



**HAL**  
open science

## Action des matieres organiques sur la stabilite structurale du sol

Gwendal Monnier

► **To cite this version:**

Gwendal Monnier. Action des matieres organiques sur la stabilite structurale du sol. Sols Africains, 1965, 10 (1), pp.5-42. hal-02732238

**HAL Id: hal-02732238**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02732238>**

Submitted on 2 Jun 2020

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

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

## ACTION DES MATIERES ORGANIQUES SUR LA STABILITE STRUCTURALE DU SOL

G. MONNIER

*Ingénieur-docteur, Laboratoire des Sols (Institut National de Recherches Agronomiques),  
Versailles*

A la faveur des controverses qui, depuis les travaux de Liebig, se sont poursuivies au sujet de l'importance agronomique de l'humus, il est apparu que les matières organiques pouvaient jouer dans le sol des rôles nombreux et très divers. On conçoit qu'il soit difficile, dans ces conditions, d'interpréter le résultat d'expériences culturales où la matière organique voit son efficacité établie uniquement à partir de comparaisons de rendement.

Notre but a été de contribuer à l'analyse indispensable des diverses conséquences de l'incorporation au sol de substances organiques, en nous limitant à celles qui touchent la stabilité de la structure.

Nous rappellerons tout d'abord quelques définitions :

On désigne par **structure** la façon dont les constituants élémentaires du sol sont disposés les uns par rapport aux autres.

De cet arrangement dépendent dans une large mesure la circulation de l'air et de l'eau, l'installation et le fonctionnement du système racinaire des végétaux.

Mais la structure ne caractérise l'état physique du sol qu'à un moment donné et il devient ici nécessaire de faire appel à la notion de **stabilité structurale** qui définit l'aptitude des agglomérats terreux à résister aux actions de dégradation, au premier rang desquelles se place celle des excès d'eau.

Parmi les processus de dégradation possibles, deux semblent jouer un rôle essentiel et Henin (1938) a élaboré une théorie dans laquelle ils interviennent l'un et l'autre.

Lorsqu'on met un agglomérat en présence d'eau, celle-ci pénètre par capillarité et, ce faisant, comprime l'atmosphère interne du sol. Parallèlement, les ciments colloïdaux qui assurent la cohésion de l'agglomérat gonflent et se dispersent plus ou moins.

Lorsque la pression interne devient supérieure aux forces de cohésion, l'agglomérat éclate.

La théorie peut alors se traduire par la relation :

Stabilité = Cohésion de la terre humide — Pression interne  $P_i$

$$\text{ou } P_i = \frac{2T_2 \cos \alpha}{r}$$

$\alpha$  étant l'angle de raccordement sol-eau, d'autant plus faible que la terre est plus mouillable,  $T_s$  la tension superficielle de l'eau et  $r$  le rayon des plus gros capillaires du sol par où l'eau pénètre d'abord.

Les conséquences de ce schéma, Henin l'a montré, sont conformes à l'expérience.

Ainsi lors d'humectations sous vide ou ménagées, c'est à dire en commençant par les pores les plus fins, la dégradation est moins intense, alors qu'elle est accentuée par des imbibitions sous pression.

Par ailleurs, si l'on augmente la cohésion du sol à l'état humide en enrichissant l'échantillon en argile, la stabilité est également plus forte.

Enfin, l'adjonction au sol de quantités même faibles d'un corps gras, par exemple, augmente la stabilité en diminuant  $\cos \alpha$ .

Nous avons donc pris cette théorie comme point de départ de nos recherches dont il devient maintenant possible de préciser l'objet.

— Quand la matière organique se fixe sur le sol, agit-elle uniquement sur la cohésion, sur la mouillabilité, ou bien y-a-t-il action sur ces deux propriétés ?

— Quand on part d'un type de matière organique donné, quels sont les processus de fixation et dans quelles mesures les différents types se distinguent-ils par leur efficacité ?

Nous avons d'abord étudié expérimentalement les mécanismes de stabilisation de façon à obtenir un ensemble de données de référence. Celles-ci ont été ensuite confrontées avec les observations faites dans le milieu naturel, en relation avec diverses techniques culturales.

## LES METHODES D'ETUDES

### I. Appréciation de la stabilité structurale

Nous avons utilisé une méthode dont les principes découlent directement de la théorie de Henin.

En voici, brièvement résumées, les principales caractéristiques.

Il s'agit d'une série de tamisages à  $200 \mu$ , effectués sous l'eau et dans des conditions standard, sur des échantillons du sol étudié composés d'agrégats séchés à l'air.

Préalablement au tamisage, certains échantillons sont humectés par des liquides organiques dans le but d'apporter des nuances à l'action directe de l'eau sur la terre sèche.

Humecter la terre par de l'alcool éthylique revient, en effet, à remplacer l'atmosphère interne du sol par un liquide miscible à l'eau. Le phénomène d'éclatement sera donc fortement atténué lors de l'action ultérieure de l'eau sur les agglomérats ainsi "prétraités".

Le deuxième liquide de prétraitement, le benzène, a été choisi pour deux raisons :

— la première est qu'il est, lui, non miscible à l'eau et aura donc une action générale opposée à celle de l'alcool éthylique. Les pores du sol

seront remplis d'un liquide incompressible, et l'éclatement en sera rendu plus brutal.

— la deuxième est qu'il est susceptible d'être fixé par les matières organiques du sol. Il se forme alors à la surface des pores un film de benzène continu qui rend le sol encore moins mouillable. L'action sensibilisatrice générale dont nous venons de parler sera donc fortement atténuée voire même inversée pour les terres humifères.

L'intérêt de ces prétraitements est d'abord qu'ils permettent d'obtenir une sensibilité de la méthode dans toutes les gammes de stabilité; mais nous verrons aussi l'interprétation particulière que chacun d'eux autorise.

On obtient ainsi trois taux d'agréats stables à l'alcool  $Ag_a\%$ , au benzène  $Ag_b\%$  et sans prétraitement  $Ag_o\%$ .

A partir de ces éléments et en tenant compte de la quantité de particules  $< 20 \mu$  qui se dispersent au cours des opérations de tamisage, il est possible d'établir un indice unique  $S$  qui varie de valeurs voisines de zéro pour les terres les plus stables à des valeurs supérieures à 100 pour les terres les plus instables.

Cet indice permet un classement des terres en bon accord avec leur comportement directement apprécié sur le terrain.

## II. Caractérisation et dosage des matières organiques du sol

L'hétérogénéité de ces constituants est telle qu'elle peut apparaître, au moins partiellement, à l'observation optique directe. C'est ainsi qu'à côté de nombreux composés liés à la fraction minérale du sol, on trouve des débris organiques végétaux ou animaux plus ou moins altérés mais dont la caractéristique commune est d'être juxtaposés et non liés au support minéral.

Par une sorte d'analyse immédiate dont le principe a été présenté par Henin et Turc (1949), nous avons séparé ces deux formes principales: par immersion et centrifugation dans un liquide de densité intermédiaire entre la densité des débris voisine de 1 et celle du complexe organo-minéral, généralement supérieur à 2, on peut isoler une fraction dite " libre " et une fraction dite " liée ". La quantité de carbone présente dans chacune de ces fractions est dosée par la méthode de Anne (1945).

La fraction libre présente un rapport C/N élevé et variable de 15 à plus de 100 suivant la nature, le type et le degré d'évolution des débris qui la composent.

De plus, elle est en majorité labile sous cette forme: cela traduit le fait que, lorsque les conditions sont favorables, elle est susceptible de se transformer rapidement en matière organique liée.

Au contraire, la matière liée dont le rapport C/N est relativement constant et se situe au voisinage de 10 semble, excepté dans certaines situations, composée surtout de substances biologiquement stables. Elle correspond donc à ce que l'on appelle généralement l'**humus**. Le tableau I présente à titre d'exemple quelques résultats de fractionnement.

