

SCIENCE DU SOL

Comportement d'agrégats terreux soumis à l'action de l'eau : analyse des mécanismes de désagrégation

Yves Le BISSONNAIS

I.N.R.A., Service d'Etude des Sols et de la Carte Pédologique de France, Centre de Recherches d'Orléans, Ardon, F 45160 Olivet

RÉSUMÉ

Les mécanismes élémentaires de désagrégation sont étudiés à partir de l'analyse du comportement d'agrégats de différents sols limoneux, lors de leur immersion dans l'eau. Les résultats obtenus montrent l'existence de plusieurs domaines de comportement, en fonction de l'état hydrique initial des agrégats : le mécanisme d'éclatement, lié au piégeage d'air lors de l'imbibition, est prédominant tant que les agrégats ne sont pas saturés, mais son action diminue régulièrement lorsque leur teneur en eau augmente, et au-delà du point d'entrée d'air, seule la désagrégation mécanique liée à l'agitation intervient.

Ces deux mécanismes de désagrégation aboutissent à des distributions de taille des particules résultantes différentes et caractéristiques.

Ces résultats peuvent être généralisés à des agrégats de calibres différents : seule la cinétique de désagrégation est affectée par la taille des agrégats.

L'ensemble de ces résultats permet d'envisager une nouvelle approche de l'estimation de la sensibilité des matériaux à la dégradation structurale superficielle.

Mots clés additionnels : *Stabilité structurale, éclatement, désagrégation mécanique, état hydrique, domaine de comportement, particules mobilisées.*

SUMMARY

Mechanisms of aggregate breakdown.

Elementary mechanisms of aggregate breakdown were studied, analysing the behaviour of different silty soils during immersion under water. Results show the existence of different domains of behaviour in accordance with initial water content : slacking due to air-trapping during wetting was the main mechanism so long as aggregates were not saturated, but its effect decreased with increasing initial water content. Beyond the air entry point, only mechanical breakdown due to stirring took effect. These two mechanisms of aggregate breakdown were characterized by the particle size distribution. The results could be generalized to different sizes of aggregates : only the kinetics of breakdown were different. All these results allow consideration of a new approach to the estimation of the sensitivity of soil to superficial structural degradation.

Additional key words : *Structural stability, slacking, mechanical breakdown, water content, behaviour domain, mobilized particles.*

I. INTRODUCTION

La structure des couches superficielles des sols cultivés évolue rapidement sous l'action des pluies. La nature et l'intensité de cette évolution dépendent de nombreux facteurs et conditions : caractéristiques des pluies, couverture du sol, propriétés des matériaux constitutifs,

conditions hydriques et structurales lors de l'exposition aux pluies.

L'une des manifestations les plus caractéristiques de cette évolution est le développement de croûtes superficielles, couramment dénommées croûtes de battance, dont de nombreuses études ont montré les conséquences sur l'implantation des cultures semées, l'hydrologie superficielle des terrains concernés et, dans certaines situations géomorphologiques et culturales, le déclenchement de l'érosion hydrique.

De nombreux travaux ont porté sur la description et la prévision de cette évolution, et ont conduit à s'interroger sur les moyens d'identification et de hiérarchisation des facteurs qui en sont responsables.

Un premier type d'approche, qui a pour objectif la caractérisation de la sensibilité des matériaux, est basé sur le concept de stabilité structurale et tend à évaluer à l'aide de tests pratiqués au laboratoire, le comportement de fragments terreux, préalablement calibrés ou non, très généralement initialement secs, lorsqu'ils sont mis au contact d'un large excès d'eau. De nombreuses variantes dans la procédure du test proprement dit et dans le mode d'expression des résultats ont été proposées (YODER, 1936; KEMPER, 1965; HENIN & MONNIER, 1956; DE LEENHEER & DE BOODT, 1959). Elles ont en commun :

- de privilégier le rôle des propriétés du sol par rapport à celui des conditions d'humectation,
- de favoriser le mécanisme d'éclatement, lié au piégeage de l'air lors de l'humectation des agrégats,
- de confondre dans un résultat global, l'effet de mécanismes de division très différents par leur nature et les facteurs qui les commandent : pression capillaire, actions mécaniques de l'agitation et du tamisage.

De ce fait, ces méthodes donnent des indications globales et tendanciennes sur le comportement comparé de sols placés dans un même contexte général climatique et cultural, ou sur l'évolution du comportement d'un sol donné, en fonction par exemple des variations de son statut organique.

Elles ne permettent donc de prévoir ni la dynamique de formation des croûtes dans des conditions climatiques données, ni *a fortiori* leur structure et ses conséquences hydriques et/ou mécaniques.

Une deuxième approche a pour objectif de relier la formation des croûtes *in-situ* aux processus de détachement et de déplacement des particules à la surface du sol. Elle se fonde sur des observations et mesures de terrain réalisées en conditions pluviométriques naturelles ou provoquées (simulation de pluie) (BOLLINNE, 1982; ELLISON, 1947; FARRIS, 1980, 1987; SAVAT & POESEN, 1981; AL DURRAH & BRADFORD, 1982; TREVISAN, 1986; RAHELIARISOA, 1986).

Les données recueillies portent sur les quantités de terre déplacées à la surface du sol par la pluie (« splash »), sur différents indicateurs de la rugosité de la surface ou sur l'évolution d'indicateurs morphologiques.

J. BOIFFIN (1984) en exploitant systématiquement les possibilités de ce type de démarche a pu mettre en évidence les différentes phases intervenant dans le processus de formation des croûtes, et a établi des relations empiriques entre évolution morphologique et variables pluviométriques. Il a également montré que l'aboutissement du processus (formation des croûtes de dépôt), n'intervenait que pour des flux d'infiltration devenus inférieurs aux flux pluviaux, soulignant ainsi l'importance des variations des propriétés hydrodynamiques de la surface du sol au cours de la première phase de la dégradation.

Il a enfin mis en évidence, la nécessité de connaître le déterminisme de la division des fragments et de la mobilisation des particules, afin de prévoir et de comprendre l'évolution morphologique des croûtes,

selon les séquences climatiques et la nature des matériaux.

Nous nous proposons donc ici d'apporter une contribution à cette question, à travers la mise en évidence expérimentale de différents mécanismes de désagrégation des mottes sous l'action de l'eau, préalablement à leur déplacement ; l'analyse des facteurs et paramètres qui les commandent et en particulier de l'état hydrique initial ; et la caractérisation des particules mobilisées par chacun d'entre eux.

II. MÉTHODES

Nous avons choisi, dans une première étape rapportée ici, de mettre en œuvre un ensemble de méthodes ayant en commun :

- la mise en contact des matériaux étudiés avec un large excès d'eau (immersion),
- l'évaluation par tamisage du résultat de la division des agrégats.

