



Etude quantitative de la granulation des sols sous prairies de graminees. 1. Parametres definissant la structure granulaire et leur relation avec la porosite du sol

- Bui Huu Tri, Gwendal Monnier

► To cite this version:

- Bui Huu Tri, Gwendal Monnier. Etude quantitative de la granulation des sols sous prairies de graminees. 1. Parametres definissant la structure granulaire et leur relation avec la porosite du sol. Annales Agronomiques, 1973, 24 (4), pp.401-424. hal-02729473

HAL Id: hal-02729473

<https://hal.inrae.fr/hal-02729473>

Submitted on 2 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ÉTUDE QUANTITATIVE DE LA GRANULATION DES SOLS SOUS PRAIRIES DE GRAMINÉES

I. — PARAMÈTRES DÉFINISSANT LA STRUCTURE GRANULAIRE ET LEUR RELATION AVEC LA POROSITÉ DU SOL

BUI HUU TRI et G. MONNIER

avec la collaboration technique de Claude CLOAREC et C. JEANDET

*Laboratoire des Sols, Station d'Agronomie,
Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,
78000 Versailles*

Annales agronomiques

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149, rue de Grenelle, 75007 Paris

ÉTUDE QUANTITATIVE DE LA GRANULATION DES SOLS SOUS PRAIRIES DE GRAMINÉES

I. — PARAMÈTRES DÉFINISSANT LA STRUCTURE GRANULAIRE ET LEUR RELATION AVEC LA POROSITÉ DU SOL

BUI HUU TRI et G. MONNIER

avec la collaboration technique de Claude CLOAREC et C. JEANDET

*Laboratoire des Sols, Station d'Agronomie,
Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,
78000 Versailles*

RÉSUMÉ

A l'examen morphologique d'un nombre important d'échantillons de sols variés prélevés sous prairies jeunes, on a observé des états structuraux très différents qui ont pu être caractérisés par deux paramètres, obtenus à partir d'un test utilisant l'alcool éthylique à 95° comme liquide de traitement et de tamisage.

Le premier paramètre, T_{10} , est le taux cumulé d'éléments structuraux de diamètre inférieur à 10 mm ; il représente le degré de développement de la structure. Le deuxième, φ , est la taille moyenne de ces éléments ; il indique le degré de finesse de la granulation.

On constate que les terres présentant un état de division nette se subdivisent en deux groupes, granulaires normales et granulaires légères, impliquant des mécanismes de granulation différents dont les conséquences sont différentes également.

Les calculs de corrélation font apparaître un seuil, $T_{10} = 30$ p. 100, dans le degré de développement, à partir duquel outre sa visibilité, la granulation intervient pour augmenter la porosité totale du sol. Celle-ci, dans les terres granulaires normales, est significativement reliée à T_{10-30} , et mieux encore, à $1/\varphi$, ces deux paramètres étant d'ailleurs très dépendants l'un de l'autre. En outre, dans ces terres, les variations de la porosité totale sont dues aux variations de la porosité structurale définie comme la fraction de porosité correspondant au volume propre des fissures entre les éléments structuraux.

INTRODUCTION

Au cours d'un travail récent, l'un de nous (TRI, 1968) a étudié les conditions d'apparition de l'état structural granulaire fréquemment observé sous prairie de graminées. Cette recherche conduite par la voie expérimentale en vase de végétation ou sur des modèles de laboratoire plus simples encore, a permis de mettre en évidence le rôle joué par un certain nombre de facteurs dans l'apparition et le développement de la granulation. C'est ainsi qu'il est apparu que si la présence

des racines était une condition nécessaire, elle ne pouvait être considérée comme suffisante. L'étude des mécanismes mis en cause a en effet montré que c'est par l'intermédiaire des phénomènes de gonflement et de retrait liés à des alternances d'humectation et de dessiccation que se produisaient la fissuration et (ou) l'aggrégation responsables, selon le cas, de la granulation. Dans ces conditions, il était prévisible, et l'expérience l'a confirmé, que la texture du sol et le régime hydrique auquel il était soumis intervenaient de façon déterminante. C'est seulement lorsque ces deux types de conditions sont remplis que l'influence des racines se manifeste en accentuant le phénomène et, plus particulièrement, en commandant la dimension des éléments structuraux résultants.

Toutefois, la méthode même utilisée, qui reposait sur une schématisation de la réalité dans le but d'en isoler les mécanismes principaux, entraînait certaines limitations à la généralisation des résultats obtenus :

— en premier lieu, il n'avait pu être mis en évidence que l'action des seuls facteurs volontairement mis en jeu ;

— par ailleurs, certains de ces facteurs, et en particulier la constitution physique du matériau soumis à l'évolution n'était étudiée que de façon très discontinue sur quelques matériaux considérés comme caractéristiques. De ce fait, les résultats obtenus ne pouvaient conduire à une formulation quantitative de leur influence, ni à la détermination de seuils d'apparition de la granulation.

Nous nous proposons donc ici de compléter cette première approche par l'étude de l'état structural réellement observé sous prairie dans des conditions pédologiques, climatiques et culturelles très variées. Nous nous efforcerons de chercher les relations entre d'une part, l'apparition, le développement et la finesse de la granulation et, d'autre part, un nombre plus élevé de facteurs caractéristiques du milieu. Bien entendu, la constitution de l'échantillon de cette enquête et le choix des méthodes mises en œuvre pour caractériser les différentes situations ont été orientés et facilités par les résultats dont nous venons de rappeler les grandes lignes. Leur description fera l'objet de la première partie de ce mémoire. Dans une deuxième partie, nous rechercherons les paramètres définissant l'état structural granulaire et enfin, nous examinerons les conséquences de la granulation au niveau de la porosité de la couche de sol intéressée.

Dans un mémoire ultérieur, ces paramètres de granulation seront étudiés en relation avec la constitution physique du sol et le système racinaire des graminées fourragères dans le but de déterminer les conditions d'apparition et de développement de la granulation et les facteurs qui commandent la taille des éléments structuraux obtenus.

I. — MATÉRIEL ET MÉTHODES

A. — Constitution de l'échantillon

1. Considérations générales.

La collecte des échantillons a été réalisée à partir de la plupart des régions agricoles de France dans des conditions variées de sol, d'espèces de graminées, d'exploitation et de climat.

Des 80 échantillons reçus, nous avons éliminé ceux qui ont été sous luzerne et retenu 71.

Ces derniers proviennent de sols à textures sableuses, limoneuses ou moyennement argileuses. Il n'y a pas eu de terres ayant plus de 60 p. 100 d'argile.

L'espèce de graminées la plus représentée est le Ray-Grass d'Italie ; viennent ensuite la fétuque des prés, la fétuque élevée, le dactyle et la fléole. Dans certains cas, nous avons également eu affaire à des mélanges de ces espèces. Les prairies ont été conduites soit en culture sèche, soit en culture irriguée et exploitées soit par pâturage, soit par fauche. Toutefois, le nombre de prairies irriguées étant trop petit par rapport à celui des prairies non irriguées, l'étude de la granulation que nous avions prévue en fonction de l'approvisionnement en eau n'a pas pu être réalisée.

Enfin, comme l'objet de ce travail était limité à l'étude de la granulation, nous avons cherché à réduire, dans toute la mesure du possible, les phénomènes complémentaires susceptibles d'intervenir sous prairie, en particulier la stabilisation par les matières organiques (MONNIER, 1965) et l'action de la faune du sol. Pour cela, nous avons choisi des prairies relativement jeunes, ayant tout au plus 20 mois au moment du prélèvement. En fait, elles contiennent le plus souvent des taux de matières organiques déjà importants pouvant atteindre dans un cas extrême 14 p. 100. Nous verrons dans un mémoire ultérieur en quoi cela peut influencer les résultats obtenus. D'ores et déjà, il est à noter que les résultats rapportés dans ce mémoire représentent la conséquence globale de l'action intégrée de tous les facteurs que nous venons d'énumérer.

2. Mode de prélèvement.

Cette opération a été standardisée suivant un protocole dont nous indiquons ici les grandes lignes.

Sur chaque prairie retenue, un monolithe de terre d'environ $18 \times 13 \times 13$ cm de dimensions est prélevé de façon à éviter toute perturbation de son état structural. Il est ensuite enveloppé dans une toile de nylon et séché à l'air avant d'être expédié. Notons que, pour notre enquête, c'est l'état structural de ce monolithe particulier par rapport à celui des monolithes provenant d'autres prairies qui nous intéressait, plus que la représentativité de l'échantillon vis-à-vis de la prairie considérée. C'est la raison pour laquelle un seul monolithe a été pris sur chaque prairie.

Sur les monolithes ainsi obtenus, nous avons effectué des observations, des mesures et des tests sur 2 profondeurs (0-6 cm et 6-12 cm) dont la justification est donnée par ailleurs.

B. — Description du système sol-racine

Pour définir ce système, nous avons mis en œuvre un certain nombre de méthodes que nous allons rapidement décrire.

1. Caractérisation du matériau.

Elle est effectuée sur des échantillons issus de monolithes et préalablement tamisés à 2 mm et comporte essentiellement trois catégories de mesures.

a) Évaluation quantitative des éléments constitutifs.

Ceux qui nous intéressent en particulier sont la granulométrie, les taux de matières organiques. Ils ont été déterminés respectivement par une analyse granulométrique sans décarbonatation, un dosage du carbone total par la méthode Anne.

b) Évaluation des propriétés du matériau.