**Tableau I. — Exemples de fractionnement densimétrique des matières organiques du sol**

(Caractérisations des fractions)

Désignation des échantillons (Prise d'essai 10 g)	Fraction peu dense F <sub>1</sub> (d < 2)				Fraction dense F <sub>d</sub> (d > 2)		
	F <sub>1</sub> (mg)	C mg dans 1 g de F <sub>1</sub>	C/N	C mg (de F <sub>1</sub> ) dans 1 g de terre t	C mg dans 1 g de F <sub>d</sub>	C/N	$\frac{C}{C_{\text{total}}} \frac{F_1}{F_1}$
Jeune prairie sur sable fin n° 636 . . . . .	212,5	201	16,8	4,27	6,2	9,6	40,4 %
Rendzine blanche sur craie n° 650 (culture)	194	228	26,2	4,42	22,3	8,9	16,0 %
Vieille prairie sur limon n° 115 . . . . .	336	240	20,7	8,06	16,05	9,8	33,0 %
Sous-sol de limon en- richi en matière orga- nique (farine de luzerne) . . . . .	332	214	27,5	7,10	17,7	9,85	28,6 %

Certes cet "humus" contient de nombreux constituants de propriétés physico-chimiques très diverses et il existe des méthodes permettant de le fractionner. Toutefois ces techniques ne permettent pas, au moins en l'état actuel de nos connaissances, d'aborder ce problème qui nous préoccupe. Il apparait en effet très vite que dans l'action des matières organiques sur la stabilité structurale, certains produits préhumiques, certains corps microbiens jouent un rôle fondamental. D'autre part le mode de fixation des matières organiques apparait également comme ayant un rôle prépondérant. Pour ces raisons, nous avons considéré qu'une première analyse devait porter sur les notions de liaison à la partie minérale du sol, d'origine et de mode de fermentation, et de répartition au sein du matériau à stabiliser.

### ETUDE DES ECHANTILLONS MODELES

Au cours d'une première étape, nous avons étudié des échantillons modèles obtenus par l'adjonction de substances organiques déterminées et dont les propriétés étaient connues à un support minéral unique: un sous-sol argilo-limoneux, l'horizon B de Versailles.

Les unes, polyacrylates et carboxyméthyl-celluloses, paraissaient particulièrement susceptibles de modifier la cohésion *C* de la terre humide sans diminuer la mouillabilité.

Des mesures directes de *C* ont été effectuées sur des patons fabriqués à partir des échantillons étudiés et humectés de façon à éviter tout phénomène d'éclatement. Nous avons pu alors constater que ces substances accroissaient effectivement la cohésion de la terre humide (Fig. 1). Mais, de plus, il apparait sur la Fig. 2 qu'il existe une bonne corrélation entre le taux d'agrégats à l'alcool *A*<sub>g</sub>% et les valeurs directement appréciées de cette cohésion.

D'autres substances telles que la cire d'abeille, l'acide oleïque etc...

et, à un degré moindre, les acides humiques, par leurs propriétés hydrophobes, ont fortement diminué la mouillabilité des échantillons auxquels elles avaient été ajoutées ; la mouillabilité étant appréciée par une vitesse initiale d'ascension capillaire (Fig. 3).

Cette diminution de mouillabilité apparait, de plus, sur la Fig. 3, en bonne corrélation avec l'effet spécifique du prétraitement au benzène, c'est-à-dire avec la différence  $Ag_a\% - Ag_b\%$ .

Cette première série d'expériences nous permet de tirer deux conclusions :

1) Les propriétés conférées au sol par la fixation de substances de propriétés connues se manifestent bien comme on pouvait le prévoir.

2) Les résultats obtenus dans certains tests de l'analyse d'agrégats sont liés aux valeurs appréciées de façon directe des deux facteurs essentiels de la stabilité.

Ainsi, et toutes choses égales par ailleurs,  $Ag_b\%$  varie en raison inverse de la mouillabilité du sol et  $Ag_a\%$  en raison directe de la cohésion.

Il est alors possible, par la comparaison des différents prétraitements, de connaître le mécanisme dominant de la stabilisation due à un traitement donné.

## ETUDE DES FERMENTATIONS

Dans le sol, les substances organiques qui assurent l'ensemble complexe de fonctions que nous avons évoquées, sont élaborées au cours de fermentations qui dépendent de nombreux facteurs (nature du métabolite, conditions du milieu) dont il est difficile d'isoler l'action dans le milieu naturel. C'est pourquoi nous avons cherché à obtenir au laboratoire des échantillons enrichis en matières organiques qui soient le produit de fermentations dirigées en ce qui concerne le métabolite de départ et les conditions dans lesquelles elles se déroulent.

### I. Fermentations à partir du glucose

Dans une première série d'essais, nous avons cherché à préciser l'influence de la substance même des agents de la fermentation.

Pour cela, nous avons mis à fermenter des échantillons d'horizon B convenablement humidifiés et enrichis en glucose, sucre qui nous paraissait peu susceptible, en lui-même ou en ses produits de dégradation, de modifier les facteurs de la stabilité.

Une série d'essais a été effectuée en présence et une autre en absence d'azote minéral. A intervalles réguliers, la teneur en carbone organique et la stabilité à l'alcool et au benzène ont été mesurées.

La Fig. 4 rassemble les résultats obtenus en présence d'azote.

On constate d'abord que l'accroissement visible de la stabilité, en début d'expérience, est liée à la disparition de la plus grande partie du carbone apporté sous forme de glucose.



Dès que la métabolisation de ce carbone diminue puis s'arrête, la stabilité décroît très rapidement au début, et au bout de 60 jours la plus grosse partie de l'effet obtenu a disparu.

D'autre part, l'examen direct sous binoculaire des échantillons en fermentation montre que l'évolution des taux  $Ag_a\%$  et  $Ag_b\%$  est liée au stade de développement des micro-organismes. Par exemple, l'accroissement de  $Ag_a\%$ , seul visible au 5<sup>ème</sup> jour, correspond à l'emballement des agrégats dans un mycelium hydrophile mais qui freine la désagrégation, au cours de l'humectation. Sous l'objectif de la loupe binoculaire, une fine goutte déposée à la surface de l'agrégat s'étale et est rapidement absorbée mais l'agrégat, bien que noyé totalement, ne se délite que très lentement par rapport au témoin. Par la suite,  $Ag_b\%$  croît lorsque la sporulation intervient en rendant le milieu peu mouillable. Une goutte déposée à la surface d'un tel agrégat conserve alors une forme arrondie jusqu'à son évaporation.

En l'absence d'azote minéral, l'évolution précédente est plus lente et plus anarchique.

Des comptages comparés de micro-organismes au 40<sup>ème</sup> jour nous ont montré que les germes étaient alors 4 fois moins nombreux et moins divers qu'en présence d'azote. Il semble y avoir succession de populations microbiennes, phénomène déjà mis en évidence par Swaby (1950).

L'action propre des agents microbiens apparaît donc à la fois très importante et fortement influencée par les conditions de milieu, ici la richesse minérale. Les facteurs favorisant la fermentation rapide favorisent " ipso facto " une action stabilisatrice intense mais de courte durée.

## II. Fermentations à partir de foin de luzerne

La même expérience a été reprise en remplaçant le glucose par une farine de foin de luzerne. Le résultat qui figure sur la Fig. 5 apparaît tout à fait comparable. Après une phase initiale où se manifestent parallèlement un accroissement rapide de stabilité et la liaison au support minéral de la plus grande part de la matière organique libre apportée, la stabilité décroît fortement d'abord, puis de moins en moins rapidement en même temps que l'évolution organique se ralentit.

