



HAL
open science

**Action des matieres organiques sur la stabilite
structurale de sols : 1ere these. Le concept de sol et son
evolution : 2eme these**

Gwendal Monnier

► **To cite this version:**

Gwendal Monnier. Action des matieres organiques sur la stabilite structurale de sols : 1ere these. Le concept de sol et son evolution : 2eme these. Sciences du Vivant [q-bio]. Université de Paris, 1965. Français. NNT: . tel-02859676

HAL Id: tel-02859676

<https://hal.inrae.fr/tel-02859676>

Submitted on 8 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.

N° D'ORDRE :
926

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS



POUR OBTENIR
LE TITRE DE DOCTEUR-INGÉNIEUR

PAR
Gérard MONNIER

1^{re} THÈSE

**ACTION DES MATIÈRES ORGANIQUES
SUR LA STABILITÉ STRUCTURALE DES SOLS**

2^e THÈSE

Proposition donnée par la Faculté
« Le concept de sol et son évolution »

Soutenue le 20 mars 1965, devant la Commission d'Examen :

M. CHOUARD *Président*
MM. HÉNIN } *Examineurs*
LEMÉE }

INSTITUT DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149, rue de Grenelle - Paris-VII^e

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

PROFESSEURS :

BRELOT	T	Analyse supérieure.
PRENANT	T	Anatomie et Histologie comparée.
GRASSE	T	Évolution des Êtres organisés.
PRÉVOST	T	Chimie organique.
WYART	T	Minéralogie et Cristallographie.
TEISSIER	T	Zoologie.
MANGENOT	T	Biologie végétale (Orsay).
AUGER	T	Physique quantique et Relativité.
MONNIER	T	Physiologie générale.
PIVETEAU	T	Paléontologie.
ROCARD	T	Physique (E. N. S.).
CARTAN	T	Mathématiques (E. N. S.).
LAFFITTE	T	Chimie générale.
N.....	T	Géométrie supérieure.
COULOMB	T	Physique du Globe.
M ^{lle} COUSIN	T	Biologie animale (SPCN).
CHRÉTIEN	T	Chimie minérale.
BOQUET	T	Zoologie.
KASTLER	T	Physique (E. N. S.).
EPHRUSSI	T	Génétique.
RIVIÈRE	T	Géologie (SPCN) et Sédimentologie (Orsay).
GAUTHERET	T	Biologie végétale (PCB).
LUCAS R.	T	Recherches physiques.
THOMAS A.	T	Biologie cellulaire.
ARNULF	T	Optique appliquée.
MORAND	T	Physique Enseignement.
SOLEILLET	T	Physique (PCB).
FORTIER	T	Mécanique expérimentale des Fluides.
DRACH	T	Zoologie.
QUENEY	T	Météorologie et Dynamique atmosphérique.
GALLIEN	T	Embryologie.
BICHORN	T	Botanique.
DE CUGNAC	T	Biologie végétale (SPCN).
M ^{lle} CAUCHOIS	T	Chimie physique.
CHAMPETIER	T	Chimie macromoléculaire.
CUVILLIER	T	Micropaléontologie.
JUNG	T	Géologie.
TRILLAT	T	Microscopie et Diffraction électronique.
WIEMANN	T	Chimie organique et structurale.
JACQUINOT	T	Spectroscopie et Physique céleste (Orsay).
VASSY	T	Physique de l'Atmosphère.
DESTOUCHES	T	Théories physiques.
AMEL	T	Chimie générale.
HOCART	T	Minéralogie et Cristallographie.
J. P. MATHIEU	T	Physique optique.
COUTEAUX	T	Cytologie.
MAY	T	Zoologie.
CHOQUET	T	Théorie des fonctions et Topologie.
FELDMANN	T	Biologie végétale marine.
GUINIER	T	Physique des Solides (Orsay).
JOST	T	Physiologie comparée.
FORTET	T	Calcul des Probabilités et Physique mathématiques
SCHWARTZ	T	Calcul différentiel et intégral.
CHOUARD	T	Physiologie végétale.
MALAVARD	T	Aviation (technique aéronautique).
NORMANT	T	Synthèse organique.
BÉNARD	T	Chimie minérale.
BUVAT	T	Botanique (E. N. S.).
DUGUÉ	T	Statistiques mathématiques.
SOULAIRAC	T	Psychophysiologie.
ULRICH	T	Physiologie végétale appliquée.
MARÉCHIAL	T	Optique théorique et appliquée.
KIRRMANN	T	Théories chimiques.
CHADEFAUD	T	Botanique.
M ^{lle} LE BRETON	T	Physiologie de la Nutrition.
LELONG	T	Application de l'Analyse à la Géométrie.

Doyen M. ZAMANSKY.

THELLIER	T	Physique du Globe.
L'HÉRITIER	T	Biologie générale (Orsay).
GRIVET	T	Radioélectricité (Orsay).
PONCIN	T	Mécanique générale.
DUBREIL	T	Arithmétique et Théorie des Nombres.
QUELET	T	Chimie organique.
CAGNIARD	T	Géophysique appliquée.
LENNUIER	T	Physique (MGP).
RIZET	T	Génétique (Orsay).
ROUTHIER	T	Géologie appliquée.
M ^{me} TONNELAT	T	Physique théorique.
DIXMIER	T	Mathématiques (MPC).
SOUCHAY	T	Chimie générale.
AIGRAIN	T	Électrotechnique générale.
BRUSSET	T	Chimie systématique.
M. LÉVY	T	Physique théorique des hautes Énergies (Orsay).
M ^{me} CHAIX	T	Chimie biologique.
M ^{me} HUREL-PY	T	Biologie végétale (PCB).
PANNETIER	T	Chimie générale.
BRUN	T	Mécanique des Fluides I.
LEDERER	T	Chimie biologique (Orsay).
M ^{me} DUBREIL	T	Mathém. (Agrégation).
M ^{me} LELONG	T	Mathém. II (E. N. S.).
BELLAIR	T	Géologie (SPCN).
COTTE	T	Physique. Électricité.
DUBOIS J. E.	T	Chimie organique.
LAMOTTE	T	Zoologie (E. N. S.).
MICHEL A.	T	Chimie minérale (Orsay).
OLMER	T	Énergétique générale.
ROUAULT	T	Électricité (Orsay).
GAUTHIER	T	Mécanique appliquée.
BARCHEWITZ	T	Chimie physique.
BROSSEL	T	Physique atomique.
BUSER	T	Physiologie comparée.
CAMUS	T	Physiologie végétale.
CASTAING	T	Physique II Thermo, (Orsay).
CURIEN	T	Minéralogie et Cristallographie.
MOYSE	T	Physiologie végét. (Orsay).
M ^{me} CHARNIAUX-COTTON	T	Évolution des Êtres organisés.
POSSOMPES	T	Zoologie.
PULLMANN	T	Chimie quantique.
TEILLAC	T	Physique nucléaire et radio-activité (Orsay).
TONNELAT	T	Biologie Physico-chimique (Orsay).
VILLE	T	Économétrie.
WILLEMART	T	Chimie (PCB).
DODE	T	Chimie (Orsay).
FREYMANN	T	Recherches physiques.
GUINOCHE	T	Biologie végétale (SPCN) (Orsay).
DEVILLERS	T	Anatomie et Histologie comparée.
EHRESMANN	T	Topologie algébrique.
FRANCON	T	Physique (SPCN).
GLANGEAUD	T	Géographie physique et Géologie dynamique.
DODEMENT	T	Mathématiques (MGP).
PISOT	T	Technique Mathématiques de la Physique.
ROCH	T	Géologie.
SCHATZMANN	T	Astrophysique.
TERMIER	T	Géologie générale.
ZAMANSKY	T	Mathématiques générales.
LUCAS	T	Géologie.
ALLARD	T	Chimie physique.
BERTHELOT	T	Physique des Particules fondamentales (Orsay).
BRICARD	T	Météorologie et Physique de l'Atmosphère.
M ^{me} ALBE FESSARD	T	Psychophysiologie.
FRIEDEL	T	Physique des Solides (Orsay).
L. JULIA	T	Études des Moléculaires complexes.
LENDER	T	Biologie animale (SPCN) (Orsay).
MAGAT	T	Physico-Chimie des Radioéléments.
M ^{lle} QUINTIN	T	Électrochimie

MONOD	T	Chimie du Métabolisme.	M ^{lle} FOURCROY	Biologie végétale (SPCN).	
BENOIT	T	Physiol. animale (Orsay).	M ^{me} CHOQUET-BRU-	Mécanique analytique et	
DE POSSEL	T	Analyse numérique.	HAT	Mécanique céleste.	
CHARLOT	T	Chimie analytique.	M ^{lle} VEIL	T	Physiologie générale.
LEMEÉ	T	Écologie végétale (Orsay).	LWOFF	T	Microbiologie.
GUÉRIN	T	Chimie (MPC) (Orsay).	SIESTRUNCK	T	Mécanique physique et ex-
GATELET	T	Chimie (PCB).			périmentale.
JEAN	T	Physique nucléaire (Orsay).	NÉRON	T	Mathématiques (MPC)
MATTLER	T	Physique (SPCN).			(Orsay).
BERGEBARD	T	Zoologie (Orsay).	M ^{me} PECKERWIMEL ..	T	Astrophysique.
BERTEIN	T	Électronique (Orsay).	BALKANSKY	T	Physique (MPC).
BOUSSIÈRES	T	Radiochimie.	LE CORRE	T	Électricité
M ^{me} COUTURE	T	Thermodynamique et Mé-	DELGROIX	T	Physique théorique (Orsay).
		canique physique.	GOURDIN	T	Physique théorique des
ELLENBERGER	T	Géologie des grandes Ré-			hautes Énergies (Orsay).
		gions du Globe (Orsay).	LEHMANN	T	Physique expérimentale des
FRANC	T	Biologie animale (PCB).			hautes Énergies.
SCHNELL	T	Botanique tropicale.	NATAF	T	Physique nucléaire et Ra-
STOLKOWSKI	T	Physiologie végétale.			dioactivité (Orsay).
ACHER	T	Chimie biologique	ÉCHALIER		Biologie animale (PCB).
BAUDOIN	T	Biologie animale (PCB).	BARRAUD		Physiologie cellulaire.
BLAUMONT	T	Biologie animale (SPCN).	LIORÉT		Physiologie végétale (Orsay)
BEAUMONT	T	Géophysique ionosphère.	DARS		Géologie structurale et géo-
BOUREAU	T	Botanique.			logie appliquée.
CURIE D.	T	Physique (MGP).	GAMEFORT	T	Botanique (Agréation).
DURAND-DELGA ..	T	Géologie.	VICHNIEWSKY	T	Mécanique industrielle.
FRÉON	T	Chimie organique (Orsay).	BLAQUIÈRE		Électronique (Orsay).
ROLLET	T	Chimie minérale.	ARNOUS	T	Physique théorique.
M ^{de} JOSIEN	T	Chimie (SPCN).	CADIOT		Chimie organique (E. N.
CHEVALLEY	T	Géométrie algébrique et			S. C. P.).
		Théorie des Groupes.	RIGAUDY		Chimie (SPCN).
ARNOULT	T	Électronique (Orsay).	COLLONGUES		Chimie (CPEM).
CHAPELLE	T	Physique I (Orsay).	TALBOT		Génie chimique.
DELANGÉ	T	Mathématiques I (Orsay).	TATIBOUET	T	Chimie (CSU Orléans).
DENY	T	Mathématiques générales	MALLIAVIN	T	Mathématiques propéd.
		(Orsay).			(Orsay).
GERMAIN	T	Mécanique théorique des	GAUDEMAR		Chimie propédeutique.
		Fluides.	PEREZ Y JORBA		Physique expérimentale des
LACOMBE	T	Métallurgie des Métaux nu-			hautes Énergies (Orsay).
		cléaires (Orsay)	DAVID	T	Chimie (Agréation Orsay).
BROCHARD	T	Physique (PCB) (Orsay).	BROUSSE	T	Mécanique théorique.
CABANNES	T	Mécanique générale.	ROSCHE	T	Astronomie.
LESTEUR	T	Mathématiques I (Orsay).	GUY	T	Physique expérimentale.
MAZET	T	Mécanique générale (Orsay).	LAZARD		Mathématiques (MPC).
CAIRE		Géographie physique et	MOREL Pierre		Physique (MPC).
		Géologie dynamique.	MAITTE	T	Chimie (PCB).
COMOLET	T	Mécanique des Fluides.	MEYER		Physique propédeutique.
CORABŒUF	T	Physiologie animale (Orsay)	NICOLAS		Géologie appliquée
DELLOUE	T	Physique de l'Exosphère.	PANIGEL		Biologie générale.
GORENFLOT		Botanique II (Orsay).	RAVIER		Pétrographie.
HOUILLOIN		Biologie animale (PCB).	ROSEAU	T	Mécanique théorique des
JULLIEN J.		Chimie (SPCN) (Orsay).			Fluides.
MALGRANGE	T	Technique mathématiques	ROUBINE		Électronique.
		de la Physique (Orsay).	SILBER	T	Chimie (PCB).
OLIVIER	T	Anthropologie.	UEBERSFELD	T	Électronique.
NOZERAN	T	Botanique II (Orsay).	YVON	T	Théories physiques.
BLANC-LAPIERRET ..	T	Physique (E. N. S.) (Orsay).	HERVÉ	T	Mathématiques.
CHEVAUGEON	T	Botanique (Orsay).	JANCOVICI		Physique atomique (Orsay).
KAHANE	T	Mathématiques (Orsay).	FALK-VAIRANT		Physique nucléaire (Orsay).
SAMUEL	T	Mathématiques (E. N. S.)	FÉTIZON		Chimie propédeutique (Or-
		féminines.			say).
KOURGANOFF	T	Astronomie (Orsay).	CERF		Mathématiques (Orsay).
THIRY	T	Mécanique céleste.	ARSAC	T	Programmation.
ABELES		Physique (SPCN).	LEFEBVRE		Chimie (MPC).
AMAT	T	Physique (PCB).	CHAPEVILLE		Biochimie.
AUBOIN	T	Géologie.	BENOIT		Physique (CPEM).
M ^{me} BENOIT-GUEU-	T	Physique nucléaire et Ra-	RIO		Chimie (CPEM).
TAL		dioactivité (Orsay).	JAUZÉIN		Géologie (E. N. S.).
BOUGIS		Biologie marine Ville-	PRÉVOST G.		BV (CPEM).
		franche/Mer.	FAVARD P.		BA (CPEM).
BRUHAT	T	Mathématiques (MPC).	VILKAS		Chimie (CPEM).
BRUNN	T	Géologie historique (Orsay).	M ^{lle} FIGINI		Chimie (CPEM).
CHABBAL	T	Physique (MGP) (Orsay).	LEQUEUX		Astronomie.
DEHEUVELS	T	Mathématiques propéd.	COHEN TANNOUNDI ..		Physique (MPC).
		(Orsay).	TAVENNIER		Physique (CPEM).
D'ESPAGNAT	T	Physique théorique (Orsay).	M ^{me} ROIZEN		Physique (CPEM).
FURON	T	Géologie (SPCN).	DURAND M.		BA (SPCM).
M ^{me} GANS	T	Génétique.	PASCAUD		Physiologie.
GENEVES		Biologie végétale (PCB).	M ^{me} PETIT		BA (CPEM).
GUILBERT		Physique (CUS Orléans).	BROUSSE		Géologie (Orsay).
HUPE	T	Pétrographie	GAGNAC		Physique Agrégation (Or-
HOLLANDE	T	Biologie générale.			say).
LIONS	T	Analyse numérique.	LEBERRE		Zoologie (Orsay).
HELLER	T	Physiologie végétale.	SCHOFFER		Microbiologie (Orsay).
TORTRAT	T	Calcul des Probabilités.	DE GENNES		Physique des solides (Orsay)
CALLEUX	T	Géologie (SPCN).	RIOU		Physique nucléaire expé-
MAGNAN	T	Physique, Électricité.			riimentale (Orsay).
DAUDEL	T	Mécanique ondulatoire ap-	CLAUSER		Chimie biologique (Orsay).
		pliquée à la Chimie théo-	CHEVALIER		Physiologie animale (Orsay)
		rique et à la Physique			
		nucléaire.			

