

Recherche d'une méthode de dissociation des agrégats constituant la macrostructure du sol

Philippe de BLIC (1) et Joël FARDOUX (2)

(1) Pédologue Orstom, BP 5045, 34032 Montpellier, France

(2) Même adresse

RÉSUMÉ

Ce travail a pour objet de définir l'état hydrique optimal ainsi que la nature et l'intensité des contraintes à appliquer à un volume de sol pour le séparer en unités structurales. Des agrégats calibrés provenant d'un horizon B ferrallitique ont été soumis à quatre modes d'humectation. Seule l'humectation sous vide conserve la distribution initiale des tailles d'agrégats.

Des assemblages fragmentaires naturels ont été humectés sous vide puis désagrégés par immersion dans l'eau ou l'éthanol ou par une chute verticale.

L'immersion dans l'éthanol et la chute donnent des répartitions d'agrégats très voisines. On a vérifié, sur des massifs d'agrégats obtenus par compactage et portés à différents états hydriques, que, pour une teneur en eau de 0,25 g.g⁻¹, les deux méthodes permettent d'obtenir une répartition identique au matériau de départ. Si la désagrégation dans l'éthanol peut être considérée comme une méthode de référence, des contraintes purement mécaniques appliquées sur un échantillon porté à un état hydrique bien défini peuvent également être utilisées lorsque tout effet chimique doit être évité.

MOTS CLÉS : Agrégats – Structure – Distribution dimensionnelle – État hydrique – Fractionnement.

ABSTRACT

DESINTEGRATION OF SOIL MACROSTRUCTURE INTO AGGREGATES. METHODOLOGICAL STUDY

This paper aims at assessing the conditions of separation of structural units (aggregates) that characterize soil macrostructure at a given time. Initial water content of the aggregated soil, nature and intensity of disruptive forces are peculiarly concerned. It is essential to avoid any interference with structural stability. First, we subjected sized aggregates to four wetting techniques. Vacuum technique was the only able to preserve the initial size distribution of aggregates. Then a lot of natural clods with fragmentary fabric were subjected to various disaggregation treatments differing in disruptive force type and initial water content. Each treatment was characterized through the size distribution of created aggregates. A lot of artificial aggregate beds were used in a similar manner in order to control the initial aggregate size. Submersion into ethanol and disintegration by vertical fall technique were able to produce aggregate size distributions similar to the initial aggregate sizes.

KEY WORDS : Aggregates – Structure – Size distribution – Water content – Fractionation.

INTRODUCTION

La structure est caractérisée par la manière dont sont assemblés les divers constituants du sol (HENIN, 1976). Elle se réfère assez généralement à la forme, la taille et l'arrangement spatial d'unités structurales naturelles ou artificielles formées par l'association des particules primaires (HODGSON, 1976).

Les unités structurales font ici référence à des agrégats existant à un moment donné dans le sol, séparables les uns des autres par les faces de moindre résistance et qui ne peuvent être définis que par rapport aux forces de rupture qui permettent de les obtenir (MONNIER et TRI, 1971).

On peut, notamment, évaluer la résistance d'assemblages structuraux à l'action de l'eau dans des conditions standardisées (ALBRECHT, 1988 ; HENIN, 1938, 1976 ; KEMPER et ROSENAU, 1986). Les résultats de ces tests de stabilité structurale sont souvent exprimés en pourcentages d'agrégats stables supérieurs à une taille de référence. Ces agrégats stables ne coïncident que rarement avec les entités définissant, à un moment donné, la macrostructure du sol en place.

Cette macrostructure, souvent affectée en milieu cultivé d'une variabilité spatiale importante, peut être décrite au champ. La méthode du profil culturel (HENIN *et al.*, 1969) permet d'analyser les modifications physiques du sol sous l'action des techniques culturales (MANICHON, 1982 ; PAPY, 1987 ; BLIC, 1990) tout comme les relations sol-racines (TARDIEU, 1988).

Une telle approche doit être complétée par la mesure de certains paramètres liés à la structure des volumes de sol. La distribution dimensionnelle des agrégats est un paramètre particulièrement intéressant pour suivre l'évolution de la structure selon les pratiques culturales.