Nous pouvons interpréter l'ensemble de ces faits de la façon suivante :

Dans un premier temps, jusqu'au 20<sup>ème</sup> ou 30<sup>ème</sup> jour, se place le premier cycle de développement des micro-organismes responsables de la transformation de la matière libre en matière liée, le rendement de cette transformation étant très élevé, de l'ordre de 45%, ce qui nous autorise à penser que ces matières liées ne sont pas de l'humus mais des substances préhumiques, donc transitoires. A ce stade, ce seraient principalement les corps microbiens eux-mêmes qui seraient responsables de la stabilisation.

Par la suite, cette dernière décroît sans modifications sensibles de la quantité de carbone lié, dont l'efficacité spécifique apparente semble donc de plus en plus faible au fur et à mesure que l'on arrive à des substances

proches de l'humus. On peut alors admettre que ce sont désormais les substances préhumiques elles-mêmes qui sont responsables du reliquat de stabilité.

En définitive, lorsqu'au lieu d'un sucre simple, on introduit dans le sol des matières organiques fermentescibles, mais dont les sous-produits sont susceptibles de modifier le comportement du sol vis à vis de l'eau, on conserve les grandes lignes du phénomène mais deux facteurs interviennent successivement. Ce sont d'abord les micro-organismes eux-mêmes dont l'action brutale, mais éphémère, suit très vite l'incorporation. Dans un deuxième temps, il semble se substituer à cette action celle de produits dont l'action spécifique est plus faible mais plus durable.

C'est donc dans cette deuxième phase que nous allons nous placer pour préciser le rôle de ces substances.

### III. Essais de fermentations en tubes

Nous avons, dans cette expérience, cherché à faire varier la nature du matériel végétal et les conditions d'aération de la fermentation. D'autre part, il paraissait intéressant de pouvoir juger séparément l'efficacité des produits fixés immédiatement au sol à leur point de formation et celle de substances ayant migrées. Enfin il nous fallait obtenir pour chaque combinaison des trois conditions précédentes, une large gamme de teneur en substances fixées suffisante pour permettre d'établir par voie statistique des coefficients d'efficacité.

Le dispositif expérimental est représenté dans la Fig. 6. Dans le cas des tubes aérobies, le mouvement des solutions se fait vers le bas, entraînant les substances solubles formées en aérobiose sur de l'horizon B pur. Par contre, dans le cas des tubes anaérobies, le même processus s'effectue par un mouvement ascendant des solutions. La fermentation a duré 2 mois  $\frac{1}{2}$  pour les raisons que nous avons indiquées.

En ce qui concerne l'influence de la nature des matières végétales introduites, deux aspects doivent être considérés :

— Les quantités de substances formées sont plus élevées en moyenne à partir de la luzerne, beaucoup plus riche en azote, qu'à partir de paille de blé ou d'avoine. Le degré de finesse qui distingue ces deux dernières semble n'avoir eu que peu d'importance.

**Tableau II. — Comparaison des teneurs en carbone lié (C%) moyennes suivant la nature de la matière végétale apportée**

	Témoin	Luzerne	Blé	Avoine
Produits fixés sur place —				
Aérobiose . . . . .	3,8	17,1	9,1	11,8
Anaérobiose . . . . .	3,9	16,2	7,2	6,9
Produits de transport —				
Aérobiose . . . . .	4,0	8,0	5,0	4,9
Anaérobiose . . . . .	3,9	8,7	5,2	4,8



Quant à l'efficacité spécifique des substances formées, elle s'est avérée, dans les conditions où nous avons opéré, indépendante de la nature de l'apport.

**Tableau III. — Comparaison de l'efficacité des substances issues de matières végétales différentes**  
(Produits fixés sur place)

Condition de fermentation	Matière végétale	C % lié	Ag <sub>a</sub> %	Ag <sub>b</sub> %
Anaérobiose . . . . .	luzerne blé	7,45	38	52
		7,25	40	51,4
	blé avoine	5,5	24	32,6
		5,6	28,2	33,2
Aérobiose . . . . .	luzerne blé avoine	10	56	74
		9,2	49	70,4
		9,5	55	69
Témoin sans matière organique		3,8	16	3

Le tableau IV rassemble les relations que nous avons établies entre la teneur en carbone fixée à l'horizon B et les taux d'Ag<sub>a</sub> et d'Ag<sub>b</sub>.

**Tableau IV. — Action sur la stabilité structurale de différentes substances issues de fermentations**

A. SUBSTANCES ORGANIQUES FIXÉES SUR PLACE

I. Relations Ag<sub>a</sub> % / C % lié

- Aérobiose . . . . . Ag<sub>a</sub> % = 2,66 C % + 23,6 (toutes valeurs de C %)  
 Ag<sub>a</sub> % = 2,48 C % + 24,9 (C % 7)  
 Anaérobiose . . . . . Non significatif (tous C %)  
 Ag<sub>a</sub> % = 3,2 C % + 19,8 (C % 7)

II. Relations Ag<sub>b</sub> % / C % lié

- Aérobiose . . . . . Ag<sub>b</sub> % = 98,6 e<sup>- (7/C %)</sup> ≠ Ag<sub>b</sub> % = 13 C % + a  
 Anaérobiose . . . . . Ag<sub>b</sub> % = 91,2 e<sup>- (6,1/C %)</sup> ≠ Ag<sub>b</sub> % = 17 C % + a

B. SUBSTANCES AYANT MIGRÉ

I. Relations Ag<sub>a</sub> % / C % lié

- Aérobiose . . . . . Ag<sub>a</sub> % = 3,49 C % - 6 (C % 7)  
 Anaérobiose . . . . . Non significatif

II. Relations Ag<sub>b</sub> % / C % lié

- Aérobiose . . . . . Ag<sub>b</sub> % = 2,42 C % - 6,51  
 Anaérobiose . . . . . Ag<sub>b</sub> % = 5,51 C % - 19,4

Il ressort de ces chiffres que les substances fixées n'ont augmenté la cohésion de la terre humide qu'à partir d'un seuil (voisin dans tous les cas de 7% de carbone) et que, même alors, l'accroissement de stabilité à l'alcool qui en a résulté a été très modérée: de l'ordre de 2 à 3% d'Ag<sub>a</sub> supplémentaire par unité % de carbone fixé.

L'action sur la mouillabilité a été beaucoup plus nette et s'est manifestée par des accroissements sensibles du taux d'Ag<sub>b</sub> pour des quantités très faibles de substances fixées.

Dans le cas des substances fixées sur place, cette baisse de mouillabilité a été considérable dans les deux conditions d'aération, bien que plus importante en milieu anaérobie.

Par contre, seuls les produits de transports formés en milieu anaérobie ont accru la stabilité au benzène, bien que nettement moins que pour les substances non solubles.

Le principal mécanisme de stabilisation consiste donc en une diminution de la mouillabilité du sol susceptible d'intervenir après la fixation de très faibles quantités de substances. Le fait que l'activité spécifique de ces dernières soit plus élevée lorsqu'elles se sont formées dans des conditions réductrices où l'on peut noter la formation de complexes organo-ferreux, conduit à penser que le fer peut jouer un rôle important dans ces phénomènes. Cette hypothèse se trouve d'ailleurs appuyée par différents faits expérimentaux.

Si elle était définitivement établie, elle représenterait un élément fondamental du mode d'action des matières organiques.

### **INFLUENCE DE LA TEXTURE SUR LA STABILISATION DU SOL PAR LES MATIERES ORGANIQUES**

Il nous reste à examiner dans quelles conditions les résultats que nous avons obtenus jusqu'ici en fixant diverses substances sur un même limon argileux, ceci pour faciliter les comparaisons, sont transposables à des supports minéraux de texture différente.

La Fig. 7 indique que la relation qui existe entre le taux d'agrégats stables au benzène fourni par un échantillon et sa teneur en une matière organique liée d'un type donné, est fortement influencée par la texture du matériau considéré. Plus précisément l'efficacité spécifique d'une substance est en raison inverse de la teneur en argile du support minéral auquel elle est fixée.

