

N° d'enregistrement
au C.N.R.S. :
A.O. 3253

THESE DE DOCTORAT D'ETAT ES-SCIENCES NATURELLES

présentée

A LA FACULTE DES SCIENCES DE PARIS

par

M. BUI HUU TRI

pour obtenir

le grade de Docteur Es-Sciences

Sujet de la Thèse :

DYNAMIQUE DE LA GRANULATION DU SOL SOUS PRAIRIE

soutenue le : 22. DEC. 1969

devant la Commission d'Examen :

MM. P. CHOUARD	Président
G. LEMEE	Examineurs
S. HENIN	
G. MONNIER	

A LA MEMOIRE DE MON PERE

AVANT - P R O P O S

Avant d'exposer les résultats de ce travail, je tiens à remercier toutes les personnes qui en ont permis la réalisation.

Monsieur le Professeur S. HENIN, membre de l'Académie d'Agriculture, Chef du Département "Agronomie" de l'Institut National de la Recherche Agronomique, qui m'a accueilli au Laboratoire des Sols et m'a sensibilisé aux problèmes particuliers posés par les relations sol-plantes en physique du sol. C'est grâce à son intervention que j'ai pu obtenir une bourse de l'I.N.R.A. qui m'a mis à l'abri des soucis financiers pendant toute la durée de ce travail. C'est encore et surtout la bienveillante sympathie qu'il a témoignée à mon égard qui a été un support moral inestimable pour moi au cours de ces années.

Monsieur P. CHOUARD, Professeur de Physiologie végétale à la Sorbonne, qui m'a fait l'honneur d'accepter, malgré ses lourdes charges, la Présidence du jury.

Monsieur G. LEMEE, Professeur d'Ecologie végétale à la Faculté des Sciences d'Orsay qui après avoir suivi et conseillé régulièrement mon travail, a bien voulu en être le rapporteur.

Monsieur G. MONNIER, Maître de Recherches au C.N.R.A. qui m'a guidé dans ce travail et qui m'a fait profiter de ses critiques et de ses conseils. Je ne saurai oublier son dynamisme qui inspire et la chaleureuse assistance qu'il m'a prodiguée dans la résolution de nombreux problèmes d'ordre personnel, a été pour moi un soutien moral très précieux. C'est de tout cela que je suis heureux de pouvoir le remercier bien vivement en l'assurant de mon sincère attachement.

.../...

Monsieur le Directeur Général J. BUSTARRET qui m'a accepté comme boursier de l'I.N.R.A.

Monsieur l'Inspecteur Général DROUINEAU qui a examiné ma candidature de boursier à l'I.N.R.A. et qui lui a donné un avis favorable.

Monsieur R. BETREMIEUX, Directeur du Laboratoire des Sols qui m'a permis d'utiliser les moyens du laboratoire et qui a bien voulu lire le manuscrit de l'article principal recouvrant en partie cette thèse.

Tous les autres membres de l'équipe du Laboratoire des Sols qui m'ont accepté parmi eux et qui m'ont témoigné leur amitié.

Monsieur le Directeur et le personnel de la Station d'Amélioration des plantes fourragères de Lusignan qui ont mis à ma disposition les moyens facilitant le prélèvement des échantillons de sol sous prairies.

Les secrétariats du Département Agronomie et du Laboratoire des Sols qui ont assuré la dactylographie et la reproduction de cette thèse.

Ma femme NGUYET qui m'a encouragé tout au long de ce travail et qui m'a aidé dans la révision du manuscrit.

o
o o
o

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
MATERIEL ET METHODES	5
A. - Matériel	5
I - Les types de sols utilisés	5
II - Le matériel végétal	6
III - Les modèles	6
B. - Méthodes	7
I - Le dispositif expérimental	7
II - Méthodes d'appréciation de l'évolution structurale	8
a) Le test à l'alcool	8
b) Détermination de la stabilité structurale	12
c) Etude de la forme et de la taille des éléments structuraux	13
d) Etude de l'évolution de la densité apparente	14
DISCUSSION DES RESULTATS	15
I - Interaction entre le milieu et la plante : étude des résultats sous serre et des échantil- lons prélevés dans le milieu naturel	15
A - Action du réseau racinaire sur le milieu continu	15
B - Action du réseau racinaire sur le milieu monoparticulaire	23
C - Action du réseau racinaire sur le milieu fragmentaire	24
1) Milieu fragmentaire fin	24
2) Milieu fragmentaire grossier	30
3) Interaction globale entre le milieu fragmentaire et le réseau racinaire	35
D - Etude de l'état structural des sols en relation avec le système racinaire des graminées fourragères dans le milieu naturel	38
a) Sols riches en limon	38
b) Sols argileux	39

.../...

.../...

II - Etude sur modèles des mécanismes de la formation des éléments structuraux sous prairie	41
A - Interaction entre les fils inertes et le milieu	42
1) Milieu continu	42
a) Limon blanc et horizon B de Versailles	42
b) Convergence des résultats obtenus sur modèles et en serre	47
c) Elargissement de la gamme de textures étudiées : mélanges artificiels	48
2) Milieu fragmentaire	51
B - Interaction entre les fils inertes, le milieu et son régime hydrique	54
1) Effet de la dessiccation différentielle	55
2) Effet combiné des humectations et dessiccations différentielles	57
III - Rapprochement des résultats obtenus sur modèles et en vases de végétation	59
CONCLUSIONS	61
BIBLIOGRAPHIE	64

INTRODUCTION

La structure granulaire est en général considérée comme caractéristique d'un sol sous prairie. C'est un état structural particulier qui a été reconnu depuis longtemps et l'emploi des prairies pour améliorer la structure d'un sol est une pratique assez courante bien avant même la publication, en Angleterre par R.H. ELLIOT en 1898, des résultats de ses "Expériences de Clifton Park" qui sont considérés comme l'un des tous premiers travaux systématiques ayant pour but de démontrer leur rôle important (PRINGLE et COUTTS, 1956).

En effet sous l'action des prairies on peut constater que l'évolution de la structure d'un sol se fait en deux étapes. Il y a d'abord la formation d'éléments structuraux de petites dimensions, généralement plus petites que 10 mm, polyédriques ou grumeleux, qui peut intervenir très rapidement après l'implantation de la prairie. Ultérieurement, on observe un enrichissement de la terre en matières organiques issues de la décomposition des premières générations de racines, et parallèlement, un accroissement de la stabilité structurale de la couche superficielle du sol (MONNIER, 1965). On remarque aussi que cette deuxième étape n'intervient jamais d'une manière immédiate. La plupart du temps elle ne devient sensible qu'entre la deuxième et la troisième année, voire au bout d'un laps de temps plus long, après l'établissement de la prairie (LOW, 1955).

Il semble que la vitesse à laquelle apparaît l'effet améliorant de l'ensemble de ces deux étapes dépend de la nature du sol, de son état structural initial, de son drainage, de son histoire culturale, du climat, des espèces de graminées et de leur âge (LOW, 1955 ; TROUGHTON, 1957 ; RUSSELL, 1961). Bien que de nombreuses interactions existent vraisemblablement entre les étapes de formation et de stabilisation, ce qui fait qu'elles sont le plus souvent étudiées ensemble (BUCKMAN et BRADY, 1960 ; ALLISON, 1968), elles affectent cependant des caractéristiques bien différentes.

Nous nous proposons d'étudier la première étape qui conduit à l'apparition d'éléments structuraux de taille et de forme caractéristiques.

L'importance de cette phase devient apparente dès que l'on a affaire à des cultures de courte durée (prairies annuelles, engrais verts en sols de verger par exemple). Il est à noter aussi qu'elle ne se manifeste pas dans tous les sols et de la même manière. Ainsi, on a pu remarquer que pour certains sols, la granulation apparaît au bout de quelques mois, que pour certains autres elle ne s'accomplit qu'après une période plus longue, tandis que pour d'autres encore elle ne se manifeste pas du tout (LOW, 1955 ; PLOTNIKOV, 1960).

Cette variété de comportements souligne la nécessité de connaître le mécanisme de la granulation, si l'on veut être à même de prévoir les conditions de son apparition. Or, il semble que c'est un aspect qui n'a pas été étudié d'une manière approfondie. En effet, si l'importance du phénomène de granulation a été reconnue depuis longtemps et ses conséquences ont été étudiées avec soin (RUSSELL, 1938 ; MARTIN, 1944 ; LOW, 1950 ; PRINGLE et COUTTS, 1956 ; IMURA et EGAWA, 1956 ; EGAWA et al., 1957 ; BARBER, 1959 ; KOBLET et WEHRLI, 1959 ; BEKHAR, 1959 ; PLOTNIKOV, 1960 ; TOTH et ALDERFER, 1960 ; ASHLEY, 1961 ; SKEPINSKII, 1961 ; FRIDLAND, 1964 ; CHATTERJEE et SEN, 1964 ; ANDREW, 1965 ; HARRIS et al., 1966), la genèse même de la granulation n'a pas reçu une attention comparable. Le peu de données disponibles dans la littérature à ce sujet semble avoir deux causes principales :

- Les études ont fréquemment porté sur l'état du sol à la fin de la végétation de la prairie : c'est alors la résultante globale de l'évolution du sol qui peut être observée. Ainsi, la plupart des travaux qui ont été rapportés portent principalement sur la stabilisation des éléments structuraux qui représente l'action intégrée ou le résultat à un stade avancé de l'action des graminées fourragères sur les sols. Par contre, leur action initiale, c'est-à-dire la façon avec laquelle les racines des graminées effectuent la formation de ces éléments structuraux à partir d'un sol présentant un état physique donné, reste mal connue.

Manifestement c'est la conception imprécise des types d'assemblage qui caractérisent la structure d'un sol en général, et celle d'un sol sous prairie en particulier, qui est à l'origine de l'absence des recherches sur cet aspect précis du problème. Pour certains auteurs une agglomération de particules élémentaires assez stables à l'eau s'appelle "ped", tandis que le mot "motte" est réservé aux masses de particules artificiellement formées qui ne sont pas habituellement stables dans l'eau (DONAHUE, 1958). D'autres ont appelé "agrégat" une agglomération ou groupe de particules de sol à l'état naturel et dans laquelle les forces qui retiennent ces particules sont beaucoup plus intenses que celles entre les agrégats adjacents (MARTIN et al., 1955). D'autres encore considèrent comme agrégats les éléments inférieurs à 0,2 mm qui sont stables dans certaines conditions. Ces agrégats sont alors considérés comme de véritables unités caractérisant la

"microstructure" du sol. S'ils se groupent de façon plus ou moins lâche formant ainsi des ensembles de dimensions variables pouvant dépasser 10 cm, ils sont appelés "faux agrégats" ou "mottes" et ils constituent la "macrostructure" du sol (DEMOLON, 1952).

On voit bien que ces définitions considèrent suivant les cas comme un élément structural un ensemble faiblement cohérent ou une unité fortement stabilisée. Et c'est parce qu'il n'y a pas de distinction expresse faite sur leur comportement que la nécessité de les étudier séparément n'a pas été apparente, et que la notion "d'agrégats" de "ped" et de "motte" reste toujours vague et ambiguë.

Il en est de même de la conception concernant l'arrangement de ces unités structurales dans le sol. MARTIN et ses collaborateurs (1955) ont souligné que pour beaucoup d'auteurs les termes "structure du sol" et "agrégation" sont interchangeables (MARTIN et al., 1965 ; HARRIS et al., 1966). Or, il semble que le terme "agrégation" ne représente qu'un aspect de la formation de la structure.

Par ailleurs la plupart des auteurs ont une conception des éléments structuraux que l'on peut qualifier de qualitative : en effet, ils recherchent le plus souvent des assemblages de propriétés privilégiées existant au sein d'une couche donnée de sol et présentant une certaine permanence. Ils sont donc conduits à utiliser des méthodes qui, en fin de compte, permettent de ne séparer que des éléments structuraux stables à l'eau. Encore faut-il noter que les résultats obtenus par ces méthodes varient beaucoup en fonction de la manière, nécessairement conventionnelle, avec laquelle les auteurs font intervenir l'action de l'eau. Les avantages et inconvénients de ces méthodes ont été d'ailleurs discutés par RUSSELL (1938), LOW (1954) et BAVER (1956).

Etant donné d'autre part que les forces liant les particules élémentaires en éléments structuraux varient en intensité suivant les conditions physico-chimiques et biologiques du milieu, on peut concevoir, et l'observation confirme cette position, qu'il existe dans le sol à un moment donné, non seulement des éléments structuraux stables à l'eau, mais toute une gamme d'assemblages de cohésion variable et qui réagissent donc différemment à un traitement donné. Il faut alors les mettre en évidence par des méthodes appropriées à chaque niveau de résistance, si l'on veut rendre compte d'une manière plus progressive et plus complète de l'évolution de la structure depuis le début. Notre but étant d'étudier la formation de la structure sous prairie dans un temps relativement court, ce qui implique des milieux non stabilisés, il est plausible que le comportement vis-à-vis de l'eau des éléments structuraux formés dans ces conditions soit tout à fait différent de celui qui est manifesté par des éléments provenant d'un milieu où la stabilisation, par les matières organiques notamment, a pu

intervenir. Dès lors nous avons renoncé à l'attitude qualitative qui est à l'origine des conceptions "d'agrégats", de "ped" et de "motte" que nous venons de rappeler et qui postule une discontinuité de nature entre les différents constituants structuraux. Au contraire, nous nous proposons d'appeler éléments structuraux les différents groupes ou ensembles de particules séparés les uns des autres par des lignes ou des faces de moindre résistance et existant à un moment donné dans le sol. Cette définition admet que les éléments structuraux puissent présenter des cohésions très variables et évoluer avec le temps.

Ceci nous a conduit à une conception quantitative (par opposition à la position que nous avons qualifiée de qualitative). Une telle attitude conduit à étudier au préalable une gamme de méthodes dont l'agressivité vis-à-vis du traitement à l'eau décroît progressivement, et à choisir celle qui donne des résultats les plus rapprochés de ce que l'on observe réellement sur le terrain. La méthode à choisir sera donc d'autant plus satisfaisante qu'elle nous permettra de traduire aussi fidèlement que possible la présence et l'abondance de ces éléments structuraux au fur et à mesure qu'ils apparaissent.

Dans les conditions ainsi définies notre étude a porté sur les points suivants :

1. Mise au point d'une méthode de séparation faisant intervenir des actions relativement ménagées permettant d'isoler les assemblages fragiles ;

2. Mise en évidence des mécanismes de l'interaction entre les racines des graminées fourragères et deux types de sols, dont, d'après les observations sur le terrain, l'un répond et l'autre ne répond pas à l'influence du système racinaire. Nous avons étudié chacun de ces sols dans les états structuraux suivants :

a. continu, représentant un milieu compact n'ayant pas de faces de moindre résistance dans son ensemble ;

b. fragmentaire, constitué au départ :

- soit par des particules agrégées de petites dimensions (inférieures à 500 microns) ;

- soit par des assemblages plus grossiers (5 à 10 mm).

Nous avons en plus étudié un milieu monoparticulaire, constitué par la juxtaposition des particules élémentaires, qui est en l'occurrence des sables fins (50 à 200 microns).

Nous allons maintenant décrire d'abord le dispositif expérimental que nous avons mis en œuvre pour ce travail, puis la méthode que nous avons mise au point, ainsi que les méthodes existantes pour suivre l'évolution de la structure sous prairie et pour étudier le mécanisme de cette évolution, et enfin les résultats obtenus.

MATERIEL ET METHODES

A - MATERIEL

I - TYPES DE SOLS UTILISES

Il a été rapporté (LOW, 1955 ; PLOTNIKOV, 1960) et l'observation sur le terrain le confirme, que certains sols tels que les sols riches en sables fins et / ou en limons, ou les sols argileux constamment humides se prêtent mal ou ne se prêtent pas à la granulation, tandis que d'autres tels que les sols riches en argile et bien drainés présentent une texture très favorable à la formation d'une structure granulaire sous l'influence des racines. C'est en nous basant sur ces observations que nous avons choisi les matériaux suivants :

a/ - Terres naturelles.

Les textures sableuse, limoneuse et argileuse sont représentées, respectivement, par le sable fin de Fontenay (50 - 200 microns), le limon de Bernay ou le limon Blanc, et l'Horizon B de Versailles. Le tableau 1 donne les résultats de l'analyse granulométrique de ces terres.

Le comportement de ces terres sous végétation de graminées fourragères a été étudié dans leurs états physiques suivants : monoparticulaire (représenté par le sable de Fontenay), fragmentaire fin ou grossier (les deux limons et l'Horizon B tamisés soit à 0,5 mm, soit à 5 - 10 mm), et continu (limons et Horizon B artificiellement compactés).

b/ - Mélanges artificiels.

Pour élargir la gamme de textures précédentes et pour étudier leur comportement en fonction de la nature de l'argile nous avons fabriqué et utilisé des mélanges artificiels de limon avec soit de la montmorillonite, soit de l'illite, soit de la kaolinite, dans lesquels la teneur de chaque type d'argile varie de 10 à 50 %.

mélange
artificiels.

limon + kaolinite } 10 à 50% cent
Illite (Hb)

Tableau 1

Composition granulométrique (%) des sols utilisés.

Lim BERNAY	Classe et taille des particules	Limon Bernay	Limons Blanc	Horizon B
	Argile ($\leftarrow 2 \mu$)	10,5	12,1	28,5
	Limons fin (2 - 20 μ)	22,6	35,0	24,0
	Limons grossier (20 - 50 μ)	54,6	40,0	45,0
	Sable fin (50 - 200 μ)	7,0	10,0	1,5
	Sable grossier (200 μ - 2 mm)	0,6	—	0,5
	Matières organiques	—	0,6	0,5
limons	mélange		fragments fins, grosses cailloux	
	modèles		60g + fils.	

II - LE MATERIEL VEGETAL

Compte tenu du fait que le phénomène de granulation s'observe seulement dans les sols placés sous graminées fourragères notre choix du matériel végétal se limite donc sur ces dernières. Les espèces utilisées au début de nos expériences étaient Lolium italicum (Ray-grass d'Italie, variété Rina) et Festuca pratensis (Fétuque des prés, variété Sequana). Les densités de semis étaient fixées à 60 ou 120 mg / 50 cm² de surface. Comme le développement de la Fétuque s'est par la suite révélé trop lent et beaucoup moins satisfaisant que celui du Ray-grass, nous avons décidé de ne retenir que ce dernier pour le reste de nos essais.

III - LES MODELES

Pour mettre en évidence et étudier plus en détail les phénomènes observés à l'issue des expériences en vases de végétation nous avons fabriqué et utilisé des modèles qui simulent le système sol-plantes. Ce sont des gâteaux de Limons ou d'Horizon B d'environ 60g ayant une surface sensiblement

égale à 20 cm² dans lesquels sont implantés des fils de nylon (0,32 mm de diamètre) ou des fils de fer galvanisés (de 0,5 à 1 mm de diamètre). Ces gâteaux ont été soumis à divers traitements que nous détaillerons dans la partie des études de modèles.

B - METHODES

I - LE DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Nous avons d'abord procédé à des expériences in vivo c'est-à-dire en vases de végétation sous serre. Les interactions entre les différents milieux et le système racinaire des graminées sont évaluées au bout des périodes de temps déterminées qui s'échelonnent entre 2 et 18 mois. Les expériences que nous avons entreprises sont les suivantes :

- a/ - Ray-grass sur sable de Fontenay.
- b/ - Ray-grass et Fétuque sur Limon de Bernay et Horizon B compactés.
- c/ - Ray-grass sur Limon Blanc compacté.
- d/ - Ray-grass sur :
 - Horizon B tamisé à 0,5 mm
 - Horizon B constitué d'éléments structuraux de 5 à 10 mm.

La croissance optimum des graminées sur ces milieux a été assurée par l'apport régulier, soit en surface, soit par en dessous, de la solution nutritive de KNOF (POLLOCK et al., 1954) et par un éclairage adéquat pendant la période d'hiver. Des coupes régulières ont été effectuées au fur et à mesure du développement des graminées. Les récoltes ainsi obtenues ont été séchées à l'étuve à 50° C jusqu'à poids constant et pesées. Nous avons aussi pris des mesures appropriées pour réduire au minimum les dégâts causés par les maladies ou les insectes et qui auraient pu affecter le rendement des coupes.

A des intervalles de temps déterminés des pots sous herbe et leurs témoins correspondants sont ouverts et leur état structural ainsi que celui des modèles a été étudié par les méthodes que nous présentons dans le paragraphe suivant.