Cette détermination est toutefois délicate. Des tamisages à sec ont été utilisés pour caractériser l'action des outils sur le sol (WEILL *et al.*, 1989) et pour mesurer l'érodibilité par le vent (CHEPIL, 1962 ; ZOBECK et POPHAM, 1990). Cette méthodologie est bien adaptée aux horizons superficiels meubles constitués d'un mélange de mottes et de terre fine. Son emploi est plus délicat dans le cas d'horizons cohérents à structure moins exprimée (tels que des fonds de labour).

Le tamisage dans des liquides de traitement facilite la dissociation des assemblages selon les faces de moindre résistance. En choisissant le liquide, il

est possible de réduire sensiblement les processus d'éclatement et de gonflement des agrégats : le traitement par l'éthanol ou le méthanol s'avère particulièrement satisfaisant (CONCARET, 1967 ; MONNIER et TRI, 1971 ; HENIN et SANTAMARIA, 1975).

Des résultats très intéressants enfin ont été obtenus en soumettant des échantillons conservés à l'humidité du prélèvement à un traitement comportant une immersion dans le méthanol suivie d'un séchage sous lampe infrarouge et d'un tamisage à sec (BRAUDEAU, 1982).

Partant d'un volume pédologique homogène décrit et caractérisé à un instant dans le profil culturel, ce travail a pour but de rechercher des méthodes de désagrégation qui séparent les unités structurales qui le constituent, sans modifier leur morphologie.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

La démarche générale

Deux types de traitements ont été testés afin de désagréger des échantillons de sol non remaniés (mottes) : une immersion dans de l'éthanol ou de l'eau et une chute verticale de 2,0 m à 3,8 m.

Les unités structurales obtenues sont assimilées à des agrégats sans faire référence à leur origine ni à leur assemblage interne. Ces agrégats sont caractérisés par leur distribution dimensionnelle obtenue par tamisage à sec des échantillons aspergés de méthanol en aérosol (BRAUDEAU, 1982).

Nous avons voulu comparer les distributions d'agrégats obtenues après les différents traitements à la distribution d'agrégats de l'échantillon initial. Pour cela, on a répété les traitements sur des massifs agrégés fabriqués à partir d'une population d'agrégats de distribution dimensionnelle connue. Ces massifs ont servi également à étudier l'influence de la teneur en eau initiale des échantillons sur les modalités de la désagrégation.

Les traitements étudiés nécessitant des niveaux d'humidité constants, il a fallu humecter les échantillons. Une étude méthodologique préalable a été conduite sur des lots d'agrégats calibrés pour définir les modalités d'humectation qui ne modifient pas la taille initiale des agrégats.

Les échantillons

Le matériau étudié provient de l'horizon B1 d'un sol ferrallitique jaune fortement désaturé du

Niari (Congo). Le prélèvement a été effectué en début de saison sèche, entre 40 cm et 60 cm de profondeur, dans une fosse pédologique ouverte sous une savane à *Hyparrhenia diplandra*.

De couleur brun jaunâtre (10 YR 6/4 à 7/6), ce matériau est caractérisé par une structure polyédrique anguleuse fine nette, une compacité forte, une consistance friable à l'état frais. Ses principales caractéristiques physiques sont regroupées dans le tableau I.

TABLEAU I
Principales caractéristiques physiques
de l'horizon B1 ferrallitique étudié
*Main physical characteristics
of the studied ferralitic B1 horizon*

Texture %			
0 - 2 µm	64	50 - 200 µm	9
2 - 20 µm	16	200 - 2000 µm	6
20 - 50 µm	5		
<hr/>			
pF 2,0 (agrégats 5,0-3,15 mm)	28,2	g.g-1	
pF 3,0 (agrégats 5,0-3,15 mm)	25,5	g.g-1	
densité apparente (mottes)	1,48	g.cm-3	
densité apparente (agrégats)	1,51	g.cm-3	

Trois types d'échantillons ont été préparés à partir du matériau séché à l'air :

a) des agrégats calibrés obtenus par trituration à la main du matériau et tamisage ménagé à sec ; il s'agit des populations Niari 5,0-3,15 mm, Niari 3,15-2,0 mm et Niari 2,0-1,0 mm ;

b) des mottes de 30 à 50 cm³ extraites avec précaution du matériau non remanié ;

c) des massifs agrégés fabriqués à partir du matériau tamisé à 5,0 mm et homogénéisé. Les massifs ont été obtenus par un compactage dynamique effectué à l'état humide dans un moule cylindrique (diamètre 5,4 cm, hauteur 3,0 cm). L'état d'humidité, déterminé à partir d'un test de compactage préalable, a été choisi de façon à réaliser un tassement maximum dans les conditions de l'essai.

