas, être déduite de la taille des particules.

EXEMPLE D'APPLICATION DE LA MÉTHODE : ÉTUDE DE L'EFFET D'UN CONDITIONNEUR DE SOL SUR LA STABILITÉ STRUCTURALE

Les conditionneurs de sol sont des substances d'origine organique ou minérale (souvent de gros polymères de synthèse) agissant, à faible dose, sur les propriétés physiques des sols. Ces produits peuvent intervenir sur la stabilité structurale et/ou sur les propriétés d'hydrophobie-hydrophilie (De Boodt, 1972 ; Theng, 1979).

Le test de stabilité structurale proposé ici a été mis en œuvre sur un conditionneur de sol appelé WAC, (ATOCHEM). Ce produit, un polymère d'aluminium, s'est révélé efficace sur le terrain pour retarder la formation des croûtes de battance, dans certaines conditions (Le Souder *et al.*, 1990, 1991). Son action, bien visible à la surface du sol et dont les conséquences sur le retard du ruissellement ne sont pas négligeables, porte surtout sur le maintien d'une structure motteuse. Le test de stabilité structurale, avec ses 3 composantes, va permettre d'une part de quantifier l'effet de ce conditionneur, et d'autre part de tenter d'expliquer son mode d'action, en particulier sur quel mécanisme de désagrégation il intervient le plus significativement.

Préparation des échantillons

Les échantillons de départ sont constitués d'agréats calibrés, de 3 à 4 mm dans le cadre de cette expérimentation. Les agrégats ont été préparés selon la méthodologie proposée. Ils proviennent de la couche labourée d'un sol limoneux (19 % d'argile) du bassin parisien. Le conditionneur (liquide miscible à l'eau) a été appliqué en tentant de reproduire des applications de terrain. Il a été pulvérisé, à l'aide d'un micro-pulvérisateur, sur un lit d'agréats secs à l'air. L'influence de la dose d'application a été étudiée : trois doses ont été testées, pour une

Tableau 3 : Classes de stabilité, battance et érosion en fonction de valeurs du diamètre moyen pondéral après désagrégation (MWD).

Table 3 : Classes of stability, crustability and erosion from MWD values.

MWD	Stabilité	Battance	Ruissellement et érosion diffuse
< 0.4 mm	Très instable	Systématique	Risque important et permanent en toutes conditions topographiques
0,4 - 0,8 mm	Instable	Très fréquente	Risque fréquent en toute situation
0,8 - 1,3 mm	Moyennement stable	Fréquente	Risque variable en fonction des paramètres climatiques et topographiques
1,3 - 2,0 mm	Stable	Occasionnelle	Risque limité
> 2,0 mm	Très stable	Très rare	Risque très faible

même dilution dans l'eau du conditionneur (rapport 1/1) soit 250 l/ha, 500 l/ha, 1 000 l/ha.

Effet du conditionneur sur la désagrégation par éclatement (immersion rapide dans l'eau)

Sur la figure 4 on peut tout d'abord noter que la distribution granulométrique obtenue pour le témoin est caractérisée par une forte proportion des particules les plus fines, avec 60 % de la distribution inférieure à 0,2 mm. Il s'agit bien d'un sol peu stable.

Lorsque les agrégats ont été préalablement traités à la dose 250 l/ha, la distribution granulométrique se trouve décalée: le taux d'éléments fins (ou particules) inférieurs à 0,2 mm passe à 40 %, alors que le taux d'éléments grossiers (ou agrégats) supérieurs à 2 mm passe de 2 à 10 % avec une augmentation significative. Aux doses supérieures, ce taux d'agrégats supérieurs à 2 mm augmente très fortement atteignant près de 60 % avec le traitement 1000 l/ha. Une réduction de toutes les classes inférieures à 1 mm s'effectue simultanément.