Le secrétaire général
R. POULLAIN

**ACTION DES MATIÈRES ORGANIQUES SUR
LA STABILITÉ STRUCTURALE DES SOLS**

SOMMAIRE

AVANT PROPOS

INTRODUCTION GÉNÉRALE

PREMIÈRE PARTIE

ÉTUDE DES MODES D'ACTION DES MATIÈRES ORGANIQUES SUR LA STABILITÉ STRUCTURALE DU SOL.

INTRODUCTION

CHAPITRE PREMIER : LES MÉTHODES D'ÉTUDE.

- A. Appréciation de la stabilité structurale.
- B. Caractérisation des matières organiques.
 - 1. Fractionnement densimétrique.
 - 2. Dosage du carbone organique.
 - 3. Dosage de l'azote organique.
- C. Caractérisation du support minéral.

CHAPITRE II : ÉTUDE DE LA COHÉSION ET DE LA MOUILLABILITÉ DU SOL.

- 1. Définition et mesure de la cohésion.
- 2. Définition et mesure de la mouillabilité.

CHAPITRE III : ÉTUDE DES « ÉCHANTILLONS MODÈLES ».

- 1. Préparation des échantillons.
- 2. Résultats et discussion.

CHAPITRE IV : PHÉNOMÈNES DE FERMENTATION.

- A. Action des agents de la fermentation.
 - 1. Description de l'expérience.
 - 2. Résultats.
 - 3. Relations entre les variations de stabilité et le développement des micro-organismes
- B. Stabilisation due à la fermentation de produits végétaux.
 - 1. Essai « Durée de fermentation de la luzerne ».
 - 2. Essais de fermentations en tubes.

CHAPITRE V : MODIFICATION EXPÉRIMENTALE DE STABILITÉ.

- A. Action du chauffage.
 - 1. Chauffage au laboratoire.
 - 2. Action des feux en plein champ.

B. Modification de stabilité par fermentation.

CHAPITRE VI : INFLUENCE DE DIFFÉRENTS CATIONS ASSOCIÉS A LA MATIÈRE ORGANIQUE SUR LA STABILITÉ STRUCTURALE.

CHAPITRE VII : RELATIONS ENTRE LA NATURE DU SUPPORT MINÉRAL, ET L'EFFICACITÉ DES MATIÈRES ORGANIQUES.

CONCLUSION DE LA PREMIÈRE PARTIE.

DEUXIÈME PARTIE

INTRODUCTION

CHAPITRE PREMIER : ÉTAT ET ÉVOLUTION DES MATIÈRES ORGANIQUES DANS LE SOL.

CHAPITRE II : LES RÉSIDUS DE RÉCOLTE.

- Bilan organique et structural des rotations sans fumure organique.
- Cas particulier de l'enfouissement des pailles.

CHAPITRE III : LES FUMIERS ET AUTRES PRODUITS ORGANIQUES FERMENTÉS ET SEMI-FERMENTÉS.

1. Les fumiers.
2. Engrais organiques divers.

CHAPITRE IV : LES ENGRAIS VERTS.

1. Les différents types d'engrais verts.
2. Les différents modes d'action des engrais verts sur la structure du sol et sa stabilité.

CHAPITRE V : REPOS DU SOL SOUS VÉGÉTATION PERMANENTE.

- A. Évolution du sol consécutive à des défrichements.
- B. Influence du repos sous prairie sur les propriétés physiques du sol.
 1. Mécanisme de l'amélioration structurale.
 - Enrichissement du sol en matière organique.
 - Amélioration de la structure et de sa stabilité.
 2. Moyens de contrôle de la répartition des racines et de l'amélioration structurale.
 - Choix botanique : influence de l'espèce.
 - Influence du mode d'exploitation de la prairie.
 - Influence des conditions d'installation de la prairie.
 - Relations entre la durée de la prairie et la stabilisation de la structure.
 3. Évolution du sol après retournement de la prairie.
 - Cas des prairies à racines annuelles.
 - Cas des prairies à racines perennes.
 - Relations entre l'âge de la prairie et la durée de son action stabilisante.
 4. Retournement de la prairie.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES.

AVANT-PROPOS

C'est M. le Professeur HÉNIN, directeur du Laboratoire des Sols, qui a été à la base de ma formation en Physique des Sols et c'est lui qui, deux ans plus tard, m'a accueilli dans son laboratoire lorsqu'après un séjour outre-mer, je suis entré à l'Institut national de la Recherche agronomique.

Après m'avoir suggéré comme ligne générale de travail, l'action des matières organiques sur la stabilité structurale des Sols, M. HÉNIN m'a généreusement consacré une part importante de son temps : au cours de très nombreuses conversations, la charpente du sujet a été dégagée, s'est étendue peu à peu délimitée ; la place du problème posé dans l'ensemble de la Physique du Sol, ses implications agronomiques me sont progressivement apparues. Au fur et à mesure du déroulement des recherches, M. HÉNIN m'a fait réfléchir sur les questions soulevées et il n'a cessé de peser les résultats, d'en critiquer les interprétations, Ainsi, cette période a été pour moi particulièrement formatrice et enrichissante. C'est de tout cela que je suis heureux de pouvoir le remercier bien vivement en l'assurant de mon sincère attachement.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à M. CHOUARD, Professeur de Physiologie végétale à la Sorbone, qui a accepté, malgré ses lourdes charges, la présidence du jury.

M. LEMÉE, Professeur d'Écologie végétale à la Faculté des Sciences d'Orsay, après avoir suivi et conseillé régulièrement mon travail, a bien voulu en être le rapporteur. Je l'en remercie tout particulièrement.

Les développements agronomiques de ce travail n'auraient pu être menés à bien sans la collaboration confiante et efficace des différents services relevant de l'Administration et des organismes privés ou professionnels par l'intermédiaire desquels nous avons noué de fructueuses relations de travail avec de nombreux agriculteurs. Nous citerons particulièrement les Centres d'Études techniques agricoles, l'Association pour l'Encouragement à la Productivité agricole, les Instituts techniques spécialisés. Que tous, que nous ayons pu ou non les nommer, veuillent bien trouver ici l'expression de notre profonde gratitude.

Le travail expérimental a été entièrement réalisé dans le cadre du Laboratoire des Sols de l'Institut national de la Recherche agronomique. Je me fais un devoir d'exprimer tout d'abord ma respectueuse gratitude à M. le Directeur général J. BUSTARRET qui, après avoir permis mes recherches, a bien voulu assurer la publication de ma thèse. Mes remerciements vont également à M. l'Inspecteur général DROUINEAU, et à M. P. BOISCHOT, Directeur de la Station centrale d'Agronomie, qui ont bien voulu lire mon manuscrit et me faire bénéficier de leurs critiques et suggestions.

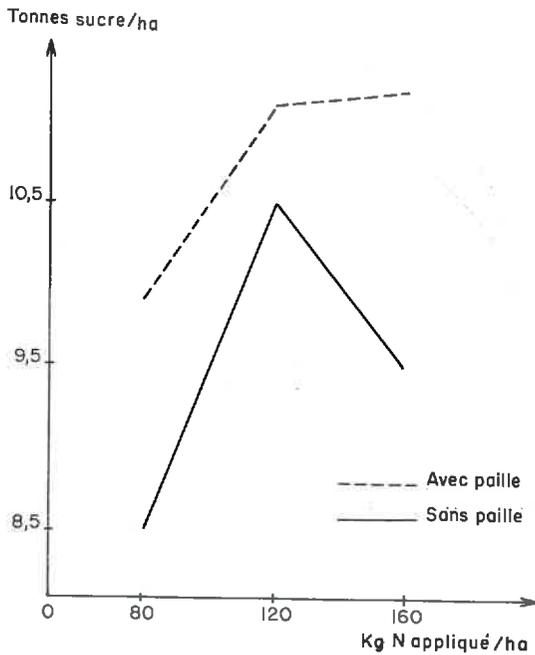
Si la liste en était moins longue, je serais heureux de citer les nombreux chercheurs appartenant à l'I.N.R.A. tels MM. BARBIER et REBISCHUNG, et aussi à d'autres

Services de Recherche, tel M. LE BORGNE de l'Institut de Physique du Globe, qui, par leur compétence dans des domaines interférant avec le mien, m'ont fourni, des suggestions et des critiques fécondes ; que tous en soient très vivement remerciés.

Enfin, mes collègues du Laboratoire des Sols, et parmi eux particulièrement M. R. BÉTRÉMIEUX, directeur adjoint, L. TURC et R. GRAS, m'ont apporté des idées et des données précieuses ; surtout, ils m'ont aidé au cours de nombreuses discussions, à préciser certains raisonnements et les limites de mes interprétations. Je veux les assurer de mon amicale reconnaissance.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Traditionnellement l'humus a été considéré comme le facteur essentiel de la fertilité du sol. A la fin du XVIII^e siècle, on estimait même que l'alimentation des végétaux s'effectuait par absorption directe des matières organiques noires renfermées dans le sol ; c'est-à-dire de l'humus. C'est à Liebig que revient, comme on le sait, le mérite d'avoir montré que l'alimentation des végétaux supérieurs s'effectuait uniquement à partir d'éléments minéraux.

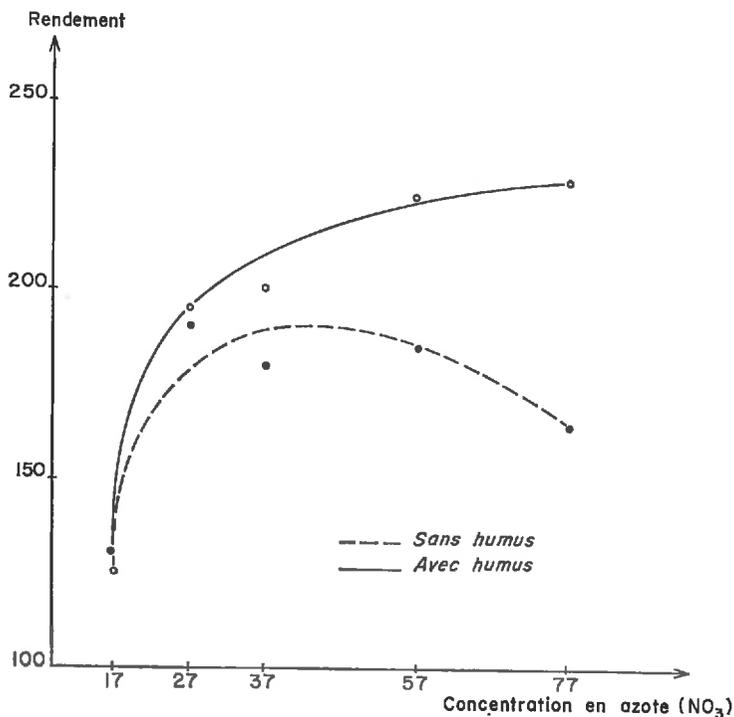


GRAPHIQUE 1. — Influence d'une fumure organique sur le rendement en plein champ de la betterave à sucre recevant des doses croissantes d'azote minéral (d'après G. BARBIER)

Corollairement, les matières organiques semblaient n'avoir plus d'autre intérêt que les éléments minéraux qu'elles contenaient. Après une controverse passionnée opposant des faits expérimentaux apparemment incontestables, une doctrine attribuant différents rôles aux matières organiques du sol a fini par s'élaborer ; on y trouve une justification des réserves formulées, à la suite des travaux de Liebig, par d'anciens agronomes comme Boussingault qui disait : « Il faut reconnaître que nous sommes maladroits de nous donner tant de mal pour apporter le fumier par tombereaux dans nos champs ; si cet engrais n'agissait que par ses éléments minéraux, il suffirait de l'incinérer et l'on pourrait en transporter la matière utile avec une brouette. »

En fait, on considère à l'heure actuelle que les matières organiques au sens large du terme, qui comprennent aussi bien l'humus, c'est-à-dire un groupe de substances noires dont le rapport carbone/azote est voisin de 10, que tous les résidus végétaux et animaux présents dans le sol, agissent de trois façons différentes :

— Par une action physiologique dans l'acception globale du terme, qui se traduit par le fait que l'activité nutritive des éléments minéraux présente un plafond plus élevé en présence de matières organiques qu'en leur absence. Les deux



GRAPHIQUE 2. — Influence d'un apport d'acide humique sur le rendement d'un Ray-grass d'Italie cultivé en pots en présence de doses croissantes d'azote minéral (d'après R. CHAMINADE)

diagrammes suivants 1 et 2, l'un dû à G. BARBIER et J. CHABANNES (1961) et l'autre à R. CHAMINADE (1958) montrent l'allure du phénomène et précisent qu'il n'est pas spécifique d'une forme de matière organique puisque l'une des courbes a été obtenue à partir d'apports de paille fraîche et l'autre à l'aide d'acides humiques extraits de tourbe.