Étude des modalités d'humectation

Des échantillons de 20 à 30 g, prélevés dans les trois populations d'agrégats calibrés, ont été

humectés en conditions contrôlées selon les trois modalités suivantes :

T0 Témoin	Pas d'humectation.
T1 Humectation brutale	Les agrégats secs ont été plongés dans un excès d'eau
T2 Humectation rapide	Imbibition partielle par capillarité pendant 2 minutes, puis submersion rapide.
T3 Humectation ménagée	Les agrégats ont été disposés sur un papier filtre maintenu à un potentiel de - 0,1 kPa.
T4 Humectation sous vide	Les agrégats ont été soumis au vide, puis imbibés à un potentiel de - 0,1 kPa, le vide étant maintenu.

Les échantillons, transférés sur un tamis de 50 µm, ont été séchés selon la méthode définie par BRAUDEAU (1982) avant d'être tamisés à sec.

Trois sous-traitements supplémentaires ont été effectués sur la population Niari 5,0-3,15 mm afin d'évaluer l'effet d'une submersion rapide dans l'eau ou l'éthanol après humectation ménagée et humectation sous vide. Ils sont désignés T3 eau, T4 étha et T4 eau.

On a procédé à 5 répétitions par traitement et sous-traitement. À la suite du traitement le plus agressif (T1), on a séparé sur les trois populations Niari les sables libres (> 0,05 mm) présents dans les différentes fractions de tamisage.

Étude des modalités de désagrégation des mottes

L'objectif principal étant de comparer différentes forces de rupture et d'évaluer la dispersion des résultats, il a fallu au préalable déterminer l'état hydrique auquel il convenait de travailler.

Les mottes ont été humectées par capillarité sous vide à un potentiel hydrique égal à - 0,1 KPa, puis ajustées à l'humidité désirée par dessèchement contrôlé à 70 °C avant d'être soumises aux différents traitements étudiés.

Au cours d'un essai préliminaire, on a testé sans répétition plusieurs forces de rupture et plusieurs états hydriques, ces derniers choisis d'après les courbes de retrait établies sur des matériaux de même origine et de texture comparable (BRAUDEAU, 1988). Les forces de rupture testées comportaient :

- une immersion brutale dans de l'eau,
- une immersion brutale dans de l'éthanol,
- une chute verticale d'une hauteur de 2,0 m.

Les teneurs en eau des mottes étaient : 0,15 g.g⁻¹ ; 0,22 g.g⁻¹ ; 0,30 g.g⁻¹.

Les résultats de cet essai préliminaire seront discutés. Ils nous ont conduit à fixer l'état hydrique des mottes à la valeur $0,22 \text{ g.g}^{-1}$ dans l'essai force de rupture.

Dans l'essai force de rupture, on a comparé les traitements suivants :

Traitement	Force de rupture	État hydrique
Eau 0	immersion dans l'eau	séché air
Eau 22	immersion dans l'eau	$0,22 \text{ g.g}^{-1}$
Etha 22	immersion dans l'éthanol	$0,22 \text{ g.g}^{-1}$
Chute 3,8 m	chute d'une hauteur de 3,8 m	$0,22 \text{ g.g}^{-1}$
Chute 2,5 m	chute d'une hauteur de 2,5 m	$0,22 \text{ g.g}^{-1}$
Chute 2,0 m	chute d'une hauteur de 2,0 m	$0,22 \text{ g.g}^{-1}$

Neuf répétitions ont été effectuées par traitement. Les mottes du traitement témoin ont été soumises à un simple tamisage à sec (6 répétitions). Le traitement Eau 0 constituait la référence stabilité structurale.

Étude des modalités de désagrégation des massifs artificiels

On a appliqué aux massifs artificiels agrégés des traitements choisis de façon à :

- tester plusieurs forces de rupture à même état hydrique initial,
- évaluer l'influence de l'état hydrique initial des massifs sur les distributions d'agrégats obtenues après une chute verticale.