Les mesures de pH et la détermination de la capacité d'échange (par extraction à l'acétate d'ammonium N neutre) ont pour but de mieux caractériser l'argile et la composition ionique du sol. L'humidité équivalente a été déterminée par centrifugation à 1 000 g dans le but de compléter la qualification texturale des sols étudiés. De plus, c'est à partir de cette humidité caractéristique qu'est déterminée l'humidité de malaxage adoptée pour la préparation des échantillons en vue de définir leur porosité texturale et leur coefficient de gonflement potentiel (FRÈS et FAURE, 1972).

La porosité texturale est une caractéristique liée à la composition granulométrique du matériau. Elle représente le volume des vides ménagés par l'arrangement des particules élémentaires à l'état humide ou à l'état sec et peut être obtenue à partir de la relation :

$$P_{\text{text.}} = \frac{\gamma - d_t}{\gamma} \times 100 \quad (1)$$

dans laquelle γ est la densité réelle du matériau et d_t est la densité apparente texturale due à l'organisation spontanée des éléments constitutifs de ce dernier. La densité réelle γ a été déterminée au pycnomètre à air et la densité apparente texturale d_t sèche et humide par la méthode au vernis. Pour cette dernière, le protocole suivi pour la préparation des mottes est celui adopté par KHEYRABI et MONNIER (1968) et le vernis utilisé (F 310) est apparenté à celui (F 220) préconisé par BRASHER (1966).

Quant au coefficient de gonflement potentiel, il est déterminé à l'humidité de saturation, c'est-à-dire dans l'état où tous les pores sont remplis d'eau. Il définit un gonflement potentiel lié à la texture et à la nature de l'argile que nous désignons par G. Cet indice a été calculé suivant la relation :

$$G = \frac{V_h - V_s}{V_s} \times 100 \quad (2)$$

dans laquelle V_h et V_s sont respectivement les volumes apparents humide (à saturation) et sec mesurés par la méthode au vernis, à partir d'un échantillon qui a été préparé suivant le protocole KHEYRABI et MONNIER (1968).

Notons que la valeur absolue de ce coefficient exprime également la possibilité qu'a un échantillon saturé de diminuer de volume au cours de sa dessiccation. Il mesure donc l'amplitude maxima des variations de volume quel qu'en soit le signe susceptible de se manifester lorsque l'humidité du sol varie dans un sens ou dans l'autre.

c) Évaluation de la stabilité structurale.

Enfin, pour nous rendre compte du comportement des échantillons au point de vue stabilité structurale, le test classique de HÉNIN et MONNIER (1956) a été également pratiqué sur des prises d'essai provenant des monolithes.

2. Caractérisation du système racinaire.

Elle est essentiellement basée sur la détermination de la longueur des racines par la méthode des intersections de NEWMAN (1965).

a) Principe.

Soit une surface S sur laquelle on a disposé au hasard un certain nombre de segments de droite. Selon NEWMAN, le nombre d'intersections N avec les segments d'une racine étalés sur cette surface est d'autant plus grand que la racine est plus longue. N peut donc être utilisé pour estimer la longueur de la racine. Soit Δl un élément de racine ; NEWMAN a démontré que le nombre d'intersections de Δl avec les segments de droite ayant une longueur totale H serait :

$$N = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{(\Delta l)H}{S} |\sin \theta| d\theta \quad (3)$$

θ étant l'angle qui se forme au point d'intersection ; et après intégration :

$$N = \frac{2(\Delta l)H}{S} \quad (4)$$

Une aliquote de racines de longueur l peut être considérée comme composée de la somme de courts segments de droite Δl . La longueur l peut de ce fait être estimée en fonction de N :

$$l = \frac{\pi NS}{2H} \quad (5)$$

b) Description de la technique.

A partir d'un poids P_r de racines extraites d'un échantillon de terre pesant entre 800 et 1 000 g (P_e) dont nous avons déterminé au préalable la densité apparente d_a , nous avons prélevé une aliquote p (50 à 100 mg). Cette dernière est étalée uniformément dans un rectangle de dimensions $S = 8 \times 6$ cm, dessiné sur le fond d'une boîte de Pétri. Ce rectangle est subdivisé en 20 petits rectangles de 1,6 cm $\times$ 1,5 cm de côté chacun et numérotés de 1 à 20 pour identification sous le binoculaire. Les racines étant bien aplaties et réparties dans le grand rectangle, on les observe au binoculaire (grossissement $\times 6$) et l'on compte le nombre d'intersections entre les fragments de racines contenus dans chacun des petits rectangles et le réticule

de l'oculaire. Nous avons effectué 2 comptages. Soit D (cm), la longueur apparente du réticule et N le nombre total d'intersections correspondant à C comptages ; la longueur l (cm) de l'aliquote est alors calculée à partir de la formule (5) dans laquelle $H = C \times D$.

c) *Notions de longueur spécifique et volumique.*

En partant de la correspondance ainsi obtenue entre le poids et la longueur de l'aliquote, nous avons déterminé deux caractéristiques que nous appellerons longueur spécifique (L_s) et longueur volumique (L_v).

La longueur spécifique L_s est la longueur par unité de poids de racines (cm/g) considérée comme un caractère spécifique du système racinaire.

La longueur volumique L_v est une évaluation de la densité d'enracinement dans le sol en place. Elle est exprimée en cm/cm³ et calculée par la formule :

$$L_v = \frac{L_s \times P_r \times d_a}{P_s} \quad (6)$$

dans laquelle :

P_r = poids de racines ;

P_s = poids de l'échantillon de terre ;

d_a = densité apparente de l'échantillon.

Rappelons que cette longueur volumique semble caractériser de façon efficace l'enracinement par rapport au phénomène de granulation (TRI, 1968).

C. — Évaluation de l'état structural et de ses conséquences

1. Critères de définition.

a) Observations visuelles.

Avant toute opération de prélèvement d'échantillons pour les mesures décrites précédemment, les monolithes ont été soumis, dans l'état (sec) où nous les avons reçus, à une observation directe. Celle-ci, effectuée sur chacune des 2 profondeurs retenues, nous a permis de distinguer 3 états structuraux principaux que nous avons qualifiés de *continu*, *tendance granulaire* et *granulaire*. Il n'a pas été possible de parvenir à un classement plus précis ni d'évaluer de façon suffisamment sûre la taille moyenne des éléments structuraux.

b) Le test à l'alcool.

Nous avons ensuite comparé cette classification qualitative avec les résultats obtenus par le test à l'alcool sur des échantillons provenant des 2 profondeurs de chacun des monolithes (MONNIER et TRI, 1971).

α. Mode opératoire. — Rappelons que le test à l'alcool consiste à immerger dans l'alcool éthylique à 95° un échantillon non remanié (60 à 100 g) de la couche de sol à étudier et de le tamiser, également dans de l'alcool, à travers une batterie de tamis ; nous en avons utilisé 6 ayant des ouvertures de mailles de 10, 5, 3, 2, 1 et 0,5 mm. Les éléments structuraux recueillis sur chacun de ces tamis sont ensuite séchés à 105°C et pesés. Leur taux respectif par rapport au poids initial de l'échantillon détermine la distribution dimensionnelle des éléments structuraux. Nous avons retenu deux critères pour la caractériser : le taux d'éléments structuraux plus petits que 10 mm et leur taille moyenne.

β. Le taux d'éléments < 10 mm. — Étant donné qu'en général, la taille des éléments structuraux des sols granulaires est relativement petite, ne dépassant pas 10 mm (RETZER et RUSSEL, 1941 ; BEKAREWITSCH, 1964) le taux des éléments < 10 mm peut constituer un indice de présence ou d'absence de granulation. Ce taux peut en outre servir pour évaluer le degré de développement du phénomène. Pour simplifier l'écriture, nous le désignons désormais par T_{10} .

γ. La taille moyenne. — Pour déterminer cette caractéristique d'une manière convenable, il faut d'abord tester la normalité de la distribution. Nous avons utilisé pour cela la méthode graphique d'Henry (C. E. T. A. M. A., 1969). On porte les taux cumulés d'éléments inférieurs à une taille donnée soit sur un graphique gaussien-arithmétique, soit sur un graphique gaussien-logarithmique. Si les points représentant la distribution s'alignent sur une droite sur le premier graphique, elle est dite normale. S'ils ne sont pas alignés sur ce graphique, mais qu'ils le sont sur le deuxième, la distribution est alors dite log-normale. Quand une distribution est

normale ou log-normale, elle est complètement définie par une valeur moyenne et son écart type qui peuvent être déterminés directement sur le graphique. Dans le cas particulier qui nous intéresse, cette valeur définit la taille moyenne ϕ d'une distribution d'éléments structuraux.

2. *Paramètres définissant les conséquences de l'état structural : la porosité totale et la porosité mottière.*

Une caractéristique susceptible d'être influencée par l'action des racines sur le sol est sa porosité. Faute d'avoir pu, pour des raisons évidentes, effectuer des mesures de porosité totale caractérisant globalement l'état structural d'une couche de sol en place (méthode des anneaux ou densitomètre à membrane) à une humidité donnée, nous nous sommes bornés à des mesures de porosité effectuées sur des volumes plus petits représentés par des mottes sèches de 15 à 400 g prélevées à partir des monolithes reçus. La porosité « totale » a été déterminée à partir de la formule :

$$P_{\text{tot.}} = \frac{\gamma - d_a}{\gamma} \times 100 \quad (7)$$

dans laquelle γ est la densité réelle du sol déterminée au pycnomètre à air et d_a la densité apparente déterminée par la méthode au vernis. Nous discuterons lors de la présentation des résultats la pertinence de cette porosité totale ainsi obtenue.