En fonction des besoins de l'analyse nous avons eu recours à une ou plusieurs des procédures suivantes :

1 - La méthode proposée en 1956 par HENIN et MONNIER qui se rattache au premier type d'approche évoqué en introduction avec comme caractéristiques :

- de comparer à l'action directe de l'eau, un test avec saturation préalable des fragments par de l'alcool éthylique, dans le but de minimiser le mécanisme de désagrégation par éclatement,
- de comporter entre l'action initiale de l'eau et le résultat une série d'actions mécaniques : agitation et tamisage sous l'eau, limitant la possibilité d'analyse directe du rôle respectif de l'une ou l'autre, sur la division des fragments soumis au test et leur éventuelle dispersion,
- de limiter l'expression des résultats à un taux de particules, dit agrégats stables, constituant le refus d'un tamisage à 200 μm (Age et Aga pour le test sans et avec prétraitement à l'alcool respectivement), éventuellement complété par un taux de particules < 20 μm , mesurée par sédimentométrie.

La seule modification à la procédure standard, a été d'utiliser des agrégats calibrés entre 2 et 3 mm, afin de mieux contrôler l'état initial des échantillons, pour pouvoir en étudier l'évolution.

Par rapport à l'objectif d'analyse que nous nous sommes fixé, cette méthode présentait donc l'intérêt de fournir une évaluation sommaire d'un comportement global, vis-à-vis d'actions de natures différentes, et de fournir un premier moyen d'analyse (comparaison Age-Age).

2 - Une procédure mise au point dans le double but :

- de limiter les actions mécaniques préalables, ou impliquées dans l'évaluation de la désagrégation, permettant ainsi de préciser les conditions de l'éclatement,
- de fournir une distribution granulométrique plus complète du résultat de la désagrégation.

On s'est fondé pour cela sur les propriétés de miscibilité de l'alcool éthylique et de l'eau, et sur le comportement des agrégats terreux dans l'alcool.

Le protocole finalement adopté a été le suivant :

— l'échantillon (5 g de terre sèche) est immergé dans l'eau durant le laps de temps choisi (5 mn). L'excès d'eau est alors éliminé par décantation, et l'échantillon est transféré sous l'alcool sur un tamis de 100 μm d'ouverture de maille. L'objectif est de fixer l'état de désagrégation atteint au cours de la première phase, et d'effectuer un premier tri non destructif, à une dimension compatible avec le tamisage sous liquide.

Le refus à 100 μm est alors séché par passage à l'étuve à 105 °C jusqu'à poids constant, puis tamisé à sec, technique non destructive si elle est peu prolongée, à 2, 1, 0,5, 0,2 et 0,1 mm.

On obtient ainsi une distribution en 6 classes de la taille des particules résultantes, éventuellement complétée par un fractionnement sédimentométrique de la classe < 100 μm .

Ces méthodes ont été appliquées à des agrégats calibrés de tailles variables, mais le plus souvent compris entre 2 et 3 mm. Les variantes ont porté principalement sur la durée de la phase initiale de contact avec l'eau.

Nous avons accordé une place importante à l'influence de l'état hydrique initial des échantillons étudiés.

Des résultats obtenus par J. BOIFFIN (1984) et d'autres auteurs, ont, en effet, montré l'importance souvent déterminante de ce facteur dans le comportement ultérieur vis-à-vis de l'eau, et suggèrent que l'étude des conséquences de ces variations peut contribuer à l'analyse des différents mécanismes de la désagrégation. D'autre part, le schéma de HENIN-YODER implique effectivement que le taux de saturation soit un facteur déterminant de l'intensité de la désagrégation.

La technique utilisée pour amener les échantillons à un état hydrique initial donné est celle proposée par MONNIER *et al.* (1973) : humectation des agrégats par capillarité sous vide jusqu'à saturation, suivie d'une dessiccation contrôlée, jusqu'à une humidité et/ou un potentiel donné. Ces états hydriques initiaux ont été caractérisés par la teneur en eau pondérale et volumique, et par le potentiel hydrique : courbes de retrait-gonflement et fonctions potentiel/teneur en eau obtenues sur agrégats de 2-3 mm.

III. MATÉRIAUX

Nous avons travaillé sur des matériaux présentant tous une texture à dominante limoneuse, mais dont les

comportements moyens vis-à-vis de la battance sont très différents. Ils proviennent de différentes régions de la moitié Nord de la France, et ont été prélevés dans l'horizon labouré (Ap), sur des parcelles portant des successions de cultures annuelles.

Le tableau 1 regroupe les caractéristiques analytiques des 7 échantillons étudiés.

En dehors de la forte dominance limoneuse déjà mentionnée (2-50 μm compris entre 62,2 et 78,5 p. 100), ces matériaux ont en commun une faible teneur en sables grossiers (moins de 3 p. 100 de particules > 100 μm). Ils sont très peu ou pas calcaires, et présentent des pH peu éloignés de la neutralité.

La principale variation porte sur leur teneur en argile (< 2 μm), qui s'échelonne entre 11,5 et 31,4 p. 100.

Ramenée à 100 g d'argile granulométrique, la CEC s'écarte peu d'une valeur moyenne voisine de 50 meq.

La teneur en carbone organique est faible et peu variable d'un échantillon à l'autre. Mais une certaine variabilité apparaît lorsque l'on calcule le rapport MO/A dont MONNIER (1965) a montré qu'il était une variable plus pertinente de l'efficacité des matières organiques sur la stabilité. Toutefois ces teneurs restent faibles, et peu susceptibles d'améliorer de façon sensible la stabilité, sauf peut-être pour les 2 ou 3 échantillons les moins argileux.

En définitive, la principale variation de constitution porte sur la teneur en argile.

Les résultats (tabl. 2) du test de stabilité structurale de HENIN & MONNIER (1956) (pratiqués ici sur la terre < 2 mm) font apparaître des comportements globaux allant de stable à très instable (MONNIER *et al.*, 1982). Ils confirment donc l'ampleur de la gamme de comportements tendanciels recherchée ; mais aussi la faible influence de la matière organique (Agb) et le rôle déterminant de la texture (Aga) dans la variabilité des comportements vis-à-vis de la désagrégation par l'eau.

IV. RÉSULTATS ET DISCUSSION

A. Influence de l'état hydrique initial

1. Résultats

a) Les figures 1 et 2 représentent les résultats des tests réalisés selon le protocole HENIN, exprimés respectivement en fonction de l'humidité pondérale et du pH initial des agrégats de 2-3 mm.