II - METHODES D'APPRECIATION DE L'EVOLUTION STRUCTURALE

a/ - Détection des éléments structuraux : le test à l'alcool.

Quand un agglomérat de terre se trouve en contact avec de l'eau il se désagrège plus ou moins rapidement. HENIN (1938) a montré que ceci est dû à la dispersion des argiles (SCHLOESING, 1885) et à la compression de l'atmosphère interne (YODER, 1936) de l'agglomérat causée par l'entrée de l'eau dans les pores. La baisse de cohésion résultant du gonflement entraîne la destruction des agglomérats par l'intermédiaire des mécanismes d'éclatement ; nous rechercherons donc un traitement qui ait un effet aussi peu marqué que possible sur cette propriété.

RUSSELL (1938) a rapporté que l'emploi du tamisage direct des échantillons tels qu'on les trouve au moment du prélèvement (PUCHNER, 1911 ; KEEN, 1933 ; NEKRASSOV, 1934) ou séchés à l'air (MANGELSDORFF, 1929 et VOLKOV, 1933) pourrait être une solution. Toutefois ces méthodes de tamisage direct donnent trop d'importance à des actions secondaires diverses y compris celles qui interviennent lors du prélèvement lui-même.

Un autre méthode consiste à traiter et à tamiser les échantillons dans des liquides organiques. Selon RUSSELL (1938), TIULIN fut parmi les premiers à proposer l'emploi du benzène ou du xylène en 1928. D'autres ont signalé l'intérêt de l'alcool éthylique comme liquide de tamisage (KOEPF, 1961) sans en préciser les raisons. Or, CONCARET (1965) a rapporté que la cohésion d'une terre humidifiée diminue à cause du gonflement et qu'en traitant les agglomérats par des mélanges alcool/eau on réduit l'abaissement de cohésion lié à l'humectation à un degré tel que les variations de la pression interne ont des effets négligeables, les agglomérats se trouvant ainsi plus stables. Il est donc probable que l'action de l'alcool sera plus sélective que celle de l'eau permettant ainsi de mettre en évidence les premières phases de la formation des éléments structuraux, correspondant à des assemblages peu cohérents.

Nous avons observé dans une expérience préliminaire que lorsque l'argile est rendue hydrophobe par une substance telle que le chlorure de cétyle pyridinium, $C_{21}H_{38}NCl$, H_2O (LAW, Jr. et KUNZE, 1966) et que les conditions d'évacuation de l'air sont assurées en opérant sous vide, l'eau peut remplacer l'alcool éthylique et donne des résultats tout à fait comparables. C'est là une preuve indirecte du fait que l'alcool éthylique élimine pratiquement les effets de gonflement et de compression, effets qui rendent la méthode du tamisage direct dans l'eau inutilisable. L'étude comparée des divers traitements est résumée dans le Tableau 2 qui montre que les traitements au chlorure de cétyle pyridinium et à l'alcool éthylique à 95 % sont les moins destructeurs et

Tableau 2

Effets de divers traitements sur le comportement des éléments structuraux provenant de l'Horizon B de Versailles ayant des histoires culturales différentes

Taille des éléments structuraux (mm)	TRAITEMENTS																	
	A			B			C			D			E			F		
	17	19	18	17	19	18	17	19	18	17	19	18	17	19	18	17	19	18
> 3	0,7	0,3	2,0	7,9	5,3	35,8	16,1	13,9	42,8	40,0	49,3	84,4	60,5	62,0	94,5	58,0	60,0	95,0
3 - 2	0,3	0,1	0,4	2,4	3,3	3,3	4,1	5,2	3,5	3,8	4,6	1,6	5,0	4,6	3,3	4,8	5,0	3,0
2 - 0,5	2,8	2,8	7,7	33,6	30,9	22,4	34,6	36,5	23,2	24,3	18,6	6,0	21,0	18,5	1,7	20,0	19,0	1,0
0,5 - 0,2	12,8	15,1	19,3	19,4	20,6	11,3	14,1	15,6	9,8	7,2	7,0	1,5	5,4	5,4	0,1	6,4	6,0	0,5
< 0,2	83,3	81,6	70,5	36,6	39,8	27,1	31,0	28,8	20,6	24,6	20,5	6,4	8,0	9,4	0,3	9,0	10,0	0,4

Note : Les numéros 17, 19, 18 représentent respectivement les cases l'ysimétriques en jachère, sous cultures et sous fétuque élevée.

A = Humectés et tamisés dans l'eau

B = Humectés sous vide et tamisés dans l'eau

C = Humectés dans 60% alcool et tamisés dans l'eau

D = Humectés dans 95% " " " "

E = Humectés et tamisés dans 95% d'alcool

F = Prétraités avec le chlorure de cétyle pyridinium, humectés par l'eau sous vide et tamisés dans l'eau.

et qu'ils donnent des résultats qui s'accordent le mieux avec les faits observés sur le terrain lorsque les conditions d'observation, l'humidité du sol en particulier, sont favorables.

Si d'autre part on compare les résultats (Tableau 3) d'un tamisage à sec et du test à l'alcool (traitement et tamisage dans l'alcool à 95°) des échantillons provenant d'un sol (Horizon B de Versailles) sans herbe et du même sol sous Ray-grass d'Italie, on voit que le test à l'alcool est nettement plus révélateur que le tamisage à sec. Alors que ce dernier ne donne aucune différence appréciable aussi bien dans l'évolution de l'état structural de l'Horizon B sans herbe et sous herbe en fonction du temps, qu'entre les états structuraux du même sol avec et sans herbe à un moment donné, le test à l'alcool l'a au contraire révélée d'une manière très significative. Pour ces raisons et étant donné la facilité et la rapidité avec lesquelles le traitement à l'alcool peut être réalisé, nous l'avons adopté comme méthode de base pour déceler la présence des éléments structuraux et en évaluer le taux.

Le protocole suivi est le suivant : une prise d'essai de 15 g constituée d'agglomérats séchés à l'air, dont la taille est comprise entre 5 et 10 mm et obtenus par fragmentation de l'échantillon initial, est placée dans un bécher de 600 cc de forme basse et recouverte avec 30 cc d'alcool éthylique à 95° pendant 1 heure. Les agglomérats sont ensuite versés avec précaution sur un tamis à mailles carrées de 3 mm d'ouverture, qui constitue la partie supérieure d'une colonne de 4 tamis dont les 3 autres ont des mailles de 2 mm, 0,5 mm et 0,2 mm. Les tailles de 0,2 et 10 mm étant considérées (RETZER et RUSSELL, 1941 ; TARASENKO, 1960 ; BEKAREWITSCH, 1964) comme les dimensions utiles des agrégats sous prairies, nous les avons adoptées comme les limites inférieure et supérieure de tamisages. La colonne est fixée par sa partie supérieure à l'appareil à tamiser de FEODOROFF (1960) et plongé dans un bécher de 5 l contenant de l'alcool éthylique à 95° en s'assurant que le niveau de celui-ci dépasse de 0,5 cm la toile du tamis supérieur. Le tamisage, assuré par l'appareil qui déplace la colonne de tamis de haut en bas et vice versa par un mouvement hélicoïdal dans l'alcool, comporte 30 coups effectués en 30 secondes. La colonne est ensuite détachée de l'appareil et sortie du bécher. Les unités structurales restées sur chacun des tamis sont placées séparément dans des capsules en porcelaine, séchées à l'étuve à 105°C et pesées. Les résultats sont exprimés en pourcentage du poids total de la prise d'essai. Pour être certain que les éléments structuraux mis en évidence par le traitement à l'alcool sont de vrais agglomérats qui ne changent pratiquement plus de forme et de taille une fois séparés les uns des autres suivant les lignes de moindre résistance par le premier tamisage, nous les avons soumis à un second traitement à l'alcool après séchage, et retamisé. Les résultats montrent effectivement (Tableau 4) que la majorité des agglomérats obtenus lors du premier tamisage se retrouvent après le deuxième.

Tableau 3

Comparaison du test à l'alcool avec la méthode du tamisage à sec dans la mise en évidence de l'évolution d'une structure d'un sol avec ou sans herbe (Horizon B de Versailles) constituée au départ par des éléments structuraux de 5 à 10 mm.

Période étudiée (mois)	Profondeur étudiée (cm)											
	0 - 6				6 - 12				12 - 20			
	Sec		Alcool		Sec		Alcool		Sec		Alcool	
	Témoin	Ray-grass	T	R.G	T	R.G	T	R.G	T	R.G	T	R.G
2	59,8	59,8	16,1	53,5	72,8	75,2	39,2	35,8	66,3	72,6	51,5	43,8
7	55,2	56,2	17,5	41,0	63,8	62,6	15,1	29,3	53,9	53,9	17,9	13,4
10	49,8	52,0	19,7	19,2	56,2	59,9	15,5	28,0	48,9	47,0	11,6	6,4
12	52,5	48,4	16,3	10,1	44,2	48,9	12,0	8,4	48,0	47,5	9,2	4,4
15	57,8	53,0	18,1	7,8	55,0	49,0	12,4	6,7	56,3	54,0	6,8	3,9
% d'éléments structuraux de 5 mm obtenus												

Tableau 4

Signification du test à l'alcool : mise en évidence et reproductibilité des éléments structuraux ayant un niveau de cohésion donné.

Nombre de traitements à l'alcool et de tamisages	Horizon B agrégé fin sans herbe	Horizon B agrégé fin, 2 mois sous Ray-grass d'Italie	Case Lysimétrique n° 17 (Horizon B, 11 ans en jachère)	Case Lysimétrique n° 18 (Horizon B, 3 ans sous féтуque élevée)
Poids des éléments structuraux > 3 mm obtenus après chaque tamisage				
1 ^{er} (1)	1 g	4,2 g	10,3 g	18,2 g
2 ^{me} (2)	0,8 g	3,5 g	9,4 g	17,4 g
% obtenu du 2 ^{me} par rapport au 1 ^{er}	80,0	83,4	91,3	95,5

(1) - Prise d'essai = 20 g

(2) - Prise d'essai = poids obtenus à l'issu du 1^{er} tamisage.

b/ - Détermination de la stabilité des éléments structuraux.

Après avoir mis en évidence les éléments structuraux, nous avons essayé d'évaluer leur stabilité à l'eau en fonction du temps dans le but de déterminer la période au bout de laquelle la stabilisation commence. Pour cela, nous avons utilisé le test de stabilité structurale mis au point et décrit par HENIN et MONNIER (1956). Grâce à l'inclusion des prétraitements des échantillons à l'alcool éthylique et au benzène, ce test permet la distinction des effets de stabilisation par augmentation de la cohésion des agglomérats à l'état humide ou par diminution de leur mouillabilité due aux matières organiques. Les résultats sont donnés sous forme d'un indice S, qui varie de 0 pour les structures très stables, à des valeurs au-delà de 100 pour les structures très instables.

c/ - Etude de la forme et de la taille des éléments structuraux en fonction des dimensions de la maille racinaire.

Nous avons noté plus haut que là où il existe une structure "granulaire" sous l'influence de la prairie les éléments structuraux présentent une forme et taille très caractéristiques. Les deux méthodes précédentes nous permettent de mettre en évidence l'existence de ces éléments et de déterminer leur degré de consolidation. Il serait souhaitable en ce point d'aller plus loin c'est-à-dire d'effectuer une tentative d'explication de leur raison d'être. En partant de l'hypothèse qu'il existe une relation entre la taille des éléments structuraux et les dimensions du système racinaire nous avons conçu d'établir cette relation de la manière suivante.

Admettons qu'en général ces éléments structuraux soient plus ou moins cubiques et que 1 cm³ de terre contienne n³ cubes plus petits. Si n est le nombre de segments qui divisent chaque côté de ce cube, la longueur minimum L_S de racines nécessaire pour couvrir entièrement les arêtes de ces n³ petits cubes serait :

$$L_S = 3 n^2 *$$

Le tableau 5 obtenu à partir de l'équation précédente, donne la relation théorique entre les valeurs L_S et la taille des unités contenues dans 1 cm³ de terre.

Tableau 5

Calcul théorique de la taille des éléments structuraux en fonction de la longueur spécifique L_S du réseau racinaire.

Taille (cm)	Nombre de segments / cm n	Nombre de cubes/ cm ³ (n ³)	Longueur spécifique L _S (cm/cm ³)
1,00	1	1	3
0,50	2	8	12
0,33	3	27	27
0,30	3,33	39	34
0,27	3,65	48	40
0,25	4	64	48
0,20	5	125	75
0,10	10	1000	108
0,05	20	8000	363

* En effet, pour chaque petit cube d'arête $\frac{1}{n}$ la longueur nécessaire, compte tenu du fait que chaque arête est commune à 4 cubes, est égale à

$$\frac{12}{n} \times \frac{1}{4} = \frac{3}{n}$$

La valeur de L_S correspondante est donc : $\frac{3}{n} \times n^3 = 3 n^2$

C'est en comparant les tailles les plus représentées dans l'échantillon des éléments structuraux obtenus à l'issue du test à l'alcool et les longueurs spécifiques mesurées des racines présentes dans l'échantillon, avec les valeurs tailles et L_g théoriques du tableau 5 que nous avons pu dire s'il existe ou non une relation entre ces deux éléments.

500) Pour déterminer les longueurs de racines présentes dans un volume de terre donné nous avons effectué des mesures de longueurs sur un nombre suffisamment grand d'échantillons de racines pesant chacun de 16 ± 1 mg. Ces séries de mesures nous ont permis d'établir une relation approximative entre la longueur et le poids de racines qui est de l'ordre de 148 m pour 1 g. Cette méthode donne des résultats qui s'accordent bien avec ceux obtenus par la méthode des intersection de NEWMAN (1966), qui permet la détermination directe de la longueur des racines mais qui demande beaucoup plus de temps. Le poids des racines obtenu par notre méthode est d'autre part du même ordre de grandeur que celui donné par la formule allométrique de TROUGHTON (1956) à partir du rendement de la graminée.

d/ - Etude de l'évolution de la densité apparente.

Enfin, les variations de la densité apparente sont mesurées pour apprécier une conséquence globale des changements subis par la structure initiale sous l'influence des racines. Les mesures sont effectuées :

1. Au volumétre à mercure pour les échantillons compacts.
2. Au vernis à base de polystyrène pour les échantillons présentant des pores de plus grandes dimensions. Le principe d'utilisation de cette dernière méthode ainsi que ses avantages vis-à-vis de la méthode classique à la paraffine ont été expliqués par MAERTENS (1965).

Le matériel et les méthodes mis en œuvre ayant été décrits nous allons aborder maintenant l'étude critique des résultats obtenus.

DISCUSSION DES RESULTATS

Dans ce qui suit nous allons présenter et discuter successivement les résultats provenant de nos essais en vases de végétation sous l'influence des racines sur deux milieux extrêmes ; continu et monoparticulaire, et sur deux milieux intermédiaires : fragmentaire fin et grossier. Nous exposerons ensuite les expériences sur les modèles. De ces 2 séries de travaux nous essaierons de faire le rapprochement des résultats et d'en tirer des conclusions pertinentes.

I - INTERACTION DU MILIEU ET DE LA PRAIRIE : ETUDE DES RESULTATS SOUS SERRE ET DES PRELEVEMENTS DANS LE MILIEU NATUREL

A - ACTION DU RESEAU RACINAIRE SUR UN MILIEU CONTINU :

I - LIMON BERNAY, LIMON BLANC ET HORIZON B COMPACTES EN VASE DE VEGETATION

Dans cet essai sous serre nous avons semé la Fétuque des prés et le Ray-grass d'Italie (semé à $60 \text{ mg}/50 \text{ cm}^2$) sur le limon Bernay et l'Horizon B préalablement malaxés et compactés en une masse continue. Leur densité apparente après ce traitement est de l'ordre de 1,60 et 1,80 respectivement. Dans un premier temps les deux graminées s'établissent lentement et alors que par la suite, et dans les conditions expérimentales où nous les avons placés, le Ray-grass se développe normalement, la végétation de la Fétuque s'est avérée difficile et insuffisante, ce qui nous a conduit à la retirer de nos expériences. Ainsi dans tout ce qui suit, le Ray-grass est le seul matériel végétal que nous avons utilisé.

Après 6 mois (du 26/10/65 au 16/5/66) le test à l'alcool montre qu'une nouvelle structure de l'Horizon B est formée, tandis que la structure continue au départ du limon Bernay reste sensiblement la même (Tableau 6). Le changement de la structure initiale de l'Horizon B est caractérisé par une augmentation du taux des agglomérats plus petits que 2 mm aux dépens de celui des unités plus grandes que 3 mm ; par une baisse appréciable de la densité apparente de 1,80 à 1,50 jusqu'à une profondeur de 8 cm ; et par une diminution sensible de la valeur de l'indice S, c'est-à-dire, une augmentation de la stabilité des éléments structuraux (Tableau 7).

Si à partir des résultats du tableau 6 on représente sur un graphique la distribution moyenne des éléments structuraux du témoin B_0 (courbe 1), et celles de B_1 à des profondeurs de 0-4 cm (courbe 3) et 4-8 cm (courbe 2), les courbes qui en résultent ont l'allure indiquée dans la figure 1. En comparant avec la courbe témoin, on voit que la formation

- Tableau 6 -

Comportement de la structure continue des sols riches en limon (limon Bernay : A₀ : A₂) en argille (Horizon B₀, E₀, B₁) sous l'action des racines du Ray-grass d'Italie.

(6. sur. m. n. s.)

Taille des éléments structuraux (mm)	Traitement, profondeur étudiée (cm) et % d'éléments structuraux obtenus à l'issue du test à l'alcool																
	B ₀ (sans herbe)					B ₁ (Ray-grass)					A ₀ (sans herbe)						
	0-4 cm	4-8 cm	8-12 cm	Moy.	H _B	0-4 cm	4-8 cm	8-12 cm	Moy.	H _B	0-4	4-8	8-12	Moy.	0-4	4-8	8-12
> 3	86,5	88,0	86,6	87,0	54,0	82,6	84,0	73,5	98,0	98,0	96,0	97,0	95,0	98,0	97,0	96,0	
3 - 2	2,1	3,3	3,3	2,9	2,8	2,7	5,7	3,7	-	-	-	-	-	-	-	0,6	0,2
2 - 0,5	2,8	3,3	3,3	3,1	12,1	6,7			-	-	-	-	0,3	0,1	0,3	0,2	
0,5 - 0,2	0,7	0,7	0,7	0,7	12,7	2,7	1,0	5,4	-	-	-	-	-	-	-	-	
< 0,2	7,9	4,7	6,1	6,2	18,4	5,3	5,2	9,6	2	2	4	3	-	-	-		

- Tableau 7 -

Evolution de la densité apparente et de la stabilité structurale du limon Bernay (A_0 , A_2) et de l'horizon B (B_0 , B_1) compactés, sous l'action des racines du Ray-grass d'Italie.

Traitements	Rendement g/pot (50 cm ²)	Densité				Indice S				% d'éléments > 0,2 mm stables à l'eau après prétraitement au benzène		
		Profondeur étudiée (cm)										
		0-4	4-8	8-12	Moy.	0-4	4-8	8-12	Moy.	0-4	4-8	8-12
Sans herbe (A_0)	-	1,65	1,62	1,62	1,63	31,0	32,4	25,4	29,6	2,0	2,0	2,0
Ray-grass (A_2)	8,9	1,52	1,63	1,63	1,59	10,3	25,8	34,5	23,6	3,0	2,2	2,0
Sans herbe (B_0)	-	1,81	1,79	1,80	1,80	53,5	80,4	93,0	75,6	0,2	0,2	0,2
Ray-grass (B_1)	12,2	1,53	1,49	1,82	1,61	23,0	53,4	61,8	46,0	2,0	0,8	0,2

de la nouvelle structure sous l'influence du Ray-grass s'effectue par une division de la masse continue par le réseau racinaire. Cette division est accompagnée d'un affinement progressif des unités plus grandes que 3 mm vers les fractions 0,5 à 2 mm (courbe 2) puis vers les fractions plus fines encore (courbe 3) à mesure que le réseau racinaire devient plus dense. Par ailleurs, la baisse de la densité apparente de 1,80 à 1,50 à la suite de ces changements entraîne une augmentation correspondante de la porosité de 31,4 % à 43 %. D'autre part, l'augmentation, d'ailleurs peu importante de la stabilité structurale (Tableau 7) est montrée par le tamisage des échantillons prétraités au benzène comme due à une baisse de la mouillabilité des éléments structuraux causée par les matières organiques, qui, dans ce cas, sont vraisemblablement des racines mortes en décomposition.