Les traitements étudiés ont été les suivants :

Traitement	Force de rupture	État hydrique
Eau 0	immersion dans l'eau	séché air
Eau 25	immersion dans l'eau	$0,25 \text{ g.g}^{-1}$
Etha 25	immersion dans l'éthanol	$0,25 \text{ g.g}^{-1}$
Chute 25	chute de 2,0 m de haut	$0,25 \text{ g.g}^{-1}$
Chute 20	chute de 2,0 m de haut	$0,20 \text{ g.g}^{-1}$
Chute 30	chute de 2,0 m de haut	$0,30 \text{ g.g}^{-1}$

La densité apparente sèche moyenne des massifs était égale à $1,31 \pm 0,01 \text{ g.cm}^{-3}$.

Après humectation sous vide à un potentiel hydrique égal à $-0,1 \text{ kPa}$, les massifs ont été amenés par dessiccation contrôlée aux différents états hydriques choisis.

Les distributions d'agrégats obtenues à l'issue des différents traitements ont été comparées à la distribution des agrégats initiaux non compactés. Le traitement témoin a comporté un tamisage à sec des agrégats de départ après pulvérisation de méthanol sous lampe infrarouge.

On a vérifié que le mode de chute des massifs, sur la tranche ou à plat, n'a pas d'incidence notable sur la distribution des agrégats résultants.

RÉSULTATS, DISCUSSION

Modalités d'humectation

Les sables libres sont peu abondants et répartis de façon homogène dans toutes les fractions de tamisage. Leurs pourcentages cumulés sont les suivants :

- 3,8 % pour la population Niari 2,0-1,0 mm, dont 1,1 % de sables supérieurs à 1 mm préexistant au traitement,
- 2,2 % pour Niari 3,15-2,0 mm, dont 0,2 % de sables initiaux,
- 1,7 % pour Niari 5,0-3,15 mm.

Eu égard à leur faible importance relative, les sables libres peuvent être négligés sans risque sérieux de biais, d'autant que la submersion par l'eau ne constituait dans ce travail qu'une référence vis-à-vis de traitements libérant moins de sables.

Les agrégats obtenus à l'issue des différents traitements sont caractérisés par leur distribution dimensionnelle. Nous présentons ici les résultats concernant la population Niari 5,0-3,15mm, bien représentative du comportement des trois populations étudiées (tabl. II).

TABLEAU II
Taux cumulé (%) d'agrégats inférieurs à une taille donnée. Population Niari 5,0-3,15 mm
Cumulative percentage of aggregates

taille mm	mode d'humectation							
	brutale	rapide	ménagée	ménagée	vide	vide	vide	témoin
	T1	T2	T3	T3eau	T4	T4eau	T4éth	T0
0,2	3,2	1,4	0,7	0,8	0,7	0,8	0,9	0,8
0,5	10,4	3,1	1,2	1,3	1,0	1,1	1,2	1,1
1,0	22,9	6,7	1,7	1,8	1,2	1,3	1,5	1,4
2,0	51,6	17,7	3,5	3,5	1,9	2,0	2,3	2,2
3,15	80,9	38,7	11,8	10,8	5,9	5,8	7,0	6,0

Les distributions T3 et T3 Eau sont pratiquement identiques. Cela confirme bien que, pour le matériau étudié, une préhumectation ménagée protège efficacement les agrégats vis-à-vis d'une submersion ultérieure. Quant à l'humectation sous vide, suivie ou non d'une submersion dans l'eau ou l'éthanol, elle fournit des distributions d'agrégats identiques au témoin non humecté.

Le *taux de désagrégation* est un paramètre intéressant pour comparer les effets des différents traitements sur une population d'agrégats calibrés. Il s'agit du taux pondéral (%) d'agrégats inférieurs à la plus petite taille initiale (taux d'agrégats inférieurs à 3,15 mm pour la population Niari 5,0-3,15 mm, par exemple).