— Par ailleurs les matières organiques ont un ensemble de fonctions influant sur les propriétés physiques du sol. A des taux relativement élevés, elles peuvent augmenter sa capacité pour l'eau. Elles ont également une action sur la structure du sol par un effet de division lié surtout à la présence de racines mais assuré dans une certaine mesure par tous les résidus organiques.

— Enfin, les matières, organiques ont une influence d'une grande importance sur la stabilité de cette structure. En leur présence, les petits fragments de terre qui sont le résultat de l'action combinée du travail du sol et d'agents naturels tels que

le gel, la dessiccation, etc. se désagrègent moins lorsqu'ils sont au contact d'un excès d'eau.

Le but de notre travail est d'étudier le mode d'action des matières organiques sur cette stabilité structurale. Les discussions que nous avons évoquées précédemment au sujet du rôle et de l'utilité des matières organiques et le fait que l'on leur reconnaisse au moins trois modes d'action permettent d'imaginer les difficultés que l'on éprouve à interpréter une expérience culturale globale où la matière organique voit son efficacité établie uniquement grâce à des comparaisons de rendement.

L'analyse des phénomènes à laquelle nous nous proposons de contribuer est donc nécessaire, préalablement à toute interprétation.

Notre travail se situera à différents niveaux. Dans une première partie, nous examinerons les mécanismes de stabilisation des différents types de matières organiques.

Dans la deuxième partie, nous chercherons à établir dans des applications pratiques la validité des règles ainsi dégagées.

PREMIÈRE PARTIE

**ÉTUDE DES MODES D'ACTION DES MATIÈRES ORGANIQUES
SUR LA STABILITÉ STRUCTURALE DU SOL**

Introduction

Une fois défini le but général que nous poursuivons, nous devons préciser le problème qui doit être résolu et les méthodes adaptées à l'obtention de ce résultat. Rappelons tout d'abord deux définitions fondamentales :

1^o Il faut entendre par *structure* la façon dont les constituants du sol sont disposés les uns par rapport aux autres. Les constituants élémentaires, c'est-à-dire ceux qui sont séparés par une analyse granulométrique, peuvent être parfois simplement juxtaposés : on obtient alors des *structures monoparticulaires* dont les éléments peuvent être plus ou moins rapprochés, ce qui entraîne des différences de porosité et même de cohésion.

Les constituants élémentaires peuvent au contraire être réunis entre eux par des ciments colloïdaux constitués par les fractions élémentaires les plus fines. On peut alors observer des masses continues comme c'est le cas dans les formations aliotiques ou tuffeuses : ce sont les *structures dites continues*.

Mais il peut y avoir aussi, et c'est le cas le plus fréquent, fragmentation des ensembles cimentés : la structure est alors qualifiée de *fragmentaire* et l'on peut la caractériser en précisant la forme, la cohésion, la compacité des fragments ainsi que les conditions de leur assemblage.

La propriété globale exprimant le résultat de cet arrangement est la porosité.

2^o Toutefois, les différentes données qui viennent d'être évoquées ne peuvent caractériser l'état structural du sol qu'à un moment donné : celui de l'observation qui a permis de les recueillir. En effet, la structure subit une évolution permanente particulièrement dans les sols ou parties de sol qui ont à subir les actions mécaniques de l'homme. Il faut alors tenir compte de la permanence d'un état structural donné vis-à-vis des actions de dégradation et c'est ici qu'apparaît le concept de stabilité structurale. On peut définir celle-ci comme l'aptitude d'une structure à résister aux actions de dégradation.

La méthode la plus directe pour apprécier cette aptitude consisterait à suivre l'évolution des caractéristiques de la structure en fonction de l'intervention des agents de dégradation et en particulier de la pluie. Le coefficient d'efficacité de cet agent fournirait *a contrario*, ainsi que l'a montré S. HÉNIN (1938), une mesure de cette stabilité. Mais il est évident qu'une telle méthode de travail serait inapplicable à une étude systématique car elle nécessiterait des mesures sur place fréquentes, particulièrement aux périodes caractéristiques. Une telle exigence en limite évidemment les possibilités d'utilisation. Un autre inconvénient provient de l'extrême difficulté qu'il y a à procéder dans le milieu naturel à des mesures suffisamment précises pour mettre en évidence les processus de dégradation.

C'est pourquoi, depuis longtemps, on s'est efforcé d'opérer sur des modèles du phénomène réalisés, en faisant intervenir de différentes façons, au laboratoire, l'action de l'eau sur des fragments de terre dans des conditions standard. C'est par ce

biais qu'il a été possible de montrer l'existence d'un certain nombre de processus de dégradation.

Deux de ces processus paraissent jouer un rôle essentiel. Ce sont :

— Le gonflement et la dispersion des ciments colloïdaux dont SCHLOESING (1885) a souligné l'importance.

— L'éclatement des fragments de terre suivant le schéma de YODER.

Pour définir les facteurs de stabilité, S. HÉNIN (1938) a imaginé une théorie simple dans laquelle interviennent les deux mécanismes. Selon l'hypothèse de YODER (1936), l'eau dans laquelle est plongée une motte de terre pénètre dans les pores capillaires en commençant par les plus gros. L'atmosphère incluse dans le fragment de terre est alors soumise à la pression exercée par les ménisques. Lorsque cette pression est suffisante, la motte éclate.

Le facteur de résistance est la cohésion C de la motte. Cette donnée est assez mal définie car elle décroît au fur et à mesure que la terre se mouille et subit les phénomènes de gonflement et de dispersion des colloïdes. C'est évidemment la cohésion de la terre mouillée qui intervient : une preuve peut en être trouvée dans le fait que les matériaux terreux dont les ciments (oxydes et hydroxydes par exemple) sont peu sensibles à l'action de l'eau, n'éclatent jamais même lorsqu'ils sont peu cohérents à l'état sec.

Dans ces conditions, C représentant la cohésion de la terre humide et P la pression capillaire, la condition de stabilité s'écrira :

$$C > P$$

ou bien en explicitant P :

$$C > \frac{2 T_2 \cos \alpha}{r}$$

où T_2 est la tension superficielle de l'eau,

α l'angle de raccordement sol-eau,

r le rayon des plus gros capillaires du sol.

Cette relation peut également s'écrire :

$$\text{stabilité} = C - \frac{2 T_2 \cos \alpha}{r}$$

S. HÉNIN a montré que les conséquences de ce schéma étaient conformes à l'expérience. En effet, sous un vide même partiel, ou bien lorsque la terre est imbibée par capillarité, c'est-à-dire en commençant par les pores les plus fins, la stabilité croît. Au contraire, si on mouille la terre sous pression, la stabilité diminue. De même, une modification de la mouillabilité, c'est-à-dire de $\cos \alpha$ par fixation au sol d'un corps gras par exemple, accroît la stabilité. Enfin, la teneur en argile qui assure la cohésion du sol, même à l'état humide, est également un facteur croissant de stabilité.

Ces différents aspects de la théorie sont simples et directement vérifiables. On peut aller plus loin dans l'interprétation des phénomènes, mais cette démarche prend alors un caractère hypothétique, car il faut appliquer aux solides des formules qui n'ont été vérifiées que dans le cas des liquides.

Quoi qu'il en soit, les considérations précédentes fournissent une image très fidèle du comportement du sol dans le milieu naturel. D'autres faits expérimentaux,

d'ailleurs vérifient également cette théorie : par exemple, si l'on imbibe avec précaution des petites mottes de terre avec de l'alcool éthylique, leur stabilité dans l'eau est accrue comme si l'on avait chassé l'air avec précaution par une imbibition capillaire avec de l'eau. On peut remplacer l'alcool éthylique par toute une série de liquides organiques miscibles à l'eau et l'on obtient à peu près les mêmes résultats. L'effet protecteur de la molécule organique tend toutefois à diminuer à mesure que la dimension de sa chaîne hydrocarbonée croît pour un même groupement hydrophile.

Si au contraire on imbibe la terre avec un liquide non polaire et non miscible à l'eau, le benzène par exemple, on obtient alors deux types de résultats : les terres pauvres en matières organiques ont tendance à être beaucoup moins stables, exactement comme si on les avait imbibées d'eau sous une forte pression. Au contraire, si la terre contient des matières organiques, la stabilité est moins modifiée, pouvant même, dans certains cas, être accrue. On peut interpréter ce dernier cas en supposant que le liquide organique non polaire se fixe sur la matière organique du sol, formant ainsi une couche rendant la terre encore moins mouillable.

Bien que datant d'une vingtaine d'années, la théorie dont nous venons de donner les grandes lignes reste encore valable ainsi que le soulignait récemment T. J. MARSHALL (1962). Nous la prendrons donc comme point de départ de nos recherches dont nous pouvons maintenant préciser l'objet :

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

Quand on part d'un type de matière organique donnée et en particulier de débris végétaux, quels sont les processus de fixation et dans quelle mesure les différents types se distinguent-ils les uns des autres par leur efficacité ?

Étant donné les interactions existant entre les phénomènes, nous ne pourrions pas adopter comme tête de chapitre chacune de ces questions, Elles serviront de trame à notre conclusion. Nous avons dû, pour des raisons de technique, aborder l'étude des modes d'action des matières organiques sur la stabilité de la structure en suivant le plan indiqué ci-après :

Dans un premier chapitre, nous décrivons les méthodes d'étude que nous avons utilisées portant sur l'appréciation de la stabilité de la structure, la caractérisation des matières organiques et du support minéral.

Après avoir étudié les relations entre d'une part la mouillabilité et la cohésion du sol, d'autre part les résultats de différents tests de stabilité, nous présenterons et discuterons le comportement d'« échantillons-modèles », puis celui d'échantillons enrichis sous différentes conditions de fermentation en diverses matières organiques. Enfin, nous examinerons les modifications expérimentales de stabilité par chauffage ou fermentation d'échantillons humifères et les liaisons entre les caractéristiques granulométriques du support minéral et l'aspect quantitatif de l'efficacité des différents types d'actions précédemment définis.

CHAPITRE PREMIER

LES MÉTHODES D'ÉTUDE

A. Appréciation de la stabilité structurale

Nous avons dit que la méthode la plus évidente et la plus directe pour apprécier la résistance de la structure à l'action de l'eau, qui consisterait à observer les variations de l'état structural sur le terrain en liaison avec l'intensité des différents agents de dégradation, était difficilement applicable dans la pratique.

Pour cette raison, nous avons été amenés à mettre au point une méthode de laboratoire qui soit d'un emploi relativement aisé tout en étant suffisamment sensible et fidèle. Le principe de cette méthode tient compte du fait qu'il est impossible de reproduire fidèlement au laboratoire l'ensemble des conditions de dégradation qui prévalent au champ. Il apparaît alors plus raisonnable de soumettre le sol à une série d'épreuves, chacune de celles-ci tendant à accentuer un des aspects du phénomène complexe naturel. Ce principe nous a conduits à l'utilisation de deux sortes de tests : d'abord une série de tamisages sous l'eau dite « analyse d'agrégats », ensuite un test en milieu concentré qui est ici une mesure de percolation.

I. — PRINCIPE ET DESCRIPTION DE L'« ANALYSE D'AGRÉGATS »

Il s'agit d'une série de tamisages sous l'eau opérés dans des conditions conventionnelles, définies une fois pour toutes. La caractéristique permettant de distinguer cette technique de celles qui ont été précédemment décrites dans la littérature réside dans le fait que l'on a cherché à apporter d'une manière simple des nuances à l'action de l'eau. Il est en effet commun de remarquer que lors du classement d'une série de comportements, on aboutit fréquemment à deux groupes extrêmes séparés par une frange contenant les échantillons moyens dont le comportement n'est que mal déterminé. Ainsi, l'attaque brutale d'un échantillon de sol sec par de l'eau permet de séparer aisément d'une part les terres très stables et d'autre part celles qui sont presque entièrement dégradées. Par contre, ce traitement sans nuance ne permet pas à lui seul de classer de façon satisfaisante toutes les terres de comportement intermédiaire.

Les travaux de HÉNIN sur l'action des pré-traitements par des liquides organiques ont permis de trouver une solution, d'emploi commode et se prêtant au travail en série, à cette nécessité d'établir une gradation dans l'action de l'eau. Une imbibition préalable ménagée de l'échantillon par de l'alcool éthylique permet, ainsi que nous l'avons vu, d'atténuer cette action et autorise ainsi une certaine discrimination au sein d'un groupe d'échantillons peu stables. D'autre part, un pré-traitement au

benzène opéré dans les mêmes conditions et sur des terres pauvres en matières organiques, donc sans affinité pour ce liquide non polaire, aggrave la destruction de la terre par le traitement ultérieur à l'eau : le piston élastique que constituait l'air présent dans les pores du sol est en effet remplacé par un piston incompressible de benzène, ce dernier n'étant pas miscible à l'eau. Nous reprendrons ultérieurement et préciserons les renseignements que l'on peut tirer de l'utilisation comparée de ces deux pré-traitements avec celle d'un simple apport d'eau sur la terre sèche. Bornons-nous pour l'instant à noter que ce pré-traitement au benzène permet, lui, d'opérer un classement dans le groupe des terres à bonne stabilité structurale dont seules les plus résistantes supportent, au moins en partie, ce traitement énergétique.