II. — RÉSULTATS ET DISCUSSION

A. — Caractérisation des structures continues et granulaires

1. *Choix des profondeurs à étudier.*

Les figures 1 et 2 montrent que pour les espèces de graminées fourragères rencontrées dans cette enquête, la distribution des longueurs spécifiques des racines en surface et en profondeur est très différente, quoique normale, dans la plupart des cas. L'observation directe des monolithes a également montré qu'en général le degré d'extériorisation d'un état structural et surtout l'intensité d'enracinement ne sont pas les mêmes dans les 2 couches qui correspondent approximativement à des profondeurs de 0-6 et 6-12 cm. Compte tenu des remarques précédentes et des résultats d'un travail antérieur (TRI, 1968) qui ont indiqué une influence majeure des racines sur la granulation, nous avons choisi d'étudier séparément ces 2 profondeurs.

2. *Les seuils définissant une structure continue ou granulaire.*

Les notations visuelles ont été comparées aux données quantitatives correspondantes, à savoir les taux cumulés d'éléments structuraux < 10 mm obtenus par le test à l'alcool. Cette comparaison montre (tabl. 1) que 91 p. 100 (0-6 cm) et 75 p. 100 (6-12 cm) des échantillons caractérisés par $T_{10} < 10$ p. 100 ont été notés visuellement continus, tandis que 78 p. 100 (0-6 cm) et 77 p. 100 (6-12 cm) des échantillons pour lesquels T_{10} est supérieur à 30 p. 100 ont été notés « granulaires ».

D'autre part, il existe pour $10 < T_{10} < 30$ p. 100, une zone d'incertitude que nous appelons zone à structure incertaine et qui comprend aussi bien des structures continues et à tendance continue que des structures granulaires ou à tendance granulaire. A partir de ces observations, on peut considérer en première approximation que lorsque le test à l'alcool fournit un taux T_{10} inférieur à 10 p. 100, le sol étudié peut être qualifié de continu, et qu'il est granulaire lorsque ce taux est supérieur à 30 p. 100. En revanche, si l'on obtient un taux compris entre 10 et 30 p. 100, le diagnostic doit être réservé.

Nombre d'échantillons

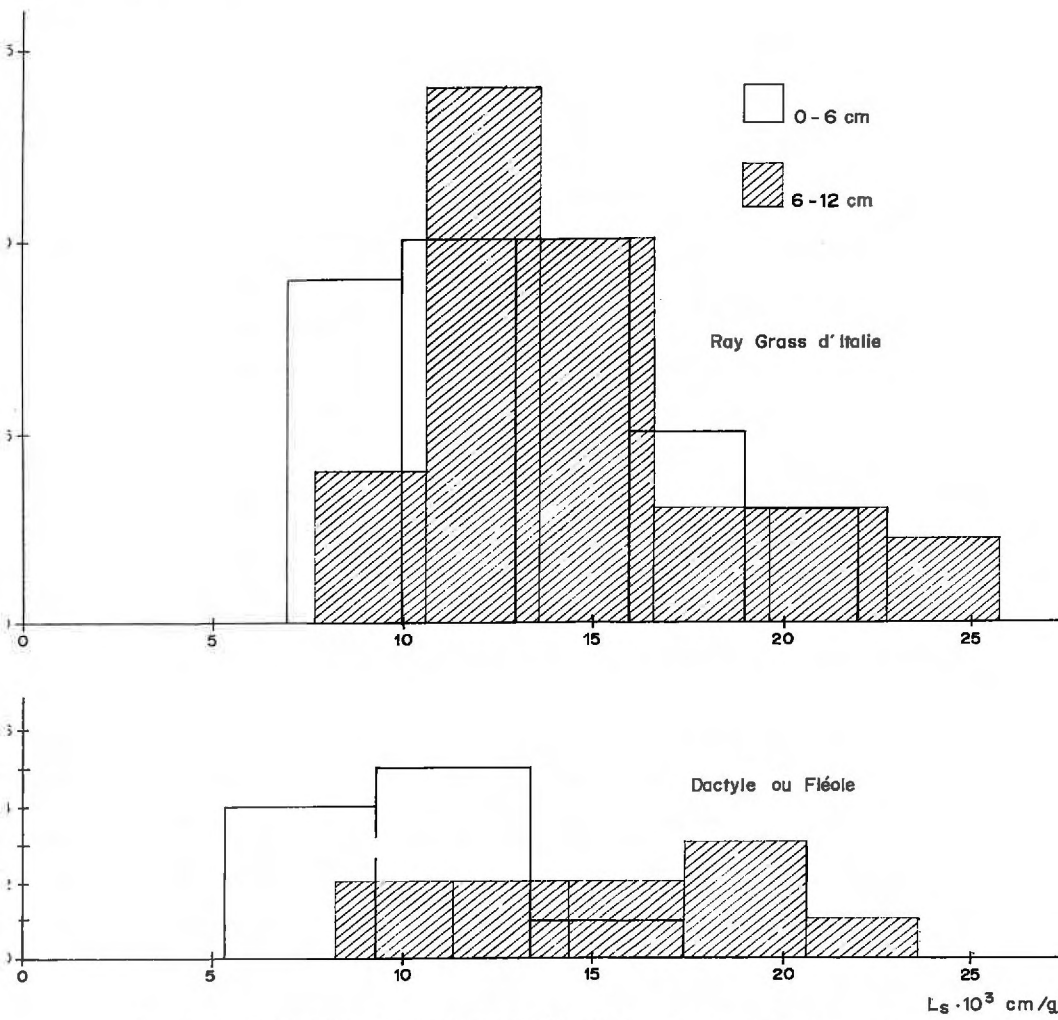


FIG. 1. — Histogrammes des longueurs spécifiques, L_s , de divers systèmes racinaires

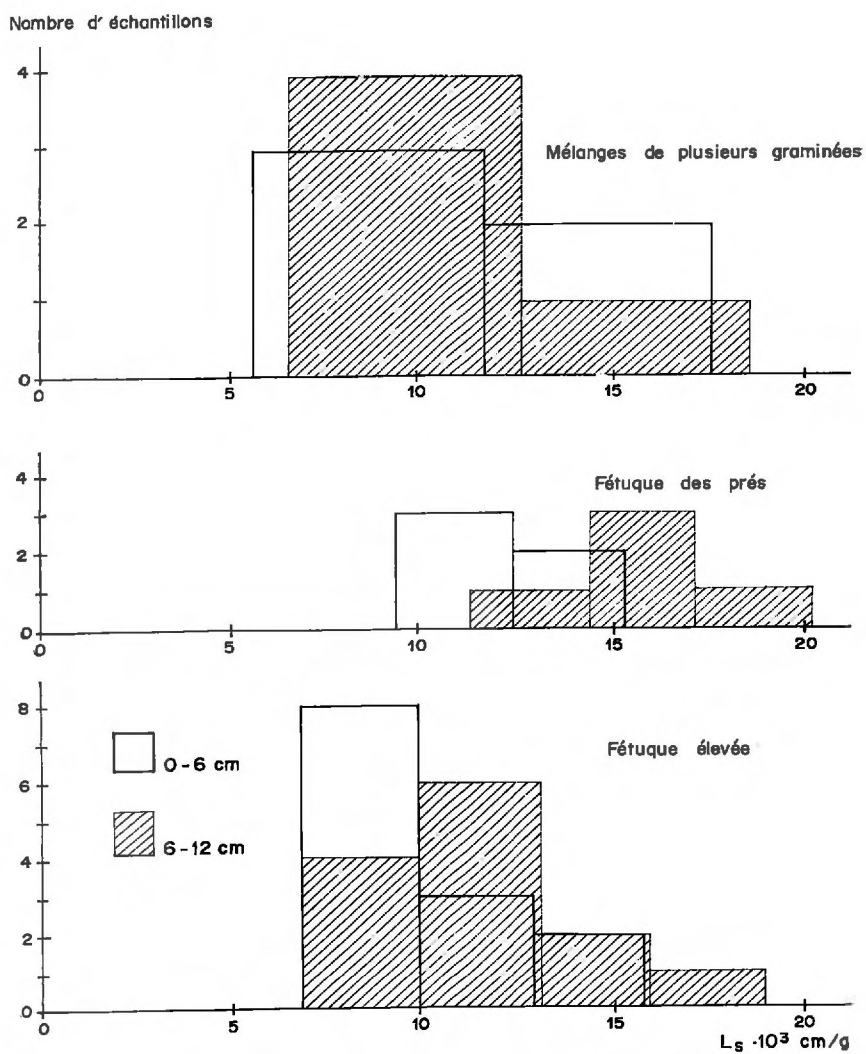


FIG. 2. — Histogrammes des longueurs spécifiques, L_s , de divers systèmes racinaires

Par ailleurs, on note que l'élévation du seuil T_{10} , caractéristique de l'apparition de la granulation, n'améliore pas sensiblement son pouvoir discriminant.

TABLEAU I

Comparaison entre les notations visuelles et les résultats du test à l'alcool

Taux cumulé d'éléments < 10 mm	$\leq 10 \%$		10 à 30 %		$> 30 \%$		$> 40 \%$		$> 50 \%$	
Profondeur de l'échantillon (cm)	0-6	6-12	0-6	6-12	0-6	6-12	0-6	6-12	0-6	6-12
Nombre d'échantillons par classe	21	24	21	25	37	30	27	23	20	19
Notation visuelle la plus fréquente dans la classe	Structure continue		Structure continue		Structure granulaire		Structure granulaire		Structure granulaire	
% correspondant dans la classe	91	75	57 ⁽¹⁾	64 ⁽²⁾	78	77	78	87	80	89

(¹) Les 43 p. 100 d'échantillons non continus ont été notés { pour 19 % : granulaire
pour 24 % : tendance granulaire

(²) Les 36 p. 100 d'échantillons non continus ont été notés { pour 20 % : granulaire
pour 16 % : tendance granulaire

3. Influence globale de la texture.

Il faut rappeler d'abord que dans un certain nombre de cas, des différences de jugement entre l'état structural des 2 couches étudiées sont intervenues lors de l'observation visuelle. Autrement dit, l'une des couches a pu être notée granulaire par exemple, tandis que l'autre se présentait comme continue. L'analyse granulométrique étant faite sur l'ensemble des 2 couches, il était donc nécessaire de juger si l'état structural global de l'échantillon devait être classé granulaire ou continu pour pouvoir établir la correspondance générale avec la texture.