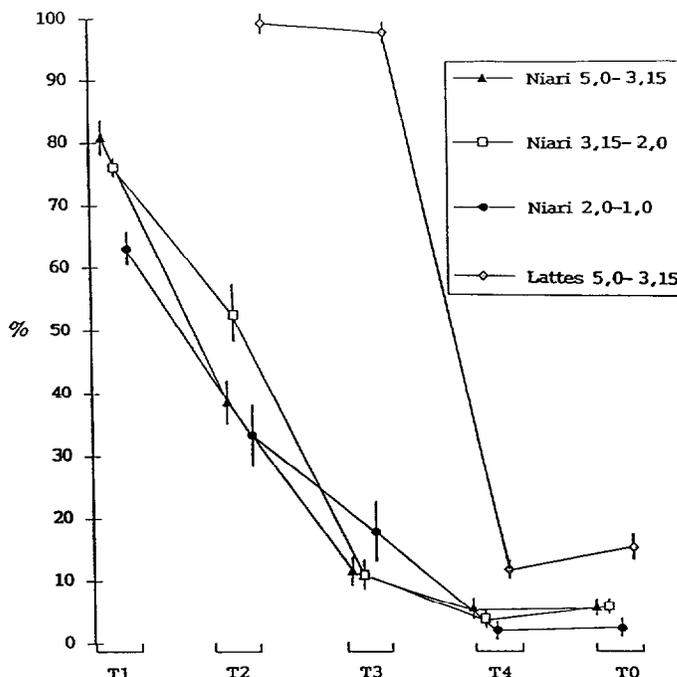


FIG. 1. — Influence du mode d'humectation des agrégats sur le taux de désagrégation.
Influence of wetting technique of aggregates on disaggregation rate.

La figure 1 présente les valeurs moyennes du taux de désagrégation avec leurs écarts-types pour chaque population et chaque traitement.

Il nous a paru intéressant d'y faire figurer des résultats illustrant un comportement à l'humectation assez différent. Il s'agit d'une population d'agrégats (Lattes 5,0-3,15 mm) prélevée dans l'horizon Ap d'un limon sablo-argileux calcaire

proche de Montpellier. Trois modes d'humectation avaient été comparés avec trois répétitions.

Les trois populations Niari présentent des comportements très voisins. Les taux de désagrégation sont en relation directe avec l'agressivité du mode d'humectation. Une préhumectation, même partielle et de courte durée (T2), réduit de près de moitié la désagrégation dans l'eau par rapport à la submersion brutale d'agrégats secs (T1).

LE BISSONNAIS (1989) a obtenu, à la suite d'expériences comparables sur des matériaux argileux, des taux de désagrégation nettement plus élevés, même sous vide, de l'ordre de 30 à 50 %. Il pense que le gonflement joue un rôle prédominant dans la destruction des agrégats lorsque le taux d'argile est supérieur à 40 %. Or le matériau ferrallitique étudié ici est à plus de 60 % d'argile. On peut penser que c'est la nature minéralogique de l'argile (kaolinite) qui induit cette différence de comportement à l'humectation.

La population Lattes 5,0-3,15 mm montre un comportement très comparable aux matériaux limoneux étudiés par LE BISSONNAIS (1989). L'action de l'eau à pression atmosphérique, même ménagée, provoque une dislocation intense des agrégats qui contraste avec les faibles taux de désagrégation observés après imbibition sous vide. LE BISSONNAIS explique ce comportement par la prédominance du mécanisme d'éclatement lié au piégeage d'air dans l'espace poral des agrégats au cours de l'humectation à l'air libre.

La figure 1 montre que l'humectation par capillarité sous vide est la seule, dans les conditions de l'expérience, à assurer des taux de désagrégation très voisins du témoin.

C'est le mode d'humectation qui a été retenu dans la suite de ce travail pour amener à saturation des échantillons de sol séchés à l'air.

Désagrégation d'assemblages naturels

ESSAI PRÉLIMINAIRE

Les résultats obtenus lors de l'essai préliminaire sans répétition sont à considérer avec précaution. Ils peuvent être résumés ainsi :

- pour une teneur en eau de 0,30 g.g⁻¹, les mottes n'ont subi qu'un léger effritement périphérique (eau, éthanol) ou une fragmentation très grossière (chute) ;

- aux deux autres teneurs en eau, la désagrégation des mottes a été complète, conduisant à diverses répartitions en classes d'agrégats selon le traitement imposé ;

- pour une teneur en eau de 0,22 g.g⁻¹, immersion dans l'éthanol et chute de 2 m ont fourni des

distributions d'agrégats très voisines que nous avons pu décrire dans les mêmes termes que la structure du sol en place.