Certes il est souvent possible d'établir, comme de nombreux auteurs l'ont fait, des corrélations satisfaisantes entre le taux d'agrégats au benzène et la teneur en matière organique d'une série d'échantillons. Nous avons toutefois pu vérifier que l'on améliore considérablement la signification statistique des corrélations en question lorsqu'on remplace la teneur en matière organique par le rapport :

$$\frac{\text{M.O. \%}}{\text{Argile \%}}$$

De plus, nous avons pu montrer que le prétraitement au benzène permettait d'extraire de la masse de l'échantillon traité des agrégats présentant une teneur en matière organique d'autant plus élevée que la terre en question était plus argileuse.

L'ensemble de ces observations montre qu'il existe entre la texture du sol et ses possibilités de stabilisation par les matières organiques une

interaction importante dont nous devons tenir le plus grand compte dans la comparaison des résultats obtenus dans le milieu naturel.

\*

Du travail expérimental que nous venons d'exposer, on peut tirer tout d'abord une conclusion concernant les mécanismes de la dégradation structurale.

La modification expérimentale de deux facteurs principaux mis en cause par la théorie de Henin a entraîné des modifications correspondantes de stabilité. Cette théorie s'est donc trouvée confirmée.

En ce qui concerne le mécanisme propre de l'action des matières organiques, il apparaît tout d'abord l'importance des modifications de mouillabilité par rapport aux modifications de cohésion.

Lorsqu'on étudie les processus liés à l'évolution des matières organiques dans le sol, on découvre le rôle prépondérant joué par les fermentations qui sont à l'origine de l'humification.

Les agents même de la transformation interviennent les premiers. Leur action est très intense mais de courte durée.

Les produits transitoires de l'humification interviennent ensuite : leur activité spécifique reste très élevée. Elle semble indépendante de l'origine végétale des apports, mais liée aux conditions de la fermentation (répartition de l'apport, aération et richesse minérale du milieu).

Enfin, au terme de l'évolution, l'efficacité de l'humus résiduel plus faible mais beaucoup plus durable, est lui aussi fonction des conditions dans lesquelles s'effectue sa liaison au sol, mais aussi de la texture de ce dernier.

Une appréciation de la stabilisation du sol par des apports organiques doit donc être envisagée, aussi bien d'un point de vue dynamique : durée de l'effet obtenu, que d'un point de vue statique : intensité de cet effet.

\*

La confrontation, aux conditions de la pratique, des résultats dont nous venons de rappeler les grandes lignes présentait pour nous un double intérêt.

Tout d'abord, elle était le seul moyen de vérifier qu'au laboratoire nous avions bien isolé des mécanismes réellement fondamentaux et non subordonnés aux conditions particulières de l'étude.

Par ailleurs, cette transposition pouvait seule nous permettre de déboucher sur l'action technique et de retirer ainsi les bénéfiques pratiques des résultats obtenus.

Mais cette confrontation pose un double problème :

En premier lieu, dans le milieu naturel, l'application d'un traitement, si bien défini soit-il, provoque des actions très diverses. Il devient indispensable d'analyser l'effet global qui en résulte et de tenir compte des interactions entre les effets annexes et l'effet principal étudié. La méthode du profil cultural s'est révélée un moyen d'analyse précieux à ce stade du travail.

D'autre part, l'importance de la dynamique des matières organiques nous a conduit à l'étude de l'état et de l'évolution des matières organiques dans les sols cultivés.

A ce niveau, c'est la méthode de fractionnement densimétrique qui nous a permis le mieux de caractériser une situation ou son évolution.

Nous résumerons brièvement le schéma général auquel, à la suite de nombreux auteurs, nous sommes parvenus.

Les éléments qui, lorsqu'on les connaît, permettent de prévoir l'importance des divers stades de cette évolution sont :

— la masse de débris incorporés.

— leur fermentescibilité, qui commande la naissance simultanée de substances transitoires en quantités suffisantes pour que leur influence se manifeste.

— leur coefficient isohumique, qui traduit le rendement de leur transformation en humus, et qui est très variable suivant la nature de l'apport.

— enfin, le coefficient de destruction annuel de l'humus résiduel, que l'on s'accorde à situer aux environs de 1 à 2% de la masse d'humus présente.

Ces bases ayant été établies, il nous est possible de comparer les conséquences, sur la stabilité de la structure, de certaines pratiques agricoles prises à titre d'exemple.

La diversité des effets que l'on peut observer est clairement illustrée par le tableau V.

**Tableau V. — Action comparée d'apports de fumier et du repos du sol sous prairie**

	Témoin	Fumier	Prairie (perenne 3 ans)
Ag <sub>b</sub>	100	216	300
Matière organique totale	100	250	116

**Stabilité (Ag<sub>b</sub> %) de divers échantillons avant et après 1 mois de fermentation à l'étuve**

Chaque échantillon avant fermentation	Horizon B + acides humiques	Fumier	Horizon B + luzerne (2 mois)
100	95	85	35
	Prairie (3 ans ray-grass anglais)		Horizon B + glucose (45 jours)
	51		22

Dans la première partie, il apparaît que si l'on fait plus que doubler la teneur en matière organique d'un sol de limon par des apports convenables

de fumier, on double son taux d'Ag<sub>b</sub> alors que ce taux triple après trois ans de repos sous prairie à base de ray-grass anglais pour une élévation très modérée du taux de matière organique. L'activité spécifique des substances élaborées sous prairie est donc beaucoup plus forte que celle des substances qui se forment dans le sol, à la suite d'incorporation de fumier.

Mais la deuxième partie du tableau, dans laquelle nous avons comparé ce qu'il restait de la stabilité de divers échantillons après 1 mois de fermentation en présence d'azote minéral, indique clairement que l'amélioration due au fumier est, comme celle résultant d'un apport d'acides humiques, beaucoup plus stable que celle provenant d'une prairie, qui diminue de moitié au cours de la fermentation. Les résultats sous prairie peuvent être rapprochés des résultats " luzerne ". Quant à l'échantillon " glucose " il est encore plus extrême et voit sa stabilité diminuée au 1/5.

L'interprétation de ces résultats peut s'effectuer assez commodément à la lumière des données que nous avons recueillies lors de l'étude des modèles de laboratoire.

Le fumier, du moins lorsqu'il est " bien fait " comme l'on dit, est un amendement organique évolué. Sa fermentescibilité est donc fortement diminuée. Son évolution dans le sol ne donne pas lieu à des proliférations abondantes de micro-organismes susceptibles de stabiliser immédiatement la structure et de fournir à un moment donné une quantité de ces substances préhumiques, dont nous avons noté la forte activité spécifique, qui soit suffisante pour que leur action se manifeste. Cela est d'autant plus vrai que le fumier est généralement mal mélangé lors de son incorporation et que nous avons noté l'action prépondérante des substances fixées à leur point de formation.

Par contre son rendement en humus stable est élevé et l'action structurale du fumier sera donc modérée mais relativement durable. A cet aspect de son action sur la stabilité s'ajoutent de nombreux avantages : participation à la fertilisation azotée et minérale, faibles risques d'accidents culturels consécutifs à des fermentations réductrices " explosives ", facilité technologique d'enfouissement.

C'est plus à notre avis à cet ensemble d'actions favorables ainsi qu'à l'absence d'effets annexes nuisibles aux cultures que le fumier doit l'excellente réputation dont il jouit auprès de la plupart des agriculteurs.

A l'opposé, l'action des engrais verts très fermentescibles, mais au rendement en humus très faible ou nul peut-être rapprochée de celle du glucose dans notre modèle correspondant. Les observations sur les engrais verts dont on dispose sont souvent contradictoires et s'expliquent justement par la fugacité de leur action et sa dépendance de l'intimité du mélange des matières fraîches à la masse du sol réalisée lors de l'enfouissement. L'étude détaillée des données bibliographiques et les résultats d'une expérience en plein champ, que nous venons de mener à son terme, confirment dans l'ensemble cette interprétation : on peut donc attribuer aux engrais verts une action directe sur la stabilité qui peut être forte, relativement à la



masse enfouie, mais qui, en tout état de cause, est toujours éphémère et non cumulative.