La réalisation de ce test montre que le conditionneur permet de produire des fragments de plus grande taille mais qui ne sont pas forcément des agrégats conservés. Dans le cas du traitement 250 l/ha, la forme en calotte des plus gros fragments fait supposer que seule une zone ayant été directement en contact avec le conditionneur est protégée. Dans le cas des doses les plus fortes, le produit appliqué, en recouvrant

presque toute la périphérie des agrégats, permettrait leur protection quasi-totale.

Effet du conditionneur sur la désagrégation par microfissuration (réhumectation lente par capillarité)

La distribution granulométrique résultante (figure 5) du témoin se caractérise tout d'abord par l'importance des classes de taille intermédiaire : 75 % des produits sont compris entre 0,2 et 1 mm.

En ce qui concerne les échantillons ayant été préalablement traités à la dose 250 l/ha, les fractions les plus grossières sont fortement augmentées : le taux d'agrégats résultant supérieurs à 2 mm passe de 4 % pour les témoins à plus de 20 % sur les échantillons traités. Ce dernier taux augmente avec la dose de conditionneur apportée, jusqu'à atteindre plus de 90 % avec le traitement 1 000 l/ha. Quel que soit le traitement reçu par ces échantillons, la fraction grossière obtenue (< 2 mm) est constituée ici par des agrégats conservés et non par de gros fragments.

Dans le cas de ce traitement avec un plus faible gradient hydrique apporté aux agrégats et des possibilités d'échappement de l'air plus importantes, le conditionneur protège de façon très efficace les agrégats, en étendant cette protection non seulement à une calotte périphérique de l'agrégat mais

Figure 4 : Influence de la dose d'application du conditionneur de sol sur la désagrégation pour le test d'immersion.

Figure 4 : Effect of conditioner application rate on breakdown after fast wetting.

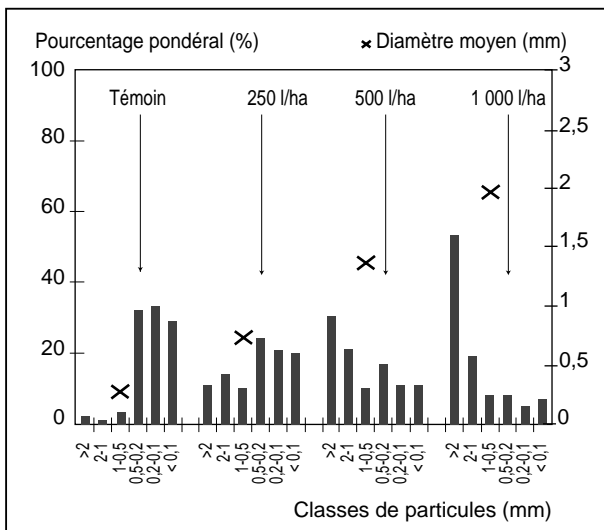
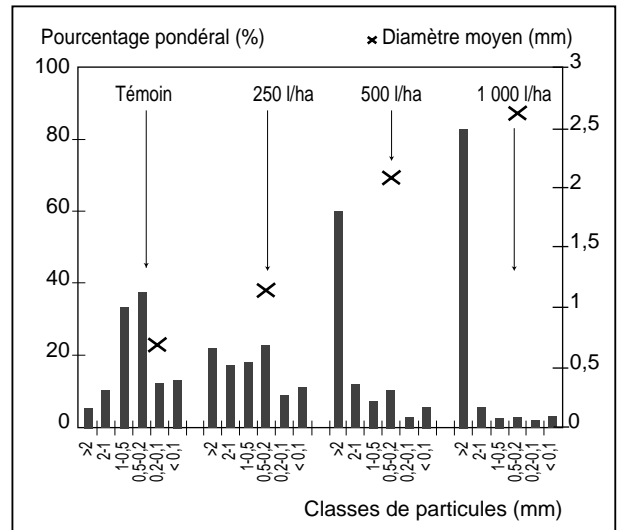


Figure 5: Influence de la dose d'application du conditionneur de sol sur la désagrégation pour le test de réhumectation par capillarité.

Figure 5 : Effect of conditioner application rate on breakdown after slow wetting.



aux agrégats entiers.