A la suite de l'action de l'eau sur la terre soit directement soit après les deux pré-traitements que nous venons de mentionner, un tamisage sous l'eau effectué dans des conditions « standard » permet d'obtenir trois taux d'agrégats stables. Mais il apparaît que la permanence ainsi établie d'une certaine quantité d'agglomérats grossiers ne suffit pas à rendre compte du comportement au champ de certains sols. Il arrive en effet que des terres dont en moyenne une partie importante des agrégats grossiers reste sur le tamis acquièrent rapidement sous l'action de l'eau *in situ*, une structure compacte. Ce fait provient de ce que la fraction de l'échantillon qui est passée au travers des mailles du tamis est, dans ce cas, largement dispersée.

Il était donc nécessaire de tenir compte de la quantité d'éléments fins qui se dispersent au cours de la manipulation sans l'intervention d'agents chimiques extérieurs au sol. Une telle mesure est évidemment délicate car la suspension de ces éléments fins ne peut pas recevoir de stabilisant et risque donc de flocculer plus ou moins rapidement au cours de la sédimentation préparant la mesure. Cet inconvénient, inéluctable, a été toutefois fortement atténué en choisissant comme limite supérieure des éléments fins un diamètre moyen de 20 μ . Le tri, par sédimentation, de particules de cette taille ne nécessite en effet qu'un temps de quelques minutes, ce qui réduit considérablement les risques de floculation accidentelle qui seraient au contraire très élevés si l'on avait à séparer les éléments dispersés de diamètre moyen inférieur à 2 μ .

Ces quelques principes étant posés, nous allons rappeler sommairement la technique de ces différentes opérations.

a) *Échantillonnage*

A partir de 200 g environ de terre séchée à l'air, passée avec précaution à travers un tamis à mailles carrées de 2 mm. et étendue sur un plateau, on constitue trois prises d'essais de 5 g chacune obtenues en déposant sur le plateau d'une balance quatre ou cinq prises différentes de 1 g chacune environ. Ces précautions sont rendues nécessaires par l'obligation que chaque prise d'essai représente aussi fidèlement que possible la granulométrie moyenne des agrégats telle qu'elle résulte du tamisage à sec préalable de l'échantillon.

b) *Pré-traitements, imbibition par l'eau, agitation*

Chacune des trois prises ainsi obtenues est déposée au fond d'un becher de 250 cc rigoureusement sec. La première est imbibée avec ménagement par environ 5 cc d'alcool éthylique, la deuxième reçoit une même quantité de benzène alors que la

troisième ne reçoit aucun pré-traitement. Au bout de 5 mn, les trois bechers sont brutalement emplis d'eau distillée et l'ensemble est laissé au repos 1/2 heure. Le contenu de chaque becher est alors transvasé quantitativement dans un erlenmeyer de 700 cc. amené à un volume de 300 cc. et agité 20 fois par retournement.

c) Tamisage proprement dit

Le contenu de chaque erlenmeyer est jeté sur un tamis de 200 μ d'ouverture de mailles lequel est adapté à un appareil conçu par A. FEODOROFF (1960) qui lui imprime un mouvement hélicoïdal alternatif dans des conditions de vitesse définies, la toile du tamis baignant dans l'eau d'un récipient pendant toutes les phases du mouvement. Après le tamisage, les agrégats restés sur la toile, c'est-à-dire ceux qui sont dits « stables », sont recueillis dans une capsule, séchés à l'étuve à 105° et pesés. Leurs poids permettront d'établir les taux d'agrégats stables après les divers pré-traitements.

Le « filtrat » du tamisage c'est-à-dire l'ensemble des particules agrégées ou non, d'un diamètre inférieur à 200 μ est amené à un volume dans une allonge de sédimentation et on détermine par la méthode « pipette de Robinson » le taux d'éléments inférieurs à 20 μ mis en suspension par une agitation ménagée, effectuée dans des conditions standard.

e) Expression des résultats

Il est indispensable, si l'on veut pouvoir comparer un ensemble de sols, de disposer d'un indice unique dont les composantes soient le résultat des différents tests de l'analyse d'agrégats. L'élaboration de cet indice a été effectuée de façon à ce que le classement qu'il permet d'obtenir soit aussi fidèlement que possible le même que celui du comportement *in situ* des différents échantillons. Il se présente sous la forme d'un rapport entre la fraction inférieure à 20 μ obtenue par le traitement le plus dispersant (fréquemment le pré-traitement benzène) et la moyenne arithmétique des trois taux d'agrégats grossiers obtenus comme il est dit précédemment. Le dénominateur de la fraction est diminué des 9/10 des sables grossiers. Il est en effet indispensable de tenir compte principalement des véritables agrégats stables tout en maintenant une place à l'influence favorable sur le comportement du sol vis-à-vis de l'eau des sables supérieurs à 200 μ . Le coefficient 0,9 a été choisi après de multiples essais parce que satisfaisant le mieux cette double exigence.

En résumé, l'indice que l'on désigne couramment par S (ou encore I_s) prend la forme suivante :

$$S = \frac{\left(\begin{array}{c} \text{Éléments inférieurs} \\ \text{à } 20 \mu \end{array} \right) \quad \% \text{ maximum}}{\frac{\Sigma \text{ Agrégats } \%}{3} \quad - \quad 0,9 \text{ S. G.}}$$

Cet indice varie en raison inverse de la stabilité de valeurs inférieures à 0,1 pour des terres très stables à des valeurs supérieures à 100 pour des terres sodiques particulièrement fragiles.

On doit toutefois souligner que lors d'une étude particulière visant à mettre en évidence l'évolution d'un sol sous l'action de traitements bien définis, il est parfois

indispensable d'étudier les résultats partiels qui, seuls, permettent l'interprétation du phénomène en cause alors que l'indice S ne fournirait qu'une image brute de la modification globale due à ce phénomène. Par exemple, pour les études portant sur le rôle de la matière organique sur la stabilité, le taux d'agrégats stables après pré-traitement au benzène est la donnée qui permet la comparaison la plus sensible des échantillons. C'est ainsi que divers auteurs ont établi des corrélations entre ce taux d'agrégats et la teneur en matières organiques des échantillons dont ils proviennent. Nous verrons que ces corrélations ne sont étroites que si la texture des échantillons est relativement homogène ; il n'en reste pas moins qu'il y a là une présomption en faveur d'une telle méthode de travail. De plus, nous avons pu montrer que la teneur en matière organique des agrégats stables au benzène était beaucoup plus élevée que celle de la terre de départ et même des agrégats obtenus par les autres pré-traitements.

Le tableau 1 rassemble quelques-uns de ces résultats.

TABLEAU I

Teneurs en matières organiques liées ⁽¹⁾ des différents types d'agrégats stables
(Teneur exprimée en C p. 1 000 lié)

Sols	Teneurs en carbone			
	Terre totale	Ag _a ⁽²⁾	Ag _e ⁽²⁾	Ag _b ⁽²⁾
Sous-sol (horizon B)	3,8	3,8	5,7	11,8
Sol de prairie (limon)	22,2	25,7	26,2	31,9
Sol de prairie (argile)	23,4	26,1	27,9	31,5
Terre noire de Lima-gne (culture) . . .	19,2	19,6	20,6	34,5

⁽¹⁾ Voir page 25.

⁽²⁾ Ag_a, Ag_e, Ag_b représentent les taux d'agrégats obtenus respectivement après prétraitement alcool, eau, benzène.

Ces chiffres soulignent une différence très importante entre les différents tests : après pré-traitement au benzène, l'action de l'eau conduit à un tri de certains agrégats et seuls ceux qui sont suffisamment riches en matières organiques sont stables ; par contre, dans le cas d'un pré-traitement à l'alcool, rien de tel n'apparaît, la teneur en carbone organique des agrégats stables Ag_e restant voisine de celle de la terre de départ... il n'y a plus tri mais protection plus ou moins intense de l'ensemble des agrégats.

Enfin, l'étude des comportements comparés suivant les pré-traitements, de différents grands types de sols, outre qu'elle met en évidence le caractère nécessaire de ces pré-traitements, souligne la sensibilité particulière de tel ou tel test partiel vis-à-vis de l'influence des différents facteurs de la stabilité structurale :

TABLEAU 2

Comportement comparé aux trois pré-traitements de différents types de sols

Type de comportement	Ag _a %	Ag _e %	Ag _b %
I. — Fraction agrégée, élevée et sensiblement constante.			
Sols argilo-humiques sur alluvions de l'Ouémé (Dahomey)	79,0	76,5	68,1
Sols noirs sur basalte récent (Cameroun)	64,0	63,5	60,5
Rendzines grises sur craie (France)	72,8	64,5	67,6
II. — Fraction agrégée, élevée pour l'alcool et l'air, faible pour le benzène.			
Sols ferrallitiques sur basalte ancien (sous-sol) (Cameroun)	77,1	73,2	0,3
Terre noire de Limagne (sous-sol) (France)	71,0	56,2	8,7
III. — Fraction agrégée, moyenne ou élevée pour l'alcool, très faible pour l'air et le benzène.			
Sous-sol argileux des Landes (France)	47,6	2,3	0,7
IV. — Fraction agrégée, très faible dans tous les cas.			
Sous-sol à montmorillonite magnésienne (Guadeloupe) ...	0,5	0,4	0,3
Horizon profond de solonetz (France)	2,0	0,5	1,1

II. — PRINCIPE ET DESCRIPTION D'UN TEST EN MILIEU CONCENTRÉ

Les divers tests de l'analyse d'agrégats ne permettent pas, nous l'avons constaté, de mettre en évidence les variations de comportement du sol sous l'influence de modifications relativement faibles de sa composition ionique. C'est ainsi que l'influence du chaulage, manifeste au champ dans certaines conditions, n'est pas mise en évidence par le tamisage sous l'eau. Pour pallier cette insuffisance, nous avons proposé un test pratiqué en milieu suffisamment concentré (rapport terre/eau élevé) pour permettre l'apparition de l'influence des électrolytes. Il s'agit d'une mesure de perméabilité sur échantillons remaniés. Les tubes de percolation sont remplis sous l'eau à partir de l'échantillon calibré et en usant de nombreuses précautions destinées à assurer le dégazage des particules, à éviter leur tri par sédimentation et à leur permettre de gonfler aussi librement que possible. Une charge d'eau constante est ensuite établie et l'on mesure le volume percolé au cours de la première heure. Le résultat est exprimé en prenant comme indice le coefficient de la loi de Darcy exprimé en cm/heure : cet indice est d'autant plus élevé que la terre est plus stable et peut varier de 0 à plus de 60. Bien que la reproductibilité de la mesure soit assez médiocre (l'erreur relative atteint couramment 20 à 30 p. cent) l'amplitude de variation est suffisante pour permettre un classement des différentes terres dans les cas où l'indice S est défaillant.

Traitement	S	K
Chaulage (pH 7,8)	2,30	4,0
Nitrate de soude	2,80	1,25
Témoin sans engrais	2,60	2,75

Comme le montrent les quelques chiffres ci-dessus, obtenus sur un même sol de limon cultivé ayant subi des apports chimiques différents, ce test de percolation peut seul permettre certaines différenciations avec une sensibilité satisfaisante.

Inversement, l'action des matières organiques ressort beaucoup plus fortement de l'analyse d'agrégats et de l'indice S : ainsi que le montre l'exemple ci-dessous.

Traitement	Matière organique %	S	K
Prairie de 3 ans	1,65	2,95	2,85
Témoin (0,15 cm)	1,42	8,62	2,20

Il ressort de ces quelques considérations que ce test de percolation nous sera beaucoup moins utile dans le travail qui fait l'objet de ce mémoire que les divers tests de tamisage. Néanmoins, il était nécessaire de l'évoquer pour deux raisons : la première se rattache au fait que l'analyse d'agrégats devient très imprécise dès que l'on a affaire à des échantillons contenant une proportion importante de sables de dimensions voisines de 200 μ ; le test K permet alors de contrôler des résultats incertains. La deuxième raison est que l'absence de réactions aux tests en milieu concentré alors même que les valeurs de S sont fortement affectées peut dans certains cas aider à l'interprétation d'un phénomène agronomique complexe comportant sous une forme ou sous une autre l'intervention de matières organiques. C'est pourquoi nous ferons appel à K principalement au cours des études agronomiques qui constitueront la deuxième partie de ce mémoire.

III. — COMPARAISON GÉNÉRALE DES RÉSULTATS

S variant en raison inverse et K en raison directe de la stabilité structurale, si l'on porte sur un graphique les points représentatifs d'une population de sols d'origine et de propriétés diverses (S en abscisse, K en ordonnée) ils se groupent autour d'une branche de courbe d'équation $K = \frac{A}{S^n}$. Après transformation logarithmique des variables, cette liaison est traduite par une régression linéaire d'équation approximative obtenue pour les 100 premiers points expérimentaux (coefficients arrondis) :

$$3 \log_{10} 10 K + 2,5 \log_{10} 10 S - 7,5 = 0$$

La transformation logarithmique permet une meilleure lecture du graphique pour les valeurs moyennes de S et de K qui correspondent à la majorité des caractéristiques des sols cultivés. La dispersion autour de la droite de régression est due au fait que ce ne sont pas, nous l'avons vu, les mêmes facteurs qui influent sur les deux indices. Chaque sol se trouve ainsi caractérisé par la position d'un point par rapport à l'ensemble des sols déjà connus.