ESSAI FORCE DE RUPTURE

Nous avons comparé les taux d'agrégats recueillis dans chaque classe de taille à l'issue des différents traitements. Les valeurs moyennes en sont reportées sur la figure 2. Pour plus de lisibilité, seules ont été reprises ici les fractions de taille inférieure à 5,0 mm. Une analyse de variance classique a permis de tester, pour chaque classe de taille, les différences entre les traitements pris deux à deux.

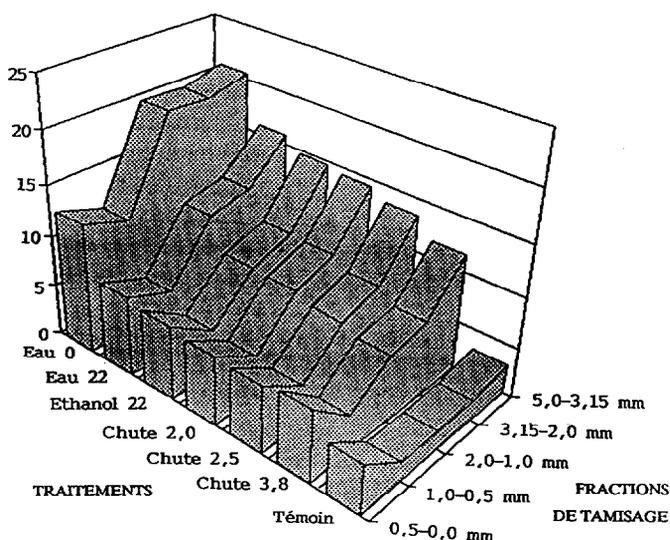


FIG. 2. - Désagrégation de mottes naturelles : distribution dimensionnelle des agrégats.
Disaggregation of natural clods : size distribution of aggregates.

Le traitement Eau 0 fournit les valeurs moyennes les plus élevées dans toutes les classes. Les différences avec les autres traitements sont hautement significatives ($P < 0,01$).

À l'opposé, le témoin se distingue de tous les traitements par des valeurs moyennes plus faibles ($P < 0,01$).

Le traitement Eau 22 se distingue bien de Chute 2 m ($P < 0,01$) et de Chute 2,5 m ($P < 0,05$). Il ne se différencie pas significativement, en raison de sa forte variabilité, de Etha 22 et Chute 3,8 m.

Etha 22 et les Chutes des trois hauteurs ne se différencient significativement dans aucune des classes de taille. On notera en particulier la grande

similitude des distributions générées par Etha 22 et Chute 3,8 m. La variabilité des résultats est toutefois assez importante, surtout dans les classes de taille les plus grandes. Nous avons calculé que 30 mottes seraient requises pour mesurer les taux d'agrégats avec une erreur relative sur la moyenne inférieure à 10 % ($P = 0,05$).

La distribution dimensionnelle des agrégats recueillis à l'issue des traitements Ethanol et Chutes nous est apparue en concordance avec les notations visuelles effectuées sur le sol en place.

Nous avons alors cherché à vérifier à l'aide des massifs agrégés artificiels si la mise en oeuvre de traitements peu agressifs permettait effectivement de retrouver les classes d'agrégats de départ.

Désagrégation de massifs artificiels agrégés

La figure 3 présente les courbes de distribution dimensionnelle cumulée des agrégats résultant du traitement Chute pour trois teneurs en eau initiales des massifs. Aux teneurs en eau $0,20 \text{ g.g}^{-1}$ et $0,30 \text{ g.g}^{-1}$, la séparation des agrégats a été très incomplète, laissant un important résidu de calibre supérieur à la plus grande taille initiale (5,0 mm).

Seul le traitement Chute réalisé à une teneur en eau de $0,25 \text{ g.g}^{-1}$ a été retenu pour être comparé au témoin ainsi qu'aux autres traitements testés. On a reporté sur la figure 4 les taux moyens d'agrégats par traitement et par classe de taille.

L'immersion des massifs secs (Eau 0) a entraîné, par rapport à tous les autres traitements, une augmentation importante des taux d'agrégats dans les classes 0-0,5 et 0,5-1,0 mm.