Intermédiaire entre celle du fumier et celle des engrais verts, l'action du repos du sol sous prairie temporaire est à la fois plus complète et plus complexe.

Si l'on examine l'enrichissement en matières organiques d'un sol supportant depuis au moins 2 ou 3 ans une prairie temporaire à base de graminées. On constate :

- 1) que l'enrichissement porte sur les deux formes libre et liée.
- 2) que l'accroissement du stock de matières libres dans la couche arable, accroissement essentiellement dû aux racines des graminées, peut atteindre 10 à 20 tonnes de matière sèche/ha, ou parfois plus pour des prairies de longue durée.
- 3) que les matières liées supplémentaires, que l'on trouve surtout sous les graminées à enracinement annuel, ne peuvent être assimilées dans leur totalité à de l'humus stable ; en effet, une partie d'entre elles disparaît rapidement après le retournement de la prairie.

Parallèlement, on constate que la stabilité structurale est sensiblement améliorée et que c'est l'indice  $S$  qui traduit le mieux cette amélioration par suite d'un accroissement considérable du taux d' $Ag_b$ .

Par ailleurs, si l'on cherche à établir une relation entre la stabilité au benzène et la teneur en matières organiques libres ou en matières organiques liées de sols de même texture sous différentes prairies, on constate que les régressions linéaires les plus significatives et dont les coefficients de pente sont les plus forts sont celles qui relient  $Ag_b\%$  non pas au taux de carbone lié mais à celui de carbone libre, ce qui peut paraître surprenant. D'autre part, le coefficient de ces régressions est plus élevé pour les prairies à enracinement à prédominance annuelle (pour le ray-grass anglais  $Ag_b\% = 0,47$  (poids de racines  $\%$ ) - 2,55) que pour les prairies à racines en majorité perennes (pour le Dactyle  $Ag_b\% = (0,23$  poids de racines  $\%$ ) - 0,05).

L'interprétation de ces différentes données peut alors être la suivante :

Une partie importante de l'amélioration de stabilité structurale sous prairie est due à l'habillage progressif des particules de terre par des substances provenant de la décomposition des racines au fur et à mesure qu'elles meurent. Comme les substances préhumiques se forment dans les couches du sol où il y a des racines, ceci explique les régressions dont nous venons de parler. Ceci explique aussi la stabilisation plus importante sous les graminées à enracinement annuel où ces substances sont relativement plus abondantes.

L'action très énergique des substances fixées sur place sur la mouillabilité du sol, que nous avons notée plus haut, explique qu'à de très faibles élévations de matières liées correspondent de très forts accroissements de stabilité au benzène.

Cette interprétation est confirmée par les observations consécutives au retournement des prairies.

La Fig. 8 montre qu'une partie importante de la stabilisation disparaît dans le cas d'un ray-grass anglais au cours de la première période chaude qui suit la remise en culture.

Mais il subsiste un reliquat stable qui correspond cette fois à un enrichissement en humus du sol sous prairie.

Ainsi donc l'action des prairies sur la stabilité de la structure du sol peut être résumée ainsi :

Indépendamment de leur action directe sur la structure, les racines de graminées provoquent dans le sol deux types d'actions.

Avant retournement et au cours de la première année de remise en culture, le rôle principal est joué par les produits transitoires divers, micro-organismes ou substances préhumiques, qui sont issus de la décomposition progressive des racines au fur et à mesure qu'elles meurent.

Cette action est étroitement liée dans son mécanisme et dans sa localisation à la répartition dans le sol du système racinaire des graminées.

Par la suite, il subsiste à long terme une amélioration résiduelle liée à l'élaboration d'humus stable à partir des quantités considérables de matière organique que constituent les racines et les bases de tiges.

On voit assez clairement que l'amélioration du sol par les prairies est une potentialité qui ne pourra être valorisée qu'en assurant au système racinaire des graminées qui les composent la possibilité de se développer convenablement.

C'est ainsi que nous avons pu montrer que le choix de l'espèce, la préparation du sol pour l'installation de la prairie, sa fertilisation et les conditions de son exploitation, en modifiant l'enracinement, modifiaient par là même l'intensité et la répartition des augmentations de stabilité sous prairie.

Enfin les conditions de remise en culture (travail du sol et fertilisation, culture de défriche), interviennent de façon très sensible sur la valorisation, agronomique cette fois, de l'effet obtenu.

### CONCLUSION

Nous allons maintenant tenter de faire apparaître d'une manière schématique l'essentiel des résultats obtenus (Fig. 9).

Il apparaît que les trois types de stabilisation correspondant aux phases successives :

- développement des agents microbiens,
- formation de produits préhumiques,
- élaboration d'humus stable,

que nous avons mis en évidence au cours des expériences de laboratoire, se retrouvent dans le milieu naturel, dans la terre cultivée. Leur importance relative y varie également, suivant la nature et la masse des matières végétales de départ, les conditions de leur incorporation et celles de leur fermentation.

Certains apports très fermentescibles, et dont le rendement humique est faible ou nul (engrais verts), provoquent des actions qui peuvent être

intenses mais qui sont de courtes durées, correspondant seulement à la première phase d'évolution.

D'autres, tels que les fumiers très décomposés, n'ont au contraire d'effet sensible qu'à long terme, en participant au maintien d'un niveau de base de la stabilité lié au taux d'humus dans le sol.

Les résidus de récoltes participent eux aussi à ce maintien d'un niveau de base, mais à des degrés variables suivant les cultures et les rendements.

Enfin les racines de prairies temporaires qui, par leur répartition dans le sol, assurent des conditions optima à l'efficacité des substances pré-humiques et qui, par leur masse, constituent une restitution importante, entraînent successivement les deux types d'action précédents, avec des modalités dépendant de leur composition botanique et de leur exploitation.

Il s'ensuit qu'une "politique" des matières organiques doit, pour être cohérente, se situer à deux niveaux :

Tout d'abord, la conservation du taux d'humus stable dépend du choix du système de culture, de l'assolement et aussi de l'ensemble des techniques qui permettent d'augmenter, par une production plus abondante, les résidus de récolte correspondants.

Mais il existe aussi un autre point de vue lié à la dynamique des phénomènes et qui consiste à obtenir une stabilisation supplémentaire, en valorisant au maximum les substances transitoires très actives qui se forment au cours de la décomposition dans le sol de toutes les matières végétales fermentescibles.

La prise en considération de ces deux aspects de ce que l'on appelle souvent le "problème de l'humus" met en lumière le rôle que jouent, dans l'élaboration de solutions, presque tous les éléments qui définissent une agriculture.

Enfin, le dernier enseignement que nous avons retiré de cette étude est d'ordre méthodologique.

Nous pensons, en effet, avoir montré que l'interprétation de nombreux phénomènes agronomiques ne peut se faire qu'à partir d'une analyse effectuée à l'aide de modèles.

La difficulté consiste alors à vérifier si les expériences de laboratoire que constituent ces modèles sont bien représentatives.

C'est la convergence des conclusions auxquelles on aboutit à partir de situations très variées qui permet de dire si l'analyse a bien porté sur des aspects fondamentaux des phénomènes.

Il devient alors possible, réciproquement, d'utiliser les règles découlant de l'étude des modèles pour raisonner les techniques culturales et pour en apprécier les effets.

## BIBLIOGRAPHIE

- HENIN, S. (1938). Etude physicochimique de la stabilité structurale des terres. Thèse Paris.  
HENIN, S., et TURC, L. (1949). Essai de fractionnement des matières organiques du sol. *C.R. Ac. Agr.*, 35, 41-43.  
ANNE, P. (1945). Dosage du carbone organique du sol. *An. Agr. Série A*, p. 165.  
SWABY, R. J. (1950). Influence de l'humus sur l'agrégation du sol. *J. Soil Sc.*, I, 182-195.