B. Caractérisation des matières organiques

I. — FRACTIONNEMENT DENSIMÉTRIQUE DES MATIÈRES ORGANIQUES

Les matières organiques du sol sont composées d'un ensemble de corps d'origine et de nature très différentes. On a coutume d'apprécier la teneur en matières organiques totales en dosant la quantité de carbone, autre que celui provenant des car-

bonates, présent dans le sol. Toutefois, l'hétérogénéité de ces constituants est telle qu'elle peut apparaître, pour une part au moins, à l'observation optique directe. C'est ainsi qu'à côté des nombreux composés liés à la fraction minérale du sol, il existe des débris végétaux ou animaux à des stades variables de décomposition mais dont la caractéristique commune est de ne pas être liés au support minéral. Cette observation a conduit S. HÉNIN et L. TURC (1949) à proposer, préalablement à toute étude quantitative ou qualitative de l'humus, une séparation de cette matière organique libre.

Le principe de la méthode proposée par ces auteurs repose sur le fait que la densité absolue des matières organiques libres supposées exemptes de toute souillure minérale est voisine de 1 alors que la densité absolue de tout le reste du sol est beaucoup plus élevée, généralement supérieure à 2. L'idée est alors née de fractionner densimétriquement les matières organiques du sol par immersion d'un échantillon convenablement préparé dans un liquide dont la densité soit intermédiaire entre celles des deux fractions que l'on veut séparer.

HÉNIN et TURC opéraient dans le champ de la pesanteur ce qui ne permettait pas toujours la séparation de matières organiques libres fines ou ayant subi un début de fixation à la fraction minérale. Pour pallier cet inconvénient, nous avons récemment mis au point (G. MONNIER et al. (1962) une technique basée sur le même principe, mais permettant d'opérer dans un champ de gravité beaucoup plus intense (de l'ordre de 1 000 g) (1) fourni par l'accélération d'une centrifugeuse. Ce perfectionnement nous a permis d'améliorer la reproductibilité des résultats et d'obtenir des fractionnements beaucoup plus satisfaisants, particulièrement lorsque les échantillons sont riches en débris organiques très fins ou au premier stade de leur fixation au sol. D'autre part, la manipulation devient beaucoup plus aisée et se prête facilement au travail en série.

Description de la technique

L'échantillon constitué à partir de terre séchée à l'air passant au tamis de 2 mm peut être de cinq ou de dix g. suivant la teneur supposée en matières organiques libres. Il est en effet commode de traiter une prise de terre telle que la fraction peu dense obtenue puisse constituer la totalité de la prise d'essai en vue du dosage ultérieur du carbone qu'elle contient. En tout état de cause, on doit apporter un grand soin à la constitution de la prise d'essai qui doit être représentative de l'échantillon.

Un broyage, suivi d'un tamisage à 500 μ , permet de libérer certains débris organiques emprisonnés mécaniquement dans les agglomérats. Ce moyen est préférable à une destruction de la structure plus rapide et ne risque pas de provoquer de redistribution de substances solubles ou pseudo-solubles.

L'échantillon ainsi préparé est placé dans un tube de centrifugeuse de 100 cc qui est ensuite rempli avec le liquide densimétrique choisi. Après une centrifugation de 5 mn conduite à une vitesse telle que l'accélération au centre du tube soit de l'ordre de 1 000 g, la fraction légère, constituée essentiellement, si la densité a été convenablement choisie, par de la matière organique libre, est décantée sur un filtre plat, séchée à l'étuve à 105° jusqu'à poids constant, et pesée. Il peut être utile de remettre le liquide en suspension et de recentrifuger pour séparer les matières orga-

(1) $g = 981$ CGS.

niques libres qui auraient pu rester emprisonnées lors de la première centrifugation. Cette correction qui en résulte, négligeable dans le cas général, peut devenir indispensable dans le cas de terres très riches en matières organiques libres. Les manipulations sont rendues aisées, en particulier lors des décantations de la fraction peu dense, par le fait que les culots, si le liquide densimétrique est constitué par un mélange alcool éthylique-bromoforme, présentent une cohésion suffisante quelle que soit la texture de l'échantillon. On aura toutefois soin de ne pas utiliser un dispositif de freinage à la fin de la centrifugation pour éviter une remise en suspension partielle de la fraction la plus dense.

Les tubes contenant les fractions denses sont également séchés à l'étuve à 105°. Lorsqu'on desire un séchage rapide, ou lorsque l'étude chimique des fractions nécessite un séchage à plus basse température, il est possible d'éliminer le bromoforme par un lavage des fractions à l'alcool avant leur mise à l'étuve.

C'est un mélange de densité 2 qui permet le plus couramment de séparer dans les meilleures conditions les deux formes libres et liées. Toutefois, dès que les fractions denses contiennent des teneurs élevées (supérieures à 6 ou 7 p. cent) en matières organiques liées, comme cette dernière n'est pas également répartie sur toutes les particules du support minéral, elles risquent d'avoir, pour une partie au moins, une densité inférieure à 2 ; on choisira alors un mélange de densité 1,75. Cette précaution s'impose d'autant que le sol étudié est plus riche en calcaire.

Caractérisation des fractions

Cette technique de fractionnement du sol nous intéresse dans la mesure où elle permet de séparer et de doser à part des matières organiques complètement différentes. La caractérisation de ces deux types de matières organiques peut se faire d'une façon suffisante par l'évaluation de leur rapport C/N. D'une façon très générale, le rapport C/N des fractions denses varie très peu quel que soit le sol et présente des valeurs très voisines de 10. Des études poursuivies par L. TURC (1949) ont montré d'ailleurs que la matière organique de ces fractions pouvait, en règle générale, être assimilée à l'humus. Au contraire, les fractions peu denses constituées essentiellement par des débris organiques comme le montrent leur teneur en carbone élevée (de l'ordre de 20 p. cent) et l'examen microscopique direct, ont des rapports C/N beaucoup plus élevés et variables de 15 à près de 100 suivant la nature et le degré d'évolution des débris végétaux qui en sont l'origine.

On voit ainsi que la caractéristique de la matière organique totale du sol par le rapport carbone organique *total*/azote *total* est assez illusoire car elle n'aboutit en fait qu'à refléter une incidence brute dans laquelle interviennent aussi bien le pourcentage de matières organiques qui sont sous une forme libre que la nature même de ces dernières. Nous avons d'ailleurs montré (G. MONNIER 1958) comment il était possible de calculer le rapport C/N de la terre totale à partir des résultats du fractionnement et du C/N de la seule fraction libre ; ce C/N calculé est très proche du C/N obtenu expérimentalement à partir de la terre totale.

Mais les résultats du fractionnement offrent également d'autres possibilités d'interprétation. Il est en effet possible d'assimiler les matières organiques libres à des produits d'apport relativement récent ou dont l'évolution n'a pas été permise en raison des conditions du milieu. On voit tout l'intérêt qu'on peut en retirer dans

l'étude tant *in vitro* qu'au champ de l'amélioration de la stabilité structurale des sols à partir de résidus organiques. Nous aurons l'occasion de fournir tout au long de ce mémoire de nombreux exemples des bénéfices que l'on peut tirer d'une telle interprétation.

En ce qui concerne la matière organique liée, que nous désignerons par le terme général d'*humus*, elle est constituée par un grand nombre de composés pouvant présenter des propriétés physico-chimiques très diverses et même, dans certains cas, opposées. Il existe des méthodes permettant de fractionner cet ensemble ; les critères de fractionnement reposent sur le comportement et la solubilité de certains groupes de constituants dans divers réactifs d'extraction. Toutefois, ces techniques ne permettent pas, au moins en l'état actuel de nos connaissances, d'aborder le problème qui nous préoccupe. Il apparaît en effet très vite que dans l'action des matières organiques sur la stabilité structurale, certains corps d'origine microbienne, certains produits « pré-humiques » jouent un rôle fondamental ; d'autre part, le mode de fixation des matières organiques apparaît également comme ayant un rôle prépondérant par rapport à celui que peut jouer leur composition même. 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, de répartition au sein du matériau à stabiliser.

II. — DOSAGE DU CARBONE ORGANIQUE

L'appréciation de la teneur en matières organiques de chacune des fractions se fait à partir d'un dosage de carbone organique ou plutôt d'un pouvoir réducteur lequel est transformé en taux de carbone par un coefficient déterminé empiriquement et valable globalement pour les matières organiques de sol. Cette évaluation du pouvoir réducteur du sol est faite suivant la méthode mise au point par P. ANNE (1945). Le principe en est une oxydation dans des conditions standard d'un échantillon de sol par un mélange sulfo-chromique

III. — DOSAGE DE L'AZOTE ORGANIQUE

Un avantage de l'attaque sulfo-chromique réside dans le fait qu'elle assure simultanément la minéralisation sous forme de sulfate d'ammonium de l'azote organique. Le carbone et l'azote, éléments constitutifs du rapport C/N peuvent donc ainsi être déterminés sur deux aliquotes de la même attaque (ANSTETT, 1958), ce qui diminue considérablement les risques d'erreur sur leur quotient. Certes, L. TURC (Communication personnelle de l'auteur) a constaté que la minéralisation sulfo-chromique de l'azote organique n'intéressait que 95 p. 100 en moyenne de l'azote minéralisé selon la technique classique de KÊELDAHL. Cependant, outre le fait que l'on peut toujours utiliser un terme correctif pour tenir compte de cette minéralisation incomplète, les avantages tirés d'une attaque commune en vue des deux déterminations sont suffisants pour que nous ayons adopté cette technique.

L'ensemble de ces techniques : fractionnement densimétrique, dosage du carbone et de l'azote organique sur chacune des fractions, permet de définir un ensemble

de caractéristiques du sol étudié. Le tableau 3 rassemble ces données pour quelques sols particuliers

TABLEAU 3

*Exemples de fractionnement densimétrique des matières organiques du sol,
Caractérisations des fractions*

Désignation des échantillons (Prise d'essai 10 g)	Fraction peu dense $F_e(d < 2)$				Fraction dense $F_d(d < 2)$		
	F_e (mg)	C mg dans 1 g de F_e	C/N	C mg (de F_e) dans 1 g de terre t.	C mg dans 1 g de F_d	C/N	$\frac{C}{C} \frac{\%}{\%} \frac{F_e}{\text{total}}$
Jeune prairie sur sable fin n° 636	212,5 (201,5) *	201 (202)	16,8 (17,3)	4,27 (4,07)	6,2	9,6	40,4
Rendzine blanche sur craie n° 650 (culture)	194 (191,5)	228 (228)	26,2 (26,2)	4,42 (4,37)	22,3	8,9	16,0
Vieille prairie sur limon n° 115	336 (337)	240 (240)	20,7 (20,2)	8,06 (8,08)	16,05	9,8	33
Sous-sol de limon enrichi en matière organique (farine de luzerne)	332 (338)	214 (211)	27,5 (27,6)	7,10 (7,13)	17,7	9,85	28,6
42 parcelles témoin	455	326	40,7	1,5	8,85	9,3	14,4
42 parcelles fumier	411	209	17,7	8,6	17,85	12,0	33,5

* Les résultats entre parenthèses concernent des analyses faites en double.

C. Caractérisation du support minéral

La notion la plus couramment utilisée pour caractériser les propriétés physiques d'un sol est celle de texture. Cette dernière est la propriété résultant de la répartition des particules élémentaires du sol en différentes classes de taille ; en d'autres termes, elle est une conséquence globale de la granulométrie du sol. C'est donc essentiellement la détermination de la granulométrie que nous avons utilisée pour caractériser les supports minéraux. Nous rappellerons brièvement les principes de l'analyse granulométrique telle que nous l'avons pratiquée.

La première opération consiste à préparer l'échantillon par une séparation complète des particules élémentaires du sol les une d'avec les autres. Ce résultat est obtenu d'abord par une destruction des ciments organiques qui est réalisée par oxydation à l'eau oxygénée.

Il s'agit ensuite d'assurer une dispersion stable des colloïdes minéraux. Pour les

sols non calcaires, il est possible de parvenir à ce résultat par agitation de la terre préalablement saturée par un cation monovalent en présence d'un agent dispersant et stabilisant tel que l'hexamétaphosphate de sodium ou le citrate de sodium. Lorsque la terre est calcaire, la décalcification du complexe est souvent obtenue après destruction complète des carbonates. Dans ce cas, l'étude granulométrique ne portera évidemment que sur la fraction non calcaire du sol. Cette manière de faire, dite « méthode internationale », présente des inconvénients majeurs dès que l'on a affaire à des sols contenant des quantités notables de carbonate de calcium, ce qui est le cas pour de nombreuses terres agricoles. En effet, il n'est pas indifférent que les carbonates présents dans le sol le soient à l'état de particules de la taille de l'argile ou de celle des sables grossiers. Pour parer à cette difficulté, DEMOLON (1948) a proposé une méthode permettant de disperser des sols calcaires sans destruction préalable des carbonates. Une telle méthode peut être utilisée pour tous les sols, qu'ils soient ou non calcaires, et fournir la granulométrie de l'ensemble de la partie minérale, carbonates insolubles compris.

Enfin les techniques classiques de détermination des minéraux des argiles (analyse thermique différentielle, rayon X, etc.) nous ont permis dans certains cas particuliers de préciser la nature de la fraction la plus fine du sol lorsque ce dernier n'était pas suffisamment défini par la répartition granulométrique de ses constituants.

CHAPITRE II

ÉTUDE DE LA « COHÉSION » ET DE LA MOUILLABILITÉ DU SOL

Nous avons vu que, suivant la théorie de HÉNIN, la condition de stabilité pouvait s'écrire :

$$C - \frac{2 T_2 \cos \alpha}{r} > 0.$$

Les deux facteurs sur lesquels il est possible d'agir directement sont donc C qui représente la cohésion de la particule de terre au moment où se produit le phénomène d'éclatement et α qui mesure l'angle de raccordement sol-eau, $\cos \alpha$ variant donc en raison inverse de la mouillabilité du sol. Par contre le rayon r qui mesure le diamètre des plus gros capillaires du sol est une donnée sur laquelle il est difficile d'avoir une influence directe : il s'agit là en effet d'une caractéristique de la structure elle-même.