TABLEAU 1
Caractéristiques analytiques des matériaux.
Analysis of materials.

| | GRANULOMÉTRIE (microns) | | | | | | | C % | pH | Calc % | CEC mécq/ 100 g | 10 MO/ A | CEC/ A |
|-------------|-------------------------|-----|------|-------|-------|--------|-------|--------|-----|-----------|-----------------------|-------------|-----------|
| | 0-2 | 2-5 | 5-10 | 10-20 | 20-50 | 50-100 | > 100 | | | | | | |
| Montluel | 11,5 | 4,3 | 6,1 | 15,4 | 44,6 | 15,0 | 3,2 | 0,84 | 6,1 | 0,0 | 4,7 | 1,2 | 41 |
| Hesdin | 13,3 | 3,4 | 5,3 | 14,3 | 46,6 | 16,7 | 0,3 | 1,10 | 7,0 | 0,3 | 7,7 | 1,4 | 58 |
| Le Ménard | 16,5 | 4,7 | 7,6 | 21,8 | 44,4 | 4,0 | 2,8 | 1,02 | 7,2 | 0,0 | 8,4 | 1,0 | 51 |
| Grand Juday | 19,0 | 4,7 | 8,3 | 21,0 | 42,0 | 3,4 | 2,0 | 0,79 | 6,6 | 0,0 | 8,7 | 0,7 | 47 |
| Palaiscau | 20,4 | 2,6 | 5,8 | 16,7 | 46,6 | 6,2 | 1,6 | 1,11 | 6,2 | 0,3 | 10,1 | 0,9 | 51 |
| Chêne | 22,4 | 4,1 | 5,9 | 17,9 | 44,2 | 5,3 | 0,3 | 1,02 | 8,0 | 0,9 | 10,6 | 0,8 | 51 |
| Boigneville | 31,4 | 4,1 | 7,0 | 17,2 | 33,9 | 6,1 | 0,3 | 1,06 | 6,8 | 0,3 | 15,9 | 0,6 | 51 |

TABLEAU 2
Résultats du test de stabilité structurale réalisé sur la terre fine.
Results of structural standard stability test.

| | Age | Ag _a | Ag _b | < 20 μm max | S | K |
|-------------|------|-----------------|-----------------|-------------|-------|------|
| Montluel | 8,5 | 9,0 | 7,3 | 23,8 | 9,68 | 1,83 |
| Hesdin | 5,8 | 14,2 | 2,7 | 17,3 | 2,47 | 2,84 |
| Le Ménard | 4,9 | 8,0 | 5,2 | 31,4 | 10,59 | 1,49 |
| Grand Juday | 5,5 | 20,1 | 3,9 | 34,9 | 4,77 | 1,34 |
| Palaiseau | 3,3 | 8,5 | 2,7 | 29,6 | 9,93 | 2,32 |
| Chêne | 2,2 | 10,3 | 1,5 | 30,4 | 7,38 | 3,25 |
| Boigneville | 15,4 | 35,0 | 3,8 | 28,3 | 1,67 | 5,72 |

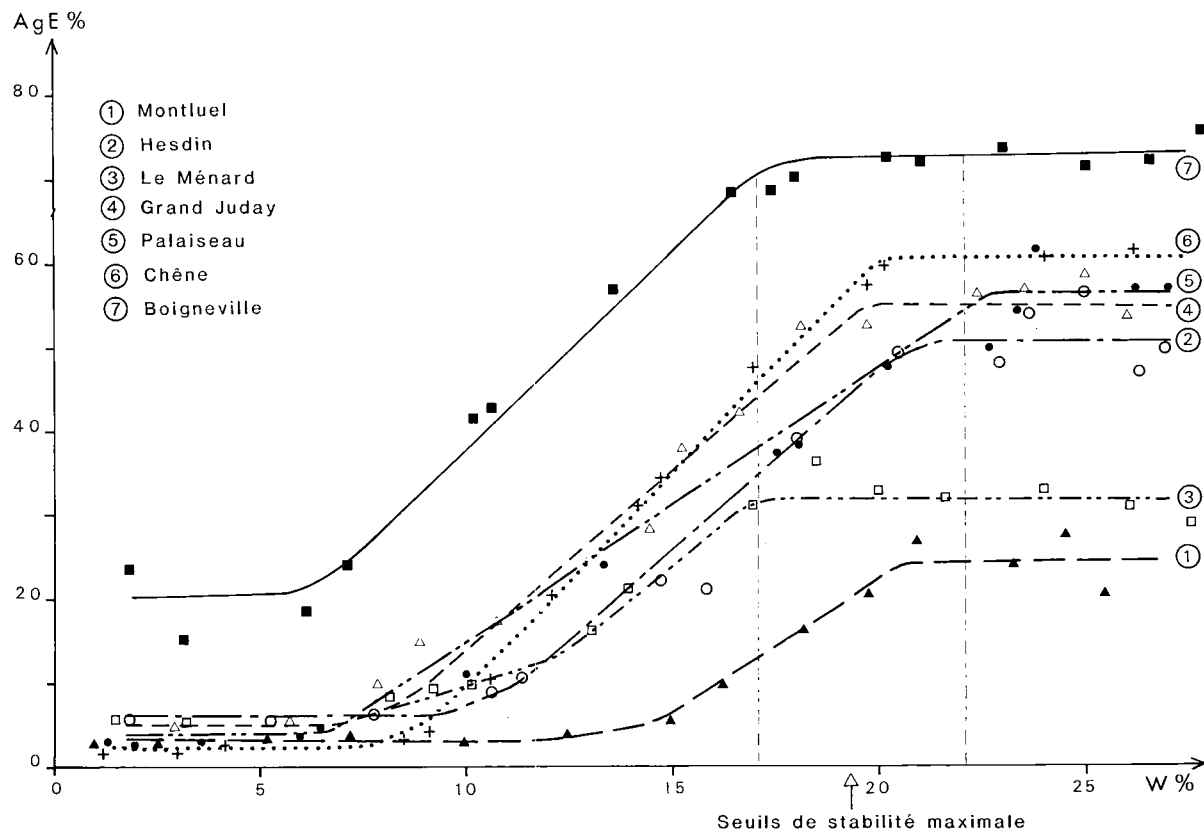


Figure 1

Influence de la teneur en eau initiale (W) sur le taux d'agrégats stables à l'eau. (Age)

Effect of initial water content (W) on ratio of water-stable aggregates. (Age)

On peut constater :

— une constance de la forme générale de ces courbes, qui présentent 3 domaines, correspondant à 2 paliers : désagrégation maximale pour les faibles humidités et minimale pour les humidités élevées, entre lesquelles Age augmente régulièrement avec la teneur en eau, dans la gamme des humidités intermédiaires.

— une discrimination des sols étudiés beaucoup plus forte dans le domaine des humidités élevées que dans celui des faibles teneurs en eau, avec des classements différents en fonction de l'humidité : certaines courbes se croisent.

b) La figure 3 représente pour trois des matériaux, l'évolution des proportions des 6 classes de particules, mesurées selon la procédure mise au point et décrite dans les méthodes.

On observe une allure générale identique, de l'influence de l'humidité avec l'existence des mêmes domai-

nes que précédemment pour toutes les classes de particules.

La mesure de la distribution des tailles de particules permet une discrimination accrue entre les matériaux et entre les domaines de comportement (fig. 4).

2. Discussion

a) La division des agrégats dans le domaine des faibles humidités initiales

La désagrégation est maximale dans ce domaine, elle conduit à une disparition quasi-totale des particules les plus grossières. Dans tous les cas, il y a prédominance des particules inférieures à 500 μm, et à l'intérieur de ces classes, la taille dominante est d'autant plus petite que la teneur en argile est faible.