A cet effet et en fonction des observations rapportées dans la rubrique précédente, nous avons effectué la répartition des différentes catégories de structures observées selon la règle suivante :

Catégorie de structure	Conditions nécessaires et suffisantes de classement	
Continue	$T_{10} < 10 \%$	Dans les 2 couches considérées
Incertaine :		
— tendance continue ...	$10 \leq T_{10} \leq 15 \%$	1 des 2 couches
— tendance granulaire ..	$15 < T_{10} \leq 30 \%$	1 des 2 couches
Granulaire	$T_{10} > 30 \%$	1 des 2 couches

Nous verrons dans un mémoire ultérieur que la valeur $T_{10} = 15$ p. 100 représentant le seuil de distinction entre les structures incertaines à tendance granulaire et à tendance continue a été suggérée par les termes constants des équations de régression obtenues pour l'ensemble des échantillons entre T_{10} et certains facteurs de granulation.

En portant sur un triangle de texture (fig. 3), les structures ainsi classées en fonction de la composition granulométrique des sols réduite à 3 fractions (argile, limon total 2-50 μ , sable), on constate tout d'abord que la distribution des points ne semble pas indiquer une influence déterminante de la texture. Toutefois, trois indications peuvent être tirées de cette représentation :

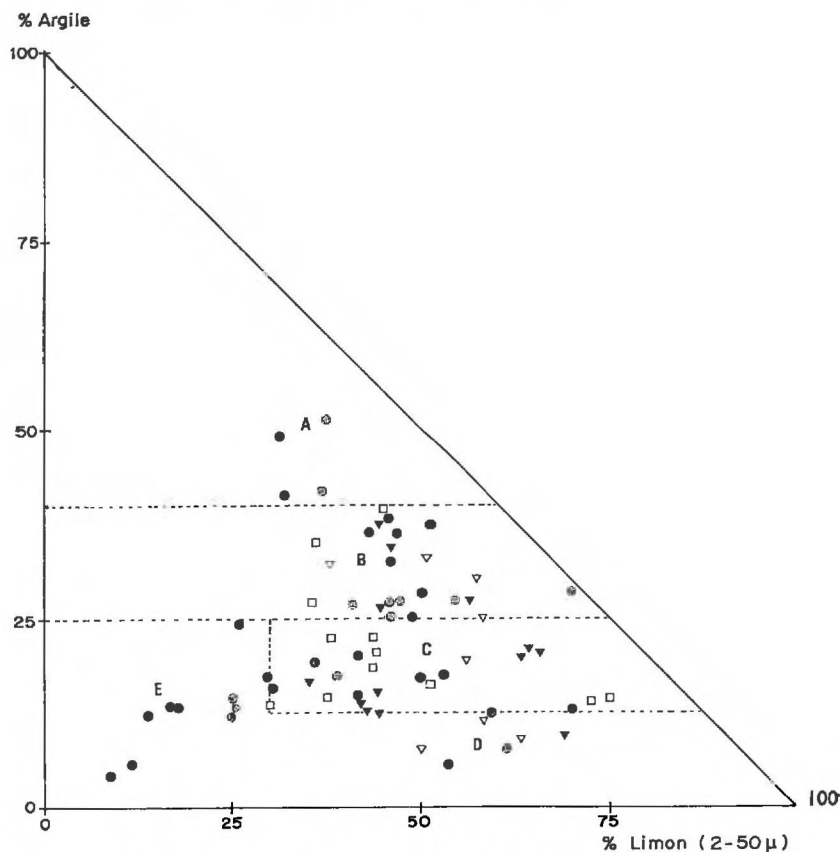


FIG. 3. — Classement des structures révélées par le test à l'alcool en fonction de la texture

- structure continue ($T_{10} < 10 \%$)
- ▽ structure incertaine à tendance continue ($10 \% \leq T_{10} \leq 15 \%$)
- △ structure incertaine à tendance granulaire ($15 \% < T_{10} \leq 30 \%$)
- structure granulaire ($T_{10} > 30 \%$)

— l'absence de structures continues dans la zone des terres sableuses (moins de 15 p. 100 d'argile et de 30 p. 100 de limon total) où se manifestent au contraire des structures granulaires. De plus, on peut noter également la présence d'une majorité de structures granulaires ou à tendance granulaire dans une zone définie approxima-

tivement par une teneur de moins de 13 p. 100 d'argile et de 50 à 75 p. 100 de limon. Les structures granulaires se trouvant dans cette zone et la zone des terres sableuses seront désormais qualifiées de « granulaires légères » (zones D et E) ;

— une certaine tendance à la localisation des structures granulaires autres que les structures granulaires légères dans la partie du triangle correspondant à des teneurs en argile supérieures à 25 p. 100 (65 p. 100 des structures classées granulaires sont dans cette zone ; au-dessus de 40 p. 100 d'argile, on en trouve à 100 p. 100). Elles seront désormais qualifiées de structures granulaires normales (zones A et B) ;

— la dissémination des structures incertaines (tendance continue et granulaire) dans la plupart des zones texturales sauf la plus sableuse (zone E) et la plus argileuse (zone A).

Ainsi, malgré une bonne répartition des points sur le triangle attestant un échantillonnage satisfaisant au niveau de la texture, et hormis quelques tendances, la connaissance de la texture ne paraît pas suffisante pour permettre une prévision sûre de l'état de granulation des terres sous prairie.

4. Nature des distributions caractéristiques des 3 types de structure.

Si l'on porte sur des graphiques gaussio-arithmétique d'une part, gaussio-logarithmique d'autre part, les taux cumulés moyens d'éléments inférieurs à une taille donnée soit : 10, 5, 3, 2, 1 et 0,5 mm obtenus à l'issue du test à l'alcool, on constate

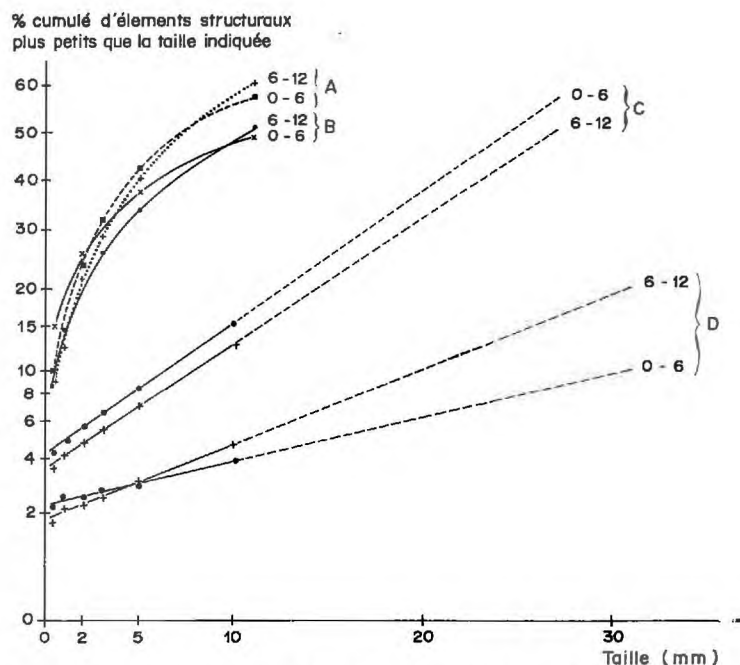


FIG. 4. — Représentation gaussio-arithmétique des distributions d'éléments structuraux provenant des structures continues (D), incertaines (C), granulaires légères (B) et normales (A), dans les couches 0-6 et 6-12 cm

(fig. 4 et 5) que les distributions correspondantes aux structures continues ou appartenant au groupe « incertain » sont normales, tandis que les structures granulaires légères et normales présentent des distributions pratiquement log-normales.

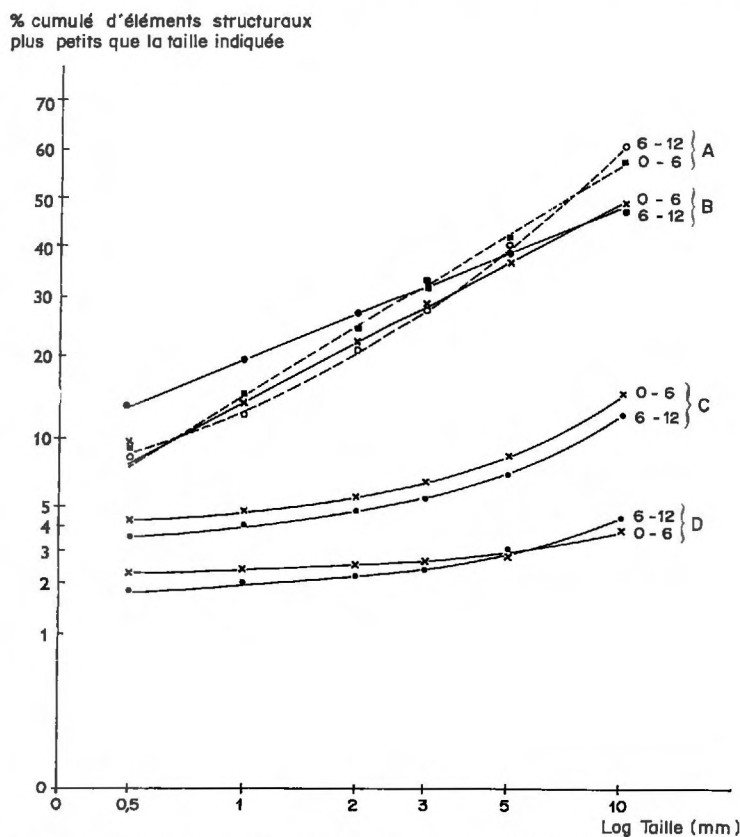


FIG. 5. — Représentation gaussio-logarithmique des distributions d'éléments structuraux provenant des structures continues (D), incertaines (C), granulaires légères (B) et normales (A) dans les couches 0-6 et 6-12 cm

Dans l'étude expérimentale sur la granulation des prairies, l'un de nous (TRI, 1969) avait déjà constaté que l'action des racines de graminées fourragères conduisait, lorsque la granulation était observée, à une distribution log-normale des éléments structuraux.