Étant donné que la plupart des matières organiques ont la propriété, liée à leur nature et à la manière dont elles sont fixées au sol, de modifier simultanément, bien que dans des proportions différentes, C et $\cos \alpha$, nous ne chercherons pas à étudier séparément l'action des matières organiques sur la cohésion puis la mouillabilité du sol. Nous nous proposons au contraire, pour chaque type de matière organique étudié, de rechercher quel est le mécanisme dominant de son action sur le comportement du sol vis-à-vis de l'eau.

C'est d'abord à partir des propriétés connues de certaines matières organiques apportées au sol que nous chercherons à mettre en évidence l'action des deux principaux facteurs de stabilité.

Il existe en effet des substances organiques dont les longues molécules ont une action floculante sur l'argile parce qu'elles sont capables d'accrocher un ensemble de micelles. Cette propriété étant due à des fonctions COOH , de telles substances sont hydrophiles et l'on peut donc penser *a priori* que, fixées au sol, elles augmenteront sa cohésion sans diminuer, voire en augmentant sa mouillabilité. Dans ce groupe il faut ranger les polyacrylates et les carboxyméthylcelluloses.

Mais nous pouvons aussi fixer sur la terre des petites quantités de matières organiques ayant des propriétés hydrophobes, telles que divers acides gras, de la cire d'abeille... etc. De telles substances ne sont pas susceptibles de modifier par elles-mêmes la cohésion du sol mais elles réduisent sa mouillabilité. Il suffit pour s'en convaincre de mettre un échantillon de terre en contenant, au contact de l'eau : chaque bulle d'air est tapissée d'une couche de terre.

Enfin, dans le cadre fourni par ces éléments de référence nous avons examiné le mode d'action de matières organiques « naturelles » telles que des acides humiques

extraits du purin, ou celui des produits fixés au sol par fermentation de matières organiques telles que glucose ou débris végétaux divers.

Avant d'aborder ce sujet proprement dit, il est toutefois nécessaire de préciser les définitions de la cohésion C et de la mouillabilité du sol et d'étudier les méthodes permettant de les apprécier.

I. — DÉFINITION ET MESURE DE C

Lorsqu'on met un fragment de terre au contact de l'eau d'une façon suffisamment ménagée pour éviter sa destruction, sa cohésion évolue au cours de l'humectation. Les différents ciments organiques et minéraux au fur et à mesure qu'ils absorbent de l'eau voient leurs propriétés mécaniques modifiées plus ou moins suivant les cas. C'est la cohésion finale résultant de cette évolution (gonflement, dispersion) qui constitue la caractéristique du sol intervenant dans le schéma proposé par HÉNIN et que nous avons à apprécier.

a) *Appréciation de la cohésion de la terre humide par une mesure directe*

Nous nous sommes basés sur la mesure de la déformation d'un échantillon de terre préalablement humecté et soumis à des pressions croissantes dans des conditions standard, l'échantillon étant susceptible de fluer latéralement. Cette mesure n'étant pas applicable à des particules de terre, de forme irrégulière, nous avons dû reconstituer des pâtons de forme géométrique définie. Ce n'est donc pas la « cohésion » originelle de la terre qui apparaît mais seulement les liaisons qui se sont établies au sein du pàton au cours de la fabrication. La méthode n'est valable que pour des terres plastiques et a été appliquée principalement d'une façon comparative à différents échantillons d'une même terre ayant subi divers traitements. Une telle méthode ne serait pas applicable à l'étude de terres à ciments fragiles tels que des hydroxydes par exemple.

La forme régulière des pâtons, indispensable à la reproductibilité des résultats de la mesure, a été obtenue en opérant de la façon suivante : l'échantillon de sol est délayé dans son poids d'eau pendant une demi-heure. La pâte qui résulte de cette opération est ressuyée sur Buchner, la fissuration étant orientée le long de stries tracées à la surface qui permettront après séchage à l'air de découper les galettes en petits cubes de 6 à 8 mm d'arête.

Les pâtons ainsi obtenus sont alors imbibés d'eau de façon ménagée pour amener leur « cohésion » à la valeur particulière qui nous intéresse, tout en évitant leur destruction. Nous nous sommes appuyé pour cela sur les observations de HÉNIN déjà citées selon lesquelles une imbibition sous vide ou par capillarité réduisait considérablement l'éclatement. L'humectation a donc eu lieu sous vide et à partir d'une plaque de porcelaine de porosité très fine. Grâce à ce procédé, même les pâtons constitués à partir des terres les plus instables ont conservé une forme géométrique définie.

Les échantillons sont ensuite soumis à des efforts croissants s'exerçant dans le sens de la compression. On mesure alors la déformation permanente du cube de terre. Chaque série de mesures permet de tracer une courbe qui pour chaque échantillon

représente les variations de l'épaisseur du pâton en fonction des forces appliquées.

La position des différentes courbes les unes par rapport aux autres permet d'établir un classement des échantillons sur une échelle de « cohésion » dont les valeurs sont conventionnellement définies par la pente de la courbe au voisinage de l'origine des efforts. Le graphique 3 illustre ce qu'on peut attendre d'un tel mode opératoire.

A l'aide de ce test, nous avons tout d'abord voulu mettre directement en évidence l'influence des traitements avec des substances organiques diverses. Nous avons ensuite recherché s'il existait une relation entre cette première gamme de comportement et les résultats d'une technique indirecte reposant sur l'action de certains prétraitements avant tamisage sous l'eau.

b) *Utilisation des prétraitements pour déterminer la part
revenant à une augmentation
de cohésion dans un phénomène de stabilisation*

Lorsqu'on traite un échantillon de sol de façon à modifier ses seules propriétés mécaniques, on constate que s'il en résulte une modification de stabilité celle-ci apparaît d'autant mieux au tamisage sous l'eau que l'échantillon est imbibé au préalable par un liquide polaire présentant une plus grande affinité pour l'eau.

Nous avons comparé par exemple la stabilité de deux types d'agrégats d'horizon B. Les uns « naturels » sont extraits par tamisage à sec du prélèvement ; les autres « artificiels » sont obtenus par simple agglomération au contact d'une quantité limitée d'eau de particules fines (inférieures à 200 μ) provenant du broyage du matériel précédent.

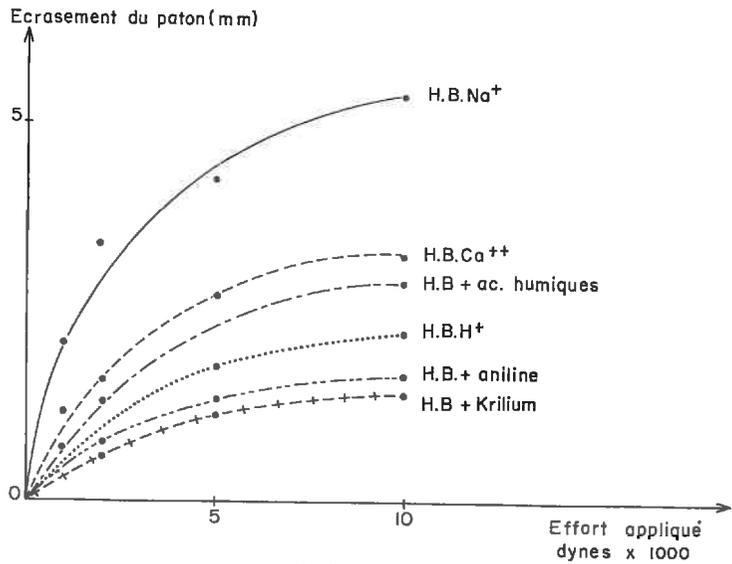
On constate que seuls l'alcool éthylique et mieux encore le dioxane utilisés en prétraitement font apparaître une différence notable de comportement au cours du tamisage sous l'eau entre ces deux séries d'agrégats. L'action directe ou après prétraitement au benzène de l'eau est trop brutale pour faire apparaître l'influence d'une modification de la seule cohésion.

Le tableau ci-après illustre cette observation.

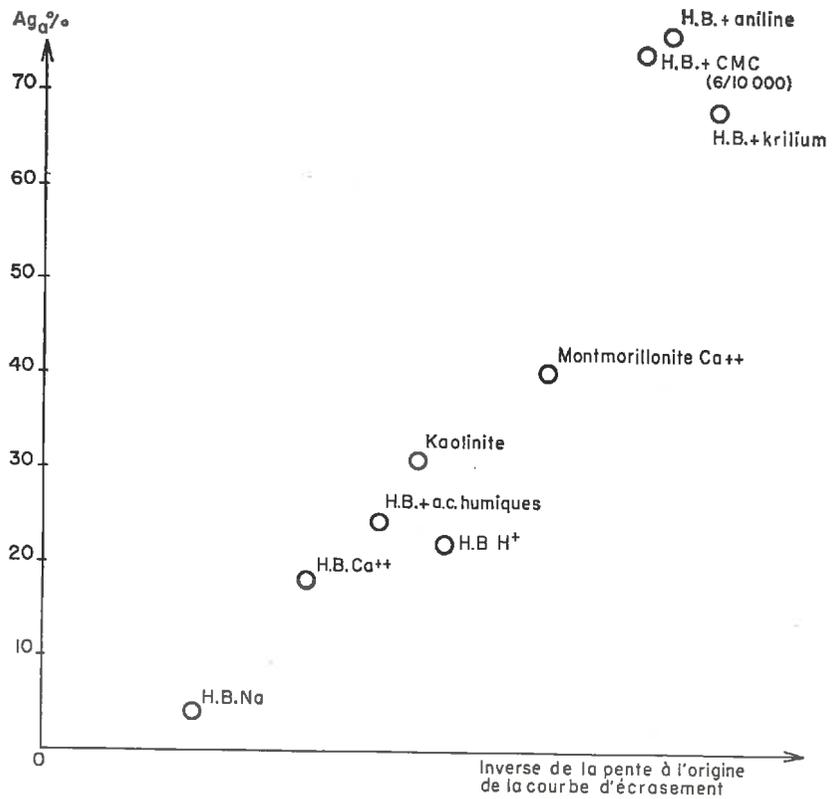
TABLEAU 4
Stabilité comparée d'agrégats naturels et artificiels

Échantillon	% agrégats stables après prétraitement			
	Air	Alcool éthylique	Dioxane	Benzène
Agrégats naturels	4,9	17,0	50,5	1,5
Agrégats artificiels	0,4	6,4	15,4	0

Rappelons d'autre part que l'étude du comportement comparé des grands groupes de sols vis-à-vis des différents prétraitements (voir p. 24) a clairement fait apparaître que seul le traitement à l'alcool était susceptible de rendre compte de différences de stabilité structurale observées *in situ* entre deux sols ne se distin-



GRAPHIQUE 3. — Appréciation de la cohésion de la terre humide d'horizon B différemment traitée



GRAPHIQUE 4. — Relation entre la cohésion de la terre humide et le taux d'agrégats stables après traitement à l'alcool éthylique

quant que par leur teneur en argile granulométrique, par la nature minéralogique de celle-ci ou par sa garniture ionique, toutes caractéristiques influençant principalement la cohésion du sol.

Étant donné l'intérêt pour notre recherche d'une telle hypothèse, si elle s'avérait fondée, nous avons cherché à vérifier qu'il existait une relation entre les résultats de l'appréciation directe de la cohésion de la terre humide selon la méthode que nous avons décrite (pente au voisinage de l'origine) et la stabilité de l'alcool (Ag_c p. 100) des pâtons. Le graphique 4 indique que les points expérimentaux se groupent le long d'une droite. Il faut cependant remarquer que l'action d'une matière organique étant toujours plus ou moins complexe, le résultat positif du test à l'alcool pratiqué sur un sol traité ne pourra indiquer qu'une tendance en faveur de la prédominance d'une action de type « cohésion » ; il est bien évident qu'un traitement organique qui rendrait la terre très peu mouillable sans pour autant modifier sa cohésion, provoquerait lui aussi un accroissement du taux d' Ag_a avec toutefois, dans ce cas, une modification simultanée du taux Ag_b p. cent.

II. — DÉFINITION ET MESURE DE LA MOUILLABILITÉ

L'angle α de raccordement sol/eau n'est pas directement mesurable dans le cas du sol. La hauteur maxima d'ascension capillaire $H = \frac{2 T_2 \cos \alpha}{r}$ est beaucoup trop influencée par les hétérogénéités dans la valeur de r pour fournir un terme de comparaison de diverses affinités sol/eau. Aussi L. TURC, dans une étude non publiée, avait-il mis au point un test de mouillabilité basé sur la mesure de la proportion de particules calibrées restant accrochées à un interface eau/benzène. Nous avons obtenu des résultats comparables à ceux obtenus par cet auteur en utilisant une méthode plus rapide bien que moins précise basée sur l'appréciation de la vitesse initiale d'ascension capillaire.

Rappelons que cette vitesse est de la forme :

$$V = k \frac{\varphi(z)}{H} \frac{2 A_r \cos \alpha - z}{z},$$

Z représentant la hauteur du front d'humectation par rapport au plan d'eau libre et k un coefficient constant. On peut raisonnablement admettre que pour les faibles valeurs de z , c'est-à-dire au début de l'ascension capillaire, $\cos \alpha$ détermine V .

En effet, pour 2 valeurs α_1 et α_2 , toutes choses égales par ailleurs :

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{2 A \cos \alpha_1 - rz}{2 A \cos \alpha_2 - rz}$$

La technique que nous avons utilisée est alors la suivante : des échantillons d'agrégats calibrés d'un même sol ont été soumis à divers traitements de façon à ne modifier que leur mouillabilité.

Chaque lot a été ensuite introduit dans des conditions standard dans un tube de verre dont la base a été mise au contact d'un plan d'eau. La comparaison de la hauteur du front d'humectation capillaire dans les différents tubes au bout d'un

temps donné de l'ordre de la minute, fournit une évaluation de la mouillabilité du sol en valeur relative pour un même support minéral.

Par la méthode de flottaison L. TURC avait dans une étude non publiée montré l'influence des cations adsorbés, sur la mouillabilité du sol. Le tableau 5 compare les résultats avec ceux que nous avons obtenus par des mesures de vitesse initiale d'ascension capillaire.