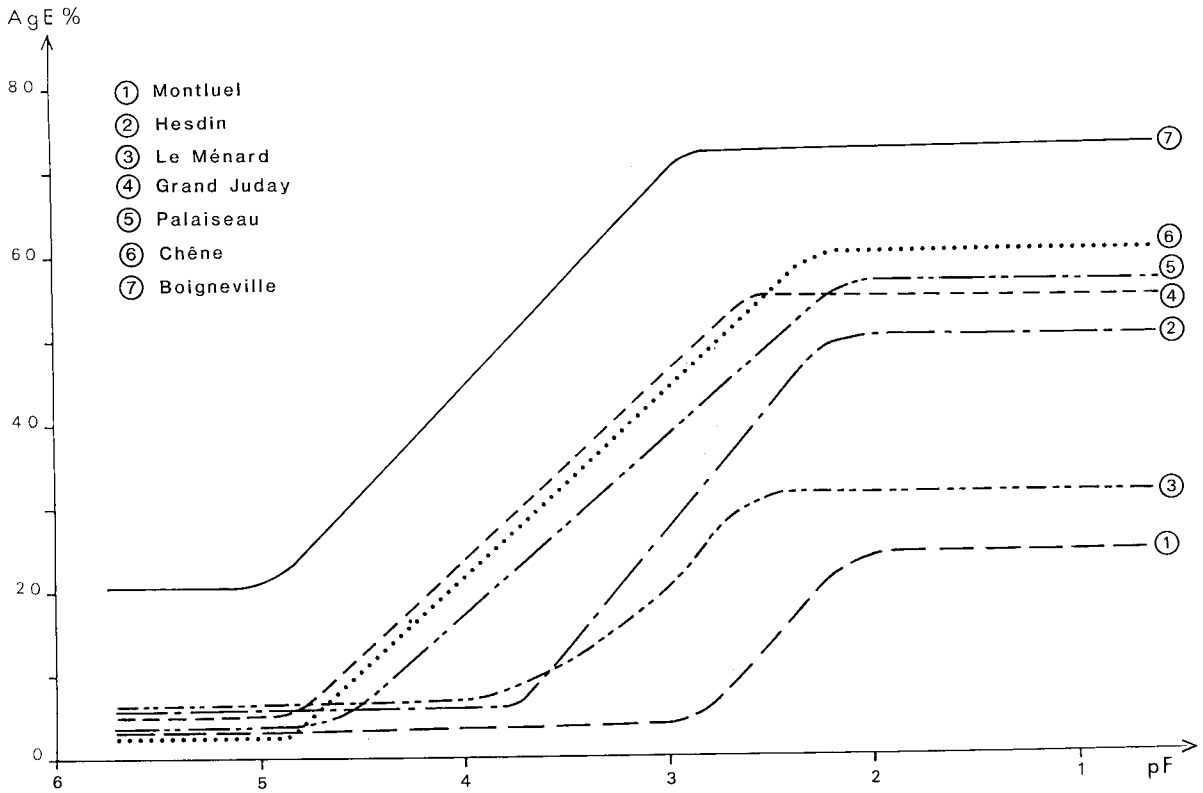


Figure 2
Influence du potentiel (pF) initial sur le taux d'agrégats stables à l'eau. (Age)
Effect of initial water potential (pF) on ratio of water-stable aggregates. (Age)

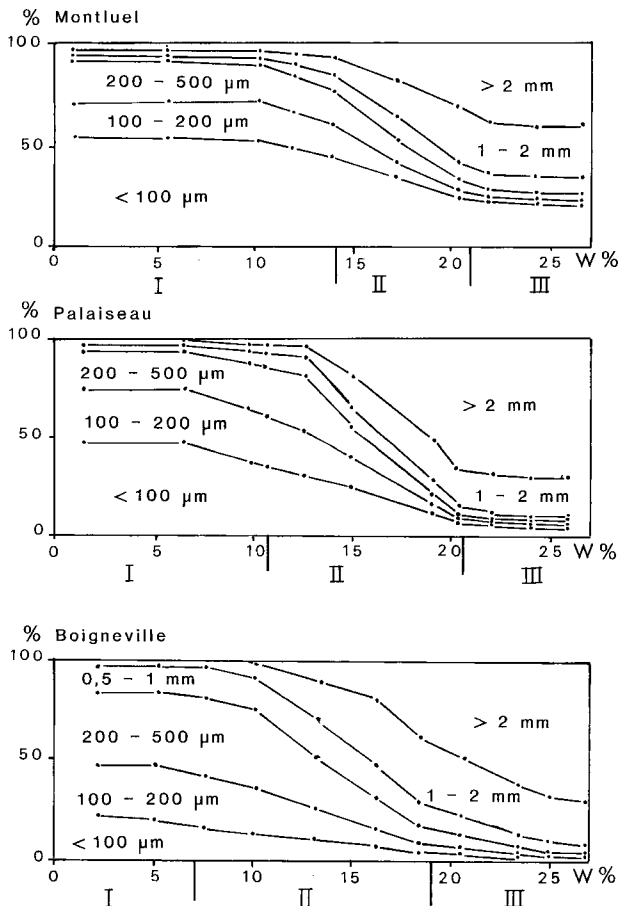


Figure 3
Influence de l'état hydrique initial sur la distribution de la taille des particules résultantes.
Effect of initial water content on resultant particle size distribution.

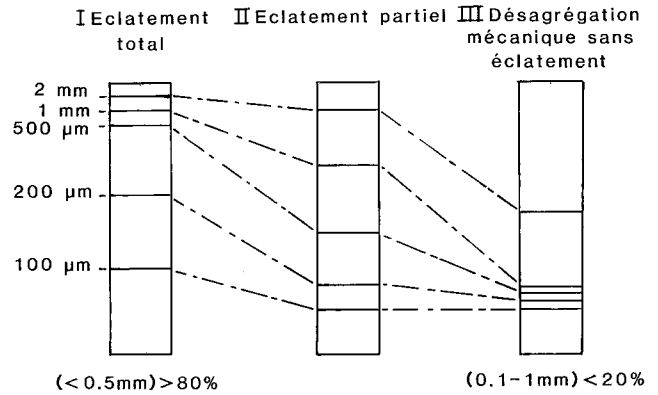


Figure 4
Distributions de la taille des particules caractéristiques des différents domaines hydriques de comportement.
Particle size distributions characteristics of different domains of behaviour.

Ainsi, il semble que l'on soit en présence d'un résultat analogue pour tous les matériaux et tout au long de la gamme des faibles humidités.

Cette observation conduit à faire 2 remarques :

— en ce qui concerne l'expression des résultats il est important de noter que la forme de ces courbes est fortement liée aux mesures effectuées et au choix des variables représentées, en particulier en ce qui concerne la présence des seuils : le fait de les observer, aussi bien au niveau des faibles teneurs en eau que des fortes humidités, ne signifie pas forcément qu'il s'agit d'une brutale modification dans l'évolution du résultat. L'apparition d'un palier peut être simplement liée au fait que

la mesure effectuée ne permet plus de détecter cette évolution. En effet, on n'effectue que des mesures discontinues qui sont liées aux mailles de tamis utilisées (100 μm minimum). Ainsi, il est possible que la désagrégation continue d'augmenter au sein de la classe inférieure à 100 μm lorsque la teneur en eau diminue à l'intérieur du domaine de stabilité minimale.