5. Critères définissant une structure granulaire.

Nous avons vu qu'un état structural peut être défini par un taux d'éléments structuraux fins obtenus par le test à l'alcool. Dans le cas d'une structure continue, ce taux est faible (< 10 p. 100) ; ceci est en accord avec la conception même de ce type de structure dans laquelle il n'existe pas à proprement parler d'éléments structuraux. Il n'y a donc pas de distribution dimensionnelle à déterminer, le seuil ≤ 10 p. 100 est suffisant pour caractériser cette structure. En revanche, dans le cas des structures granulaires, T_{10} peut varier de 30 à 100 p. 100 et la taille des éléments

structuraux d'une fraction de 1 mm à 10 mm. Il est par conséquent nécessaire d'avoir 2 critères pour définir convenablement ce type de structure. On peut concevoir que T_{10} représente le degré d'extériorisation du phénomène et que la taille moyenne ϕ traduit le degré de finesse des éléments structuraux. Le premier critère conduit à décrire la structure comme étant faiblement, moyennement ou fortement granulée par exemple. Le second précisera si les éléments de la structure ainsi décrite sont fins ou grossiers. Nous verrons par ailleurs qu'effectivement, le degré de granulation et la taille sont commandés par des facteurs différents.

B. — *Étude statistique des facteurs
susceptibles de favoriser la granulation*

Nous avons rassemblé dans le tableau 2 les moyennes et écarts-types établis par catégorie de structure (continue, incertaine, granulaire légère, granulaire normale) correspondant à différents facteurs.

L'examen du tableau 2 montre que certaines indications enregistrées au paragraphe précédent se trouvent précisées. Ainsi, la teneur moyenne en argile des terres granulaires normales est supérieure à 25 p. 100, alors que les structures continues et incertaines ont en moyenne 20 à 21 p. 100 d'argile et les granulaires légères 12,6 p. 100. On constate également des différences notables d'autres caractéristiques du sol, d'ailleurs plus ou moins dépendantes l'une de l'autre, dont le rôle sera examiné dans le deuxième mémoire.

Cependant, indiquons tout de suite, et c'est là un point qui mérite d'être souligné, que les densités d'enracinement sont en moyenne très voisines, à une profondeur donnée, quel que soit le type de structure, mais différent fortement (approximativement du simple au double) d'une profondeur à l'autre (cf. également fig. 1 et 2), ce qui justifie le traitement séparé des couches 0-6 et 6-12 cm.

En résumé, les terres granulaires, qu'elles soient normales ou légères, diffèrent des deux autres catégories par toute une série de facteurs de constitution ou de comportements physiques parmi lesquels nous aurons à rechercher les plus importants. D'ores et déjà, il est possible d'affirmer que la densité d'enracinement, du moins si elle reste dans la gamme des valeurs que nous avons observées, ne détermine pas l'apparition du phénomène de granulation ; en d'autres termes, le taux cumulé d'éléments < 10 mm issu du test à l'alcool (T_{10}) paraît indépendant de la longueur de racine par unité de volume tout au long de sa gamme de variations.

C. — *Étude des conséquences de la granulation*

Lors d'une étude expérimentale de la granulation en vase de végétation (TRI, 1968), nous avons remarqué que l'une des caractéristiques physiques du sol, à savoir la densité apparente, varie d'une manière très importante quand on passe d'un état structural continu à un état granulaire provenant d'un même sol ou de deux terres différentes. Les valeurs extrêmes observées variaient de 1,80 à 1,50. De tels changements risquent d'avoir des répercussions profondes sur l'ensemble des propriétés du sol en particulier sur sa porosité qui peut ainsi passer de 34 p. 100 à 45,0 p. 100 par exemple (la densité réelle moyenne étant de 2,72). Nous avons en

TABLEAU 2

Éléments descriptifs des états structuraux

	Continus (B et C, fig. 3)				Incertains (B, C, D, fig. 3)				Granulaires légers (D et E, fig. 3)				Granulaires normaux (A, B, C, fig. 3)			
	0-12 cm				0-12 cm				0-12 cm				0-12 cm			
	Moyenne		Écart-type		Moyenne		Écart-type		Moyenne		Écart-type		Moyenne		Écart-type	
Argile (%)	21,2		8,6		20,4		9,2		12,6		5,6		28,3		11,2	
Limon (%)	46,0		14,2		52,0		11,8		32,5		19,2		45,4		9,1	
Argile/limon	0,461		0,052		0,392		0,047		0,387		0,065		0,623		0,058	
Matières organiques (%)	2,27		0,73		2,51		1,06		3,18		1,84		3,84		2,70	
Capacité d'échange (méq/100 g)	11,2		3,9		12,0		5,9		8,4		3,8		17,4		5,4	
Gonflement potentiel (%)	11,06		6,70		13,04		8,57		6,08		4,87		21,44		14,75	
	0-6 cm		6-12 cm		0-6 cm		6-12 cm		0-6 cm		6-12 cm		0-6 cm		6-12 cm	
	M	ET	M	ET	M	ET	M	ET	M	ET	M	ET	M	ET	M	ET
Stabilité (S)	2,49	1,73	2,74	1,98	2,10	1,36	2,26	1,48	0,95	0,87	1,02	1,05	2,39	2,90	2,51	2,58
Agrégats stables au benz. Ag _b (%)	5,33	2,84	4,43	3,47	8,82	11,05	7,73	10,21	10,40	9,00	10,40	9,50	12,90	15,30	13,30	15,70
Long. volumique L _v (cm/cm ³) ..	32,3	19,9	13,0	6,3	37,1	18,0	19,8	19,0	43,5	23,9	20,4	18,5	33,0	21,0	13,1	6,2
Élém. struct. < 10 mm (%)	3,6	2,5	4,2	2,5	14,3	6,4	12,4	5,2	46,0	12,4	48,9	17,5	54,0	21,0	48,0	25,0
Nombre d'échantillons étudiés ..	12		12		21		21		14		14		24		24	

conséquence recherché si des variations du même ordre de grandeur se retrouvent dans les terres de l'enquête, et s'il est possible de les relier à des paramètres de granulation et de les interpréter.

1. La densité apparente en relation avec l'état structural.

Au vu des données rapportées dans le tableau 3, on constate que les variations de la densité apparente et de la porosité totale moyennes sont dans une assez large mesure en accord avec nos observations antérieures. Compte tenu des différences

TABLEAU 3

Variation de la porosité totale en fonction de l'état structural

	Continue		Incertaine		Granulaire normale		Granulaire légère	
	0-6	6-12	0-6	6-12	0-6	6-12	0-6	6-12
Densité apparente	1,73 ± 0,09	1,72 ± 0,12	1,69 ± 0,09	1,70 ± 0,10	1,62 ± 0,19	1,66 ± 0,20	1,56 ± 0,19	1,60 ± 0,18
Densité réelle	2,71 ± 0,04		2,71 ± 0,07		2,75 ± 0,09		2,64 ± 0,06	
Porosité totale (%)	36,1	36,6	37,6	37,2	41,1	39,64	40,91	39,39

assez importantes des densités réelles d'une classe de structure à l'autre — différences à rapprocher des constitutions minérales et organiques moyennes des échantillons correspondants — nous étudions directement les variations de porosité.

2. Interprétation des variations de porosité.

a) Notion de systèmes de porosité.

On peut considérer que la porosité d'une couche de sol en place est caractérisée par la superposition des deux systèmes :

— une porosité structurale qui représente l'espace poreux correspondant aux fissures délimitant les éléments structuraux et aux cavernes canalicules, etc., d'origine biologique ou parfois liés à des processus pédologiques ;

— une porosité dite mottière qui est propre aux éléments structuraux ou groupements cohérents d'éléments structuraux. Lorsque les mottes proviennent d'une terre à structure continue ou massive ou si elle sont des éléments structuraux simples et non compactés, la porosité qui en résulte dépend essentiellement de la texture. Dans ce cas, la porosité mottière P_m est qualifiée de porosité texturale que nous désignons par P_t et qui est considérée comme caractéristique du matériau.

Ce qui s'exprime pour les volumes de vides par :

$$V_g = V_f + V_m \quad (8)$$

dans laquelle :

V_g = volume total ou global des vides ;

V_f = volume des fissures entre les éléments structuraux (ou les mottes) ;

V_m = volume des vides à l'intérieur des éléments structuraux (ou des mottes).

Examinons la relation (8) en termes de porosité. Si l'on considère 100 cm³ de sol en place, et si la porosité de fissure ou porosité structurale est égale à P_s p. 100, le volume total des mottes dans 100 cm³ est égal à $100 - P_s$.