En ce qui concerne le limon Bernay, il n'y a pratiquement pas de division de la masse continue par les racines (Tableau 6). Les changements de densité apparente et de stabilité sont minimes et sont d'ailleurs limités à la profondeur 0-4 cm (Tableau 7).

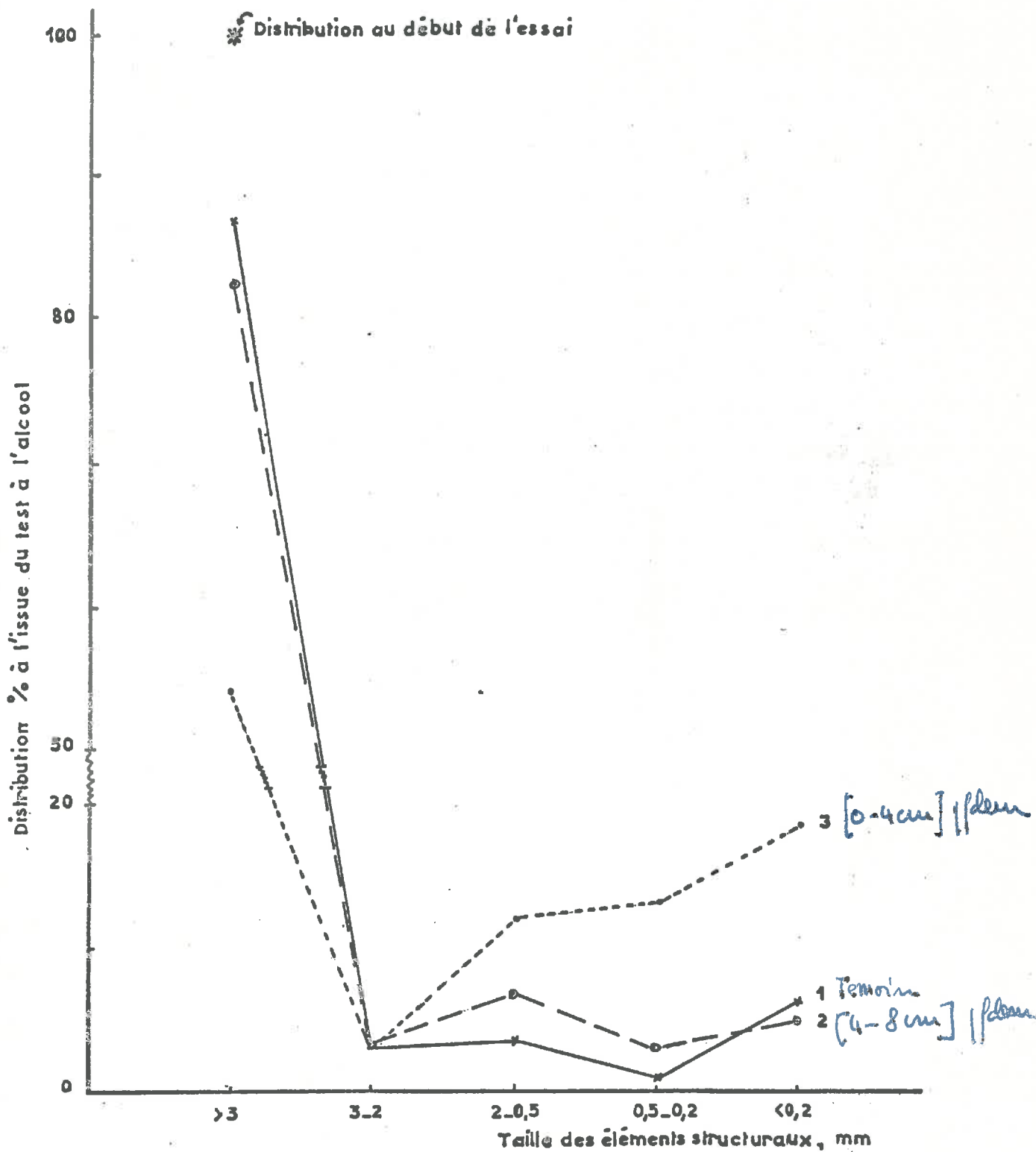


Fig. 1. Interaction entre le réseau racinaire du Lolium italicum et la structure continue d'un sol fissurable (Horizon B) (8 au mois)

Nous avons répété la même expérience sur le limon Blanc, qui a sensiblement la même composition granulométrique que le limon Bernay, en prolongeant cette fois la durée de l'essai jusqu'à 9 mois (du 23/11/67 au 30/8/68), en utilisant 2 densités de semis pour le Ray-grass d'Italie (60 mg et 120 mg/50 cm²) et en augmentant le nombre de répétitions. Les résultats obtenus sont résumés dans le Tableau 8. Tout comme dans le cas du limon Bernay on n'observe aucun changement appréciable de la structure sous herbe, la densité apparente et le taux des éléments plus grands que 3 mm à l'issue du test à l'alcool restant pratiquement les mêmes dans les témoins sans herbe et les pots sous Ray-grass. Pourtant la croissance et le développement de ce dernier ont produit un réseau racinaire très important qui devrait favoriser une interaction positive avec le milieu. Remarquons en

- Tableau 8 -

Comportement de la structure continue d'un milieu riche en limon (limon Blanc) placé sous une graminée fourragère (Ray-grass d'Italie).

Taille des éléments structuraux (mm)	Témoin (sans herbe)				Sous herbe (Ray-grass d'Italie)			
	Profondeur étudiée (cm)							
	0 - 4	4 - 8	8 - 12	Moy.	0 - 4	4 - 8	8 - 12	Moy.
% distribution des éléments structuraux à l'issue du test à l'alcool								
> 3	91,4	94,0	96,0	93,8	97,3	96,0	98,0	97,1
3 - 2	1,3	0,6	0,6	0,8	-	0,6	-	0,2
2 - 0,5	2,6	1,2	-	1,2	-	-	-	-
1,5 - 0,2	-	-	-	-	-	-	-	-
< 0,2	4,7	4,0	3,3	4,0	2,7	3,3	2,0	2,6
Densité apparente	1,74	1,73	1,72	1,73	1,61	1,71	1,73	1,68
Rendement	-				36,6 g/50 cm ² (1) 35,0 g/50 cm ² (2)			
g (cm/cm ³)	-				98	43	23	55

Note : (1) et (2) - Rendements cumulatifs provenant d'une densité de semis de 120 mg/50 cm² et de 60 mg/50 cm², respectivement.

passant que les deux densités de semis ont produit des récoltes à peu près du même ordre de grandeur. L'importance du réseau racinaire est reflétée

par la fréquence des récoltes (5 au total, à raison de 1 tous les 2 mois) et leur rendement élevé (en moyenne 35,8 g par pot de 50 cm² de surface) ainsi que par le calcul de sa longueur par unité de volume de terre, quantité que nous appelons également longueur spécifique L_s pour faciliter sa comparaison avec celles rapportées dans le tableau 5. Comme nous l'avons décrit sous la rubrique générale "Méthodes d'appréciation de l'évolution structurale" la valeur L_s s'obtient en multipliant le poids (g) sec (séché à 50° C) des racines (provenant de leur séparation dans l'eau d'un échantillon de terre prélevé à une profondeur donnée) par le facteur 148 et en divisant le résultat par le volume total (cm³) de l'échantillon. A titre d'indication nous avons réuni dans le tableau suivant les données nécessaires à partir desquelles nous avons effectué le calcul.

- Tableau 9 -

Calcul de la longueur spécifique L_s du réseau racinaire de Lolium italicum dans un milieu continu riche en limon (Limon Blanc).

Profondeur étudiée (cm)	Poids de l'échantillon (g)	Densité apparente	Volume de l'échantillon (cm ³)	Poids de racines (g)	Longueur totale des racines (m)	Longueur spécifique L_s (cm/cm ³)
0 - 4	96,7	1,61	60,0	0,392	59,2	98
0 - 8	141,0	1,71	82,5	0,243	35,5	43
0 - 12	147,0	1,73	85,2	0,127	19,2	23
Total	384,7		227,7	0,762	113,9	164
Moyenne		1,68				55

Les valeurs L_s moyennes dans le limon Bernay et l'Horizon B sont respectivement 14 et 23 cm/cm³. Théoriquement (Tableau 5) la maille racinaire dans les 2 cas est suffisamment dense pour provoquer la formation des éléments structuraux de 3,3 à 5 mm. Ce qui est vrai dans le cas de l'Horizon B seulement, et non dans celui du limon Bernay où la structure continue initiale reste pratiquement inchangée. Ce comportement persiste dans le cas du limon Blanc où la L_s atteint des valeurs très élevées (allant de 23 à 98 avec une moyenne de 55) qui devraient permettre une fissuration intense du milieu.

Etant donné les conditions expérimentales identiques sous lesquelles le limon Bernay, le limon Blanc et l'Horizon B ont été soumis, la différence de leur comportement sous l'action des racines ne peut être expli-

quée que par la différence de leur composition granulométrique ou plus exactement, de leur teneur en argile. KHEYRABI (1966) a montré que dans un milieu pauvre en argile, la phase argileuse y est discontinue ce qui limite les possibilités de fissuration, parce que le gonflement et le retrait de l'argile qui sont à l'origine de la fissuration sont que localisés et par conséquent, n'affecte pas un volume important de terre. Or, il semble que la capacité du réseau radiculaire à diviser une masse de terre compacte est étroitement liée à l'aptitude de cette terre à se fissurer. C'est ce qui explique pourquoi l'action du Ray-grass est plus efficace sur l'Horizon B qui est riche en argile, donc fissurable alors que le limon Bernay et le limon Blanc ne le sont pas. Cette différence de comportements devient plus apparente si l'on fait ressortir la distribution moyenne des éléments structuraux provenant de ces terres sous herbe et sans herbe. Pour cela nous avons utilisé la méthode log-distribution normale (gaussienne) décrite par GARDNER (1957). Elle consiste à tracer la distribution à étudier sur un graphique spécial dont l'axe des coordonnées est en échelle logarithmique et celui des abscisses est en échelle de probabilité de distribution normale. Dans notre cas (Fig. 2) nous avons porté en ordonnée les tailles $y = 0,2 ; 0,5 ; 2 ; 3 ; 5$ et 10 mm et en abscisse les taux moyens d'éléments structuraux obtenus qui sont plus grands que la taille correspondante indiquée sur l'ordonnée. Si l'on obtient une droite, la distribution est log-normale, et il arrive qu'une distribution soit parfois traduite par 2 droites, ce qui indique qu'elle est la somme de 2 log - distributions normales.

La méthode que nous venons de décrire a l'avantage d'offrir une représentation commode d'une distribution, son évaluation statistique et une appréciation de sa nature. Elle fournit en outre la possibilité d'obtenir une valeur unique pour caractériser chaque distribution facilitant ainsi leur comparaison. Cette valeur unique, appelée logarithme de la moyenne géométrique du diamètre, est représentée par le logarithme de la taille portée en ordonnée qui intersecte la droite de distribution en question au point correspondant à 50 % sur l'échelle de probabilité en abscisse. Enfin, la méthode permet la détermination directe du logarithme de l'écart type σ_g , qui avec le log de la moyenne géométrique caractérisent complètement une distribution. La valeur de σ_g s'obtient à partir des relations suivantes :

$$\sigma_g = \frac{\text{taille à } 84,13 \%}{\text{taille à } 50 \%} = \frac{\text{taille à } 50 \%}{\text{taille à } 15,87 \%}$$

Il est à remarquer que ce sont les logarithmes des tailles y , c'est-à-dire $\log y$, et non pas les tailles, ou y , qui ont une distribution normale. C'est pourquoi c'est le log de l'écart-type, $\log \sigma_g$, qu'il faut déterminer pour que la distribution ait une signification statistique.

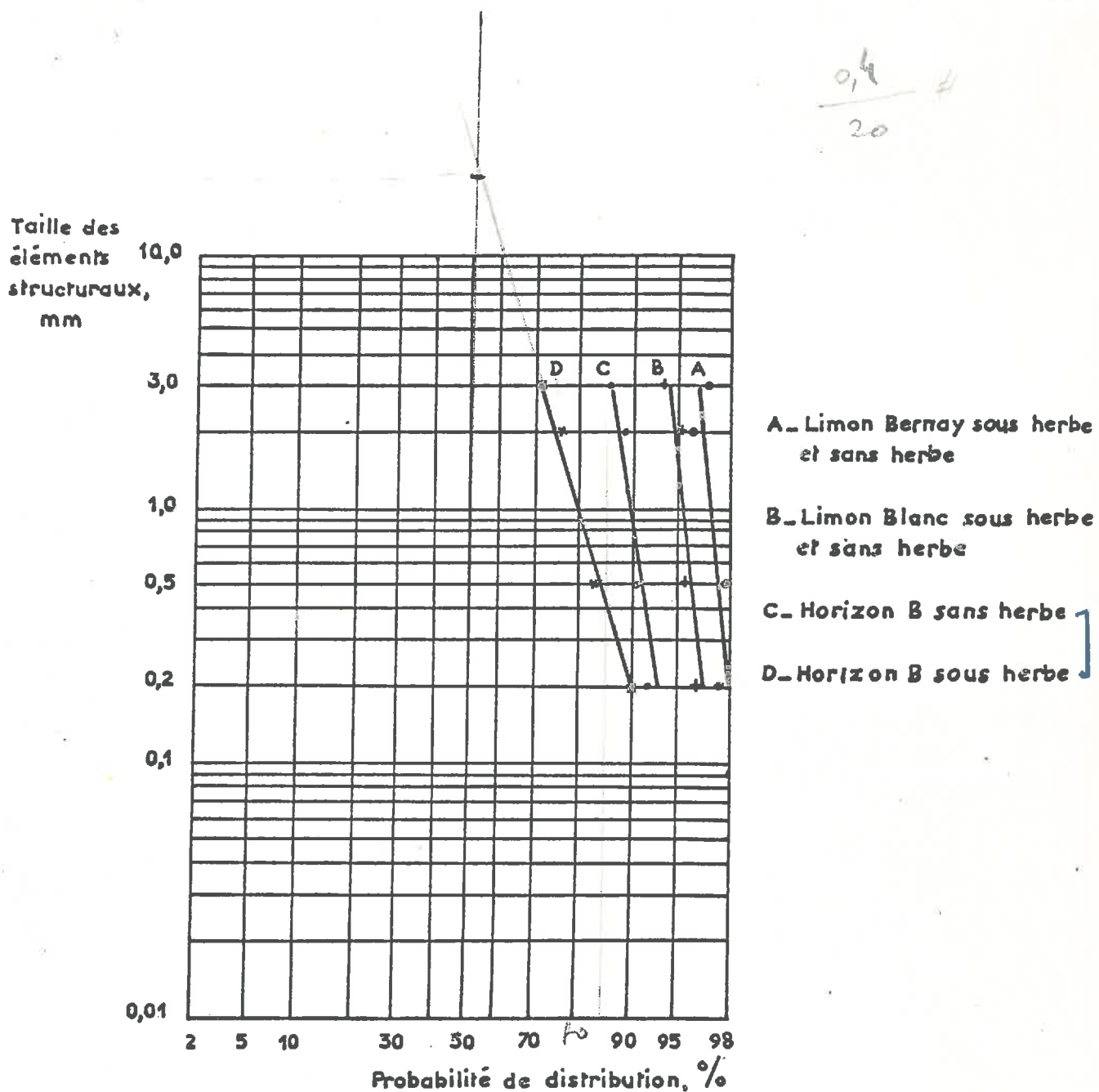


Fig.2. Distribution log-normale des éléments structuraux provenant des sols riches en limon (A et B) ou en argile (C et D), à structure continue au départ, après 6 à 9 mois sous herbe (*Lolium italicum*) ou sans herbe

Sur la figure 2 on voit que les droites représentant le limon Bernay et limon Blanc sous herbe et sans herbe se superposent et qu'avec celle de l'horizon B sans herbe, elles indiquent toute la persistance d'une structure continue au bout de l'expérience (la taille correspondant à 50 % de leur distribution reste infiniment plus grand que 10 mm sur le graphique). La droite représentant l'Horizon B est caractérisée par une pente plus raide qui donne une log moyenne géométrique un peu plus grande que 10 mm, ce qui veut dire qu'à l'issue de l'essai il ne reste qu'environ 50 % d'éléments plus gros que 10 mm, autrement dit près de 50 % de la structure continue initiale a été fissuré en éléments plus petits. Le log de l'écart type de cette distribution est de $\pm 0,05$. Enfin, dans tous les cas les distributions sont log-normales.

B - ACTION DU RESEAU RACINAIRE SUR UN MILIEU MONOPARTICULAIRE :

En serre et après 8 mois sous Ray-grass d'Italie (semé à raison de $120/50 \text{ cm}^2$) la structure monoparticulaire initiale reste inchangée. A part les gaines de sable assez cohérentes formées autour des racines, il n'y avait pas de formation d'agglomérats : les quelques mottes que nous avons pu isoler se délitent instantanément au contact de l'alcool. Nous avons remarqué en outre que la croissance du Ray-grass d'Italie sur le sable fin n'a jamais été satisfaisante malgré les mesures que nous avons prises pour la faciliter. Il en résulte que la quantité de racines obtenues est très faible. Dans ces conditions l'absence d'une structuration peut résulter de deux sortes de considérations liées aux propriétés du milieu étudié : d'une part ce dernier n'est pas de par sa texture, comme nous le verrons plus loin, susceptible de réagir fortement à l'action des racines ; d'autre part il ne semble pas favoriser le développement du système racinaire lui-même. Ce défaut semble être lié soit aux propriétés physico-chimiques, c'est-à-dire au rapport air-eau, soit à la géométrie même des pores du milieu. BAYER (1956) a rapporté que les travaux de DOIARENKO indiquent qu'une structure composée de particules $< 0,5 \text{ mm}$ donne une porosité totale de 47,5 % dont 2,7 % seulement est non-capillaire c'est-à-dire capable de permettre l'existence et la libre circulation de l'air dans le milieu. Le reste étant des pores capillaires qui s'engorgent d'eau et restent engorgés d'eau quand l'apport d'eau est régulier et adéquat. On conçoit aisément qu'un tel environnement soit asphyxiant pour la plante. D'autre part la majorité des pores dans un tel milieu étant de petites tailles, et le milieu étant rigide on conçoit aussi que de telles conditions ne favorisent pas le passage des racines qui ont apparemment un diamètre moyen plus gros que celui des pores en question.

C - ACTION DU SYSTEME RACINAIRE SUR LE MILIEU FRAGMENTAIRE

FIN

1 - MILIEU FRAGMENTAIRE : HORIZON B DE VERSAILLES TAMISE A 0,5 mm EN VASE DE VEGETATION

Dans cet essai, les pots en plastique de 18,5 cm de diamètre et 25 cm de profondeur sont remplis à sec avec de l'Horizon B de façon qu'il n'y ait pas de tassement exagéré. Certains des pots ainsi remplis sont semés de Ray-grass d'Italie à raison de 120 mg/50 cm² et un nombre correspondant de pots sans herbe sert de témoins. En ouvrant, après séchage complet à l'air, des couples témoin-Ray-grass au bout des intervalles de temps qui s'échelonnaient entre 2 et 13 mois (du 15/3/66 au 24/4/67), nous avons pu étudier l'évolution, sur 3 profondeurs (0-6 cm, 6 - 12,5 cm et 12,5 - 20 cm), de ce milieu fragmentaire fin en fonction du temps et de l'influence des racines. Les résultats moyens obtenus à l'issue du test à l'alcool, des mesures de longueurs de racines, de densité apparente ainsi que de la stabilité structurale sont rapportés dans le tableau 10.

On constate en premier lieu que la structure initiale a subi un changement important qui se traduit par la prise en masse, aussi bien dans les pots témoins que dans ceux sous Ray-grass, des particules plus petites que 0,5 mm en éléments structuraux de plus grandes dimensions. On observe en outre que ce changement n'entraîne aucune variation dans la densité apparente des témoins alors qu'elle a subi une légère baisse dans les pots sous herbe. On peut remarquer enfin que la stabilité structurale des témoins aussi bien que celle des pots sous Ray-grass croît légèrement avec le temps mais que celle des pots sous Ray-grass reste toujours sensiblement supérieure à l'autre.