Effet du conditionneur sur la désagrégation mécanique

L'histogramme des échantillons témoins est caractérisé ici par deux fractions dominantes : la fraction inférieure à 0,1 mm, avec 63 % et la fraction supérieure à 2 mm avec 22 %. Les fractions intermédiaires ne sont quasiment pas représentées (figure 6).

Après traitement à la dose 250 l/ha, le taux d'agrégats résultants supérieurs à 2 mm est fortement augmenté jusqu'à 43 % de la distribution aux dépens des classes les plus fines. Le taux d'agrégats supérieurs à 2 mm augmente peu en passant à la dose 500 l/ha, avec 49 % de la distribution, et plus nettement jusqu'à 72 % de la distribution avec le traitement à 1 000 l/ha.

Pour ce mode de désagrégation et quel que soit le traitement reçu au départ par les agrégats initiaux, les fractions les plus grossières sont constituées d'agrégats arrondis, lissés par l'agitation rotative. A l'opposé, les fractions les plus fines sont constituées de grains de quartz brillants bien propres, produits par l'usure de la périphérie des agrégats. Le conditionneur permet ainsi d'augmenter la stabilité des agrégats contre la désagrégation mécanique. Or le test employé ne met en jeu qu'un seul facteur de la stabilité qui est la cohésion à l'état humide du matériau. Nous pouvons donc conclure ici de l'effet

favorable du conditionneur sur l'augmentation de celle-ci.

Synthèse

L'ensemble de ces résultats montre que le conditionneur permet d'augmenter la résistance des agrégats vis-à-vis des trois tests de désagrégation, sans discrimination. Cet effet est essentiellement dû à la protection de la périphérie de l'agrégat, ayant directement reçu le conditionneur lors de sa pulvérisation. Aussi la protection par le conditionneur est d'autant plus efficace qu'il recouvre une grande partie des agrégats. Il est difficile de juger d'un effet plus important sur tel mécanisme plutôt que sur un autre.

Le conditionneur agit tout d'abord en augmentant la cohésion en périphérie des agrégats et en limitant ainsi l'usure exercée lors du test d'agitation mécanique. De plus, il permet de ralentir la désagrégation par éclatement. Deux hypothèses peuvent être formulées quant à une éventuelle action sur un ralentissement de l'entrée de l'eau dans l'agrégat. C'est d'une part une réduction de la taille de la porosité d'accès à l'eau en périphérie de ces agrégats et d'autre part une hydrophobie plus importante des parois de ces pores d'accès. D'autres expérimentations, à une échelle plus fine que l'agrégats; doivent être réalisées pour tester ces hypothèses.

Globalement, l'étude de l'effet du conditionneur sur la stabilité structurale a mis en évidence la grande sensibilité de ce test, les effets de dose ayant été particulièrement bien révélés. En outre, il permet de prévoir (ou confirmer dans le cas présent) les conditions climatiques dans lesquelles le conditionneur serait efficace : le WAC permettrait de maintenir la structure motteuse du sol aussi bien sur sol sec lors de violentes pluies (cas des orages de printemps) que sur sol humide (cas des pluies hivernales) avec peut-être une action plus prononcée dans le deuxième cas. Une discussion plus détaillée du rôle de ce conditionneur sur la réduction de la battance sous pluie a été présentée par ailleurs (Le Souder *et al.*, 1990, 1991).