Si la porosité des mottes est égal à P_m p. 100, le volume des vides situés à l'intérieur des mottes contenues dans 100 cm³ est égal à :

$$\frac{(100 - P_s)P_m}{100}. \quad (9)$$

Le volume total des vides dans 100 cm³ de sol en place, c'est-à-dire la porosité globale P_g p. 100 est donc :

$$P_g = P_s + \frac{(100 - P_s)P_m}{100} = P_m + \frac{(100 - P_m)P_s}{100}. \quad (10)$$

C'est dans cette optique que nous avons procédé à l'analyse des systèmes de porosités en relation avec la granulation. Les mesures dont nous disposons concernent :

— la porosité texturale déterminée expérimentalement par la méthode déjà décrite. Le tableau 4 donne les valeurs moyennes correspondant aux différentes catégories de structures ;

TABLEAU 4

Porosité texturale en relation avec l'état structural

Structure	Porosité
Continue	38,48 ± 4,47
Incertaine	37,90 ± 2,88
Granulaire :	
— légère	38,47 ± 2,4
— normale	39,18 ± 5,5
Moyenne	38,50 ± 0,57

— la porosité totale à l'échelle de mottes d'une dizaine de centimètres cube. Un tel échantillonnage serait manifestement insuffisant pour évaluer des porosités de systèmes dont l'hétérogénéité serait très grande, structures prismatiques ou résultant d'un travail du sol par exemple. Ici nous nous intéressons soit à des structures continues, soit à des structures granulaires dont les éléments sont de petites dimensions par rapport à la taille des mottes sur lesquelles ont porté les mesures (le rapport des volumes est de l'ordre de 10⁻³).

Dans ces conditions, on peut considérer que la porosité « totale » ainsi obtenue représente un système convenable englobant une porosité de fissure dite structurale, qui pourrait être liée au développement de la granulation, et une porosité mottière assimilable à la porosité texturale obtenue expérimentalement. Il est à noter néanmoins que faute d'avoir pu effectuer des mesures de porosité totale sur le sol en

place d'une part, et de porosité des éléments composants les petites mottes d'autre part, l'analyse des systèmes de porosités rapportée ici ne peut être qu'approximative.

b) *Relation entre la porosité totale et le degré de développement de la granulation : ensemble des échantillons.*

Des calculs de corrélation simple ont permis d'établir les relations suivantes entre la porosité totale y et $T_{10}(x)$:

$$(0-6 \text{ cm}) \quad y = 22,27 + 0,35 x \quad r = 0,70^{**} \quad (11)$$

$$(6-12 \text{ cm}) \quad y = 33,79 + 0,14 x \quad r = 0,39^* \quad (12)$$

On peut constater que la relation est beaucoup plus étroite pour la couche 0-6 cm, dont la structuration est en général morphologiquement plus nette. Elle montre également qu'à partir d'une porosité minimum de 22,27 p. 100 (par rapport au minimum théorique de 26 p. 100 obtenu avec un arrangement serré des particules) vient s'ajouter une porosité due à la granulation qui est proportionnelle au degré de développement de cette dernière et qui peut atteindre une valeur de 35 p. 100 quand la granulation est complète ($T_{10} = 100$ p. 100). Pour $x = 30$ p. 100 (seuil de granulation), les valeurs de y , donc les porosités, sont de l'ordre de 33 p. 100 et 38 p. 100 dans les deux couches étudiées. Or, nous avons vu que les porosités totales moyennes des terres granulaires sont plutôt de l'ordre de 39 à 41 p. 100 (tabl. 3), ce qui implique que les porosités n'atteignent ces valeurs que quand x est au-delà de 30. Ceci nous conduit à étudier en particulier les variations de porosité en relation avec $x - 30$ au lieu de x .

c) *La porosité totale des terres granulaires en fonction de leur degré de granulation.*

Les résultats obtenus montrent qu'il n'y a pas de relation significative entre ces deux variables pour les terres granulaires légères. En revanche, elles sont liées significativement en ce qui concerne les terres granulaires normales. Cette relation est traduite par les équations de régression suivantes :

$$0-6 \text{ cm} \quad y = 37,0 + 0,19 (x - 30) \quad r = 0,59^{**} \quad (13)$$

$$6-12 \text{ cm} \quad y = 37,78 + 0,15 (x - 30) \quad r = 0,54^{**} \quad (14)$$

Si l'on compare les termes constants de ces équations de régression avec la valeur moyenne 38,82 p. 100 (tabl. 4) de la porosité texturale des terres granulaires légères (38,47 p. 100) et normales (39,18 p. 100), on constate qu'ils sont du même ordre de grandeur. Dans ces conditions, ces équations peuvent être considérées comme une forme particulière de l'équation générale (équation 10) des systèmes de porosité dans laquelle P_m est représenté par le terme constant (qui est pratiquement égal à la porosité texturale) et le terme en x par la porosité structurale effective qui varie en fonction du degré de développement T_{10-30} de la structure granulaire. Ces résultats sont visualisés, si l'on porte sur un graphique (fig. 6) les porosités correspondant à des structures continues, incertaines et granulaires normales en fonction de T_{10} . Les nuages des points obtenus sont représentés par deux droites de régression dont l'une, issue aux environs de $y = 36$, est quasiment horizontale et représente la porosité totale moyenne probable des structures continues et incertaines, et l'autre dévie de l'horizontale au même niveau de porosité, mais à partir de T_{10} égal 30 p. 100 suivant une pente égale à 0,19 et 0,15 pour les couches 0-6 et 6-12 respectivement.

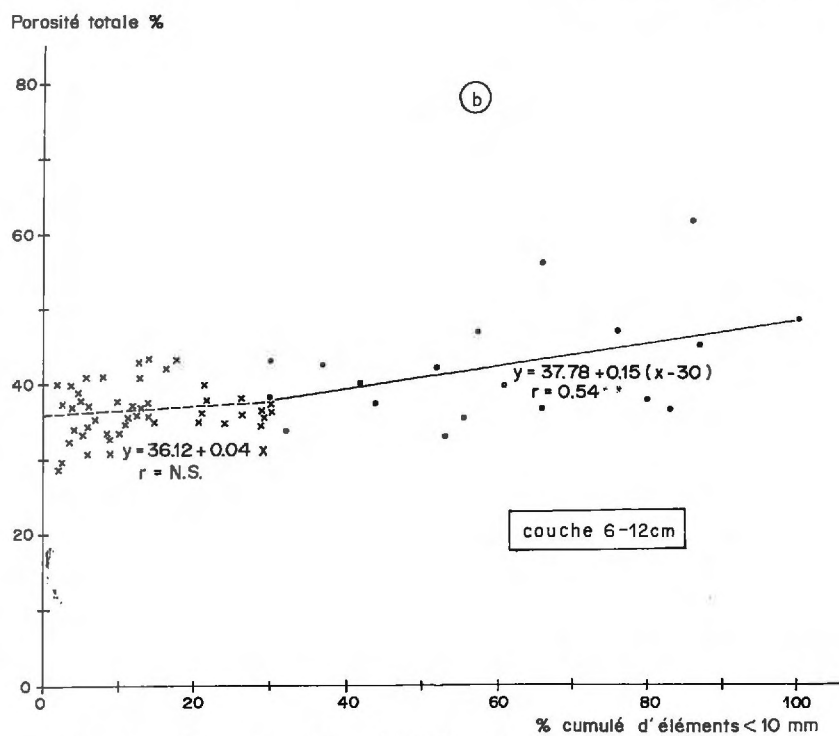
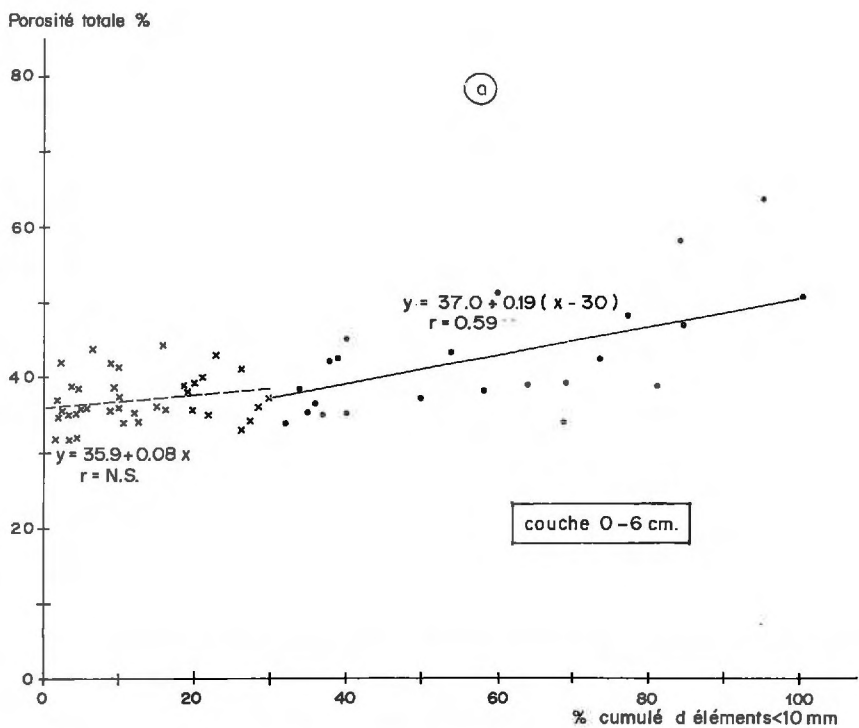


FIG. 6. — Variation de la porosité totale y en fonction du taux cumulé x d'éléments structuraux < 10 mm (couches 0-6 et 6-12 cm)

Enfin, on peut constater que pour T_{10} inférieur à 30 p. 100, la porosité est indépendante de x (r non significatif) et se situe au voisinage de 36 p. 100.