En ce qui concerne le phénomène de prise en masse dans les pots témoins et sous herbe, il est à noter toutefois que la distribution par tailles des éléments structuraux plus grands que 0,5 mm reste très différente dans les 2 cas. Ainsi peut-on voir dans le tableau 10 que dans les témoins la taille prépondérante de ces éléments se situe dans la catégorie 0,5 - 2,0 mm tandis que celle dans les pots sous herbe est en général au-dessus de 3 mm. Ceci suggère que les processus qui s'opèrent dans les 2 cas ne sont pas les mêmes. On peut concevoir que ceux qui interviennent dans le premier cas relèvent de la texture qui confère au milieu une certaine capacité d'autoagrégation, tandis que ceux qui sont responsables dans le deuxième cas sont liés non seulement à la texture mais aussi au système racinaire du Ray-grass.

En effet, un examen rapide des taux d'éléments structuraux (surtout au niveau de la taille > 3 mm) obtenue à l'issue du test à l'alcool (tableau 10) montre que leur évolution est totalement différente dans les 2 cas.

Interaction entre les racines du Ray-Grass d'Italie et la structure fragmentaire
fine d'une terre riche en argile (Horizon B) $\log S < 0,5 \text{ mm}$

Date	Designation des pots	Taille des éléments structuraux (mm)						Rendement cumulés g/270cm ²	L _s ³ cm/cm ³	Densité apparente	Indice S*
		< 0,2	0,2-0,5	0,5-2,0	2,0-3,0	> 3,0	Distribution (%) à l'issue du test à l'alcool (moyenne des 3 profondeurs étudiées)				
25/5/66	2 m pots	1	38,4	19,7	21,2	2,8	17,8	36,2	25	1,50	13,4
		2	33,5	17,8	12,8	2,1	33,7			1,48	12,2
14/4/67	13 m pots	11	30,6	18,4	21,1	4,0	25,8	116,1	27	1,52	27,7
		12	25,9	12,4	11,3	4,0	46,2			1,50	23,5
1/8/66	5 m pots	3	43,5	20,8	27,7	3,7	4,2	123,9	29	1,52	17,4
		4	23,6	8,8	5,5	2,4	59,6			1,50	13,4
14/4/67	13 m pots	7	27,5	16,4	24,4	3,1	28,4	132,4	31	1,54	28,0
		8	18,1	8,2	9,8	3,6	60,2			1,50	20,3
16/2/67	9 m pots	9	15,4	7,5	15,3	4,4	57,3	167,1	40	1,55	25,5
		10	16,1	7,3	7,0	2,8	66,6			1,48	19,6
3/11/66	6 m pots	5	29,5	16,8	39,7	5,1	8,9	180,4	42	1,55	22,2
		6	30,1	12,9	9,0	2,2	45,7			1,52	20,5
Moyenne pots impairs (témoins)			30,8	16,6	24,9	3,8	23,7				
Moyenne pots pairs (Ray-grass)			24,5	11,2	9,2	2,8	52,0				

* Nous exprimerons la stabilité par l'indice S et non, comme il est courant de le faire par $\log S$. Cette attitude est justifiée chaque fois que l'on veut comparer de petites variations de stabilité dues à l'application de traitements à un même matériau.

Si donc on représente sur un graphique les taux moyens de chaque catégorie d'éléments structuraux (tableau 10) provenant de tous les pots sous herbe (moyenne des N° pairs) d'une part et de tous les pots sans herbe (moyenne des N° impairs) d'autre part, on peut voir nettement l'allure que prend l'évolution de la structure fragmentaire fine, sous herbe ou sans herbe (Figure 3). Elle est caractérisée, dans le premier cas, par une baisse progressive du pourcentage des éléments plus petits que 0,5 mm et une augmentation correspondante en éléments plus grands que 3 mm représentée par un pic unique et considérable sur la courbe de l'évolution sous herbe dans la figure. Dans le 2ème cas, il y a aussi formation d'éléments de plus grandes dimensions à partir des particules $< 0,5$ mm, mais elle se répartit aussi bien en éléments > 3 mm qu'en éléments de 0,5 à 2 mm et se traduit par 2 pics dans la figure. Nous verrons plus loin que la distribution des éléments structuraux dans le 2ème cas a un caractère très aléatoire qui dépend surtout du régime hydrique du milieu et par extension, des saisons. A noter enfin que le taux des éléments de 2 - 3 mm est toujours petit. Il est sensiblement le même et reste pratiquement constant dans les 2 cas. SKRIBNER (1961) a rapporté à peu près les mêmes résultats après une étude qu'il a faite dans le Sud-Est de l'U.R.S.S. sur l'évolution in situ de quelques sols sous l'influence d'une végétation herbacée perenne. Il a aussi avancé des hypothèses, pour expliquer la présence prédominante des catégories d'éléments structuraux > 3 mm et de 0,5 - 2,0 mm aussi bien que le faible pourcentage des éléments de 2,0 - 3,0 mm. On peut noter de plus que les distributions des éléments structuraux provenant de l'évolution sous herbe et sans herbe sont log-normales (Fig. 4) et qu'elles sont caractérisées, respectivement, par les log-moyenne géométrique des diamètres 3,0 mm et 0,55 mm et les écarts-types O_g 0,01 et 0,12. La valeur 10 fois plus grande de l'écart-type de la distribution dans les témoins par rapport à celle dans les pots sous herbe suggère le caractère aléatoire de l'évolution de la structure fragmentaire fine sans herbe. Elle est cependant marquée par la moitié de ses éléments initialement $< 0,5$ mm se transformant en éléments plus grands que cette taille dont la log-moyenne géométrique est 0,55 mm. Comme il n'y a que des interactions entre le milieu et son régime hydrique dans les témoins, cette transformation ne peut que provenir de l'autoagrégation du milieu. Remarquons que ce n'est pas un phénomène négligeable puisqu'il a entraîné la formation de 50 % d'éléments $> 0,5$ mm au bout de 13 mois.

On se demande d'autre part quels sont les facteurs qui déterminent l'existence des éléments structuraux > 3 mm dans les pots sous herbe. L'examen de ces formations en relation avec la longueur spécifique L_g du réseau racinaire nous éclaire sur cette question.

La comparaison des valeurs L_g mesurées (tableau 10) avec les valeurs L_g calculées (tableau 5) montre que la taille des éléments structuraux formés au sein de l'Horizon B agrégé fin pendant la période étudiée doit se situer entre 0,30 cm et 1 cm, ce qui est effectivement le

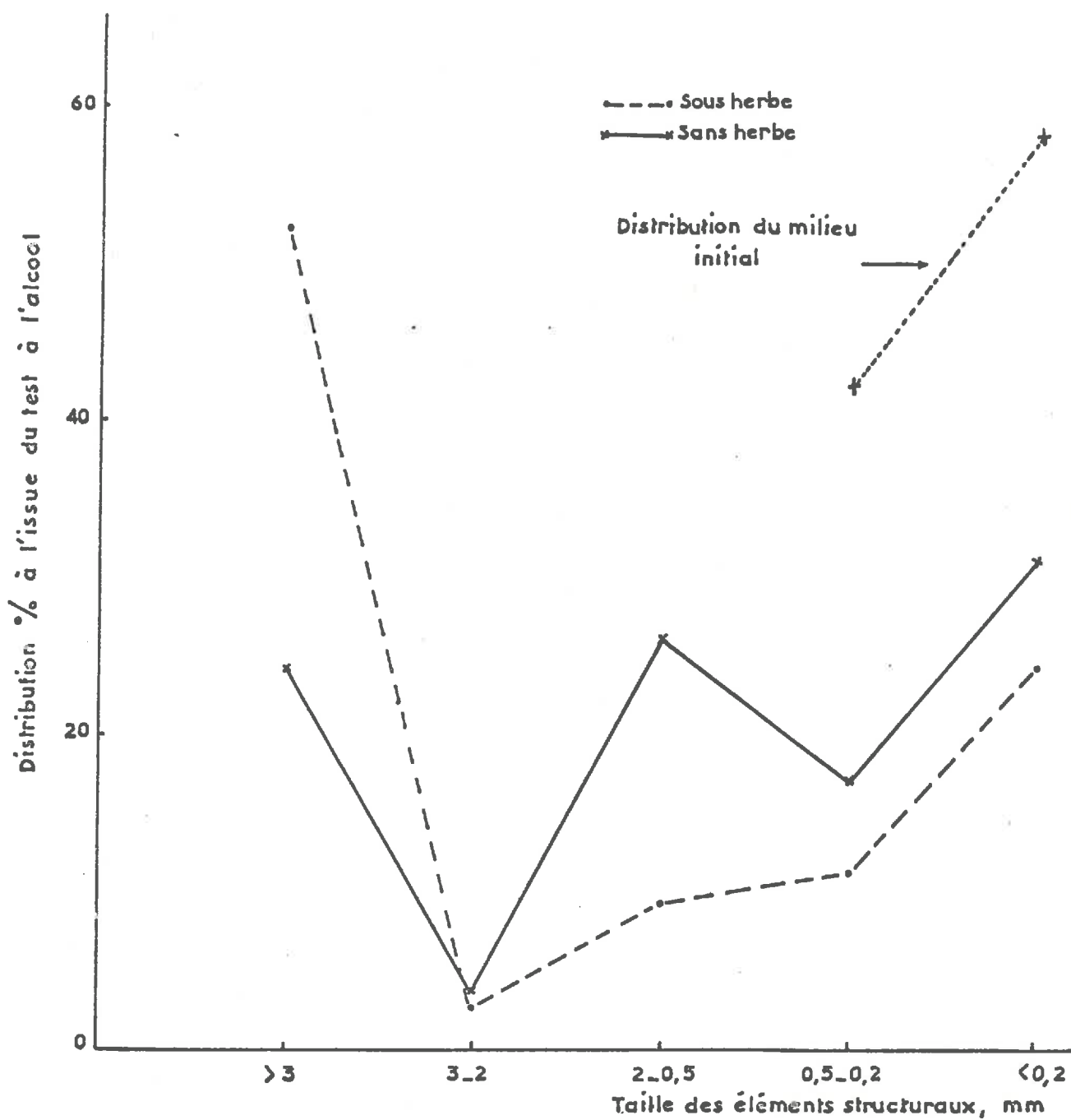


Fig. 3. Evolution globale d'un milieu fragmentaire fin (Horizon B tamisé à 0,5 mm) sous herbe (*Lolium italicum*) et sans herbe au bout de 13 mois

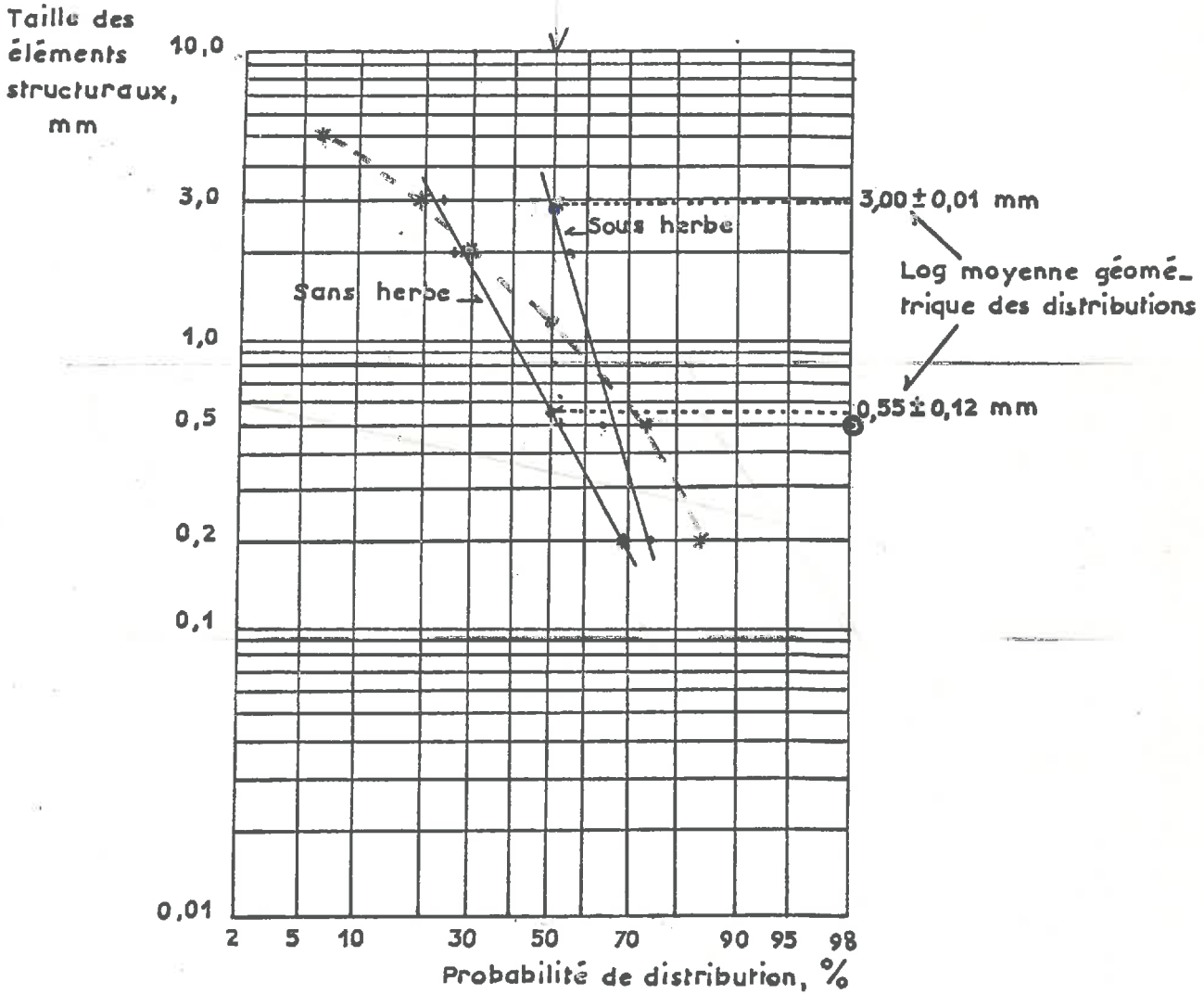


Fig. 4. Distributions log-normales, au bout de 13 mois ^{*de 13 L₅=27*} sous herbe (*Lolium italicum*) ou sans herbe (Témoin), des éléments structuraux d'un sol riche en argile (Horizon B de Versailles) à structure fragmentaire fine au départ *< 0,5 mm*

* H₀ de log géométrique au départ $L_5 = 22$, durée -

cf 10/25

cas d'après les résultats obtenus du test à l'alcool. La maille radiculaire est donc suffisamment serrée pour produire des unités supérieures à 3 mm, mais pas assez pour former des unités plus petites. Ce qui explique l'absence quasi totale des unités de 2 à 3 mm et 0,5 à 2 mm si l'on ne compte pas le taux formé par autoagrégation au niveau de cette dernière catégorie.

La conception de la longueur spécifique est d'autre part utile comme indication du degré de transformation d'une structure. Comme nous avons ici une structure agrégée fine constituée par des particules initialement inférieures à 0,5 mm, et comme les unités 0,5 à 2 mm et 2 - 3 mm ne sont pas directement formées par le réseau radiculaire, nous pouvons considérer le taux des éléments >3 mm comme un indice du degré d'agrégation du milieu considéré. On voit (tableau 1) que cet indice varie non pas en fonction du temps, mais des valeurs L_g . Les degrés d'agrégation indiqués sont obtenus en divisant le poids moyen des éléments structuraux >3 mm des 3 profondeurs étudiées par le poids total (15 g) de chaque prise d'essai. Remarquons que le degré d'agrégation en éléments >3 mm commence à décroître à partir de $L_g = 40 \text{ cm/cm}^3$ ce qui prouve une fois de plus l'influence déterminante de la densité des racines sur la taille des éléments structuraux formés, puisqu'à ce niveau du L_g la taille prépondérante est théoriquement entre 2,5 et 2,7 mm et non plus >3 mm. Il apparaît donc que l'intensité d'agrégation et la taille dominante des éléments structuraux dépend principalement de la qualité effective des racines présente dans le sol à un moment donné.

- Tableau 11 -

Relation entre la longueur spécifique L_g , la taille des éléments structuraux et le degré d'agrégation d'une structure fragmentaire fine (Horizon B).

Moyenne des 3 profondeurs étudiées			
Période sous Ray-grass (Mois)	L_g (cm/cm^3)	Taille théo- rique des élé- ments structuraux (mm)	Degré d'agrégation (%) $\phi > 3\text{mm}$
2	25	3,3 - 5,0	33,7
13	27	3,3	42,6
4	29	3,0 - 3,3	59,6
13	31	3,0 - 3,3	60,2
11	40	2,7 - 3,0	66,6
7,5	42	2,5 - 2,7	45,7

Si on représente le degré d'agrégation en fonction de L_s sur un graphique (Figure 5) on voit qu'il croît rapidement pour arriver à un palier aux environs de $L_s = 40$ qui, comme le tableau 5 le montre, est la longueur spécifique au-delà de laquelle les tailles des éléments formés tendent vers les valeurs plus petites que 3 mm. C'est le cas correspondant à la $L_s = 42$ dans le tableau 11 et sur la figure 5. Sur le graphique nous avons indiqué les tailles correspondantes aux valeurs mesurées de L_s pour souligner leur relation inverse.

Comme il est généralement admis que la taille des éléments structuraux dans les sols sous prairie varie entre 3 et 10 mm les résultats que nous avons obtenus portent à croire qu'effectivement elle évolue entre ces deux limites suivant un cycle qui est fonction des dimensions de la maille racinaire, donc des diverses stades de développement de la prairie. Dans ces conditions, les valeurs $L_s \leq 3$ et ≤ 40 détermineraient respectivement les tailles supérieure (10 mm) et inférieure (3 mm) de ce cycle. Elles correspondraient au début de l'établissement et à la période de pleine croissance d'une prairie annuelle ou au commencement et pendant le développement maximal d'une génération de racines s'il s'agit d'une prairie perenne. Voyons maintenant ce qui se passe pendant l'évolution d'une structure fragmentaire grossière.

2 - MILIEU FRAGMENTAIRE GROSSIER ; HORIZON B DE 5 A 10 mm

Nous venons de formuler une hypothèse d'un cycle d'évolution de la taille des éléments structuraux formés sous herbe et à partir d'un milieu fragmenté fin. Considérons maintenant les facteurs qui entrent en jeu dans l'évolution d'une structure fragmentaire grossière. Pour cela nous avons utilisé le même dispositif expérimental que précédemment mais avec cette fois de l'Horizon B constitué, non pas d'éléments $< 0,5$ mm au départ, mais d'éléments grossiers de 5 à 10 mm.