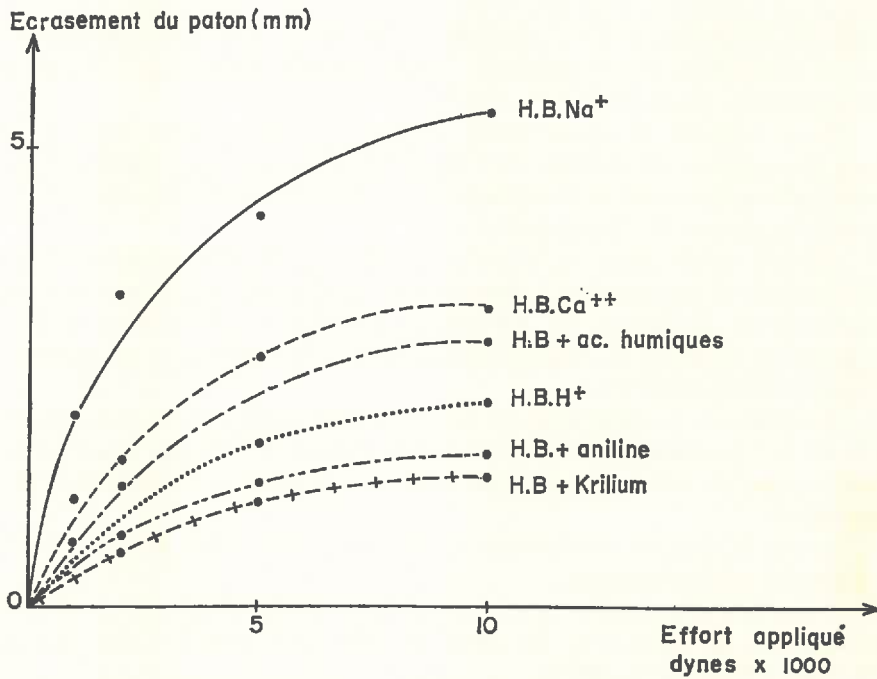


FIG. 1.—Appréciation de la cohésion à l'état humide de l'horizon B différemment traité.  
 FIG. 1.—Evaluation of cohesion of the differently treated moist B horizon.

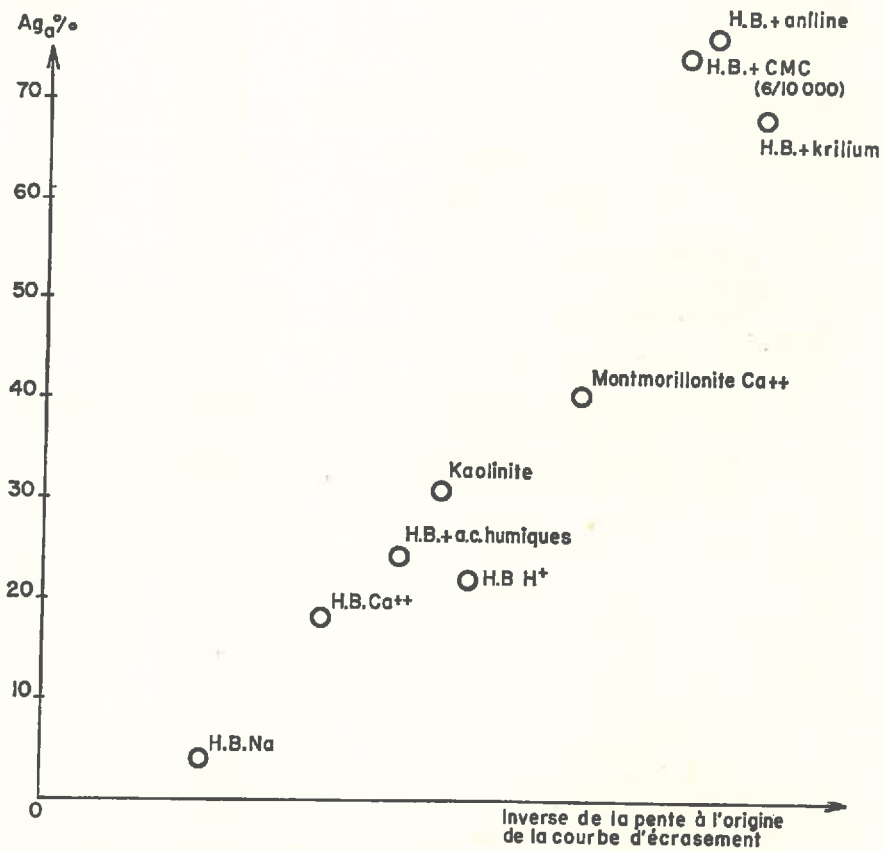


FIG. 2.—Relation entre la cohésion de la terre humide et le taux d'agrégats stables après prétraitement à l'alcool éthylique.

FIG. 2.—Relationship between the cohesion of moist soil and percentage of stable aggregates after pre-treatment with ethyl alcohol.



Ascension capillaire  
en lmin.  
(cm)

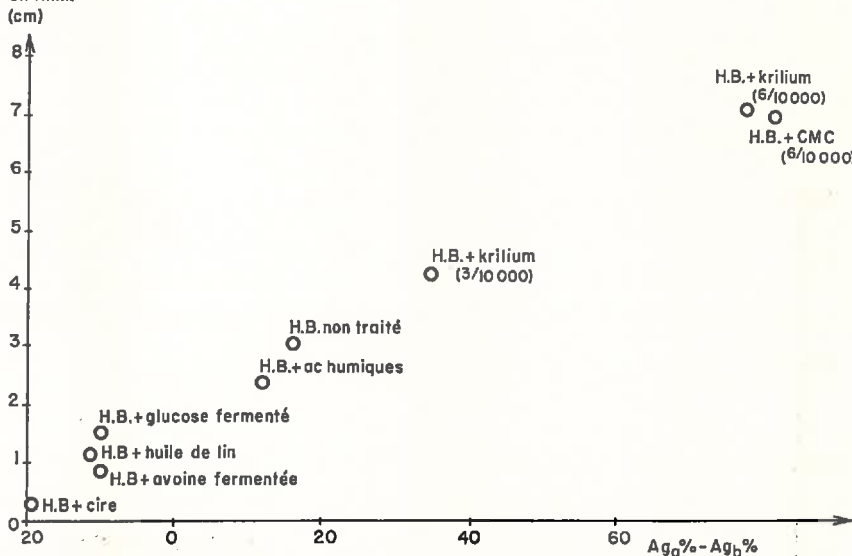


FIG. 3.—Relation entre la mouillabilité du sol (vitesse initiale d'ascension capillaire) et l'effet spécifique du prétraitement au benzène ( $Ag_a\%$  —  $Ag_b\%$ ).

FIG. 3.—Relationship between the wettability of soil (initial rate of capillary rise) and specific effect of benzene pre-treatment ( $Ag_a\%$  —  $Ag_b\%$ ).