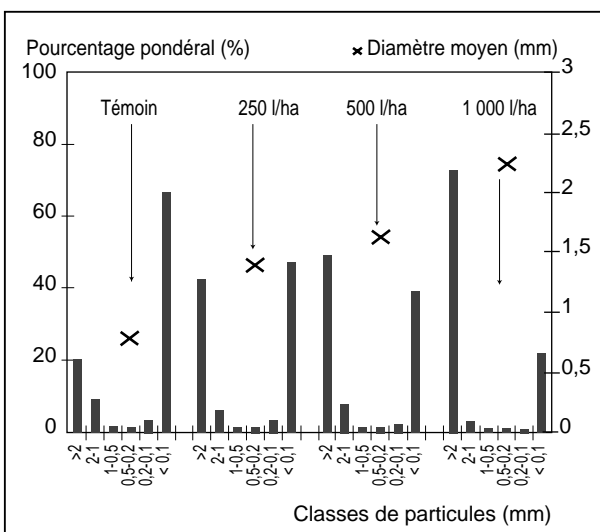
D'autres applications de cette méthode dans un but de comparaison de matériaux dans des contextes très variés ont également montré les bonnes relations existant entre les résultats des tests et le ruissellement et l'érosion mesurés sous pluie (Amezketta *et al.*, 1995; Le Bissonnais *et al.*, 1995).

CONCLUSION

Du fait du rôle des phénomènes de désagrégation dans la formation des croûtes et le déclenchement de l'érosion, il est raisonnable de penser que la mesure de la stabilité structurale

Figure 6 : Influence de la dose d'application du conditionneur de sol sur la désagrégation pour le test de désagrégation mécanique.

Figure 6 : Effect of conditioner application rate on breakdown



avec une méthode adaptée puisse fournir une bonne estimation de la sensibilité à la battance et de l'érodibilité des sols.

Le cadre méthodologique proposé tient compte des différents mécanismes de la désagrégation et des différents paramètres physiques et physico-chimiques de cette désagrégation et de la battance et de la sensibilité à l'érosion qui peuvent en résulter. Il intègre différentes méthodes éprouvées, dans une série de trois traitements complémentaires. L'exemple présenté d'application de cette méthode dans un cas particulier illustre l'intérêt de l'utilisation des trois traitements et de la description de la taille des particules résultantes.

Il faut cependant garder en mémoire que la battance et l'érosion dépendent aussi d'autres paramètres que la stabilité structurale, comme le couvert végétal ou les variations climatiques. L'objectif d'un test est seulement de fournir une référence de base sur le comportement d'un sol dans des conditions spécifiques, et de permettre des comparaisons entre sols ou l'étude de l'effet d'un paramètre particulier.