Les résultats (tableau 12) des différentes mesures effectuées sur des échantillons prélevés au bout des périodes de temps qui s'étendaient de 2 à 14 mois (entre les 27/8/66 et 5/12/67) montre que l'évolution de la structure grossière initiale sous herbe et sans herbe est influencée par des facteurs totalement différents. Elle se traduit sur la figure 6 par des courbes ayant chacune un maximum et un minimum. On remarque tout d'abord que jusqu'à une période de 6 mois la dégradation des éléments 5 - 10 mm originaux est considérablement moins intense sous herbe que sans herbe. Autrement dit il apparaît que pendant cette période, dans les pots sous herbe sa présence joue plutôt un rôle protecteur. A partir de 6 mois et c'est là que se trouve le maximum ou le minimum selon le cas sur les 2 courbes, on observe une remontée de la courbe sans herbe qui continue jusqu'à un nouveau niveau maximum pour décroître ensuite tandis que sur la courbe sous herbe l'affinement devient de plus en plus marqué pour

* / éléments ϕ 5 mm (taille en mode à classes)

éléments ϕ 3 mm

Degré d'agrégation %

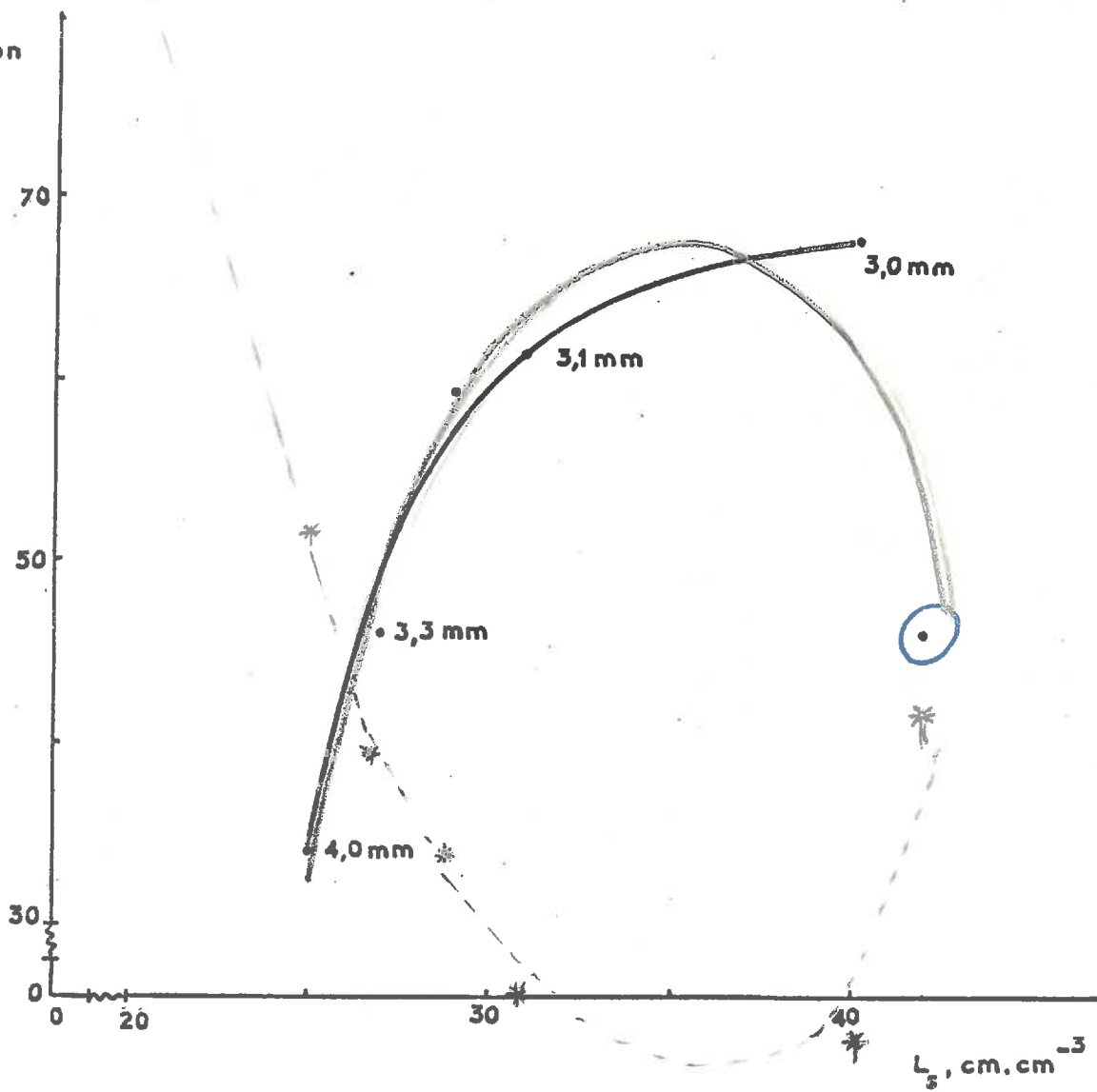


Fig.5. Relation entre le degré d'agrégation d'une structure fragmentaire fine (Horizon B de Versailles) et la longueur spécifique L_s du réseau racinaire du Lolium italicum

- Tableau 12 -

Evolution d'une structure fragmentaire grossière (Horizon B constitué d'éléments structuraux de 5 à 10 mm au départ) sous herbe (Lolium italicum) et sans herbe (témoin)

départ 24/8/66

Date	Designation des pots	Distribution (%) par tailles (mm) des éléments structuraux obtenus à l'issue du test à l'alcool (moyenne des 3 profondeurs étudiées)					Rendements cumulés g/270cm ³	L _g cm/cm ³	Densité apparente		
		< 0,2	0,2-0,5	0,5-2,0	2,0-3,0	3,0-5,0				> 5,0	
4/1/66	2 weeks	13 14	8,8 7,0	3,6 2,4	18,8 14,3	8,3 6,5	24,6 24,4	35,7 44,3	24,9	12.	1,54 1,46
21/3/67	7 weeks	17 18	12,8 10,3	7,0 5,3	37,8 27,4	13,8 11,1	18,7 24,9	10,1 51,2	42,0	10	1,55 1,50
16/6/67	9 weeks	15 16	12,2 14,8	5,8 4,1	28,2 27,2	11,9 9,7	23,0 26,6	18,9 38,0	55,0	13	1,52 1,43
30/8/67	11 weeks	21 22	12,0 14,0	5,6 10,6	27,0 41,6	12,6 10,6	22,7 12,6	20,3 6,3	77,3	18	1,50 1,44
5/12/67	15 weeks	19 20	16,0 17,6	6,5 11,6	30,6 41,5	14,0 9,5	23,6 13,6	12,4 6,1	94,9	22	1,51 1,44

g
20 > g

0

0.2

0.5

2

3

5

99.9

82.3

76.7

29.2

19.7

6.1

results
page 28.

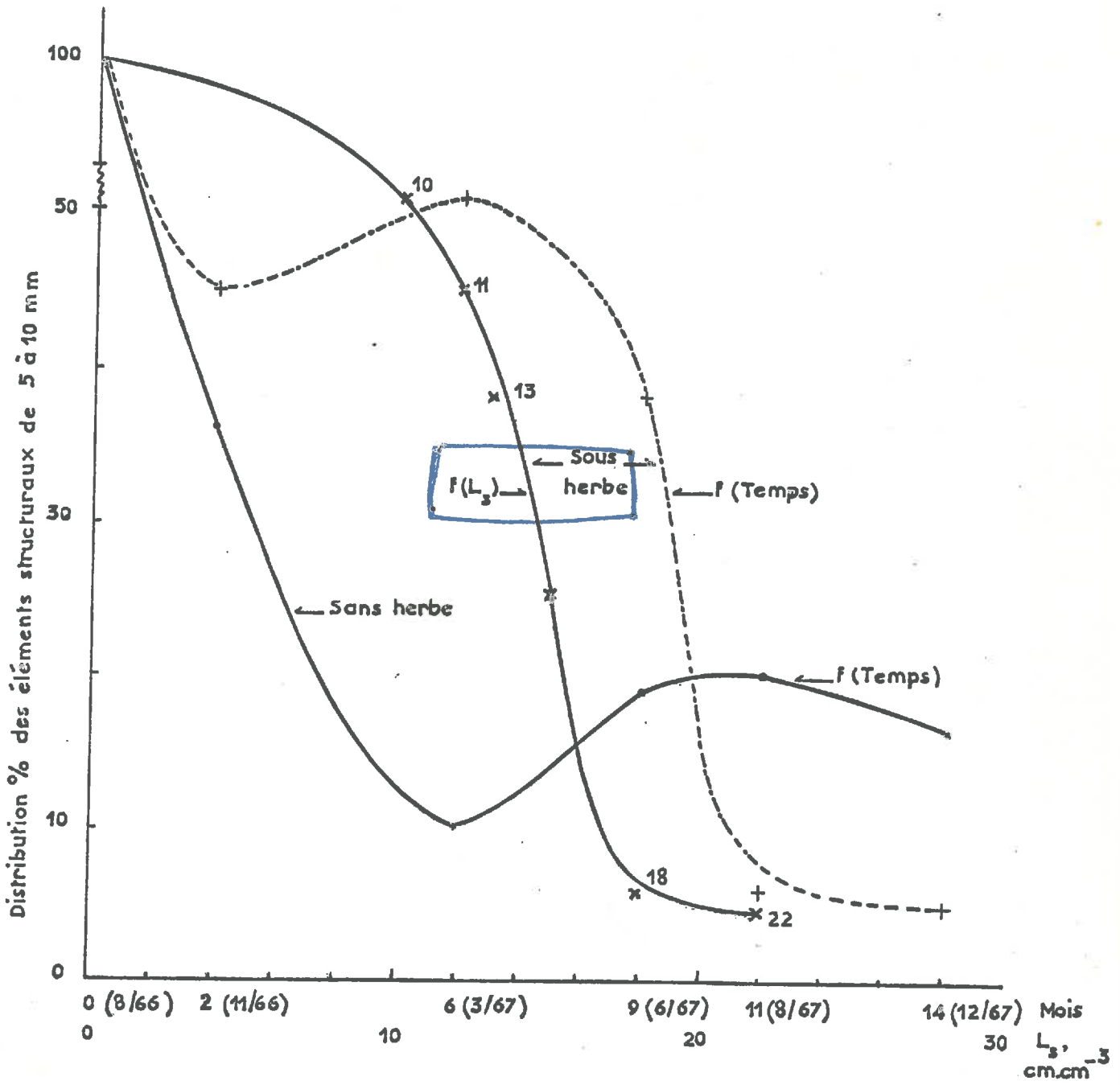


Fig. 6. Evolution d'une structure fragmentaire grossière (Horizon B de Versailles) ayant des éléments de 5 à 10 mm au départ) sous herbe (*Lolium italicum*) et sans herbe

s'aboutir à un taux minimum d'éléments structuraux de 5 à 10 mm.

Ce comportement entre les maximum et minimum des courbes sous herbe et sans herbe s'explique dans le 1er cas par l'action du réseau racinaire et dans le 2ème par la reprise en masse sous l'influence des variations du régime hydrique, des éléments fins provenant de la 1ère phase de dégradation. En effet la dégradation croissante dans le 1er cas est accompagnée des valeurs croissantes de L_g de 10 à 22. Or, le tableau 5 des L_g théoriques montre que la division des éléments entre 5 et 10 mm par le réseau radiculaire s'effectue dès qu'on a des valeurs L_g entre 3 et 12, et c'est précisément à partir de $L_g = 10$ que l'action du système racinaire devient efficace, entraînant ainsi la dégradation accentuée et la baisse de densité apparente qu'on voit sur la courbe et le tableau 12, respectivement. L'intensité de la dégradation continue d'ailleurs à être en bonne relation avec la longueur spécifique du réseau racinaire jusqu'à $L_g = 22$ où elle devient maximum. Comme le tableau 12 l'indique, c'est à ce niveau que la quasi-totalité des éléments de 5 à 10 mm au départ est transformée en éléments plus petits. D'après le tableau 5 la taille moyenne dominante de ces derniers devrait être entre 3 et 5 mm, ce qui est vrai pour la plupart des cas à l'exception de ceux correspondant aux L_g 18 et 22, où elle se situe plutôt entre 0,5 et 2 mm. Comme nous verrons plus loin que cette taille représente le résultat global de la dégradation sans herbe nous avons donc là une combinaison d'effets dus à cette dégradation naturelle et à l'action propre du réseau racinaire qui conduit éventuellement à la formation d'une structure fragmentaire fine à partir d'un état structural grossier.

L'examen de l'évolution de cet état structural dans les pots témoins sans herbe montre d'autre part qu'elle s'effectue par une dégradation accélérée puis une reprise en masse des éléments dégradés suivie d'une autre dégradation. Si on étudie cette évolution en fonction des saisons on remarque sur la figure 6 que la première phase a eu lieu d'été au printemps, la 2ème phase du printemps en été et la 3ème d'été en automne, suivant un cycle alternatif de dégradation et de recalcinescence. On peut expliquer ce processus en considérant l'état hydrique du milieu pendant ce cycle. Apparemment la dégradation est due à un régime hydrique permanent car pendant l'automne et l'hiver on conçoit que les changements de l'état hydrique du milieu soient négligeables étant donnée l'évaporation réduite pendant ces saisons. Celle-ci devient considérable pendant la période printemps-été, surtout en été étant donné le manque de dispositif de régulation de température dans la serre, entraînant ainsi des variations importantes du régime hydrique et provoquant ainsi des alternances d'humectation et de dessiccation du milieu qui sont vraisemblablement à l'origine de la reprise en masse observée. Il est probable que c'est le mécanisme principal qui empêche la structure de l'Horizon B de se dégrader entièrement et qui au contraire lui permet de se reconstituer voire d'augmenter le taux de ses éléments > 3 mm par paliers successifs à la

suite de chaque cycle de dégradation - reprise en masse pour réatteindre selon la saison un niveau d'autoagrégation donné. Il y a donc raison de croire que ce niveau représente le résultat des alternances de dégradations et de reprises en masse au moment du prélèvement et qu'il n'a donc rien de caractéristique. Remarquons que si le taux des éléments 5 - 10 mm dans les pots sans herbe varie en fonction du temps et des saisons, il dépend plutôt des valeurs L_g (figure 6, courbe $f(L_g)$) que du temps (courbe $f(\text{temps})$) dans le cas des pots sous herbe.

Il est en outre intéressant de noter qu'en ce qui concerne la distribution par tailles des éléments structuraux pendant l'évolution sans herbe de la structure fragmentaire, fine ou grossière, elle est toujours caractérisée par la prédominance de la catégorie 0,5 - 2,0 mm. C'est en effet à ce niveau là qu'aboutissent éventuellement les éléments provenant des processus d'autoagrégation ou de dégradation selon qu'il s'agit d'une structure initiale fine ou grossière. C'est aussi essentiellement à ce niveau que s'effectue le phénomène de reprise en masse.

Tout comme la taille 3 - 10 mm qui domine dans l'Horizon B sous herbe, la taille 0,5 - 2,0 peut donc être considérée comme définissant la structure de l'Horizon B sans herbe.

3 - INTERACTION GLOBALE ENTRE LE MILIEU FRAGMENTAIRE ET LE RESEAU RACINAIRE

En portant les variations des taux d'éléments plus grands que 3 mm, provenant de l'évolution sous herbe des structures fragmentaires fine et grossière, en fonction des variations correspondantes du L_g nous obtenons la figure 7 qui est en quelque sorte la représentation par juxtaposition de la courbe de la figure 5 et de la courbe $f(L_g)$ de la figure 6. Les branches de gauche et de droite de la figure 7 représentent, respectivement, l'affinement de la structure grossière et l'agrégation de la structure fine sous l'influence du Ray-grass. La courbe générale qui en résulte passe par un taux minimum d'éléments plus grands que 3 mm qui correspond à une $L_g = 20$ et à un taux maximum d'éléments plus petits que 2 mm en général, et de 0,5 à 2 mm en particulier. C'est à ce niveau que se produit une situation inverse c'est-à-dire que le taux d'éléments ≥ 3 mm commence à recroître à partir de $L_g = 25$, entraînant un abaissement correspondant du taux d'éléments 0,5 à 2 mm pour atteindre de nouveau un maximum vers $L_g = 40$. Ceci implique que les longueurs spécifiques du réseau racinaire sont telles qu'elles provoquent, directement et indirectement, une fragmentation progressive d'éléments ≥ 3 mm du milieu grossier en éléments de 0,5 à 2 mm pour les reconstituer ensuite en éléments ≥ 3 mm.

% de la masse $\phi > 5mm$

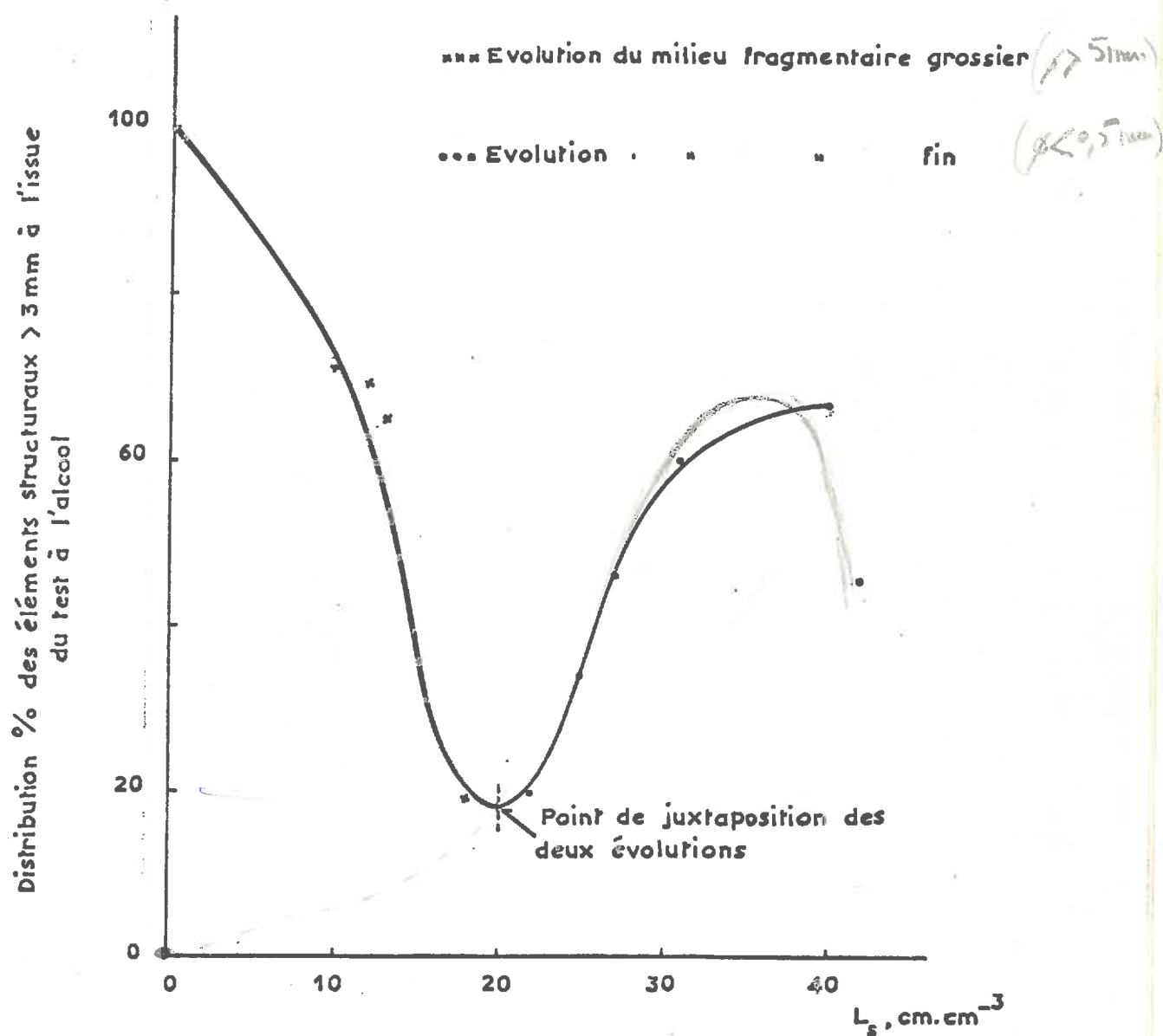


Fig. 7. Cycle hypothétique d'évolution d'un sol riche en argile (Horizon B de Versailles), à structure grossière au départ, en fonction de la longueur spécifique L_s du réseau racinaire du Lolium italicum

Il découle aussi de la figure 7 que dans un milieu fragmentaire fin, ces derniers se forment aussi principalement à partir d'éléments de 0,5 à 2 mm fournis par autoagrégation de la structure fine initiale. Dans les 2 cas on voit bien que la formation des éléments > 3 mm par le réseau racinaire n'est possible que dans la mesure où le milieu se prête à l'autoagrégation et à la fissuration donc au gonflement et au retrait suivant le régime hydrique.

Comme dans le milieu naturel on se trouve la plupart du temps en présence des terres à structure plus ou moins grossière la figure 7 représente donc le processus global de la formation et de l'évolution de cette structure là où les sols sont aptes à la granulation. Le cycle complet d'évolution ainsi défini aurait duré à peu près 2 ans. On peut anticiper qu'à l'issue de ce cycle on se trouve en face d'une alternance. S'il s'agit d'une prairie annuelle qui n'est pas renouvelée le taux des éléments > 3 mm diminuerait au fur et à mesure du temps suivant la courbe caractéristique de l'évolution sans herbe d'une structure fragmentaire grossière (Figure 6). S'il s'agit d'une prairie perenne et si les processus de stabilisation n'interviennent pas encore d'une façon considérable, on observerait d'abord la formation d'éléments de 5 à 10 mm tant que les valeurs L_g de la nouvelle génération de racines n'ont pas atteint les environs de 12' (Tableau 5). Une fois cette valeur atteinte, les éléments 5 - 10 mm nouvellement formés ainsi que ceux de la catégorie > 3 mm formés à l'issue du 1er cycle seraient soumis à une nouvelle évolution et qui recommencerait à partir de la partie gauche de la courbe sur la figure 7 pour aboutir à l'extrême droite de la courbe à un niveau plus élevé ou à un niveau semblable suivant qu'il y a ou qu'il n'y a pas eu d'intervention des processus de stabilisation.