Cependant la persistance de la présence de ces paliers pour tous les matériaux avec les 2 protocoles différents et pour l'ensemble des classes de taille de particules semble lui conférer une existence significative.

— d'autre part, il faut préciser que chaque point représenté sur les graphiques correspond à la valeur moyenne de 2 ou 3 répétitions, et que les écarts-types sur ces mesures sont en général faibles (< 5 p. 100), mais variables selon les matériaux et le domaine d'humidité, ils sont plus élevés pour les fortes teneurs en eau, ainsi que pour les faibles teneurs en eau dans le cas de Boigneville.

Ceci étant dit, ce domaine de comportement correspond tout à fait aux conditions de réalisation du phénomène d'éclatement très bien étudié par ailleurs. (HENIN, 1938, MONNIER, 1965, CONCARET, 1967, KEMPER, 1965).

Une des nouveautés de ces résultats réside dans la mise en évidence de l'étendue du domaine hydrique dans lequel ce mécanisme intervient de manière totale : en effet celui-ci est très variable selon les matériaux, en terme de teneur en eau mais aussi de potentiel hydrique (pF 3 à 5), ce qui signifie que l'influence des forces capillaires est faible par rapport à celles des forces d'éclatement.

On peut interpréter l'étendue de ce domaine de stabilité minimale, comme correspondant aux teneurs en eau telles qu'il reste un volume d'air suffisant pour que son piégeage entraîne l'éclatement de l'agrégat.

Ainsi, pour MONTLUEL ce domaine s'étend jusqu'à des valeurs de teneur en eau élevées, car d'une part, le volume poral est élevé, et d'autre part, il suffit d'un faible volume d'air pour que la pression entraîne la désagrégation.

Inversement, pour BOIGNEVILLE, ce domaine est beaucoup plus réduit.

Les matériaux sont mieux discriminés par l'étendue de ce domaine, que par les valeurs de stabilité, quelle que soit la manière de caractériser cette stabilité.

La valeur minimale de stabilité est elle-même fonction de la dimension des assemblages de particules résultant de l'éclatement, qui dépend du nombre de points de contact entre particules restant efficaces après cet éclatement.

Cette dernière valeur étant probablement liée à la teneur en argile et en autres ciments des matériaux (KHEYRABI & MONNIER, 1968).

L'observation, au microscope binoculaire, de la mobilisation de ces fractions au cours de l'éclatement, montre effectivement qu'il ne s'agit pas de particules élémentaires, mais bien d'assemblages de quelques grains de squelettes, d'autant plus nombreux et mieux soudés que la teneur en argile est élevée.

Il semble que le phénomène de dispersion des argiles n'intervienne que très peu dans cette désagrégation (EMERSON, 1967). En effet, les taux de particules inférieures à 20 μm (A + 1) que l'on peut mesurer par sédimentation, sont très bas en l'absence d'agitation (tabl. 3), alors que ces valeurs sont beaucoup plus élevées dans le cas de la procédure HENIN, après agitation et tamisage dans l'eau. Ceci indique que pour ce type de matériaux, l'apparition de particules fines est une conséquence de l'agitation et de l'usure mécanique en présence d'un excès d'eau. Il s'agit probablement plus d'une dispersion mécanique que d'un processus physico-chimique.

Ce point est à rapprocher des observations de BOIFFIN (1984), sur la coïncidence entre le démarrage de la phase II de la battance, caractérisé par le tri et la sédimentation des particules, et l'apparition d'un excès d'eau superficiel, permettant une mise en suspension et une agitation, liée à l'énergie cinétique de la pluie. La phase I, en l'absence d'excès d'eau, ne correspond effectivement qu'à une désagrégation en place sans séparation de particules élémentaires.

b) La division des agrégats dans le domaine de saturation

Le domaine de stabilité maximale coïncide nettement avec le domaine de saturation des agrégats. En effet, la position du point d'entrée d'air de chaque sol correspond à la position de son seuil de stabilité maximale (fig. 5 et fig. 7). Il faut noter que la précision des valeurs d'humidité de ces points est faible, de l'ordre de plus ou moins 1 à 2 p. 100 de teneur en eau. Et d'autre part, dans notre gamme de matériaux on est toujours au voisinage de 20 p. 100 de teneur en eau.

Cependant, ces points correspondent à des potentiels variables qui décroissent en valeur absolue avec la teneur en argile des matériaux. Il s'agit donc ici de désagrégation mécanique sans éclatement, compte tenu de l'absence d'air au sein des agrégats dans tout ce domaine.

TABLEAU 3
Dispersion après éclatement.
Dispersion after slacking.

| | Particules < 20 μm (A + 1) % | | taux de dispersion = (A + 1)/(A + 1) matériau | |
|-------------|--|-------------------|--|-------------------|
| | sans agitation | avec agitation | sans agitation | avec agitation |
| Montluel | 10 | 25 | 27 | 67 |
| Palaiseau | 9 | 20 | 20 | 44 |
| Boigneville | 6 | 17 | 10 | 28 |

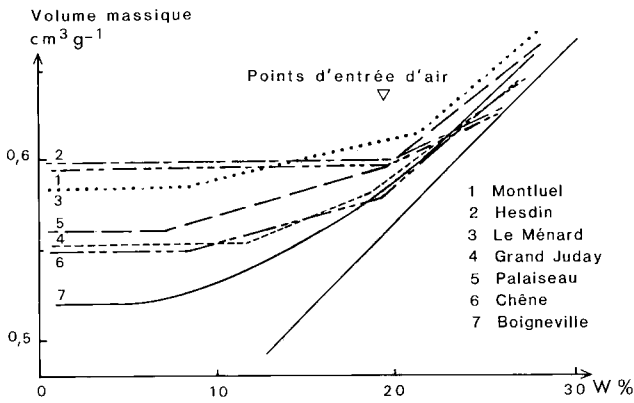


Figure 5
Positions des points d'entrée d'air sur les courbes de retrait des matériaux.
Air entry point location on shrinkage curves.

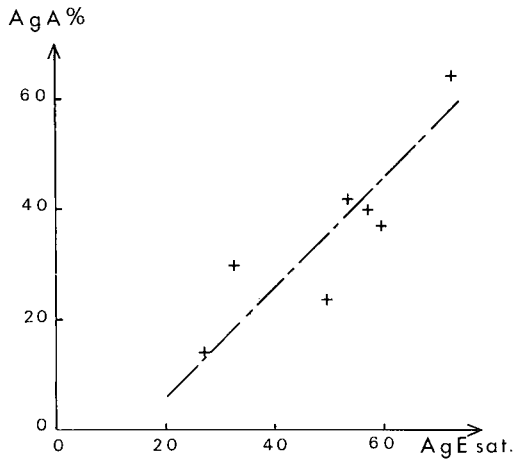


Figure 6
Relation entre taux d'agrégats stables à l'alcool (Aga) et à l'eau (Age) après saturation.
Relation between ratio of aggregates stable in ethanol (Aga) and stable in water (Age) after saturation.