BIBLIOGRAPHIE

- Al-durrah M. M. et Bradford J. M., 1982 - The mechanism of raindrop splash on soil surface. *Soil Science Society of America Journal*, 46, 1086-1090.
- Amezketta E., Singer M. J. et Le Bissonnais Y., 1995 - Testing a new procedure for measuring wet aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal*, 59, à paraître.
- Boiffin J. 1984 - La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse de docteur-ingénieur. INA-PG, 320 p.
- Bradford J. M. et Huang C., 1992 - Mechanisms of crust formation : physical components. In: *Advance in Soil Science. Soil crusting: physical and chemical processes*. M. E. Sumner and B. A. Stewart (Ed). 55-72. Lewis.
- Bradford J. M., Ferris J. E. et Remley P. A., 1987 - Interrill soil erosion processes : Relationship of splash detachment to soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 51, 1571-1575.
- Bresson L-M. et Boiffin J., 1990 - Morphological characterization of soil crust development stages on an experimental field. *Geoderma*, 47, 301-325.
- Bryan R. B., 1968 - The development, use and efficiency of indices of soil erodibility. *Geoderma*, 2, 5-26.
- Chenu C., 1989 - Influence of a fungal polysaccharide, scleroglucan, on clay microstructures. *Soil Biology and Biochemistry*, 21, 299-305.
- Chenu C. et Guéris J., 1991 - Mechanical strength of clay minerals as influenced by an adsorbed polysaccharide. *Soil Science Society of America Journal*, 55, 1076-1080.
- Chisci G., Bazzoffi P. et Mbagwu J. S. C., 1989 - Comparison of aggregate stability indices for soil classification and assessment of soil management practices. *Soil Technology*, 2, 113-133.
- Churchman G. J. et Tate K. R., 1987 - Stability of aggregates of different size grades in allophanic soils from volcanic ash in New Zealand. *Journal of Soil Science*, 38, 19-27.
- De Boodt M., 1972 - Improvement of soil structure by chemical means. In: *Optimizing the soil physical environment toward greater crop yield*. Hillel (Ed), 43-55.
- De Leenheer L. et De Boodt M., 1959 - Determination of aggregate stability by the change in mean weight diameter. *Proceedings of the International Symposium on Soil Structure, Gent, Mededelingen van de Landbouwhogenschol*, 24, 290-300.
- De Ploey J. et Poesen J., 1985 - Aggregate stability, runoff generation and interrill erosion. In: *Geomorphology and Soils*. Richards K. S., Arnett R. R., Ellis S. (Ed.). Allen et Unwin. p. 99-120.
- Edwards A. P. et Bremner J. M., 1967 - Dispersion of soil particles by sonic vibration. *Journal of Soil Science*, 18, 47-63.
- Emerson W. W., 1967 - A classification of soil aggregates based on their coherence in water. *Australian Journal of Soil Research*, 5, 47-57.
- Farres P. J., 1987 - The dynamics of rainsplash erosion and the role of soil aggregate stability. *Catena*, 14, 119-130.
- Gollany H. T., Schumacher T. E., Evenson P. D., Lindstrom M. J. et Lemme G. D., 1991 - Aggregate stability of an eroded and desurfaced Typic Argiustoll. *Soil Science Society of America Journal*, 55, 811-816.
- Grieve I. C., 1980 - the magnitude and significance of soil structural stability declines under cereal cropping. *Catena*, 7, 79-85.
- Hairsine P. B. et Rose C. W., 1991 - Rainfall detachment and deposition, sediment transport in the absence of flow driven processes. *Soil Science Society of America Journal*, 55, 320-324.
- Haynes R. J., 1993 - Effect of sample pretreatment on aggregate stability measured by wet sieving or turbidimetry on soils of different cropping history. *Journal of Soil Science*, 44, 261-270.
- Haynes R. J. et Swift R. S., 1990 - Stability of soil aggregates in relation to organic constituents and soil water content. *Journal of Soil Science*, 41, 73-83.