L'immersion dans l'eau des massifs humides (Eau 25) s'est traduite, par rapport aux traitements Etha 25 et Chute 25, par une augmentation des taux d'agrégats de taille inférieure à 1,0 mm (+ 19,6 % significatif à $P < 0,01$).

À une teneur en eau de $0,25 \text{ g.g}^{-1}$, correspondant pour le matériau étudié à pF 3,0, les traitements Ethanol et Chute ont fourni des distributions d'agrégats pratiquement identiques. Par rapport au matériau de départ, ces deux populations se sont appauvries en agrégats 5,0-3,15 mm, la différence se retrouvant surtout dans les fractions comprises entre 2,0 mm et 0,5 mm. On peut penser que le mode de préparation des massifs, notamment le compactage dynamique, a entraîné la fragmentation préférentielle d'une partie des plus gros agrégats initiaux.

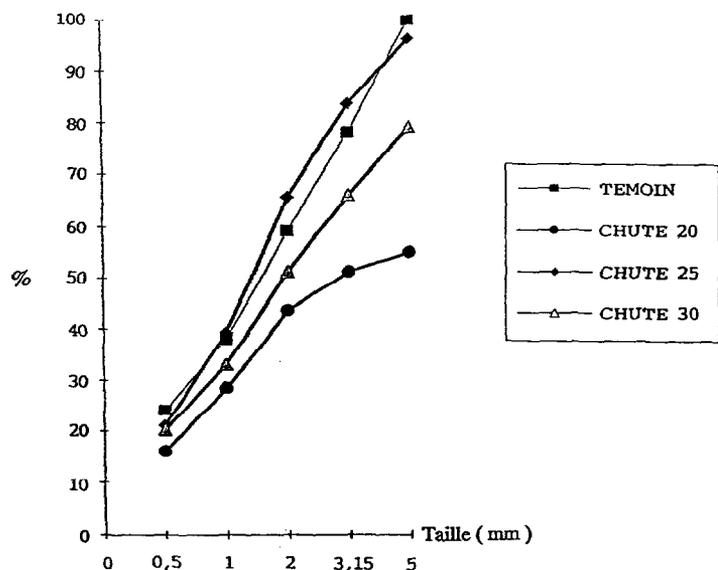


FIG. 3. – Massifs agrégés artificiels : influence de l'état hydrique initial sur la fragmentation résultant d'une chute verticale.
Artificial aggregate beds : role of the initial water content on fragmentation with vertical fall technique.

CONCLUSION

L'état hydrique des assemblages fragmentaires influence fortement les modalités de leur désagrégation, notamment sous l'effet de forces de rupture mécaniques. Pour le matériau ferrallitique étudié, le créneau hydrique optimal s'est avéré relativement étroit, correspondant à un potentiel de 100 kPa (pF 3,0).

Les expériences de fractionnement menées, tant sur assemblages naturels que sur massifs artificiels agrégés, montrent que l'utilisation de méthodes peu agressives est susceptible de conduire à une population unique d'agrégats que l'on peut caracté-

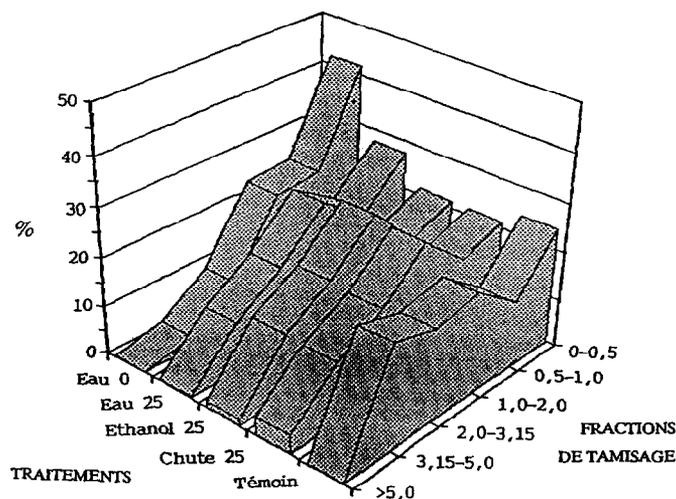


FIG. 4. – Désagrégation de massifs artificiels : distribution dimensionnelle des agrégats.
Disaggregation of artificial beds : size distribution of aggregates.

tériser par ses paramètres de distribution dimensionnelle.