Ceci confirme le fait que lorsque le taux d'éléments T_{10} est inférieur à 30 p. 100, nous avons affaire en majorité à des structures continues vraies, c'est-à-dire dépourvues de fissures développées; dans ces conditions, la porosité reste constante et voisine de la porosité texturale pour l'ensemble de la classe.

d) *Étude de la porosité totale en fonction de la finesse des éléments structuraux : terres granulaires.*

Nous avons vu que la finesse de granulation est caractérisée par la taille moyenne φ d'une distribution d'éléments structuraux. Les calculs de corrélation simple montrent une relation directe très significative entre la porosité totale y et l'inverse de la taille $1/\varphi$ dans le cas des terres granulaires normales, mais il n'existe pas de relation quand il s'agit des terres granulaires légères. Dans le premier cas, on a obtenu les équations de régression suivantes :

$$0-6 \text{ cm} \quad y = 36,35 + 13,41 (1/\varphi) \quad r = 0,77^{**} \quad (15)$$

$$6-12 \text{ cm} \quad y = 36,42 + 13,04 (1/\varphi) \quad r = 0,74^{**} \quad (16)$$

Ces relations suggèrent *a priori* une influence importante de la taille sur la porosité totale. Or, il est évident qu'avec un type d'arrangement donné, la porosité d'un milieu ne dépend pas de la taille des particules qui le composent si celle-ci est uniforme. Elle dépend plutôt du rapport des tailles quand on a affaire à des particules de dimensions variées. Dans ces conditions, on peut supposer que dans les équations ci-dessus, $1/\varphi$ représente plutôt le rapport entre une taille moyenne et une taille de référence, par exemple 1 cm, qui est la limite supérieure retenue pour des éléments structuraux granulaires.

Étant donné d'autre part qu'il existe une relation très étroite entre $1/\varphi$ et T_{10-30} , traduite par les équations :

$$0-6 \text{ cm} \quad T_{10-30} = 7,94 + 40,63 (1/\varphi) \quad r = 0,76^{**} \quad (17)$$

$$6-12 \text{ cm} \quad T_{10-30} = 4,11 + 40,79 (1/\varphi) \quad r = 0,65^{**}, \quad (18)$$

on peut supposer que l'un ou l'autre de ces facteurs joue d'une manière plus ou moins déterminante sur la porosité totale y des terres granulaires normales. En effet, quand on étudie y en fonction de $1/\varphi$ et de T_{10-30} dans une corrélation multiple, on obtient les équations de régression suivantes :

$$0-6 \text{ cm} \quad y = 36,36 + 13,3 (1/\varphi) + 0,003 (T_{10-30}) \quad (19)$$

$$6-12 \text{ cm} \quad y = 36,33 + 11,93 (1/\varphi) + 0,03 (T_{10-30}) \quad (20)$$

dont les coefficients de corrélation multiple sont respectivement $R = 0,77^{**}$ et $R = 0,74^{**}$, qui sont les mêmes que les coefficients de corrélation simple entre y et $1/\varphi$. Cela montre que T_{10-30} et $1/\varphi$ pris ensemble n'ont pas donné une meilleure corrélation avec y que celle entre ce dernier et $1/\varphi$. Il en découle que c'est plutôt $1/\varphi$ qui explique le mieux les variations de la porosité totale.

e) *Étude de la porosité structurale.*

Les résultats obtenus précédemment suggèrent que les variations de la porosité totale dépendent essentiellement des variations de la porosité structurale, étant

donné que la porosité mottière est assimilable à une porosité texturale qui est une caractéristique constante du matériau. Ceci nous conduit à étudier plus en détail les variations de la porosité structurale en relation avec les paramètres de granulation T_{10} et φ .

Rappelons que les porosités structurales ont été calculées à partir de l'équation de base dans laquelle P_m a été confondu avec P_t :

$$P_s = \left[P_g - P_t \right] \frac{100}{(100 - P_t)} \quad (21)$$

Les calculs de corrélation entre cette porosité et T_{10-30} ou $1/\varphi$ montrent qu'il n'y a pas de relations significatives avec ce dernier paramètre tant pour les terres granulaires normales que pour les granulaires légères. En revanche, il existe la relation significative suivante dans la couche 0-6 cm entre la porosité structurale y et T_{10-30} pour les terres granulaires normales seulement (fig. 7) :

$$y = 0,1289 (T_{10-30}) - 0,6126 \quad r = 0,45^* \quad (22)$$

L'équation de régression précédente indique d'une part que lorsque $T_{10} = 100$, autrement dit quand la structure est complètement granulée, la porosité structurale susceptible d'être obtenue est appréciable, de l'ordre de 9 p. 100.

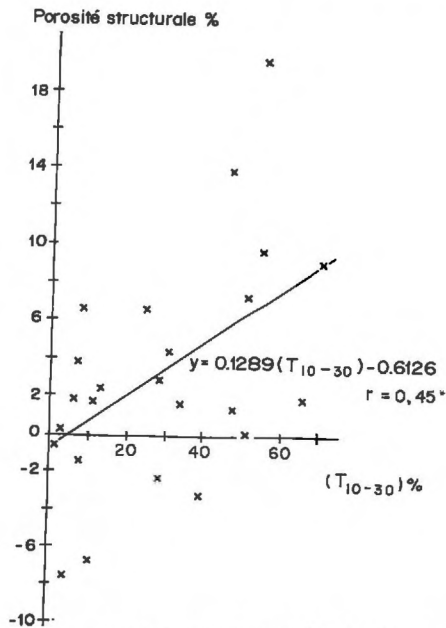


FIG. 7. — Variation de la porosité structurale y en fonction du degré de développement des structures granulaires normales (couche 0-6 cm)

Il est à noter d'autre part la présence sur le graphique de quelques valeurs de porosité structurale négatives. Cela peut se produire si la porosité totale devient plus petite que la porosité texturale, à la suite de passages d'engins lourds ou de piétinements dans certaines conditions d'humidité du sol. Toutefois, les données

de l'enquête sont insuffisantes pour affirmer, s'il y a eu, de telles actions de compaction. Par ailleurs, il faut rappeler aussi que nous avons pris, au lieu de la porosité mottière, la porosité texturale qui, dans les conditions précédemment évoquées, peut en différer sensiblement.

Enfin, quand on étudie la porosité structurale (γ) en fonction de T_{10-30} et $1/\varphi$ dans une corrélation multiple, la relation obtenue ($CCM = 0,45$; $F_{obs} = 2,84$) n'est pas meilleure que celle entre γ et T_{10-30} seulement.

CONCLUSION

De ce travail, il est possible de tirer plusieurs séries de conclusions.

Les premières portent sur la caractérisation de l'état structural des sols sous prairie de graminées. La comparaison des observations visuelles avec les résultats du tamisage sous alcool nous a permis d'utiliser ce dernier pour distinguer les différents états structuraux observés. Lorsque le taux des éléments de taille inférieure à 10 mm (T_{10}) est inférieur à 10 p. 100, on a affaire à des structures continues. Au-delà de 30 p. 100, les structures sont généralement granulaires et l'on peut considérer que T_{10} devient un *indice de développement* de ce type de structure. Enfin, le caractère log-normal de la distribution dimensionnelle des éléments granulaires permet d'évaluer leur taille moyenne, caractéristique de la *finesse de la granulation*.

Parmi les facteurs qui peuvent commander l'apparition de la granulation, la texture ne paraît pas suffisante pour permettre une prévision de l'état structural que peut prendre une terre sous prairie.

Cependant, la granulation intervient le plus souvent soit sur des terres argileuses et à forte capacité d'échange (structures granulaires dites « normales »), soit au contraire sur des terres légères. Le comportement de ces deux catégories de terres vis-à-vis du phénomène de granulation semble, de ce fait, être régi par des mécanismes très différents.

Dans le cas des structures granulaires normales, le mécanisme de leur formation apparaît conforme à celui suggéré par l'étude expérimentale de TRI (1969) : le caractère argileux du matériau et un taux de gonflement supérieur à 15 p. 100 sont des conditions nécessaires à ce type de granulation. Cette dernière s'effectue semble-t-il par fissuration du matériau, plus ou moins continu au départ, à la suite des gonflements et des retraits causés par un régime hydrique à alternances d'humectations et de dessiccations. Ces processus donnent lieu à des éléments structuraux dont la taille peut être déterminée en suivant un schéma de division qui sera exposé par ailleurs. Toutefois, ce schéma ne s'applique pas aux éléments structuraux des terres granulaires légères qui semblent être produits plutôt par agrégation.

Le mécanisme de formation de cette structure granulaire légère ne peut être envisagé que de façon hypothétique ; cependant, leur richesse relative en matières organiques suggère que ce groupe de constituants joue un rôle essentiel dans leur formation. Par ailleurs, TRI (1969) avait observé une agrégation de matériaux sableux par l'action mécanique directe des poils radiculaires dont MAERTENS (1970) a montré qu'ils se développaient d'une manière considérable en terres sableuses.

Enfin et surtout, le travail présenté a permis d'analyser les variations de porosité en fonction du type de structure et de son degré de développement.