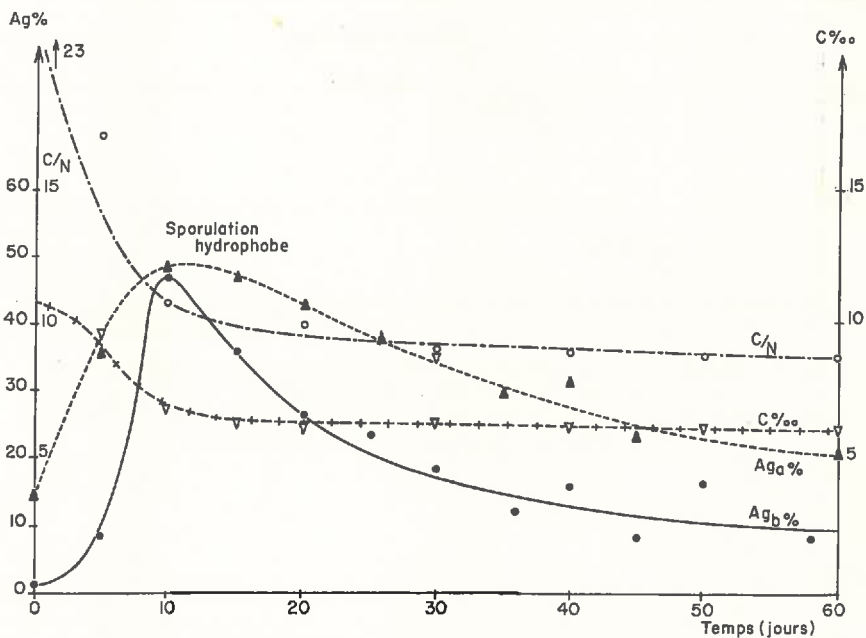


FIG. 4.—Evolution d'un sol au cours de la fermentation du glucose en présence d'azote nitrique.

FIG. 4.—Soil development during glucose fermentation in the presence of nitric nitrogen.

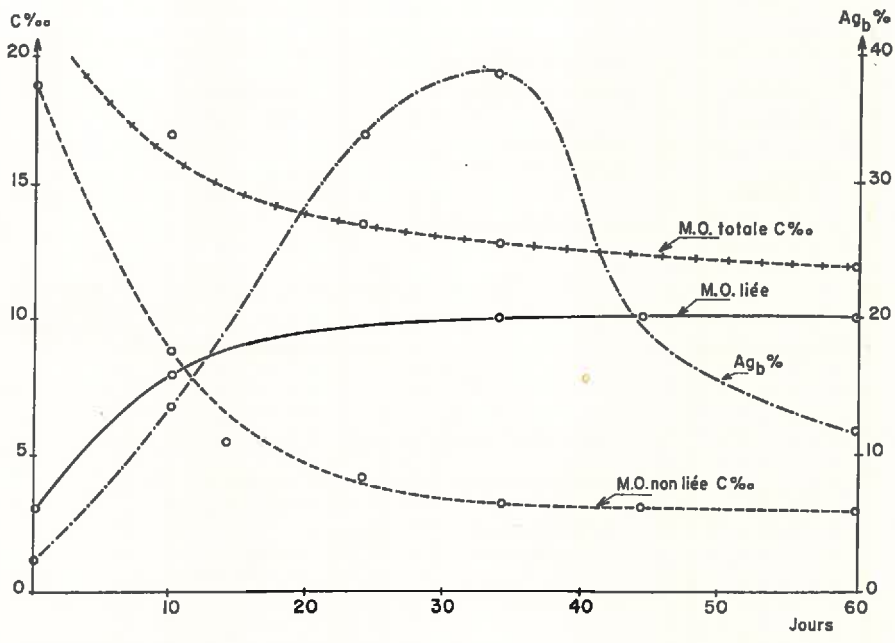
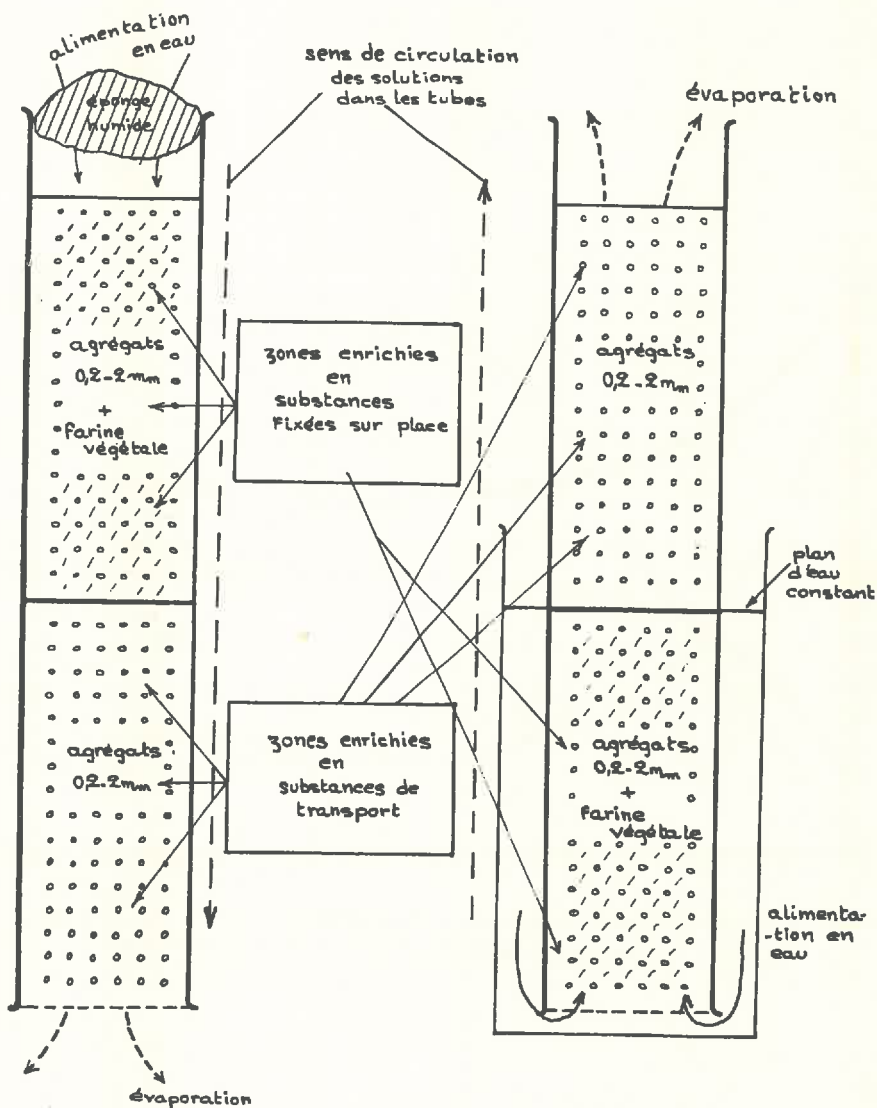


FIG. 5.—Evolution d'un sol au cours de la fermentation de farine de foin de luzerne.  
 FIG. 5.—Soil development during lucerne hay meal fermentation.



## Aérobie

## Anaérobie

FIG. 6.—Schéma du dispositif expérimental pour l'étude de la stabilisation par les substances préhumiques.

FIG. 6.—Diagram of experimental apparatus for the study of stabilisation by prehumic substances.

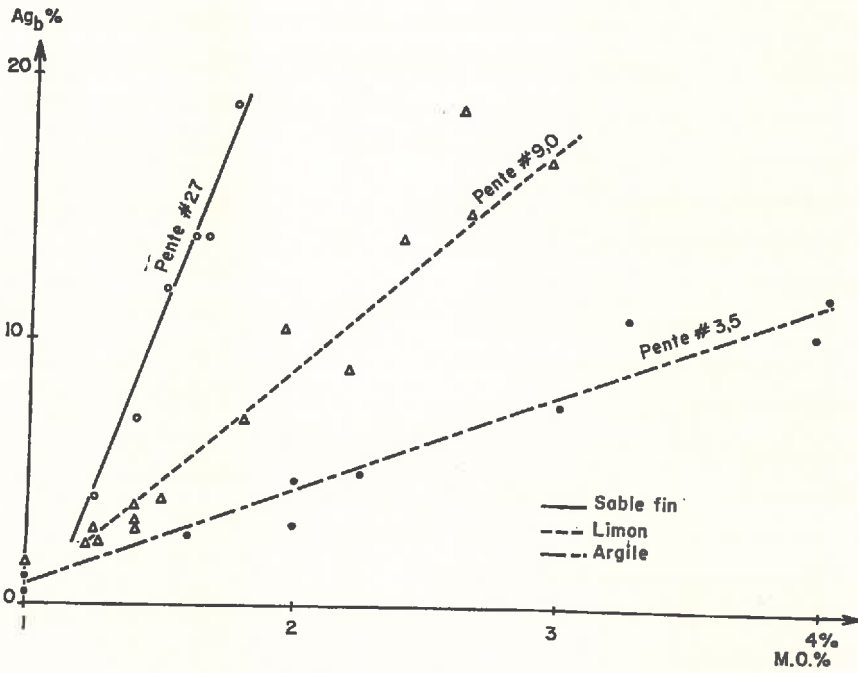


FIG. 7.—Allure de la stabilisation par la matière organique de 3 sols de texture différente.