Et il est intéressant de noter la bonne relation entre ces valeurs de stabilité obtenues sur agrégats saturés, et les taux d'agrégats stables après prétraitement alcool (Aga) mesurés selon le même protocole, qui ont effectivement pour objet de caractériser la stabilité en l'absence d'éclatement (HENIN & MONNIER, 1956) (fig. 6). L'ordonnée à l'origine négative des Aga peut signifier que l'alcool a sa propre action de désagrégation lors de l'humectation des agrégats, qui serait légèrement plus forte que celle liée à l'humectation par l'eau sous vide.

La désagrégation à saturation est beaucoup moins poussée que dans le cas de la désagrégation par éclatement, et les particules mobilisées sont très différentes : on obtient en fait une distribution bimodale de la taille des particules, avec un mode de particules très fines ($< 100 \mu\text{m}$), et un mode correspondant au calibre initial des agrégats (fig. 4). L'importance relative de ces 2 modes varie avec la teneur en argile des matériaux, mais aussi en fonction de l'énergie appliquée à l'échantillon et la durée d'application de cette énergie.

Ainsi, lorsque l'on considère uniquement la fraction 0-200 μm , l'écart entre matériaux augmente quand on compare les valeurs du test sans agitation à celles du test

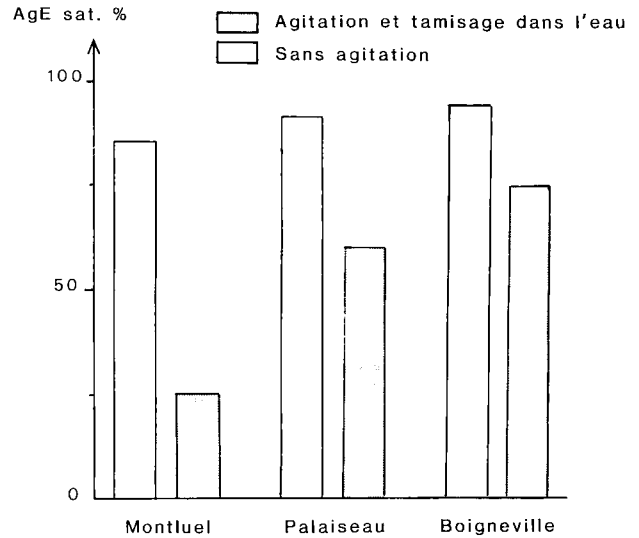


Figure 7
Comparaison des taux d'agrégats $> 200 \mu\text{m}$, pour les tests avec et sans agitation.
Comparison of $> 200 \mu\text{m}$ aggregate ratio, with and without stirring.

standard, avec agitation et usure sur le tamis (fig. 7). Cette désagrégation correspond bien à une « usure » progressive de la périphérie des agrégats comme le montre la distribution granulométrique résultante, et le comptage des agrégats qui indique qu'après le test on en conserve plus de 95 p. 100 du nombre initial. Cette usure est d'autant plus rapide que le matériau est fragile (MONTLUEL).

Il faut également noter qu'au sein de ce domaine de stabilité maximale, il ne semble pas y avoir de tendance à la décroissance aux très fortes humidités, alors que l'humidité augmentant, on pourrait s'attendre à une diminution de la cohésion des agrégats.

On peut l'expliquer par le fait qu'au sein de la population d'agrégats soumis au test, il peut exister une certaine hétérogénéité de l'humidité, avec des portions d'agrégats non saturés, bien que l'humidité moyenne corresponde à la saturation, et ce d'autant plus que l'on se rapproche de la valeur correspondant au point d'entrée d'air. Ceci, jouant en sens contraire de la diminution de cohésion, la compenserait pour donner ce palier apparent. Mais on peut également imaginer que si on augmentait encore le niveau de l'agression mécanique, ce palier serait moins net.

Il reste que le niveau de ce palier est bien lié aux propriétés mécaniques des agrégats saturés, et donc à leur teneur en argile pour un squelette donné.

La figure 8 montre effectivement que les valeurs de stabilité à saturation sont bien reliées à la teneur en argile des matériaux. La relation $\text{Age sat.} = f(\text{A p. 100})$ n'est probablement linéaire que dans le domaine des matériaux testés, mais sa forme réelle ne pourrait être déterminée qu'avec une gamme plus large, et un nombre de matériaux beaucoup plus élevé. La prise en compte de la capacité d'échange cationique (C.E.C.), améliore légèrement cette relation.

3. Généralisation des résultats à des agrégats de calibres différents

Les résultats précédents ont été obtenus sur des agrégats de 2-3 mm résultant du tri par tamisage après

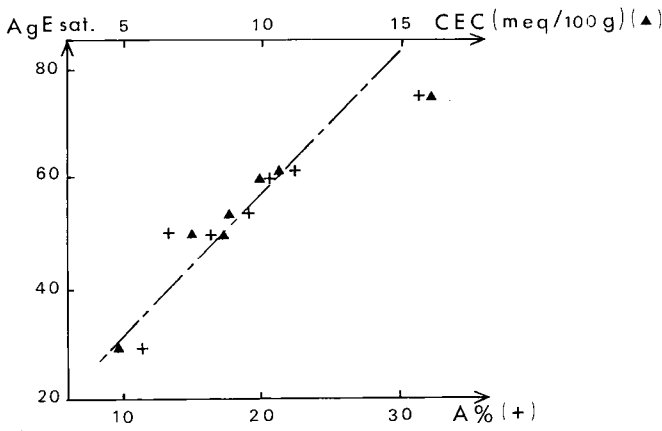


Figure 8
Relation entre taux d'agrégats stables après saturation, et teneur en argile et C.E.C.
Relation between > 200 µm aggregate ratio after saturation, and clay content and C.E.C.

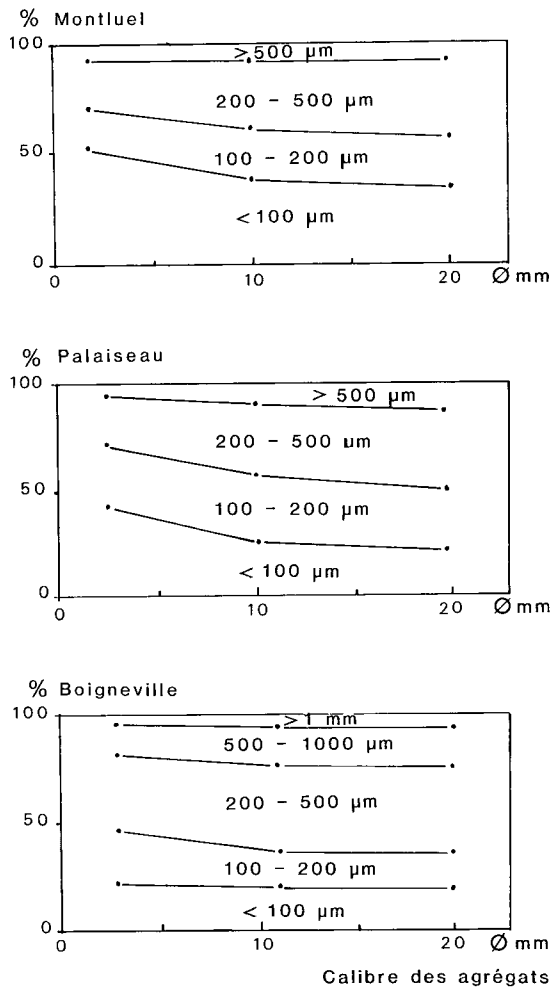


Figure 9
Relation entre le calibre initial des agrégats (mm) et la distribution de la taille des particules résultantes après une immersion de 30 mn.
Relationship between initial aggregate size (mm) and resulting particle size distribution, after 30 mn immersion.

fragmentation manuelle de mottes de l'horizon de surface. Or, de même que l'humidité, la dimension des agrégats soumis à la pluie peut être très variable.