- Hélin S., Monnier G. et Combeau A., 1958 - Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Annales Agronomiques*, 9, 73-92.
- Jouany C., Chenu C. et Chassin P., 1992 - Détermination de la mouillabilité des constituants du sol à partir de mesures d'angles de contacts : revue bibliographique. *Science du Sol*, 30, 33-47.
- Kazman Z., Shainberg I. et Gal M., 1983 - Effect of low level of exchangeable sodium and applied phosphogypsum on the infiltration rate of various soils. *Soil Science*, 135, 184-192.
- Kemper W. D. et 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. et Rosenau R. C., 1986 - Aggregate stability and size distribution. In: Klute (Ed.) *Methods of soil analysis, part 1. Agronomy nomographs n°9*, A.S.A. Madison.
- Kheyrabi D. et Monnier G., 1968 - Étude expérimentale de l'influence de la composition granulométrique des terres sur leur stabilité structurale. *Annales Agronomiques*, 19, 129-152.
- Le Bissonnais Y., 1988 - Analyse des mécanismes de désagrégation et de la mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies. Thèse de Doctorat, Univ. d'Orléans, 225p.
- Le Bissonnais Y., 1990 - Experimental study and modelling of soil surface crusting processes. In: *Catena supplement 17: Soil Erosion-Experiments and models*. R. B. Bryan (Ed), 13-28.
- Le Bissonnais Y., Bruand A. et Jamagne M., 1989 - Laboratory experimental study of soil crusting : relation between aggregates breakdown and crust structure. *Catena*, 16, 377-392.
- Le Bissonnais Y. et Singer M., 1992 - Crusting, runoff and erosion response to soil water content and successive rainfalls. *Soil Science Society of America Journal*, 56, 1898-1903.
- Le Bissonnais Y.; Singer M. J., Bradford J., 1993 - Assessment of soil erodibility: the relationship between soil properties, erosion processes and susceptibility to erosion. In: *Farm land erosion in temperate plains environment and hills*. Wicherek (Ed), Elsevier, 87-96.
- Le Bissonnais Y. et Singer M. J., 1993 - Seal formation, runoff and interrill erosion from 17 California soils. *Soil Science Society of America Journal*, 57, 224-229.
- Le Bissonnais Y., Renaux B. et Delouche H., 1995 - Interactions between soil properties and moisture content in crust formation, runoff and interrill erosion from tilled loess soils. *Catena*, 24, à paraître.
- Le Souder C., Le Bissonnais Y., Robert M., Bresson L.-M., 1990 - Prevention of crust formation with a mineral conditioner. In: *Soil micromorphology*, Douglas (Ed), 81-88.
- Le Souder C., Le Bissonnais Y. et Robert M., 1991 - Influence of a mineral conditioner on the mechanisms of disaggregation and sealing of a soil surface. *Soil Science*, 152, 395-402.
- Loch R. J., 1989 - Aggregate breakdown under rain : its measurement and interpretation. PhD Thesis, Univ. of New England, Australia.
- Low A. J., 1967 - Measurement of stability of moist soil aggregates to falling waterdrops according to Low. In: *West-European methods for soil structure determination*. Gent, 51-78.
- Matkin E. A. et Smart P., 1987 - A comparison of tests of soil structural stability. *Journal of Soil Science*, 38, 123-135.
- Monnier G., 1965 - Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. Thèse, Paris.
- Moore D. C. et Singer M. J., 1990 - Crust formation effect on soil erosion processes. *Soil Science Society of America Journal*, 54, 1117-1123.
- Pauwels J. M., Gabriels D. et Eeckout G., 1976 - Evaluation of different criteria to assess the stability of the soil surface. *Mededelingen fak. Landbouww. Rijkuniv. Gent*, 41, 135-139.
- Pojazok T. et Kay B. D., 1990 - Assessment of a combination of wet sieving and turbidimetry to characterize soil structural stability. *Canadian Journal of soil Science*, 70, 33-42.
- Quirk J. P. et Murray R. S., 1991 - Towards a model for soil structural behaviour. *Australian Journal of Soil Research*, 29, 829-867.
- Roberson E. B., Sarig S. et Firestone M. K., 1991 - Cover crop management of polysaccharides-mediated aggregation in an orchard soil. *Soil Science Society of America Journal*, 55, 734-739.
- Römkens M. J. M., Roth C. B. et Nelson D. W., 1977 - Erodibility of selected clay subsoils in relation to physical and chemical properties. *Soil Science Society of America Journal*, 41, 954-960.
- Shainberg I., 1992 - Chemical and mineralogical components of crusting. In: *Advance in Soil Science. Soil crusting: physical and chemical processes*. M. E. Sumner and B. A. Stewart (Ed). 33-54. Lewis.
- Stern R., Ben-hur M. et Shainberg I., 1991 - Clay mineralogy effect on rain infiltration, seal formation et soil losses. *Soil Science*, 152, 455-462.
- Sumner M. E., 1992 - The electrical double layer and clay dispersion. In: *Advance in Soil Science. Soil crusting: physical and chemical processes*. M. E. Sumner and B. A. Stewart (Ed). Lewis.
- Theng B. K. G., 1979 - Formation and properties of clay-polymer complexes. In: *Development in soil science*, 9, Elsevier.
- Tisdall J. M. et Oades J. M., 1982 - Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 33, 141-163.
- Truman C. C., Bradford J. M. et Ferris J. E., 1990 - Antecedent water content and rainfall energy influence on soil aggregates breakdown. *Soil Science Society of America Journal*, 54, 1385-1392.
- Wischmeier W. H. et Mannering L. V., 1969 - Relation of soil properties to its erodibility. *Soil Science Society of America Proceedings*, 33, 131-137.
- Yoder R. E., 1936 - A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *Journal of American Society of Agronomy*, 28, 337-351.
- Young R. A., 1984 - A method of measuring aggregate stability under water-drop impact. *Transaction of the American Society of Agricultural Engineers*, 27, 1351-1353.