TABLEAU 5

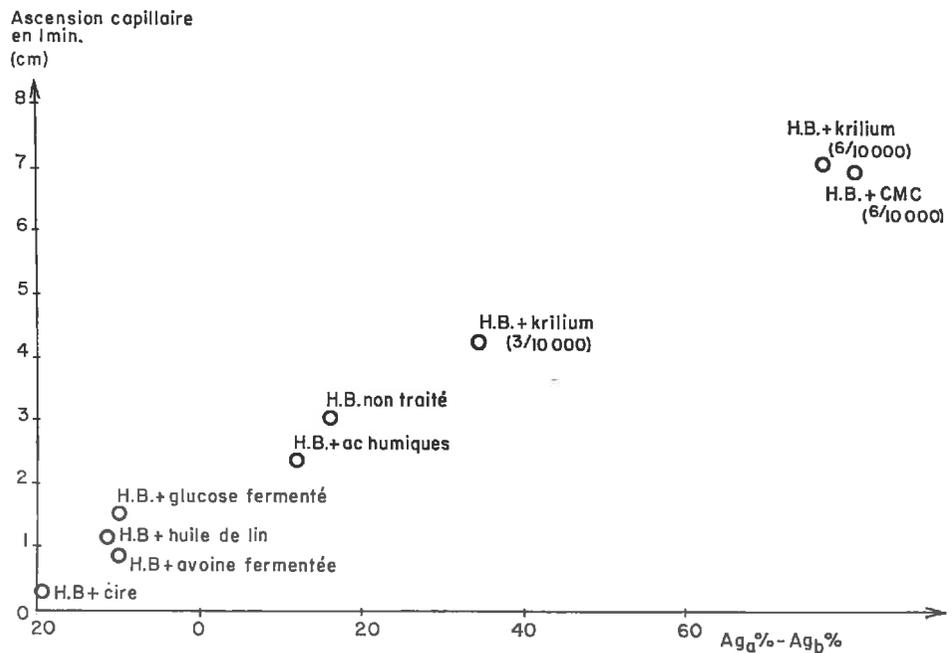
Étude par deux méthodes de l'influence des cations du sol sur sa mouillabilité

Échantillons	Terre H ⁺	Terre H ⁺ Ca ⁺⁺	Terre Ca ⁺⁺
p. 100 de la terre accrochée à l'interface eau/benzène (TURC).....	43	18	12
Ascension capillaire en 2 mn (mm).....	32	42	45

On constate qu'il existe un accord satisfaisant entre les résultats des deux méthodes et entre ces résultats et ce qu'on sait de l'affinité pour l'eau des ions H⁺ et Ca⁺⁺.

Par ailleurs, on peut constater qu'il existe une relation entre la vitesse initiale d'ascension capillaire et la différence $Ag_a - Ag_b$, cette dernière étant d'autant plus faible (elle peut même atteindre des valeurs négatives) que le sol est moins mouillable pour une « cohésion » donnée.

Le graphique 5 représente cette relation.



GRAPHIQUE 5. — Relation entre la mouillabilité du sol (vitesse d'ascension capillaire) et l'effet spécifique du prétraitement au benzène ($Ag_a\% - Ag_b\%$)

* * *

Ainsi le tamisage sous l'eau d'un échantillon de sol préalablement imbibé avec certains liquides organiques est susceptible de fournir deux sortes d'indication.

Tout d'abord, nous l'avons vu, une telle série de tests permet de placer le sol étudié sur une échelle de stabilité qui reproduit fidèlement le classement des différents comportements tels qu'on peut les observer au champ, C'est là une garantie portant sur le caractère global de l'étude ainsi pratiquée et sur la valeur de l'interprétation agronomique que l'on pourra en tirer.

Par ailleurs, nous avons constaté que les résultats obtenus dans certains tests étaient liés aux valeurs appréciables d'une façon directe de certains facteurs essentiels de la stabilité. Ainsi, 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 ». Ces liaisons sont confirmées par le comportement comparé aux différents tests de sols naturels présentant des propriétés bien caractéristiques (voir p. 24).

Il est donc possible par la comparaison des résultats des différents prétraitements de connaître le mécanisme dominant de la stabilisation due à un traitement donné:

CHAPITRE III

ÉTUDE DES « ÉCHANTILLONS-MODÈLES »

Notre plan de travail comporte, en premier lieu, l'étude d'échantillons enrichis en matière organique à l'aide de substances définies et dont en conséquence les propriétés peuvent être connues. Cette étude est destinée à fournir un cadre à l'interprétation du comportement d'échantillons contenant des matières organiques complexes dont le type d'action sur le sol ne peut être préjugé.

I. — PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS-MODÈLES

Afin de simplifier la comparaison des produits étudiés nous les avons fixés sur un support minéral unique : l'horizon d'accumulation (horizon B) d'un sol de limon de Versailles. La composition granulométrique de l'horizon B est présentée dans le tableau 6.

TABLEAU 6

Granulométrie de l'horizon B

Fractions	Matières organiques	< 2 μ	2-20 μ	20-50 μ	50-200 μ	200 μ 2 mm
p. 100 de terre séchée à 105°	0,6	32,0	40,5	20,0	4,8	2,1

Ce matériau a l'avantage d'être suffisamment riche en éléments fins et en particulier en argile ; il est pauvre en sables grossiers dont, nous l'avons vu, la présence diminue la précision des déterminations de stabilité par les tests de l'« analyse d'agrégats ».

Enfin sa teneur en matières organiques est suffisamment faible pour n'avoir qu'une influence négligeable sur son comportement.

Les matières organiques choisies ont été appliquées en solution ou pseudo-solution dans l'eau ou dans un solvant organique volatil sur des agrégats du support de diamètre inférieur à 2 mm.

Il était nécessaire de disposer d'une technique permettant d'obtenir des témoins (échantillons mis au contact du solvant sans la matière organique) présentant une

stabilité inchangée par rapport à celle du matériau de départ. Il s'est avéré que pour que cette condition soit remplie il fallait :

— appliquer progressivement la solution organique par une pulvérisation très fine ;

— veiller à ce que l'humidité (dans le cas des solutions aqueuses) ne dépasse pas une certaine valeur, soit 25 p. 100 pour l'horizon B ;

— lorsque le solvant utilisé est le benzène ces précautions sont inutiles et il suffit de mettre les agrégats directement au contact d'une quantité de solution suffisante pour imbiber la totalité de l'échantillon.

L'échantillon traité est séché à l'air et retamisé avec précaution à 2 mm de façon à séparer les agrégats qui auraient pu s'agglomérer entre eux malgré les précautions prises.

Les substances organiques choisies pour l'élaboration de ces échantillons modèles ont été :

— un polyacrylate de sodium (le krihium), une carboxyméthylcellulose (CMC) et des acides humiques extraits du purin, apportés en pseudo-solution aqueuse.

— de la cire d'abeille, de l'acide oléique et de l'huile de lin en solution benzénique.

II. — LES RÉSULTATS

Les résultats du tamisage sous l'eau après divers prétraitements effectués sur les échantillons sont rassemblés dans le tableau 7.

TABLEAU 7
Comportement des échantillons modèles

Prétraitements → Échantillons ↓	Taux d'agrégats stables après divers prétraitements				
	Air	Alcool	Dioxane	Benzène	Nitrobenzène
Carboxyméthylcellulose	56 (800)	77 (452)	81 (162)	15 (600)	30 (1 000)
Polyacrylate	48 (685)	69 (406)	80 (160)	10 (300)	26 (866)
Acide oléique	20 (285)	30 (176)	50 (100)	8 (320)	29 (966)
Huile de lin	32 (457)	42 (247)	56 (112)	57 (2 280)	54 (1 800)
Acides humiques	17,5 (250)	23 (135)	48 (96)	14 (560)	18 (600)
Cire d'abeille	35 (500)	44 (258)	70 (140)	36 (1 440)	82 (2 733)
Témoin Horizon B	7 (100)	17 (100)	50 (100)	2,5 (100)	3 (100)

Les chiffres entre parenthèses correspondent à un indice calculé sur la base 100 pour le support minéral témoin dans chaque prétraitement.

Les quantités de substances apportées correspondent à 1 p. 100 de la terre sèche, sauf en ce qui concerne le kriliium et la carboxyméthylcellulose pour lesquels l'effet maximum est atteint à une dose de 1 p. 1000.

On constate que les propriétés conférées au sol par la fixation de ces diverses substances organiques se manifestent bien comme on pouvait le prévoir.

C'est ainsi que les longues molécules de polyacrylate et de carboxyméthylcellulose permettent d'obtenir une quantité importante d'agrégats stables après prétraitement à l'alcool et plus encore au dioxane. Rappelons que le résultat de ce test s'est montré en corrélation étroite avec les mesures de « cohésion » et que celles-ci ont montré directement l'accroissement de résistance consécutif à la fixation de polyacrylate et de carboxyméthylcellulose.

Au contraire la fixation d'acides gras, tels que l'acide oléique et surtout l'acide linoléique contenu dans l'huile de lin, ou de cire d'abeille s'est traduite par un remarquable accroissement de stabilité lorsque la terre est prétraitée au benzène avant le tamisage sous l'eau. Or nous avons constaté la liaison existant entre le comportement après ce prétraitement et le test de mouillabilité à partir de la vitesse initiale d'ascension capillaire. Ainsi c'est bien un effet antimouillant que l'on met en évidence. Par analogie on constate que les acides humiques confèrent au sol un comportement équivalent bien que moins marqué.

Les corps agissant sur la cohésion que nous avons étudiés accroissent, nous l'avons vu (p. 36), la mouillabilité du sol.

Leur fixation devrait donc provoquer une destruction plus rapide des agrégats si elle n'affectait pas également, mais dans un sens opposé, la cohésion.

Au contraire les acides gras se montrent relativement moins efficaces sur la cohésion que les longues molécules organiques.

Ainsi nous pensons avoir constitué une gamme de substances de référence qui grâce à la concordance entre les appréciations directes et le comportement après divers prétraitement nous permet de préciser une dernière fois le sens des tests utilisés pour évaluer la stabilité de la structure et par voie de conséquence nous fournira un moyen d'analyser l'effet produit par un type donné de matière organique. Il nous est donc désormais possible d'aborder l'étude de substances organiques moins bien définies.

CHAPITRE IV

ÉTUDE DES PHÉNOMÈNES DE FERMENTATION

Les matières organiques qui assurent, dans le sol, l'ensemble complexe de fonctions que nous avons évoquées en introduction et qui règlent en particulier dans une large mesure la stabilité de la structure sont élaborées au cours de phénomènes de fermentation. Ces derniers dépendent du métabolite de départ et des conditions de milieu (aération, richesse minérale, température, humidité... etc.) qui sont elles-mêmes liées au type de sol, aux conditions climatiques et, dans le cas des sols cultivés, aux techniques culturales utilisées.

Dans le milieu naturel, il est difficile d'isoler ces différents facteurs pour en apprécier l'influence particulière. C'est pourquoi nous avons cherché à obtenir, au laboratoire, des échantillons enrichis en matières organiques qui soient le produit de fermentation dirigées en ce qui concerne le métabolite de départ et les conditions dans lesquelles elles se déroulent.

A — Action des agents de la fermentation

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

Certains auteurs parmi lesquels SWABY (1950) et HÉNIN (1944) ont en effet souligné le rôle des gommés et mucilages d'origine bactérienne et des filaments mycéliens qui se développent lorsqu'on ajoute au sol une substance fermentescible dans des conditions autorisant une activité des micro-organismes.

Nous nous sommes inspirés d'une expérience de HÉNIN dans laquelle cet auteur avait utilisé le glucose comme source de carbone. Ce sucre paraissait peu susceptible en lui-même ou dans ses sous-produits de dégradation de modifier les facteurs tels que mouillabilité et cohésion qui commandent, nous l'avons vu, le comportement du sol vis-à-vis de l'eau. Une raison supplémentaire de choisir le glucose nous a été fournie par sa très grande fermentescibilité propre à faciliter l'étude successive des différentes phases de la fermentation dans un laps de temps relativement court.

I. — DESCRIPTION DE L'EXPÉRIENCE

Deux séries d'échantillons composées d'agrégats d'horizon B de diamètre moyen compris entre 0,2 et 2 mm. ont été amenées à une humidité de 25 p. 100 à l'aide d'une solution contenant respectivement du glucose et de l'azote nitrique pour la première série, du glucose seul pour la deuxième série. Les quantités de glucose solubilisé

étaient calculées de façon à ce que chaque échantillon reçoive 2 p. 100 de son poids sec de glucose (soit 8 p. 1 000 de carbone), la quantité d'azote correspondant pour la première série à un rapport C/N égal à 10 pour l'ensemble de l'apport. Ces échantillons ont été introduits dans des flacons bouchés au liège de façon à maintenir un milieu relativement aéré au niveau de la fermentation, le tout étant placé à l'étuve humide à 30° C.

Tous les cinq jours on a extrait de l'étuve un échantillon de chaque série qui a immédiatement fait l'objet d'un examen à la loupe binoculaire dans le but de déceler la présence de champignons ou de colonies d'autres micro-organismes. Après séchage à l'air, nous avons examiné le comportement d'une fine gouttelette d'eau déposée sur l'échantillon pour contrôler directement l'évolution de sa mouillabilité.

Les échantillons ont été ensuite soumis aux différents tests de l'analyse d'agrégats et l'on a dosé le carbone et l'azote organique qu'ils renfermaient.