Si on adoptait le schéma que nous venons de décrire et connaissant les divers stades de développement d'une prairie on pourrait prédire à tout moment la taille prépondérante des éléments structuraux formés.

Enfin, nous avons remarqué que la taille 0,5 - 2 mm semble être caractéristique d'une structure d'Horizon B sans herbe il apparaît aussi que c'est à partir de cette taille que s'effectue la transition entre des périodes de dégradation et de reconstitution représentées par la figure 7, autrement dit l'agrégation proprement dite d'une structure fragmentaire fine sous herbe. D'après BAYER (1935) c'est précisément ce qui s'est passé dans la formation des éléments structuraux qui constituent une structure granulaire. Après avoir étudié l'arrangement des particules dans un grand nombre de sols, il a observé que cette structure est composée essentiellement d'éléments structuraux cubiques ou sphériques, qu'il appelait unités secondaires. Ces dernières, d'une taille relativement grande, sont elles mêmes constituées d'unités secondaires plus petites qui sont formées à partir des particules primaires du sol. Les résultats de nos expériences semblent

confirmer qu'il en est ainsi et on peut admettre que les éléments structuraux de 0,5 - 2 mm, correspondant aux petites unités secondaires de BAVER, forment la microstructure inhérente du milieu et que l'agrégation de ces derniers pour donner des éléments plus grands que 3 mm (unités secondaires cubiques ou sphériques relativement larges observées par BAVER) représente l'action propre du réseau racinaire. Examinons maintenant l'influence des prairies dans le milieu naturel sur la structure des sols ayant des textures différentes pour déterminer dans quelle mesure les résultats obtenus des essais en vases de végétation pourraient être généralisés.

4 - ETUDE DE L'ETAT STRUCTURAL DES SOLS DANS LE MILIEU NATUREL SOUS L'ACTION DES RACINES DE GRAMINEES FOURRAGERES

a/ - Sols riches en limon.

Les échantillons, prélevés avec le moins de dérangement possible de la structure du sol en place dans des prairies temporaires établies à la Station d'Amélioration des Plantes fourragères de Lusignan, ont été d'abord séchés à l'air sur place, puis passés avec ménagement à travers un tamis à mailles carrées de 10 mm de façon à donner des éléments de 5 à 10 mm qui sont ensuite soumis au test à l'alcool.

Les résultats (tableau 13) montrent qu'au bout de 3 ans, les sols sous graminées fourragères (champs L et E) sont devenus plus stables (indices S plus petits, surtout dans la profondeur de 0 à 6 cm) que les sols sous cultures telles que maïs, blé et orge (champ K), mais qu'au contraire la structure dans les 2 cas n'a pratiquement pas changé. En effet, si l'on compare la structure des champs K, que l'on peut considérer comme témoin sans herbe et celle des champs L comme étant la même maïs placée sous prairie, les champs K et L ayant pratiquement les mêmes textures, on voit que leur densité apparente et leur taux d'éléments structuraux (5 - 10 mm) à l'issue du test à l'alcool restent sensiblement les mêmes. La mesure de la longueur spécifique du réseau racinaire dans les champs L a donné d'autre part des valeurs de l'ordre de 70 cm/cm³ ce qui veut dire que s'il y avait interaction entre le milieu et le réseau racinaire, la majorité des éléments structuraux aurait une taille moyenne de 2 mm (tableau 5) et non 5 à 10 mm, comme l'a révélé le test à l'alcool. L'action des graminées fourragères est donc négligeable sinon pratiquement nulle sur les sols riches en limon, ce qui est en accord avec les résultats obtenus en vases de végétation et avec ceux de BASKARAN et CHAKRABARTY (1965) qui ont rapporté que la présence des 4 espèces de graminées qu'ils ont établies pendant 2 ans sur un sol contenant 12,4 % d'argile et 67,3 % de limon et de sable fin n'a pas modifié de façon significative la structure initiale de ce milieu.

- Tableau 13 -

Action des graminées sur les sols pauvres en argile dans le milieu naturel.

Profondeur étudiée (cm)	K 3 ans cultures annuelles		L 3 ans fétuque + trèfle		E 3 ans Dactyle	
	Densité	Indice S	Densité	Indice S	Densité	Indice S
0 - 6	1,71	3,10	1,63	1,18	1,70	1,36
6 - 12	1,72	2,70	1,71	2,07	1,75	1,53
12 - 24	1,71	2,28	1,66	2,04	1,73	1,44
0 - 24	1,71	2,69	1,66	1,76	1,72	1,44
Argile %	13,4		13,4		16,5	
Limon %	69,6		70,0		66,5	
% éléments structuraux 5 - 10 mm	97,0		97,3		97,0	

b/ - Sols argileux (Horizon B de Versailles dans les cases lysimétriques).

A l'encontre des sols riches en limon, et tout comme dans le cas de l'Horizon B en vases de végétation, l'Horizon B en place des cases lysimétriques au C.N.R.A. à Versailles a donné une interaction positive avec une graminée fourragère. Le tableau 14 montre que cette interaction se traduit dans la case sous herbe (case 18) vis-à-vis de la case témoin (case 17) par une agrégation accrue des éléments < 3 mm, et surtout des éléments de 0,5 à 2 mm, en éléments structuraux plus grands que 3 mm.

On ne connaît pas l'état structural initial de ce milieu, mais c'était vraisemblablement un mélange d'éléments fragmentaires fins et grossiers. Ce qui est significatif en ce qui concerne la case 17 c'est qu'au lieu de se dégrader pour donner des éléments essentiellement fins au bout de 9 ans sous jachère nue, on observe un taux d'éléments > 3 mm assez

- Tableau 14 -

Evolution de la structure d'un sol argileux (Horizon B dans les cases lysimétriques) sous prairie et en jachère nue.

Taille des unités (mm)	terrain Case 17 (9 ans en jachère)	Case 18 (4 ans sous fétu- que élevée)
	% distribution des éléments structuraux	
> 3	50,6	89,3
3 - 2	5,3	2,0
2 - 0,5	27,3	4,6
0,5 - 0,2	6,6	1,3
< 0,2	10,2	2,8

considérable de 50,6 %. C'est donc le phénomène d'autoagrégation, déjà signalé lors de la discussion des résultats des essais sur milieu fragmentaire, qui se manifeste également dans le milieu naturel. Le prélèvement des échantillons étant effectué en Octobre donc au cours du régime hydrique d'été, ce qui explique probablement le taux élevé d'autoagrégation observé.

De tout ce qui précède il apparaît que la texture du sol détermine son aptitude à former, en combinaison avec les racines du Ray-grass, une structure granulaire. Les résultats ont montré que l'interaction entre le réseau racinaire de ce dernier avec un milieu monoparticulaire (sable fin) ou riche en limon (Limon Bernay et Limon Blanc) est négligeable alors qu'au contraire elle est positive avec un milieu argileux (Horizon B de Versailles). Il en découle que la présence d'argile en quantité suffisante dans un sol soit une des conditions essentielles pour que l'action des racines se manifeste.

II - ETUDE SUR MODELES DES MECANISMES DE LA FORMATION DES ELEMENTS STRUCTURAUX SOUS PRAIRIE

Il découle des expériences précédentes que la texture du sol régit plus ou moins directement l'action des racines et que là où la texture est favorable cette action se traduit par une division ou un affinement de la structure s'il s'agit d'un sol continu ou par une agrégation d'éléments fins en unités plus grosses si le sol au départ est un milieu fragmentaire.

Il est à remarquer d'autre part que ces processus se sont manifestés d'une manière assez rapide et indépendamment de toute action notable de la matière organique comme l'ont révélé les tests de stabilité structurale. Ceci nous a amené à penser que les facteurs opérationnels dans l'étape de formation des éléments structuraux peuvent être essentiellement des phénomènes physiques.

Nous nous proposons maintenant de mettre en évidence les mécanismes qui entrent en jeu dans les processus de division et d'agrégation en opérant à partir des modèles que nous avons fabriqués au laboratoire, ce qui nous a permis par la suite de déterminer la nature de l'interaction entre le milieu et les racines.

Ainsi, à partir du limon Blanc et de l'Horizon B de Versailles, représentant respectivement des milieux pauvre et riche en argile, nous avons fabriqué soit des gâteaux compacts soit des milieux fragmentaires dans lesquels nous avons planté des fils de nylon ou de fer pour simuler le système sol-racines. Suivant les traitements que nous avons fait subir à ce système, et par comparaison avec les gâteaux ou milieux témoins (sans fils), nous avons abouti à des résultats suivants.

A - INTERACTION ENTRE LES FILS INERTES ET LE MILIEU

1. MILIEU CONTINU

a/ Limon Blanc et Horizon B

Dans cet essai nous avons étudié le comportement des gâteaux (6 cm de diamètre et 2 cm d'épaisseur) de Limon Blanc ou d'Horizon B en fonction du nombre de fils de nylon (0,32 mm de diamètre) ou de fer implantés et du nombre de cycles d'humectation et de dessiccation, une humectation suivie d'un séchage étant considérés comme formant un cycle. Les gâteaux sont fabriqués à partir d'une pâte de Limon Blanc ou d'Horizon B qui est ensuite drainée sur Büchner avant l'implantation des fils. La dessiccation se fait par séchage à l'air et la réhumectation après chaque cycle, par capillarité en posant les gâteaux sur une couche de sable fin reposant sur un plan d'eau. Les résultats du test à l'alcool sont rapportés dans le tableau 15.

Dans le cas du Limon Blanc, aucune interaction appréciable n'a pu être observée. Les gâteaux compacts au départ sont restés tels quels à l'issue du test à l'alcool effectué au bout de 2 cycles d'humectation et de dessiccation. Par contre, les gâteaux d'Horizon B se sont fissurés au bout du même nombre de cycles et l'intensité de fissuration augmente avec le nombre de fils utilisés (fig. 8).

.../...

Tableau 15

Comportement des gâteaux compacts de terre riche en limon ou en argile sous l'influence du régime hydrique et en fonction de la densité des fils inertes

*40% d'humidité deau de Buchner
rehumectation brutale à partir de sable.*

Taille des éléments structuraux (mm)	% distribution des éléments structuraux								
	Nombre de cycles d'humectation et de dessiccation								
	1 Cycle			2 Cycles					
	Limon Blanc et Horizon B			Limon Blanc			Horizon B		
	0 fils	200 fils	300 fils	0	200	300	0 fils	200	300
> 3	100	100	100	100	100	100	12,3	8,1	2,2
3-2	-	-	-	-	-	-	8,1	4,7	2,4
2-0,5	-	-	-	-	-	-	33,8	41,7	48,5
0,5-0,2	-	-	-	-	-	-	3,2	2,9	3,2
< 0,2							42,6	42,6	43,7

Il est intéressant de noter que là où la fissuration se produit, on se retrouve, comme dans les essais en vases de végétation, avec un taux prédominant des éléments de 0,5 à 2 mm. La figure 8 montre que les distributions des éléments structuraux provenant des divers traitements sont également log-normales avec la seule différence que dans ce cas chaque distribution est composée de deux droites, ce qui indique qu'elle est en fait la somme de 2 distributions log-normales. C'est sur la distribution à pente douce que les effets des divers traitements se font sentir et l'intensité de ces effets suggère qu'ils proviennent non seulement de l'action due à la présence des fils, mais probablement aussi à la manière avec laquelle les gâteaux sont préparés et les traitements appliqués. Nous avons en effet remarqué que pour un nombre de cycles donné d'humectation et de dessiccation, l'intensité de fragmentation dans les gâteaux varie avec leur humidité de préparation, les conditions de drainage

.../...

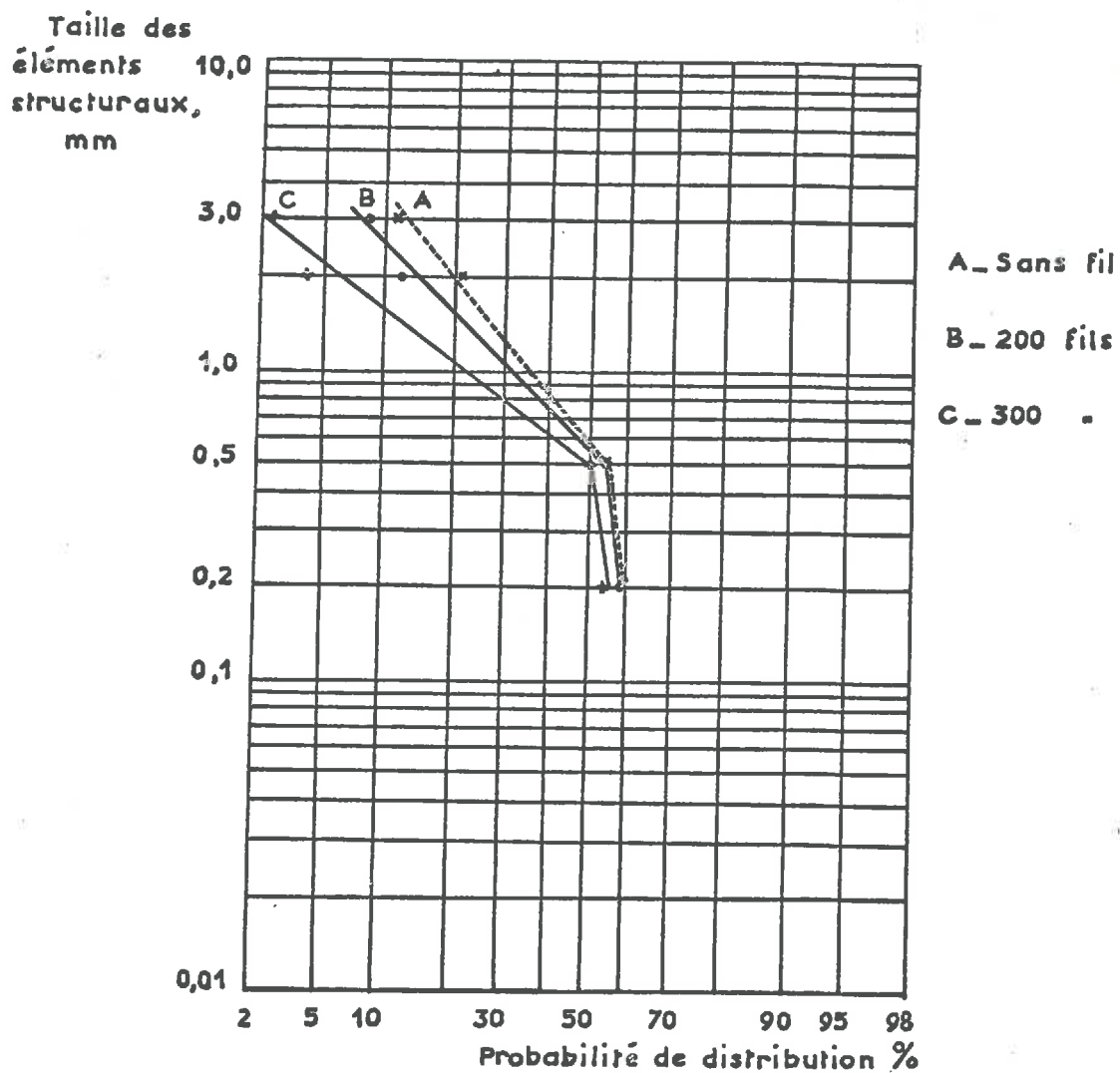


Fig. 8. Distribution log-normale des éléments structuraux en fonction de la densité des fils de nylon inertes implantés dans des modèles (Horizon B de Versailles malaxé) à structure continue

et la température de dessiccation. On voit dans le tableau 16 et la figure 9, que pour 2 cycles d'humectation et de dessiccation et avec des fils de fer galvanisés de 1 mm de diamètre, la fragmentation est plus intense si les gâteaux sont séchés à l'air plutôt qu'à 105°C ; si les gâteaux sont fabriqués à partir d'une pâte contenant un excès d'eau qui est ressuyé par un drainage rapide que s'ils sont fabriqués à 26 % d'humidité (correspondant à la capacité au champ de l'horizon B) sans drainage. Remarquons de plus que l'influence considérable de l'humidité de malaxage d'une terre sur sa fragmentation ultérieure a été mise en évidence par HENIN (1938). Les résultats obtenus par cet auteur montrent également que le maximum d'agrégation est obtenu par malaxage à une humidité voisine de la capacité au champ.

T a b l e a u 16

2 cycles

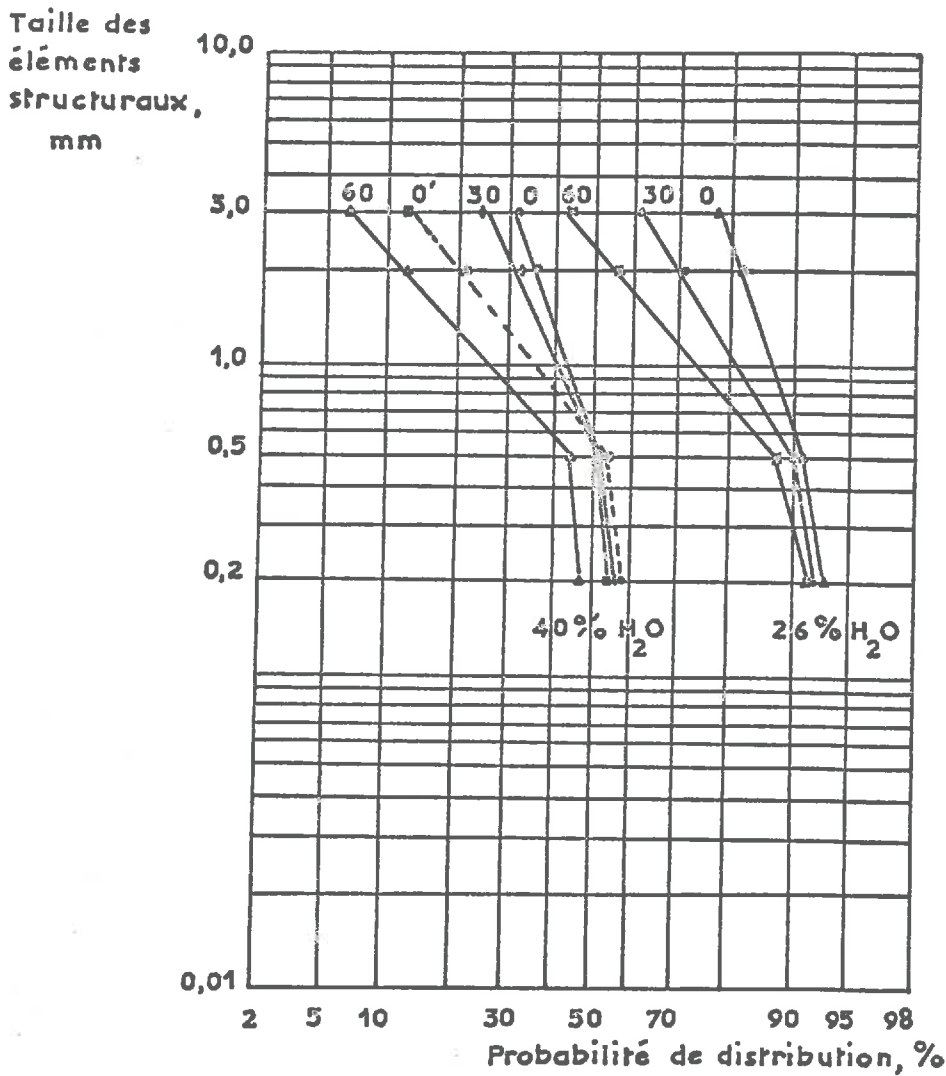
Facteurs déterminant l'intensité de fragmentation d'un gâteau de terre compacte (Horizon B)

Taille des éléments structuraux (mm)	% distribution des éléments structuraux							
	40 % humidité drainage Büchner				26 % humidité sans drainage			
	Densité de fils par gâteau (20 cm ²)							
	0 (air)	0 (105°C)	30	60	0	30	60	
> 3	12,3	32,0	25,0	7,7	78,0	62,4	45,4	
3 - 2	8,1	3,2	7,1	4,9	3,8	7,7	11,8	
2 - 0,5	33,8	17,0	20,0	32,0	10,3	20,0	32,3	
0,5 - 0,2	3,2	2,4	1,8	3,7	1,4	2,1	2,3	
0,2	43,6	45,4	46,1	51,7	6,5	7,8	8,2	

Note : Excepté pour la colonne 0 (air) qui désigne la dessiccation par séchage à l'air, la dessiccation dans les autres gâteaux se fait à 105°C comme le cas de 0 (105°C).