Il est donc nécessaire de vérifier si ces résultats sont intrinsèques, ou bien dépendent du calibre initial des agrégats.

Dans le domaine de saturation, on a vu qu'il s'agissait d'une usure de la périphérie des agrégats. Il est donc probable que, du fait de la relation entre surface externe, volume et diamètre, l'intensité de l'usure mécanique varie avec ce diamètre. Cependant, le processus ne doit pas être fondamentalement différent, et de toute façon l'agitation dans l'eau ne reproduit pas la même action mécanique que celle du choc des gouttes de pluie, ce qui rendrait difficile une transposition des résultats.

On s'est donc plus particulièrement intéressé au rôle de la taille des agrégats par rapport au mécanisme d'éclatement, c'est-à-dire en effectuant les tests sur des agrégats secs, et obtenus de la même manière que ceux de 2-3 mm.

Pour l'analyser, nous avons effectué des mesures de mobilisation des particules sur des agrégats de différentes tailles; on a également fait varier la durée de l'immersion dans l'eau.

Les résultats de la figure 9, montrent que pour une immersion prolongée, les distributions granulométriques évoluent peu: il y a un peu plus de particules plus grossières lorsque le calibre initial augmente, mais il s'agit toujours du même type de distribution granulométrique.

Si par contre, on teste l'influence de la durée d'immersion (fig. 10), on s'aperçoit que la désagrégation n'est pas instantanée, et qu'elle est réalisée pour des durées

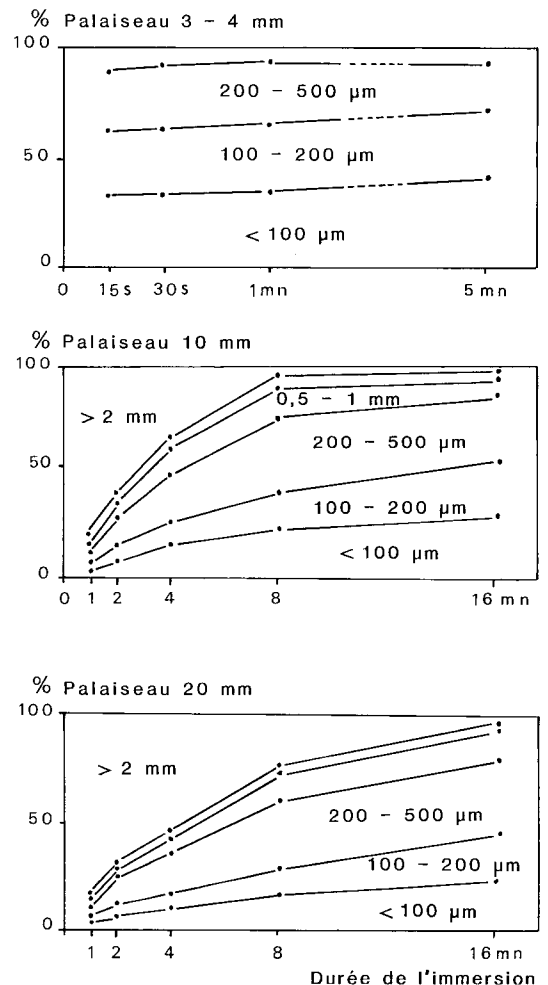


Figure 10
Influence de la durée d'immersion sur la distribution de la taille des particules résultantes.
Influence of immersion duration on resulting particle size distribution.

croissantes lorsque le calibre des agrégats augmente. L'observation visuelle montre que la désagrégation s'effectue progressivement de la périphérie vers le cœur de l'agrégat.

Après désagrégation des couches successives, on atteint un état final identique, quel que soit le calibre de départ. Selon ces observations, la vitesse de progression du front de désagrégation est de l'ordre de quelques millimètres par minute.

Il est clair que ce résultat est lié aux conditions de mise en contact terre-eau (immersion brutale des agrégats, qui sont donc sous charge hydraulique) : dans le cas d'une humectation progressive des mottes, par exemple par la pluie, l'air peut s'échapper, au moins en partie au cours de la réhumectation (GRAS, 1974). Ceci devrait avoir pour conséquence de diminuer l'importance de l'éclatement, d'autant plus que le rapport entre la taille des gouttes et celle des agrégats diminue.

Ainsi l'éclatement total ne risque d'affecter que les plus petits agrégats. Mais il est probable qu'une certaine épaisseur de la périphérie des mottes plus importantes, puisse être désagrégée de la même manière, entraînant ainsi une soudure de celles-ci entre elles et avec le reste de la surface du sol, ce que l'on observe couramment au champ.

En effet, la distribution de la taille des particules résultantes est relativement indépendante du calibre initial et du stade de désagrégation. Elle est identique à celle des petits agrégats dès le début de la désagrégation de la périphérie des plus gros.

Cette série de manipulations permet une généralisation des résultats précédents : en effet, de même que les mécanismes et les lois de comportement sont analogues pour tous les matériaux étudiés, on peut dire qu'ils sont indépendants du calibre des agrégats sur lesquels sont réalisés les tests. Seul un aspect cinétique différencie le comportement des agrégats de tailles variables, lors de leur immersion dans l'eau.

V. CONCLUSION

On a cherché dans ce travail, à mettre en évidence les mécanismes intervenant lors de l'immersion d'agrégats dans l'eau, et à étudier la nature des particules mobilisées, l'objectif étant de relier ces mécanismes à l'évolution de la surface du sol sous l'action des pluies, c'est-à-dire au développement des croûtes de battance.

Le rôle prédominant du mécanisme d'éclatement est confirmé, mais l'étude de l'influence de l'état hydrique initial montre que ce mécanisme n'intervient que dans un domaine d'état hydrique limité, et surtout variable selon les propriétés de rétention d'eau du matériau. Ainsi, la limite pour laquelle l'éclatement est maximal, varie entre pF 5 et 3 lorsque l'on passe de BOIGNEVILLE à MONTLUEL, c'est-à-dire que dans un contexte pédoclimatique donné, le premier ne sera presque jamais en situation de sensibilité à l'éclatement, alors que le second le sera quasiment en permanence. L'existence de ces domaines de comportement, et la probabilité qu'un matériau s'y trouve, apparaissent donc au moins aussi importants que les valeurs de stabilité elles-mêmes.