Dans le cas des structures continues, la porosité résulte essentiellement de la texture du matériau qui commande l'arrangement élémentaire type. A partir du moment où la granulation se manifeste, il apparaît un deuxième système de porosité superposé au précédent, dû à la présence des fissures délimitant les éléments structuraux. En ce qui concerne les terres granulaires normales, la porosité totale qui résulte de la superposition de ces 2 types de porosité est plus directement liée au rapport $1/\varphi$, φ étant la taille moyenne des éléments structuraux. La porosité structurale associée à la présence des fissures varie, quant à elle, proportionnellement à T_{10-30} , c'est-à-dire avec le degré de développement de la structure granulaire. La donnée la plus importante de ce résultat réside dans le fait que ce deuxième type de porosité caractéristique de la structure et dont l'importance vis-à-vis des propriétés physiques et mécaniques du sol est considérable, pourrait atteindre des valeurs très variables par rapport à une moyenne de 9 p. 100 de porosité supplémentaire. Il est donc nécessaire de prendre de grandes précautions au niveau de la prise d'échantillons et des mesures lorsqu'on veut l'évaluer dans chaque cas particulier.

Quant aux terres granulaires légères, l'évolution de leur porosité n'est pas statistiquement reliée aux paramètres de granulation T_{10-30} et $1/\varphi$.

D'autres éléments d'évaluation de cette évolution méritent d'être recherchés. Cet aspect présente, en effet, un intérêt spécial car ces terres, qui ont tendance à se compacter (VAN DER WATT, 1969) peuvent donner lieu sous prairies, et à courte échéance, à des structures granulaires dont le degré de développement est généralement très élevé. Quels sont les facteurs à l'origine de ce changement rapide et les répercussions de ce changement au niveau de la porosité du système? Ce sont autant de questions qui méritent d'être élucidées ultérieurement.

Reçu pour publication en janvier 1973.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier tous ceux qui ont bien voulu nous apporter leur concours pour le choix et la description des situations, ainsi que pour le prélèvement des échantillons : notamment la Direction agronomique, les ingénieurs et les techniciens régionaux de l'I. T. C. F., les Services agronomiques de différentes sociétés d'Économie mixte d'Aménagement et diverses stations de l'I. N. R. A.

Nous tenons également à remercier M. R. BÉTRÉMIEUX pour les critiques et les suggestions qui ont beaucoup contribué à la forme finale de ce mémoire.

Les déterminations classiques ont été effectuées au Laboratoire I. N. R. A. d'Analyses des Sols d'Arras.

SUMMARY

QUANTITATIVE STUDY OF SOIL GRANULATION UNDER GRASSES

I. — GRANULATION PARAMETERS AND THEIR RELATION WITH SOIL POROSITY

Morphological examinations of an important number of samples taken from various soils under young prairies have revealed different structural states which can be characterized by two parameters, obtained from a test, using ethyl alcohol (95 p. 100) as a treatment and sieving liquid.

The first parameter, T_{10} , is a cumulative percentage of structural elements having a diameter smaller than 10 mm, and represents the degree of structural development of the soil.

The second, ϕ , is the mean size of the above elements and indicates thus their degree of fineness.

Among the soils having a granulating potentiality, two groups were distinguished: the normal granular and the light granular soils. They appeared to be governed by different granulation mechanisms whose consequences were found to be equally different.

Correlation calculations indicate that there is a threshold T_{10} (about 30 p. 100) beyond which the granular structure becomes not only visible but produces an effect by increasing the total porosity of the soil.

Within the soil group termed normal granular, total porosity is significantly related to T_{10-30} , and much more so to $1/\phi$, these two parameters being themselves interrelated. It was found in addition, that the total porosity variations depend on the structural porosity changes, this type of porosity being defined as the porosity fraction corresponding to the void volumes between structural elements.

ZUSAMMENFASSUNG

QUANTITATIVE UNTERSUCHUNG

DER BODENGRANULIERUNG UNTER GRASÄHNLICHEN GEBIETEN

I. — PARAMETER DIE GRANULATÉ STRUKTUR UND IHRE BEZIEHUNGEN MIT DER BODENPOROSITÄT BESTIMMEN

Bei der morphologischen Untersuchung einer bedeutenden Anzahl von verschiedenen unterhalb junger Grasgebieten entnommener Bodenstichproben, wurden sehr verschiedene Strukturbeschaffenheiten beobachtet, die durch zwei Parameter durch einem Versuch bei dem Äthylalkool bei 95° als Behandlungs- und Siebfähigkeit verwendet wurde, charakterisiert werden konnten.

Der erste Parameter, T_{10} , ist die Kumulationsrate der Strukturelemente mit einem Durchmesser, der niedriger als 10 mm ist; er stellt den Entwicklungsgrad der Struktur dar.

Bei dem zweiten, ϕ , handelt es sich um die Mittelgrösse dieser Elemente; er zeigt den Feinheitsgrad der Granulierung.

Es wurde festgestellt, dass sich die Böden, die einen deutlichen Teilungszustand aufweisen, in zwei Gruppen unterteilen: normal körnig und leicht körnig, was verschiedene Granulationsmechanismen mit ebenfalls anderen Folgen nach sich zieht.

Korrelationsrechnungen lassen eine Sohle $T_{10} = 30$ p. 100, im Entwicklungsgrad sichtbar werden, ab welcher die Granulation ausser ihrer Sichtbarkeit dazwischentritt, um die gesamte Porosität des Bodens zu steigern. Letztere ist in den normal körnigen Böden bezeichnend mit T_{10-30} verbunden und noch besser mit $1/\phi$; im übrigen sind diese zwei Parameter sehr voneinander abhängig.

Ausserdem, sind die Variationen der gesamten Porosität in diesen Böden auf die Veränderungen der strukturalen Porosität zurückzuführen, die als Porositätsfraktion bestimmt wird, und welche mit dem eigentlichen Umfang der Spalten zwischen den Strukturelementen übereinstimmt.

РЕЗЮМЕ

Количественное изучение гранулометрии почв под злаковыми лугами.

Параметры определяющие гранулометрическую структуру почв и их соотношение с порозностью.

БЮН-ХЬО-ТРИ.

При морфологическом изучении многочисленных образцов различных почв взятых из под молодых лугов, отмечены были совершенно разные состояния структуры, характеризующиеся с помощью двух параметров,

полученных в результате тестов с применением этилового спирта, в качестве жидкости необходимой для обработки и просеивания.

Первый параметр T_{10} является об'единенным процентом всех элементов структуры диаметр которых меньше 10 мм, и его можно считать степенью развития структуры. Второй — $\emptyset$ — представляет средние размеры этих элементов или степень мелкозернистости.

Отмечается что почвы с четким разделением гранул можно поделить на две группы почв гранулометрически нормальных и почв гранулометрически легких, с неодинаковым механизмом образования гранул, приводящим к различным последствиям. При расчете корреляций появляется порог $T_{10} = 30\%$ степени развития, начиная от которого степень зернистости становится видимой и начинает увеличивать общую порозность почвы. У почв с нормальной зернистостью эта порозность выражено связана с T_{10-30} , и еще сильнее с параметрами $1/\emptyset$, причем оба последние находятся в тесной зависимости один от другого.

Кроме того, в такого рода почвах изменения общей порозности вызываются также изменениями порозности структурной, определить которую можно как порозность соответствующую об'ему свойственному трещинам между элементами структуры.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BEKAREWITSCH N. E., BUROW D. E., DOLGOW S. E., REWUT I. B., SCHEWLIAGIN A. I., 1964. Bodenstruktur und Lebensbedingungen der Pflanzen. *Trans. 8th Intern. Cong. Soil Sci.*, Bucharest, 2, 251-257.
- BRASHER B. R., FRANZMEIER D. P., VALASSIS V., DAVIDSON S. E., 1966. Use of Saran resin to coat natural soil clods for bulk density and water-retention measurements. *Soil Sci.*, 101 (2), 108.
- BUI HUU TRI, 1968. Dynamique de la granulation du sol sous prairie. *Ann. agron.*, 19 (4), 415-439.
- BUI HUU TRI, 1969. *Dynamique de la granulation du sol sous prairie*. Thèse Docteur ès Sci., Faculté des Sciences Paris.
- C. E. T. A. M. A., 1969. *Méthodes statistiques en chimie analytique*. Vol. 2 : *Distribution observée*. Commissariat à l'Énergie atomique, Dunod. Paris.
- FIÈS J.-C., FAURE A., 1972. Étude expérimentale de la sensibilité au compactage des matériaux meubles en fonction de leur composition granulométrique. *Ann. agron.*, 23 (3), 317-332.
- HÉNIN S., MONNIER G., 1956. Évaluation de la stabilité de la structure du sol. *6th Intern. Soil Sci. Cong. Proc.*, Vol. B, 49-52.
- KHEYRABI D., MONNIER G., 1968. Étude expérimentale de l'influence de la composition granulométrique des terres sur leur stabilité structurale. *Ann. agron.*, 19 (2), 129-152.
- MAERTENS C., 1970. *Influence des conditions de milieu sur l'absorption de l'eau et des éléments minéraux par les systèmes racinaires de quelques graminées cultivées*. Thèse Docteur Ing., Université de Toulouse.
- MONNIER G., 1965. *Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols*. Thèse Docteur Ing., Université de Paris.
- MONNIER G., BUI HUU TRI, 1971. Une méthode d'évaluation de la taille des éléments structuraux du sol. *Bull. Ass. Fr. Ét. Sol* (2), 17-27.
- NEWMAN E. I., 1966. A method of estimating the total length of root in a sample. *J. Appl. Ecol.*, 3 (1), 139-145.
- RETZER J. L., RUSSELL M. B., 1941. Differences in the aggregation of a Prairie and a Gray Brown Podzolic soil. *Soil Sci.*, 52, 47-58.
- VAN DER WATT, 1969. Influence of particle size distribution on soil compactibility. *Agrochemophysics*, 1, 79-86.