.../...

Densité de fil / 20 cm²



0 - Témoin séché à 105°C

0' - Témoin séché à l'air

Fig.9. Influence de l'humidité de préparation et de la température de dessiccation sur l'intensité de fissuration des modèles à structure continue (Horizon B de Versailles malaxé) en présence des fils de fer

b/ Convergence des résultats obtenus sur modèles et en serre

Nous avons constaté que, comme dans le cas du Ray Grass sur l'Horizon B compacté en serre, la présence des fils de nylon ou de fer galvanisé entraîne la fragmentation de la masse de terre compacte, et que la distribution des éléments structuraux qui en résultent présente les mêmes caractéristiques. C'est dire que sur les modèles, la fragmentation est aussi caractérisée par un affinement des éléments structuraux supérieurs à 3 mm vers les dimensions plus petites (inférieures à 2 mm) et par une bonne relation entre le degré d'affinement des unités formées et la densité des fils. Pour élucider ce dernier point, nous avons récupéré les fractions supérieures à 3 mm après le test à l'alcool dont le taux est rapporté dans le tableau 16 et nous leur avons fait subir un tamisage à sec qui donne une distribution des unités supérieures suivantes :

T a b l e a u 17

Distribution des éléments structuraux supérieurs à 3 mm en fonction de la densité des fils de fer implantés dans un gâteau de terre compacte (Horizon B)

Taille des éléments structuraux (mm)	% distribution					
	40 % humidité drainage Büchner			26 % humidité sans drainage		
	Densité : de fils / gâteau (20 cm ²)					
	0	30	60	0	30	60
> 10	58,0	0	0	68,3	25,6	0
10 - 5	21,0	45,0	10,4	12,3	40,9	43,3
5 - 3	11,2	41,5	68,8	9,0	25,6	42,4

.../...

On voit que dans le témoin la fraction > 10 mm est prédominante et qu'elle tend vers la taille 3-5 mm à mesure que le nombre des fils croît vers 60. En effet, la prédominance des unités 5-10 mm pour une densité de 30 fils/gâteau et celles de 3-5 mm pour 60 fils/gâteau correspond bien au fait que si l'on divise mécaniquement un gâteau de 20 cm² par 30 et 60 fils, on obtiendrait respectivement, des unités qui sont essentiellement 5-10 mm et 3-5 mm. L'allure que prennent les courbes (fig. 10) représentant la distribution par tailles des éléments structuraux en fonction de la densité des fils est d'ailleurs tout à fait semblable à celle de la figure 1.

c/ Elargissement de la gamme de textures étudiées : mélanges artificiels

Cette première série de résultats sur modèles s'accordent dans une large mesure avec ceux observés en vases de végétation et confirment ainsi une fois de plus l'importance de la texture en général, et de l'argile en particulier dans la formation des éléments structuraux. Comme ces résultats s'obtiennent à partir de quelques textures seulement, il nous est apparu nécessaire d'en élargir la gamme pour pouvoir tirer des conclusions plus globales. A cet effet, nous avons fabriqué des mélanges artificiels d'argile et de limon et procédé à des essais de fissuration décrits dans le paragraphe précédent. Ces mélanges sont composés de limon de 2 à 50 microns et d'argile qui peut être de la montmorillonite, de l'illite ou de la kaolinite, dont la teneur varie de 10 à 50 %.

Quelques observations importantes peuvent être tirées de ces essais. Les résultats (tableau 18) indiquent que le comportement des mélanges varie non seulement avec la teneur en argile, mais aussi avec sa nature. Ainsi, au niveau des basses teneurs, notamment à 10 et 20 %, la cohésion des gâteaux n'est pas aussi forte dans le cas de l'illite que dans celui de la montmorillonite. Ce qui est traduit par l'absence dans le 1er cas des éléments > 5 mm à l'issue du test à l'alcool (tableau 18). D'autre part et conformément aux résultats déjà acquis, on n'observe aucune interaction entre ces gâteaux riches en limon et le réseau des fils. C'est à partir de 30 % d'argile qu'elle se manifeste dans les 2 cas avec la différence importante que le maximum de corrélation entre la taille (5-10 mm) des éléments produits et les mailles du réseau se situe à 30 % pour les mélanges montmorillonite-limon et à 40 % pour les mélanges illite-limon. Dans les 2 cas, notons aussi la prédominance des éléments 0,5 à 2 mm et l'inverse relation entre l'existence de ces derniers et celle des tailles supérieures.

Distribution %
après le test
à l'alcool

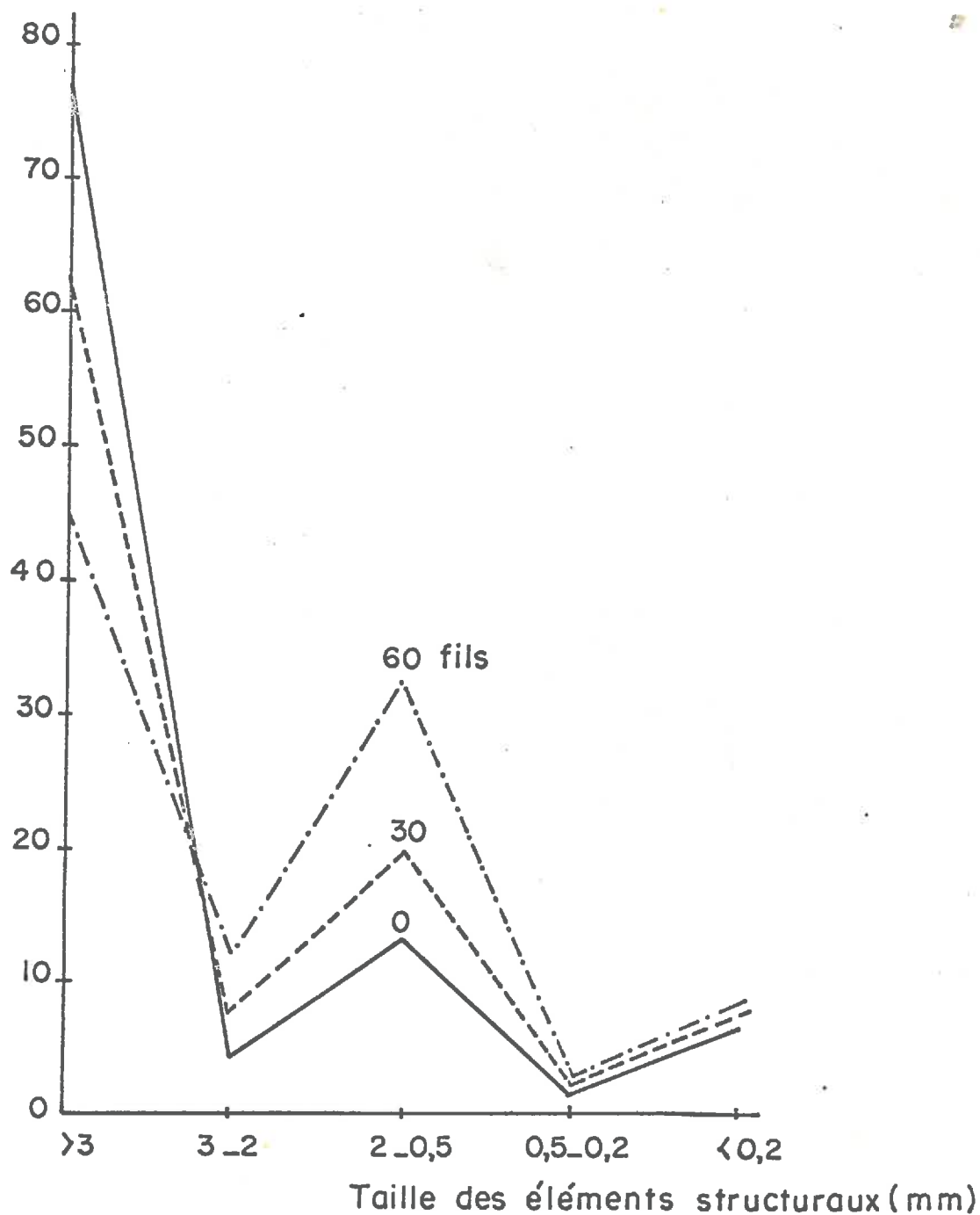


Fig.10. Influence de la densité des fils (fer galvanisé, 1 mm de dia.)
sur la fissuration par dessiccation différentielle des mo-
dèles à structure continue (Horizon B de Versailles)

Lucas

Comportement des modèles compacts de mélanges artificiels en fonction de la nature et la teneur en argile, à l'issue d'un traitement de dessiccation différentielle

3 cycles

Taille des éléments (mm)	Mélanges illite - limon						Mélanges montmorillonite - limon										
	10	20	30	40	50	% d'argile	10	20	30	40	50						
% distribution des éléments structuraux à l'issue du test à l'alcool																	
> 10	-	-	4,5	0,8	54,5	6,9	27,8	2,5	97,5	92,4	96,5	95,5	78,4	5,5	5,7	0	0
10 - 5	-	-	1,1	1,4	5,1	25,8	16,1	18,2	-	1,0	-	-	4,7	27,2	13,2	8,4	6,4
5 - 3	5,0	0,2	4,2	0,4	4,6	9,8	3,3	16,3	18,0	33,5	-	1,9	-	0,3	4,5	10,8	25,0
3 - 2	2,3	0,3	16,4	6,9	22,9	26,4	10,3	19,9	13,6	17,7	-	2,1	0,2	0,3	2,5	17,1	24,1
2	0,5	64,8	59,0	58,3	67,6	46,2	47,4	13,9	22,4	15,2	18,2	0,2	1,1	0,2	0,6	4,7	28,4
0,5 - 0,2	14,5	21,5	10,4	13,7	8,3	7,1	2,4	3,3	3,2	3,9	0,2	0,2	0,5	0,2	0,3	1,1	4,6
< 0,2	17,9	19,4	10,6	10,9	7,7	7,0	5,1	5,4	6,2	6,0	1,9	2,8	2,9	2,4	4,0	6,4	8,4

⋮ / ⋮

Le comportement des mélanges kaolinite-limon s'avère totalement différent de ce qui est observé dans les 2 cas précédents et mériterait une étude à part. Il convient de remarquer dès maintenant, que la cohésion de ces mélanges reste très faible même à des teneurs élevées en kaolinite. Leur interaction avec le réseau des fils se trouve par conséquent négligeable. Une étude comparée entreprise par ROSE (1966) sur la résistance de montmorillonite, illite et kaolinite à l'état pur ou en combinaison à l'action d'une pluie simulée a montré qu'effectivement les agrégats de kaolinite ont été complètement dispersés tandis que les autres sont restés plus ou moins intacts à l'issue de ce traitement. En étudiant d'autre part les différents types de structure formés par des mélanges de montmorillonite ou de kaolinite avec le sable ou certains sols, PETERSON a rapporté en 1944, (BAVER, 1956), que les éléments structuraux à base de montmorillonite sont plus ou moins cubiques alors que ceux produits à partir de kaolinite sont plutôt lamellaires. PETERSON a remarqué en plus, que la tendance de la kaolinite à produire une structure lamellaire a pu être modifiée ou supprimée par l'addition de petites quantités de montmorillonite, de matières organiques, de calcium et d'oxyde de fer. A travers ces résultats on entrevoit qu'en plus de la nature et quantité d'argile, la nature de sa garniture ionique ainsi que les mélanges d'argiles différentes sont autant d'éléments importants à considérer dans la formation de la structure. Passons maintenant aux résultats de l'interaction entre les modèles de milieu fragmentaire et les fils.

2. MILIEU FRAGMENTAIRE

Le Limon Blanc ou l'Horizon B agrégé fin (tamisé à 0,5 mm) contenu dans un petit pot rigide et amené à la capacité au champ par un apport d'eau par capillarité, est le milieu dans lequel nous avons planté ces fils de fer (diamètre 0,5 mm) à une densité de 100 fils/20 cm². Les modèles sont laissés sécher à l'air puis les fils sont retirés avec précaution. A partir du gâteau troué qui résulte de ce traitement et du gâteau témoin non troué, nous avons obtenu par fragmentation mécanique des unités de 5 à 10 mm que nous avons soumis au test à l'alcool. Les résultats du test montrent que l'introduction des fils n'a pas provoqué d'interaction appréciable (tableau 19) dans le cas Limon Blanc, mais qu'elle a effectivement causé une agrégation des particules inférieures à 0,5 mm en unités plus grandes dans l'Horizon B. L'interaction entre ce dernier et les fils est de plus reliée à l'alternance du régime hydrique du modèle et se manifeste déjà après un cycle d'humectation et de dessiccation pour devenir plus importante à l'issue de 5 cycles.

.../...

Tableau 19

Agrégation d'un milieu fragmentaire fin en relation avec la texture,
la présence des fils inertes et le nombre d'alternances d'humectation et de dessiccation

Taille des éléments : structuraux : (mm)	Distribution % des : éléments structuraux		Distribution % après 1 cycle		Distribution % après 5 cycles		Eléments struc-	
	Limons	Horizons	Limons Blancs	Horizons B	Limons Blancs	Horizons B	turaux (%)	troués :
	Blanc	B	Témoin : 100 fils	Témoin : 100 fils	Témoin : 100 fils	Témoin : 100 fils	par rapport au :	nombre total récu-
							peré après le :	test à l'alcool :
							Limons :	Horizons :
							Blanc :	B :
> 3	-	-	1,3	2,0	2,0	0,2	5,3	
3 - 2	1,0	1,0	2,6	2,7	3,3	2,0	6,7	26,4
2 - 0,5	26,0	23,4	38,7	15,3	14,7	36,0	34,7	13,0
0,5 - 0,2	18,0	20,7	27,3	20,0	17,3	25,4	22,0	
< 0,2	54,0	54,7	34,0	60,0	62,6	35,0	31,3	

L'ampleur de cette interaction peut être évaluée en déterminant le nombre moyen des éléments structuraux traversés par les fils, c'est à dire troués par rapport au nombre total récupéré après le test à l'alcool. Le comptage a donné plus de 50 % dans le cas de l'horizon B contre 23 % dans celui du Limon Blanc et il s'avère que les éléments troués ont tous une taille > 2 mm. Ainsi, l'interaction est pratiquement deux fois plus intense entre les fils et l'Horizon B qu'entre les fils et le Limon Blanc. Cette interaction devient plus importante encore dans le cas de l'Horizon B si l'on opère sur le milieu dans lequel l'autoagrégation a eu le temps de s'intensifier. C'est ainsi que nous avons obtenu une agrégation considérable en éléments > 3 mm (tableau 20) en introduisant les fils de fer dans de l'Horizon B tamisé à 0,5 mm et préalablement soumis pendant quelques mois à des alternances d'humectation et de dessiccation.

T a b l e a u 20

Effet de l'introduction des fils de fer dans un milieu fragmentaire riche en argile (Horizon B) et préalablement autoagrégé

Taille des éléments structuraux (mm)	% distribution des éléments structuraux à l'issue du test à l'alcool	
	Témoin	100 fils (0,5 mm) 40 cm ²
> 3	14,0	31,3
3 - 2	1,6	4,0
2 - 0,5	37,3	23,3
0,5 - 0,2	16,0	15,3
$< 0,2$	38,1	26,1

.../...

A remarquer que l'agrégation sous l'influence des fils se fait en grande partie à partir des éléments de 0,5 à 2 mm produits par autoagrégation au sein de l'Horizon B, tout comme ce qui s'est passé dans les vases de végétation sous l'action des racines. Le phénomène d'autoagrégation existe aussi dans le cas du Limon Blanc, mais à un degré beaucoup moindre.

Les différences de comportements du Limon Blanc et de l'Horizon B en présence des fils sont ici encore liées à leur teneur en argile, donc leur aptitude au gonflement et au retrait qui sont vraisemblablement à l'origine des phénomènes d'autoagrégation et d'agrégation observés. En effet, les pots étant à parois rigides et de même volume, on peut imaginer que les éléments fins de 0,5 mm au départ auraient autant plus de chance d'être accolés les uns aux autres ou autour des fils que si le gonflement et le retrait sont d'autant plus forts. L'illite étant l'argile prédominante dans les 2 terres, il est évident qu'ayant une teneur en argile plus élevée, le milieu Horizon B est plus déformable que le Limon Blanc, d'où l'effet d'agrégation plus marqué dans ce milieu.

Il y a donc raison de croire que l'agrégation provient non seulement de la pression locale due à l'introduction des fils qui constitue l'hypothèse courante du phénomène d'agrégation, mais encore et surtout des perturbations lors du gonflement et du retrait du gâteau causées par leur présence puisque le tassement ne diminue que de moins de 1 % la porosité totale (12,5 %) du volume de terre étudié (200 cm³), le volume total des fils étant de 0,4 cm³. Cette diminution de porosité est trop faible, même si elle est localisée au niveau des fils, pour justifier à elle seule l'importante agrégation observée dans le tableau 20. L'existence d'une telle agrégation sous l'influence d'un réseau de fils de fer indique d'autre part le caractère mécanique du processus.

B - INTERACTION ENTRE LES FILS INERTES, LE MILIEU

ET SON REGIME HYDRICUE

Dans la partie précédente nous avons concentré notre effort sur la démonstration de l'effet causé par la simple présence de fils inertes dans des modèles de textures et d'états structuraux différents. Or, le réseau racinaire est un système dynamique et par conséquent, il y a raison de croire que par leurs activités physiologiques les racines agissent sur le milieu notamment sur son régime hydrique. Cette action est conçue comme résultant d'une humectation et

.../...

d'une dessiccation plus poussées dans les régions au voisinage immédiat des racines que dans celles qui se trouvent plus loin, d'où le terme différentiel utilisé. Ce déséquilibre hydrique peut être produit par les changements d'humidité survenus à la suite de l'évacuation plus intense de l'eau au niveau des racines, d'où dessèchement local et du ruissellement préférentiel le long des racines, d'où mouillage plus rapide à ce niveau, après un apport d'eau (pluie ou irrigation).

1/ Effet de la dessiccation différentielle -

Dans un premier temps, nous avons construit des modèles avec de l'Horizon B compacté sur lesquels nous avons essayé d'effectuer une dessiccation différentielle en chauffant par un bec Bunsen les bouts libres des fils de fer implantés dans des gâteaux de Limon Blanc ou d'Horizon B compactés. En comparant les résultats du test à l'alcool obtenus à l'issue de 2 cycles (d'humectation et réhumectation normales, dessiccations différentielles) sur les gâteaux ainsi traités avec ceux des gâteaux témoins sans fils, non chauffés, des gâteaux avec le même nombre de fils chauffés indirectement par rayonnement de la chaleur provenant du bec Bunsen, nous avons pu isoler l'effet de chaque traitement dans le processus de fragmentation du gâteau.

Alors que les divers traitements n'ont pas d'effet notable sur le Limon Blanc (tableau 21), ils provoquent des interactions entre l'Horizon B et les fils (tableau 21 bis) qui varient en intensité. L'interaction la plus marquée est traduite par une fragmentation élevée correspondant au traitement des fils chauffés directement, c'est à dire effectivement à la dessiccation différentielle subie par le gâteau.

.../...

Tableau 21

Effet de la dessiccation différentielle sur des modèles continus
riches en limon (Limon Blanc)

Taille des éléments structuraux (mm)	Traitements			
	Témoin sans fils	30 fils (dia, 1 mm)/gâteau		
		Fils non chauffés	Fils indi- rectement chauffés	Fils direc- tement chauffés
% distribution des éléments structuraux à l'issue du test à l'alcool				
> 3	71,8	70,2	69,5	70,0
3 - 2	3,0	2,2	2,8	2,2
2 - 0,5	15,1	16,7	17,0	16,8
0,5 - 0,2	3,0	3,5	3,7	3,8
< 0,2	7,0	7,5	7,3	7,2

.../...