FIG. 7.—Rate of stabilisation by organic matter of three soils of different texture.

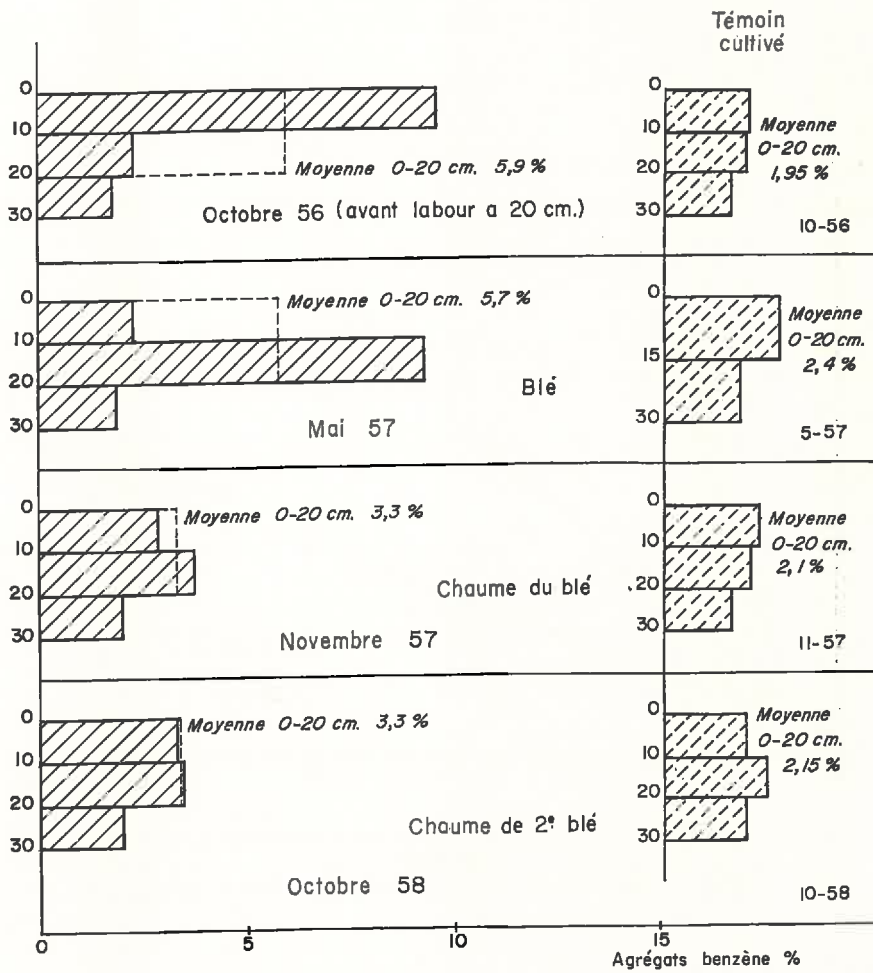


FIG. 8.—Evolution du sol après retournement d'une prairie de ray grass anglais de 3 ans.  
 FIG. 8.—Soil development after turning-under of a three-year-old perennial ryegrass meadow.



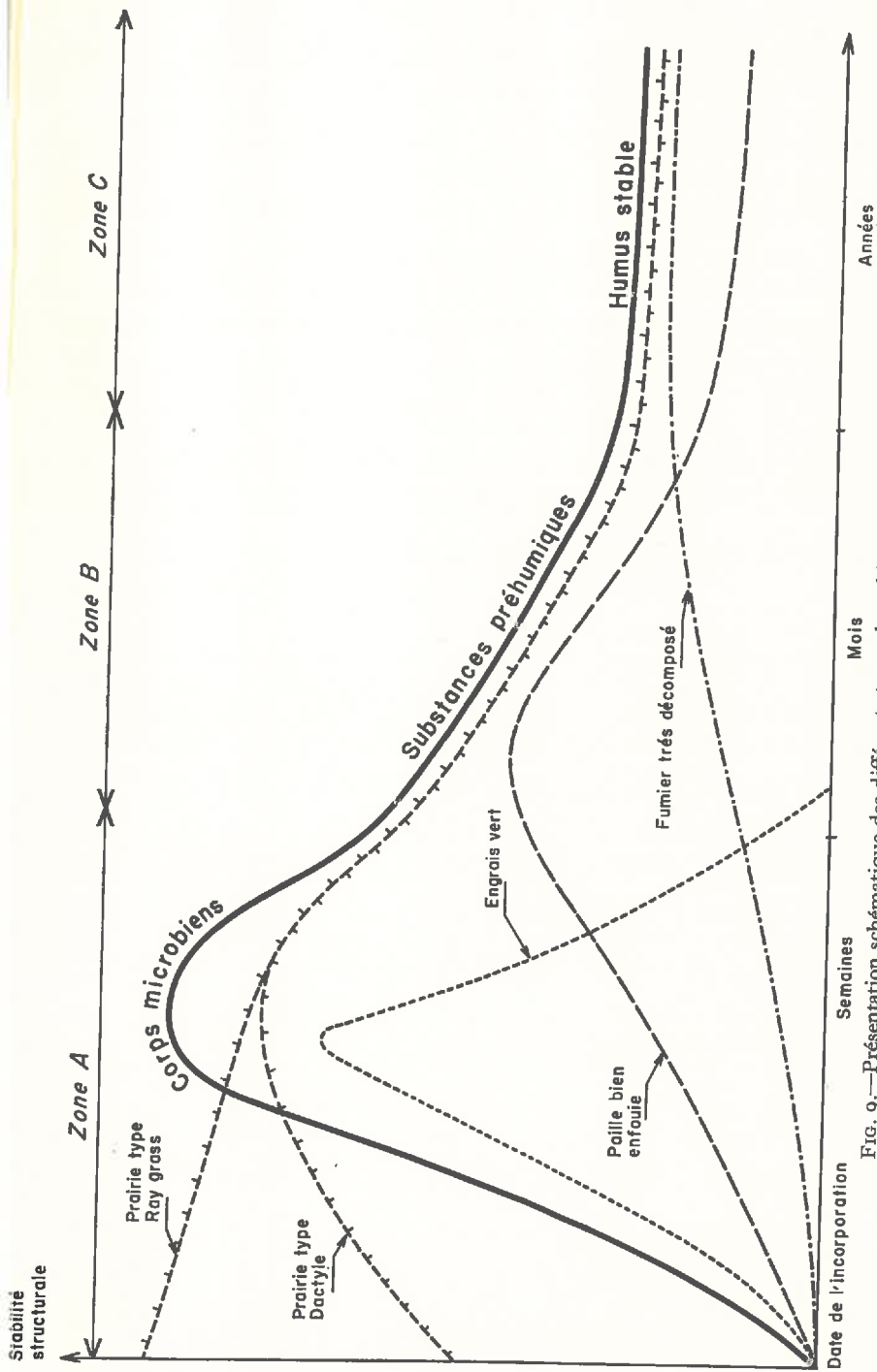


FIG. 9.—Présentation schématique des différents types de stabilisation par les matières organiques.  
 FIG. 9.—Diagrammatic illustration of the various types of stabilisation by organic substances.