Un autre point important mis en évidence concerne la dimension des particules mobilisées. En effet, cet éclatement lié au piégeage d'air, entraîne pour tous les matériaux, une destruction complète des agrégats, avec

une individualisation de particules de taille inférieure à 500 μm , mais dont le calibre moyen augmente avec la teneur en argile.

Ces particules de petites tailles ne sont cependant pas des particules élémentaires, et la dispersion des argiles, parfois considérée comme le moteur de la désagrégation, n'intervient quasiment pas dans cet éclatement ; elle apparaît plutôt comme la conséquence d'une agitation ultérieure en présence d'un excès d'eau.

A ce pôle, correspondant à l'éclatement, s'oppose un pôle, au niveau des fortes humidités, qui concerne le phénomène de désagrégation mécanique, dont l'intensité est directement liée à l'énergie appliquée aux agrégats. Ce second mécanisme correspond à une usure de la périphérie des agrégats, et la destruction résultante est beaucoup moins intense que lors de l'éclatement. Elle est inversement proportionnelle à la teneur en argile des matériaux.

Les deux mécanismes mis en évidence mobilisent des particules différentes, et on peut donc les caractériser par une distribution de la taille des particules résultantes type.

Ce dernier résultat devrait présenter un intérêt vis-à-vis de la caractérisation morphologique et fonctionnelle des organisations pelliculaires superficielles résultantes (VALENTIN, 1981).

D'autre part, on a constaté que dans le cas d'une immersion, le calibre initial des agrégats, n'influe pas sur les mécanismes et la taille des particules mobilisées, mais essentiellement sur la cinétique de désagrégation.

Ainsi, les résultats obtenus sont généralisables au niveau de l'ensemble des matériaux limoneux, dont la gamme étudiée est bien représentative, et également au sein de cette gamme, pour des agrégats de tailles variables, jusqu'à 20 mm.

L'ensemble de ces résultats nous conduit à envisager sur de nouvelles bases l'appréciation de la sensibilité des matériaux à la désagrégation :

- l'ampleur des variations de stabilité liées à l'état hydrique est beaucoup plus forte que supposé jusqu'ici ;
- le classement des matériaux est variable selon l'état hydrique auquel on se situe ;

- l'intensité de la désagrégation au cours d'une période donnée, n'est donc pas seulement liée à la stabilité du sol pour un état hydrique donné, mais dépend fortement de la probabilité qu'il a d'être dans l'un ou l'autre des domaines de désagrégation mis en évidence. Cette probabilité est liée aux propriétés de rétention en eau et de conductivité du matériau, et donc essentiellement à sa teneur en argile.

- les mécanismes correspondant aux différents domaines ainsi que les différents matériaux, se caractérisent par la dimension des particules résultantes, qui doit pouvoir être reliée à l'évolution morphologique des croûtes.

Une nouvelle caractérisation de la sensibilité des matériaux à la dégradation structurale superficielle devrait pouvoir être élaborée, en tenant compte de l'ensemble de ces données, ce qui devrait ensuite permettre de tenter une modélisation des enchaînements des processus au champ. La validation des modèles élaborés pourrait constituer une étape ultérieure de ces recherches.

*Reçu le 1^{er} juin 1988.
Accepté le 19 septembre 1988.*

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Al-Durrah M., Bradford J. M.**, 1982. Parameters for describing soil detachment due to single water drop impact. *Soil Sci. Soc. Am. Journal* 46, 836-840.
- Boiffin J.**, 1984. *La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies*. Thèse de docteur-ingénieur. INA-PG, 320 p. + annexes.
- Bollinne A.**, 1982. *Etude et prévision de l'érosion des sols limoneux cultivés en moyenne Belgique*. Thèse Université de Liège. 356 p.
- Concaret J.**, 1967. Etude des mécanismes de la destruction des agrégats de terre au contact des solutions aqueuses. *Ann. Agron.*, 18 (2), 65-90.
- De Leenheer L., De Boodt M.**, 1959. Determination of aggregate stability by the change in mean weight diameter. *Int. Symp. Bodemstructuur*. Gent, 24, 257-266.
- Ellison W. D.**, 1947. Soil erosion. *Soil. Soc. Am. Proc.*, 12, 479-484.
- Emerson W. W.**, 1967. A classification of soil aggregates based on their coherence in water. *Aust. J. Soil Res.*, 5, 47-57.
- Farres P. J.**, 1980. Some observations on the stability of soil aggregates to raindrop impact. *Catena*, 7, 223-231.
- Farres P. J.**, 1987. The dynamics of rainsplash erosion and the role of soil aggregate stability. *Catena*, 14, 119-130.
- Gras R.**, 1974. L'emprisonnement d'air lors de l'humectation des corps poreux. *Science du sol.*, 1, 49-60.
- Hénin S.**, 1938. *Etude physico-chimique de la stabilité structurale des terres*. Thèse Paris, 70 p.
- Hénin S., Monnier G.**, 1956. Evaluation de la stabilité de la structure du sol. C. R. *V. Congrès Int. Science du Sol*, Paris, Vol. B, 49-52.
- Kemper W. D.**, 1965. Aggregate stability. p. 511-519. In *Black. Methods of soil Analysis*. Amer. Soc. Agron. Inc., Madison.
- Kheyrahi D., Monnier G.**, 1968. Etude expérimentale de l'influence de la composition granulométrique des terres sur leur stabilité structurale. *Ann. Agron.*, 19 (2), 129-152.
- Monnier G.**, 1965. *Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols*. Thèse Paris. 140 p.
- Monnier G., Stengel P., Fies J. C.**, 1973. Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. *Ann. Agron.*, 25 (4), 533-545.
- Monnier G., Stengel P., Guérif J.**, 1982. Recherche de critères de la fertilité des sols et de son évolution en fonction du système de culture. C. R. Colloque CEE « *Fertilité des sols et systèmes de culture* ». Bari, 35-52.
- Raheliarisoa M. A.**, 1986. *Influence des techniques culturales sur le comportement hydrodynamique et sur la susceptibilité à l'érosion de sols limoneux et sableux*. Thèse 3^e cycle. Univ. d'Orléans, 297 p.
- Savat J., Poesen J.**, 1981. Detachment and transportation of loose sediments by raindrop splash. Part I : The calculation of absolute data on detachability and transportability. *Catena*, 8, 1-117.
- Trévisan D.**, 1986. *Comportement hydrique et susceptibilité à l'érosion de sols limoneux cultivés*. Thèse 3^e cycle. Univ. d'Orléans, INRA, 244 p.
- Valentin C.**, 1981. *Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de région subdésertique (Agadez. République du Niger)*. *Dynamique de formation et conséquences sur l'économie en l'eau*. Thèse Paris. 213 p. + annexes.
- Yoder R. E.**, 1936. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *J. of the Amer. Soc. of Agron.*, 28, 337-351.