Les fractionnements de massifs artificiels permettent d'avancer que cette population d'agrégats correspond à celle qui caractérise la macrostructure du sol en place.

Si la désagrégation en conditions contrôlées dans l'éthanol peut être considérée comme une méthode de référence, l'utilisation de forces de rupture purement mécaniques est susceptible de fournir une alternative intéressante dans tous les cas où l'on souhaite obtenir des agrégats indemnes de tout effet chimique.

Manuscrit accepté par le Comité de rédaction le 29 juin 1992

BIBLIOGRAPHIE

- ALBRECHT (A.), 1988. – Influence du système de culture sur l'agrégation d'un vertisol et d'un sol ferrallitique (Antilles). *Cah. Orstom, Sér. Pédol.*, 24 : 351-353.
- BLIC (P. de), 1990. – L'examen du profil cultural : un outil pour mieux comprendre le comportement du sol soumis à des travaux aratoires. In : Organic matter management and tillage in humid and subhumid Africa, *Ibsram Proceedings*, n°10, Bangkok : 385-399.
- BRAUDEAU (E.), 1982. – Fractionnement physique du sol. Méthode de séparation et étude du comportement d'agrégats de 0,020 à 2 mm. *Cah. Orstom, Sér. Pédol.*, 19 : 353-367.
- BRAUDEAU (E.), 1988. – Méthode de caractérisation pédohydrrique des sols basée sur l'analyse de la courbe de retrait. *Cah. Orstom, Sér. Pédol.*, 24 : 179-189.
- CHEPIL (W.S.), 1962. – A compact rotary sieving and the importance of dry sieving in physical soil analysis. *Soil Sc. Soc. Am. J.*, 26 : 4-6.
- CONCARET (J.), 1967. – Étude des mécanismes de la destruction des agrégats de terre au contact de solutions aqueuses. *Ann. Agr.*, 18 : 67-90.
- HENIN (S.), 1938. – *Étude physicochimique de la stabilité structurale des terres*. Thèse, Univ. Paris.
- HENIN (S.), 1976. – Cours de physique du sol. Volume 1 : Texture - Structure - Aération. Orstom, n° 28.
- HENIN (S.), GRAS (R.), MONNIER (G.), 1969. – *Le profil cultural*. 2^e édition. Masson ed., Paris, 332 p.
- HENIN (S.), SANTAMARIA (R.), 1975. – Observation comparée sur le comportement des fragments de terre soumis à l'action de l'eau, de différentes solutions et de l'alcool. *Sc. du Sol*, 3 : 171-182.
- Hodgson (J.M.), 1976. – Soil survey field handbook. *Tech. Monograph*. n° 5, Soil Survey of England and Wales, Harpenden.
- KEMPER (W.D.), ROSENAU (R.C.), 1986. – Aggregate stability and size distribution. In : A. Klute (ed), *Methods of Soil Analysis, Part I, Agronomy* 9 : 425-442.
- LE BISSONNAIS (Y.), 1989. – Analyse des processus de microfissuration des agrégats à l'humectation. *Sc. du Sol*, 27 : 187-199.
- MANICHON (H.), 1982. – L'action des outils sur le sol : appréciation de leurs effets par la méthode du profil cultural. *Sc. du Sol*, 3 : 203-219.
- MONNIER (G.), BUI HUU TRI, 1971. – Une méthode d'évaluation de la taille des éléments structuraux du sol. *Sc. du Sol*, 2 : 17-27.
- PAPY (F.), 1987. – Comportement d'une couche labourée sous des actions de compactage en fonction de son état hydrique et structural. *Agronomie*, 7 : 111-121.
- TARDIEU (F.), 1988. – Analysis of spatial variability of maize root density. I. Effect of discontinuous wheel compaction on spatial arrangement of roots. II. Distance between roots. *Plant and Soil*, 107 : 259-266 et 267-272.
- WEILL (A.N.), DE KIMPE (C.R.), Mc KYES (E.), 1989. – Effect of tillage reduction and fertilizer on soil macro- and microaggregation. *Can. J. Soil Sci.*, 69 : 489-500.
- ZOBECK (T.M.), POPHAM (T.W.), 1990. – Dry aggregation size distribution of sandy soil as influenced by tillage and precipitation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54 : 198-204.