T a b l e a u 21 bis

Effet de la dessiccation différentielle sur des modèles compactés

riches en argile (Horizon B)

Taille des éléments (mm)	Traitements et % distribution des éléments après le test à l'alcool							
	30 fils (dia. 1 mm)/gâteau				60 fils (dia. 0,5 mm)/gâteau			
struc- turaux	Témoin (sans fils)	Fils non chauffés	Fils indi- rectement chauffés	Fils direc- tement chauffés	Témoin (sans fils)	Fils non chauffés	Fils indi- rectement chauffés	Fils direc- tement chauffés
> 3	75,5	62,4	57,8	46,5	70,4	67,6	57,8	43,1
3 - 2	4,0	7,7	7,7	8,6	4,4	7,8	9,4	9,4
2 - 0,5	12,3	20,1	24,7	32,7	16,1	16,5	23,7	35,4
0,5-0,2	1,6	2,1	2,1	3,6	2,0	1,4	2,0	3,4
< 0,2	6,4	7,7	7,7	8,6	7,1	6,7	7,1	8,7

2/ Effet combiné des humectations et dessiccations différentielles

Pour cet essai, nous avons utilisé des fils de fer dont une partie gainée de coton hydrophile et implanté cette partie dans des gâteaux compactés de Limon Blanc et d'Horizon B encore humides. Rappelons que si elle n'est pas indiquée autrement, l'humidité de préparation de tous nos modèles correspond à leur humidité équivalente obtenue par la formule de GRAS (Le Profil Culcural, 1960). Dans notre cas, elle est de l'ordre de 18 % et 26 % de terre sèche pour le Limon Blanc et l'Horizon B, respectivement. Les gâteaux avec leurs fils gainés ainsi mis en place ont été desséchés et humectés différentiellement en

.../...

chauffant les fils par leurs bouts libres et en ajoutant de l'eau par compte goutte à leur partie gainée chaque fois que la surface du gâteau s'est desséchée. Comme le cas précédent on observe aucun changement appréciable dans les gâteaux de Limon Blanc (tableau 22). Par contre, une fissuration importante apparaît déjà après un seul cycle d'humectation et de dessiccation différentielles, alors qu'il fallait 2 cycles de dessiccations différentielles pour produire une fragmentation. Celle qui correspond au traitement humectation-dessiccation différentielles a par ailleurs produit le plus d'éléments structuraux (51,7 %) dont la taille (5 - 10 mm) est en relation directe avec les dimensions de la maille constituée par les fils (30 fils/20 cm²).

Il apparaît donc qu'avec une texture fissurable et agrégeable, la présence d'un réseau de fils couplée avec un régime hydrique à alternances d'humectation et de dessiccation différentielles constitue un système très efficace dans la formation d'une structure granulaire.

T a b l e a u 22

Effet comparé de 2 cycles de dessiccation différentielle et d'un seul cycle d'humectation et de dessiccation différentielles sur le comportement des modèles compacts de terre en fonction de leur texture

	Limon Blanc			Horizon B		
	0 fils	30 fils/gâteau (20 cm ²)	0 fils	30 fils/gâteau (20 cm ²)	30 fils/gâteau (20 cm ²)	30 fils/gâteau (20 cm ²)
	Témoin	dessiccation:humectation	Témoin	dessiccation:humectation	dessiccation:humectation	dessiccation:humectation
		différentielle:et dessicca-		différentielle:et dessicca-	différentielle:et dessicca-	différentielle:et dessicca-
		tion différen-		tion différen-	2 cycles	tion différen-
		tielle		tielle		tielle
	% distribution des éléments structuraux à l'issue du test à l'alcool					
> 10	52,6	60,0	50,7	74,0	4,5	5,2
10 - 5	6,7	11,1	8,8	1,0	30,3	51,7
5 - 3	8,2	6,8	10,7	5,5	26,2	29,8
3 - 2	4,8	2,2	2,2	3,2	10,7	2,0
2 - 0,5	17,0	11,7	16,7	10,2	19,3	5,0
0,5 - 0,2	3,7	1,8	3,5	1,3	2,0	1,0
< 0,2	7,3	6,2	7,5	4,8	6,8	5,5

.../...

III - RAPPROCHEMENT DES RESULTATS OBTENUS SUR MODELES ET EN VASES DE VEGETATION

Remarquons dès maintenant que les modèles ne peuvent pas représenter exactement le milieu sol-racines et que par conséquent, les résultats obtenus ne peuvent être qu'une grossière approximation de ce qui se passe réellement. Dans notre cas, c'est la convergence des résultats avec les faits observés en serre qui justifie leur emploi.

Il nous sont d'autant plus indispensables qu'ils nous permettent d'isoler les mécanismes qui sont opérationnels dans le processus global de la formation de la structure sous prairie.

Cela dit, des deux types d'expériences que nous avons rapportées ressortent les convergences suivantes :

1) L'action des racines ou des fils inertes est négligeable sur le milieu pauvre en argile, et franchement positive sur le milieu riche en argile ;

2) Dans le 2ème cas (où l'action des racines ou des fils est appréciable) on observe en outre :

- qu'il existe une relation entre la taille moyenne des éléments structuraux dominants et les dimensions de la maille des racines ou des fils.

- que l'ampleur des phénomènes de fissuration ou d'agrégation, représentée par le pourcentage des éléments structuraux dominants obtenus à l'issue du test à l'alcool, est du même ordre de grandeur, qu'ils proviennent de l'effet des fils ou de celui des racines,

- qu'une partie des éléments structuraux obtenus provient de l'auto-agrégation ou de l'autofissuration du milieu, une propriété qui lui est particulière et qui semble aussi liée à sa texture.

Etant donné que, d'après les observations précédentes, les deux systèmes (sol-racines et sol-fils) produisent essentiellement les mêmes effets, et que les mécanismes qui interviennent dans le système sol-fils sont uniquement des processus physiques, on peut dire que ceux qui entrent en jeu dans le système sol-racines le sont aussi.

.../...

Il faut cependant ajouter, que ces processus mécaniques n'interviennent seulement dans la mesure où la texture du sol est apte à réagir aux changements du régime hydrique. Il apparaît aussi que l'humectation et la dessiccation différentielles engendrées par la présence du réseau racinaire joue un rôle essentiel dans le déclenchement du mécanisme de la formation structurale sous prairie. Dans ce domaine, les travaux de S. MERIAUX (1968) sur la dynamique de l'eau sous prairie en sol argileux et de de BACKER et BOERSMA (1968) sur le facteur d'exploration racinaire apportent des détails utiles et sont par conséquent d'un intérêt particulier.

CONCLUSIONS

Etant donné la complexité que présentent "a priori" les mécanismes de la granulation du sol sous prairie et le peu d'informations disponibles à cet égard, il nous a paru préférable dans un premier temps, de recenser les différents types d'action susceptibles de se manifester.

Un tel parti a évidemment pour conséquence, que les faits sont établis davantage par la convergence de résultats expérimentaux obtenus dans des conditions différentes que par l'étude statistique des données ; une telle étude aurait nécessité des conditions expérimentales hors de notre portée, compte tenu du souci que nous avons d'envisager des aspects très divers du phénomène.

Ceci étant, il est cependant possible de tirer de cette étude un certain nombre d'indications importantes. Tout d'abord, contrairement à l'opinion très répandue qu'il suffit de mettre un sol à structure défavorable sous prairie pour que son état soit sensiblement amélioré, il s'avère que pendant la période relativement courte qui suit l'établissement d'une prairie de graminées (1), l'efficacité des racines à cet égard dépend non seulement de leur longueur spécifique mais aussi et surtout de la composition granulométrique des sols et de leur état physique initial. Il est évident qu'entre deux graminées, la plus efficace serait celle qui s'établit le plus vite et qui produit dans un temps relativement court un réseau racinaire à longueur spécifique appréciable. De même l'effet observé est beaucoup plus marqué dans les sols qui manifestent un certain caractère argileux que dans les terres riches en limons ou en sables fins. C'est ainsi que si un sol n'est, par ses propriétés, pas fissurable ou agrégeable, c'est-à-dire s'il ne se prête pas au gonflement et au retrait suivant son état hydrique, l'action des racines s'avère insignifiante. Enfin lorsqu'elle existe, cette action se traduit par des mécanismes d'agrégation d'éléments fins ou de fissuration d'éléments grossiers suivant que l'état structural initial est pulvérulent ou continu. Il apparaît que la formation d'une structure granulaire par fissuration ou par agrégation nécessite des périodes de temps différentes qui sont conditionnées par l'état physique initial du milieu.

(1) Notons que la période en question est de l'ordre de grandeur de la durée de végétation d'un engrais vert d'hiver en sol de verger par exemple,

L'examen des mécanismes responsables de la formation des éléments structuraux par agrégation ou fragmentation éclaire cette proposition. Les résultats ont montré que les racines pouvaient agir de deux façons différentes :

En premier lieu, leur seule présence crée dans le système une hétérogénéité qui suffit à entraîner selon les cas, une agrégation ou une fissuration, mais toujours par l'intermédiaire d'une perturbation dans le développement des phénomènes de gonflement ou de retrait. D'autre part, à cette action mécanique s'ajoute l'effet résultant de l'humectation et de la dessiccation préférentielles créés par le système racinaire qui nécessite lui aussi une possibilité de réaction du sol aux changements du régime hydrique.

Par ailleurs et quoique d'un point de vue général l'action des racines semble se borner à révéler, à accélérer, ou à fortement accentuer une évolution structurale essentiellement conditionnée par la texture du sol, elle joue un rôle essentiel au niveau de la construction des éléments structuraux en conférant à ceux-ci, de par la configuration du réseau racinaire, une forme et une taille caractéristiques d'une structure sous prairie. En effet les processus d'agrégation ou de fissuration aboutissent à la formation d'éléments structuraux dont la taille varie entre 3 et 10 mm qui semble être déterminée par celle de la maille racinaire dans la couche de sol considérée à un moment donné. Si l'on part d'une structure continue ou grossière, il paraît qu'une longueur spécifique L_g du réseau racinaire de 10 cm/cm^3 suffit déjà pour amorcer le processus de fissuration qui s'intensifie avec l'accroissement des valeurs L_g pour produire dans un premier temps aux environs de $L_g = 20$ une structure à prédominance d'éléments de 0,5 - 2 mm à partir desquels s'effectue ultérieurement le phénomène d'agrégation dont l'intensité varie aussi en fonction directe de L_g jusqu'à la valeur 40 où la granulation en éléments 3 - 10 mm est maximum. La durée d'un cycle complet ainsi défini semble être de l'ordre de 2 ans. Si d'autre part l'on a affaire au départ à une structure fine, c'est le phénomène d'agrégation qui entre tout de suite en jeu mais qui s'effectue aussi principalement à partir des éléments de 0,5 à 2 mm produits par autoagrégation du milieu. Ce processus nécessite toutefois une durée de temps beaucoup plus courte que dans le cas précédent.

Il en découle que la formation des éléments structuraux sous prairie se caractérise par l'arrangement sous l'influence du réseau racinaire de ces unités 0,5 à 2 mm produits soit par fissuration, soit par autoagrégation, en éléments de 3 à 10 mm plus ou moins arrondis.

Il ressort également de cette étude que les forces qui entraînent les processus d'agrégation ou de fissuration sont liées non seulement à la texture du sol mais aussi aux pressions locales exercées par les racines en voie de développement et surtout au régime hydrique différentiel créé au voisinage du réseau racinaire.

BLACK (1968) a émis l'hypothèse que dans le processus de la formation de la structure on peut distinguer deux phases assez nettes, à savoir le développement des liaisons interparticulaires qui intervient d'une manière assez rapide en fonction de la texture du sol, et la séparation des éléments structuraux les uns des autres par les forces extérieures (retrait, gel, racines, faunes du sol, etc...) dans des conditions bien définies. Les résultats de notre étude tendent à confirmer cette hypothèse. La structure sous prairie telle qu'elle est fréquemment observée dans le milieu naturel n'est donc qu'un cas particulier de l'interaction du milieu (sol) avec les facteurs externes, l'action des racines se traduisant essentiellement par une localisation et une intensification de l'influence de ces derniers.

L'étude de l'évolution de la structure sous prairie peut par conséquent être considérée comme une contribution dans un cas particulièrement typique à l'étude du déterminisme de la forme et de la taille des éléments constitutants d'une structure existant à un moment donné dans une couche du sol.

D'ores et déjà, les données acquises contribuent à expliquer de nombreuses observations faites dans le milieu naturel et de prévoir le comportement des sols vis-à-vis de la prairie à établir. Elles suggèrent de plus que le choix judicieux de la ou des graminées utilisées, la présence de certaines qualités texturales et d'un certain état physique initial sont des conditions indispensables à l'amélioration rapide de la structure d'un sol sous prairie. Il apparaît en particulier qu'en multipliant l'effet produit par les alternances d'humectation et de dessiccation différentielles, on ait là un moyen très efficace pour produire, sous une prairie appropriée, une granulation accélérée d'un sol à texture facilement fissurable ou agrégeable.

Comme cette amélioration dépend largement de la quantité de racines présentes les mesures tendant à faciliter leur développement et prolifération telles qu'une fertilisation équilibrée, une exploitation judicieuse de la partie aérienne, et un drainage adéquat sont évidemment nécessaires.

Enfin soumettre un gâteau compact de terre à un traitement d'alternance d'humectations et de dessiccations, surtout par chauffage des fils de fer nus implantés, vu la simplicité de cette opération, et ensuite au test à l'alcool apparaît comme une méthode parfaitement efficace pour estimer l'aptitude à la granulation d'un sol.

BIBLIOGRAPHIE

- ALLISON, F. E. 1968. Soil aggregation. Some facts and fallacies as seen by a microbiologist. *Soil Sci.*, 106, 2, 136-143.
- ANDREW, W. D. 1965. The effects of some pasture species on soil structure. *Aust. J. Exp. Agric. and Ani. Husb.*, 5, 17, 133-136.
- ASHLEY, G. D. 1961. Grassland and soil structure. *J. Brit. Grassl. Soc.*, 16, 156-159.
- BARBER, S. A. 1959. The influence of alfalfa, bromegrass and corn on soil aggregation and crop yield. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 23, 258-259.
- BASKARAN, A. R. et CHAKRABARTY, D. C. 1965. A preliminary study on the variation in the soil binding capacity of some grass roots. *Indian J. Agron.*, 10, 3, 326-330.
- BAVER, L. D. 1935. Factors contributing to the genesis of soil microstructure. *Amer. Soil Survey Assoc. Bull.*, 16, 55-56.
- BAVER, L. D. 1956. *Soil physics*. 3rd ed. John Wiley and Sons, N. Y.
- BEKAREWITSCH, N. E. et al. 1964. *Bodenstruktur und lebensbedingungen der Pflanzen*. Trans. 8th Int. Cong. Soil Sci. Bucharest.
- BEKHAR, A. 1959. The effect of soil type on structure formation. *Soils and Fert.* no. 23, item 1140.
- BLACK, C. A. 1968. *Soil-plant relationship*. 2nd ed. John Wiley and Sons, N. Y.
- BUCKMAN, H. O. et BRADY, N. C. 1960. *The nature and properties of soils*. 6th ed. The MacMillan Co., N. Y.

- CHATTERJEE, B.N. et SEN, M.K. 1964. Studies on the effect of grasses on red soils of Ranchi (India). J. Brit. Grassl. Soc., 19, 340-342.
- CONCRET, J. 1965. Etude des mécanismes de la destruction des agrégats de terre au contact de solutions aqueuses. Thèse Univ. de Strasbourg.
- DE BACKER, L. et BOERSMA, L. 1968. Une relation entre l'eau du sol et la plante. Le facteur d'exploration radiculaire. Sci. du Sol n° 2, 1968, 3-20.
- DEMOLON, A. 1952. Dynamique du sol. Principes d'agronomie. Tome I. 5me éd. Dunod Paris.
- DONAHUE, R. L. 1958. Nature des sols et croissance végétale. Intercontinental Ed., Inc., N.Y.
- EGAWA, T. et al. 1957. Role of perennial grass in the improvement of physical and chemical properties of some upland soils in Japan. Soils and Fert., 20, 6, p. 329.
- FEODOROFF, A. 1960. Evaluation de la stabilité structurale d'un sol (Indice S). Nouvelles normes d'emploi pour l'appareil à tamiser. Ann. Agron., 6, 651-659.
- FRIDLAND, V.M. et al. 1964. Structure of moist tropical soils (N. Vietnam). Doklady Soil Sci., 13, 1351-1353.
- GARDNER, W.R. 1956. Representation of soil aggregate - size distribution by a logarithmic - normal distribution. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 20, 151-153.
- HARRIS, R.F. et al. 1966. Dynamics of soil aggregation. Adv. in Agron., 18, 107-169.
- HENIN, S. 1938. Etude physico-chimique de la stabilité structurale des terres. Thèse Univ. de Paris.
- HENIN, S. et MONNIER, G. 1956. Evaluation de la stabilité de la structure du sol. 6th Int. Soil Sci. Cong. Proc. Vol. B., 49-52.
- HENIN, S. et al. 1960. Le profil cultural. Principes de physique du sol. S.E.I.A. Paris.
- IMURA, K. et EGAWA, T. 1956. A study on decomposition of organic matter and aggregate formation. Soil and Plant Food, 2, 83-88.

- KHEYRABI, D. 1966. Influence de la composition granulométrique des sols sur leur stabilité structurale. Thèse Univ. de Paris.
- KOBLET, R. et WEHRLI, A. 1959. The structure of arable soils under clover grass. *Soils and Fert.*, 23, 2, p. 104 (1960).
- KOEPF, H. 1961. Beitrag zur Strukturbildung bei verschiedenen Bodentypen. *Landw. Forsch.*, 14, 1-9.
- LAW, J. P., Jr., et KUNZE, G. W. 1966. Reactions of surfactants with montmorillonite : Adsorption mechanisms. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 30, 3, 321-327.
- LOW, A. J. 1950. Rate of build-up of water - stable aggregate and soil crumb structure. *Trans. Int. Cong. Soil Sci.*, 3, 9-13.
- LOW, A. J. 1954. The study of soil structure in the field and in the laboratory. *J. Soil Sci.*, 5, 57-74.
- LOW, A. J. 1954. Improvements in the structural state of soils under leys. *J. Soil Sci.*, 6, 179-199.
- MAERTENS, C. 1965. Deux méthodes de détermination de la densité du sol en place ; leurs possibilités d'utilisation. *Bull. Ass. Fr. Et. Sol.* Août 1965.
- MARTIN, J. P. et al. 1955. Soil aggregation. *Adv. Agron.*, 7, 1-37.
- MARTIN, W. S. 1944. Grass cover in their relation to soil structure. *Emp. J. Exp. Agric.*, 12, 21-32.
- MERIAUX, S. 1968. Dynamique de l'eau sous prairie en sol argileux. *Sci. du Sol*, n°1, 1968, 105-115.
- MONNIER, G. 1965. Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. Thèse Univ. de Paris.
- NEWMAN, E. I. 1966. A method of estimating the total length of root in a sample. *J. Applied Ecology*, 3, 1, 139-145.
- PLOTNIKOV, A. A. 1960. The role of leys of annuals and perennials in the formation of water-stable soil structure. *Soils and Fert.*, 25, 2076.
- PLOTNIKOV, A. A. 1960. The dynamics of water-stable soil structure in a grass-arable rotation. *Soviet Soil Sci.*, 10, 1104-1107.
- POLLOCK, B. M. et al. 1954. Studies on roots. *Amer. J. Bot.*, 41, 521-529.

- PRINGLE, J. et COUTTS, J.R.H. 1956. The effect of grasses on aggregation in light soils. *J. Brit. Grassl. Soc.*, 11, 185-189.
- RETZER, J.L. et RUSSELL, M.B. 1941. Differences in the aggregation of a Prairie and a Gray Brown Podzolic soil. *Soil Sci.*, 52, 47-58.
- ROSE, C.W. 1966. *Agricultural physics*. Pergamon Press. London, New-York.
- RUSSELL, E.W. 1938. Soil structure. *Imp. Bur. of Soil Sci. Techn. Comm.* n° 37.
- RUSSELL, E.W. 1961. *Soil conditions and plant growth*. 9th ed. Longmans, London.
- SKEPINSKII, A.I. 1961. Characteristics of structure formation in soils of the southeast. *Pochvovedenie*, 2, 26-32.
- TARASENKO, B.I. 1960. Mechanical stability of aggregates in western cis-caucasian chernozems. *Soviet Soil Sci.*, 10, 1101-1103.
- TOTH, S.J. et ALDERFER, R.B. 1960. Formation and breakdown of CO^{60} -tagged water-stable soil aggregates in a Norton silt-loam soil. *Soil Sci.*, 90, 232-238.
- TROUGHTON, A. 1956. Studies on the growth of young grass plants with special reference to the relationship between the shoots and root systems. *J. Brit. Grassl. Soc.*, 11, 56-65.
- TROUGHTON, A. 1957. The underground organs of herbage grasses. *Bull. 44. Comm. Bur. Past. and Field Crops. C.A.B. England.*