II. — ÉVOLUTION DES TAUX DE CARBONE ET D'AGRÉGATS STABLES

Les deux graphiques ci-contre (6 et 7) indiquent les variations des taux d'agrégats stables après les deux prétraitements principaux (alcool et benzène) pour chacune des deux séries : avec et sans apport d'azote sous forme nitrique. Nous avons porté sur ces mêmes graphiques l'évolution de la teneur en carbone organique et du rapport C/N au cours de la fermentation. L'examen et la comparaison de ces deux graphiques mettent en évidence un certain nombre de faits :

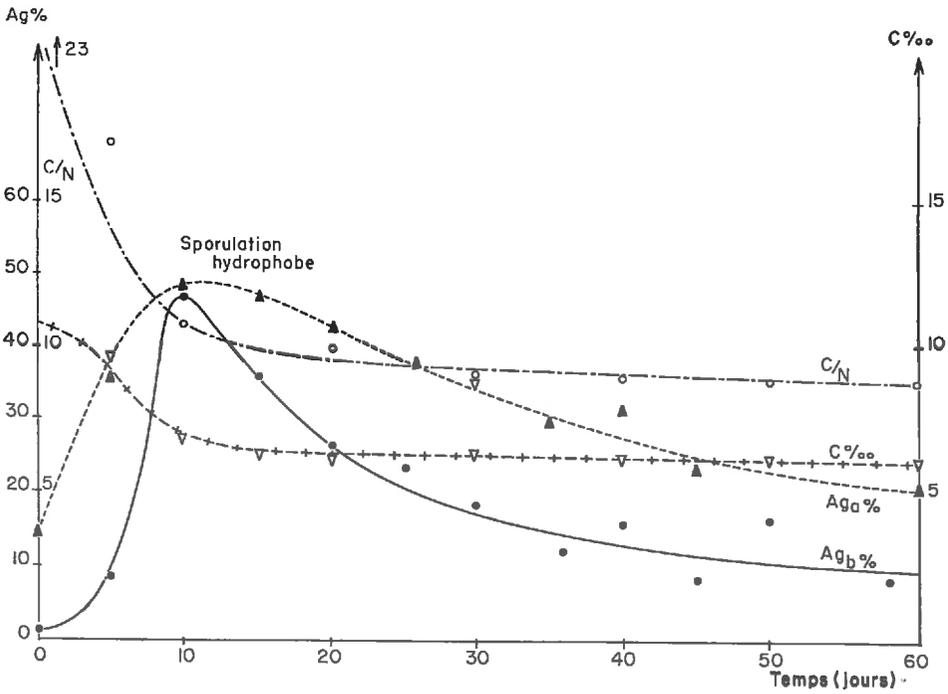
Tout d'abord, on peut constater que l'évolution de la stabilité est liée aux variations de la teneur en carbone organique. Plus précisément, tout accroissement de stabilité correspond à la disparition, provoquée par fermentation, d'une certaine quantité de carbone.

Cette disparition de glucose et les phénomènes qui l'accompagnent ne se produisent pas au même rythme en présence ou en l'absence d'azote nitrique.

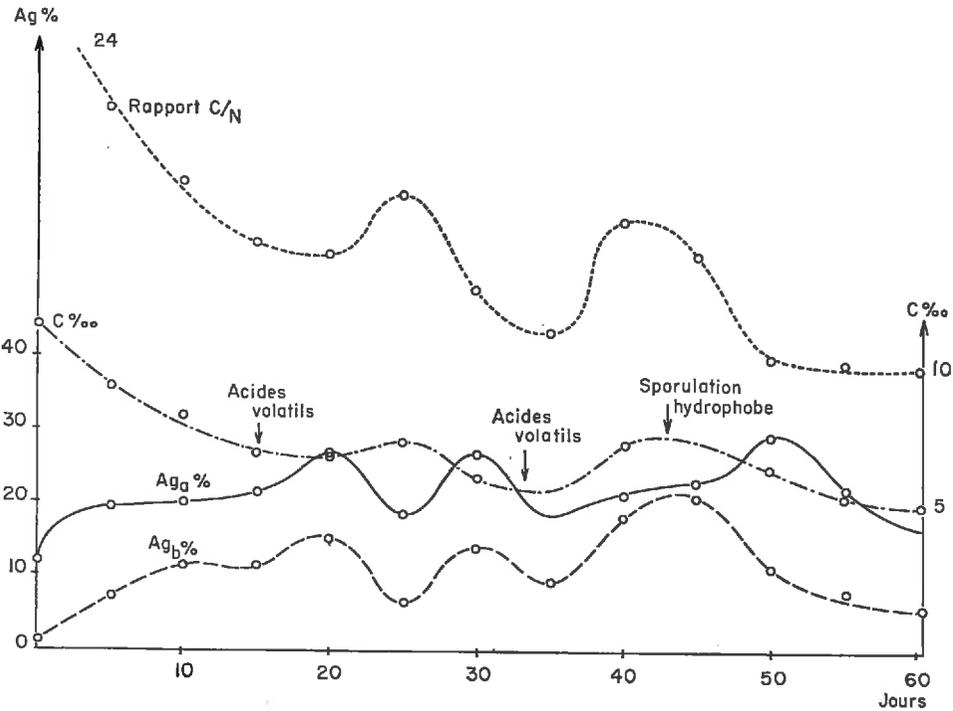
En présence d'azote, le phénomène est extrêmement rapide et régulier : dix jours après le début de la fermentation, le rapport C/N est déjà descendu à une valeur très voisine de 10 aux alentours de laquelle il se maintiendra pendant toute la durée de l'expérience ; à la même époque les 3/4 du carbone apporté ont disparu et la diminution ne sera plus désormais qu'extrêmement lente. L'évolution structurale est à peu près achevée dès ce moment-là.

Par contre, en l'absence d'azote minéral, l'évolution est à la fois plus lente et plus anarchique : c'est seulement à partir du 60^e jour que les teneurs en carbone deviennent équivalentes dans les deux séries.

Encore, doit-on noter des anomalies dans l'évolution des teneurs en carbone et corrélativement des rapports C/N en l'absence d'azote. A certaines époques en effet, aux environs des 25^e et 40^e jours, le milieu semble s'enrichir en carbone. Ce phénomène, évidemment aberrant, paraît être en relation avec le fait que quelques jours avant ces périodes les échantillons ont été le siège de fermentations particulières se manifestant par le dégagement aisément perceptible à l'odorat d'acides volatils. Étant donné que ces derniers et particulièrement l'acide acétique ne sont que partiellement oxydés par le mélange sulfochromique dans les conditions où nous opérons, on peut supposer que les « enrichissements » observés sur certains



GRAPHIQUE 6. — Évolution d'un sol au cours de la fermentation de glucose en présence d'azote nitrique



GRAPHIQUE 7. — Évolution d'un sol au cours de la fermentation de glucose en l'absence d'azote nitrique

échantillons n'étaient qu'apparents et résultaient d'une appréciation faussée des teneurs en carbone des échantillons antérieurs. Ce point de vue a été confirmé par le dosage des acides volatils dans les différents échantillons en cause. Ce n'est en effet qu'aux périodes précédant immédiatement les « remontées » anormales de la teneur en carbone que les quantités d'acides volatils présentes dans le milieu à l'ouverture des flacons ont été suffisantes pour être dosées. Exprimées en taux de carbone de l'acide acétique elles se sont alors élevées à des valeurs du même ordre de grandeur, soit 1 à 2 p. 100 de carbone, que les variations anormales que nous avons observées.

III. — RELATIONS ENTRE LES VARIATIONS DE STABILITÉ ET LE DÉVELOPPEMENT DES MICRO-ORGANISMES

L'examen des échantillons à la loupe binoculaire dès leur sortie de l'étuve nous a permis de constater qu'il existait une incidence du développement de champignons à la surface des agrégats sur l'évolution de la stabilité structurale. Cette incidence est particulièrement nette dans les premières phases de la fermentation en présence d'azote nitrique.

Au 5^e jour, en effet, les agrégats soumis à une telle fermentation apparaissent revêtus d'abondants filaments mycéliens grisâtres. A ce stade l'échantillon reste parfaitement mouillable même après séchage à l'air : une fine goutte d'eau déposée à sa surface s'étale en effet aussitôt et est rapidement absorbée. Toutefois, si l'on noie sous l'objectif un tel agrégat, il se délite beaucoup plus lentement qu'un agrégat non fermenté : sa « cohésion » à l'état humide semble donc plus importante. Parallèlement, le taux d'agrégats stables à l'alcool Ag_a p. 100 atteint 36 p. 100 contre 18 p. 100 pour le témoin, le taux d'agrégats stables au benzène Ag_b p. 100 n'étant que faiblement modifié.

Au 10^e jour les champignons ont abondamment sporulé recouvrant les agrégats d'une poussière vert-de-gris qui s'avère extrêmement hydrophobe. Une gouttelette d'eau déposée sur l'échantillon séché, conserve jusqu'à évaporation une forme arrondie. Il devient difficile de noyer certains agrégats. A cette période on relève un accroissement considérable d' Ag_b qui atteint 47 p. 100.

Dans le cas de la fermentation sans azote le phénomène est beaucoup moins net en raison du faible développement des micro-organismes. Toutefois l'augmentation de Ag_b p. 100 qui se produit au 40^e jour correspond à l'apparition de spores non mouillables à la surface de certains agrégats.

Ainsi la présence et ce stade de développement des champignons sont apparus dans cette expérience comme des facteurs très importants de stabilisation de la structure. L'observation directe permet même de préciser le mécanisme de leur action ; l'interprétation, sur les bases que nous avons établies au chapitre II, des taux d'agrégats stables après prétraitement à l'alcool et au benzène vient à l'appui des conclusions tirées :

Les filaments mycéliens emballent l'agrégat dans un réseau lui permettant de mieux résister au délitement : il s'agit alors d'une augmentation de cohésion.

Les spores, ainsi vraisemblablement que certaines gommés d'origine bactérienne, ont une action anti-mouillante. De très faibles quantités de ces substances sont alors capables de provoquer des accroissements considérables de stabilité.

La netteté de ces actions nous a incité à étudier les populations microbiennes présentes dans les échantillons fermentés. Pour cela nous avons procédé à des comptages par la technique des dilutions qui consiste à ensemencer une série de plaques de silicogel avec des broyats de plus en plus dilués de l'échantillon étudié et à déterminer le nombre et la nature des colonies microbiennes apparaissant après un séjour de quelques jours dans une étuve à culture.

Nous avons apprécié les populations présentes au 40^e jour dans chacune des séries avec ou sans azote. La comparaison des différentes dilutions n'ayant fait apparaître clairement que l'abondance relative d'*Aspergillus* en présence d'azote nous nous bornerons à présenter globalement les résultats (tabl. 7 bis).

TABLEAU 7 bis

Populations microbiennes au 40^e jour de fermentation

	Série sans azote	Série avec azote
Nombre total de colonies	13	53
Champignons	12 { <i>Penicillium</i> 80 % <i>Trichoderma</i> 10 % Dematiées 10 %	38 { <i>Aspergillus</i> 60 % Dematiées 15 % <i>Penicillium</i> 15 % Divers 10 %
Bactéries	1 Bacille	12 { Staphylocoque 40 % <i>Diplococcus</i> 25 % Bacilles 25 % Divers 10 %

Les pourcentages sont donnés en chiffres arrondis aux dizaines et demi-dizaines.

On constate tout d'abord qu'en présence d'azote la microflore est beaucoup plus riche, tant au point de vue de la variété des genres que de l'abondance des germes.

Dans l'échantillon fermenté sans azote on ne trouve pratiquement que des champignons qui appartiennent presque tous au genre *Penicillium*. Au contraire l'échantillon fermenté avec azote contient également de nombreuses colonies de bactéries et les champignons qu'il renferme sont plus divers, bien que le genre *Aspergillus* prédomine ; un ensemencement d'un milieu de culture avec les spores apparus au 10^e jour nous permet, de plus, de penser que ce sont des *Aspergillus* qui ont été responsables de la « pointe » de stabilité observée à cette époque.

Enfin, on doit souligner que, dans les deux séries, les champignons les plus fréquents appartiennent à des genres couramment représentés dans le sol en conditions naturelles, et qu'ils y sont peu spécifiques d'une source de carbone déterminée. Il est donc probable que la comparaison reste valable lors de l'enfouissement de matières organiques diverses dans les conditions de la pratique agricole.

Ce premier groupe d'expériences semble mettre clairement en évidence l'importance, déjà soulignée par différents auteurs, des corps microbiens agents de l'évolution des matières organiques dans le sol et cela indépendamment des produits de métabolisme qu'ils élaborent au cours de leur action. De plus, les conditions de milieu apparaissent comme jouant un rôle déterminant parce qu'elles influencent à la fois la qualité, l'importance numérique et le rythme de développement des micro-organismes qui jouent ce rôle de stabilisateur de la structure. Il est bien évident que cette action directe de la microflore est d'autant plus sensible qu'elle est, comme c'était le cas dans les fermentations à partir de glucose que nous avons décrites, pratiquement la seule à se manifester par suite de l'absence ou de la faible importance de produits d'évolution organiques issus de ces fermentations. Il semble que l'action des engrais verts, très controversée en ce qui concerne une amélioration de stabilité structurale, puisse être rattachée à cette catégorie de phénomènes. Nous verrons, dans la deuxième partie de ce mémoire que cette hypothèse est assez raisonnable et qu'en particulier, elle permet d'expliquer un certain nombre de bénéfices tirés de l'application de cette technique culturale.

B. Stabilisation due à la fermentation de produits végétaux

Après avoir mis en évidence le rôle propre des micro-organismes responsables des fermentations, il nous reste à étudier l'influence des produits de la fermentation.

I. — ESSAI DE DURÉE DE FERMENTATION A PARTIR DE FOIN DE LUZERNE

Dans une première expérience inspirée des essais « glucose » mais où ce sucre a été remplacé par de la farine de foin de luzerne (3,75 g pour 100 g de terre sèche), nous avons cherché à analyser le mécanisme de la fixation au sol des produits formés à différentes périodes de la fermentation. Nous avons appliqué dans ce but à des échantillons ayant fermenté pendant des temps croissants la technique précédemment décrite de fractionnement densimétrique des matières organiques. Les résultats ainsi obtenus ainsi que les stabilités structurales exprimées en taux d'agrégats stables au benzène sont présentés dans le graphique 8.

On constate que la liaison de substances organiques nouvelles à la partie minérale du sol se manifeste dès le 10^e jour. L'évolution très rapide au début se ralentit à partir du 20^e au 30^e jour.

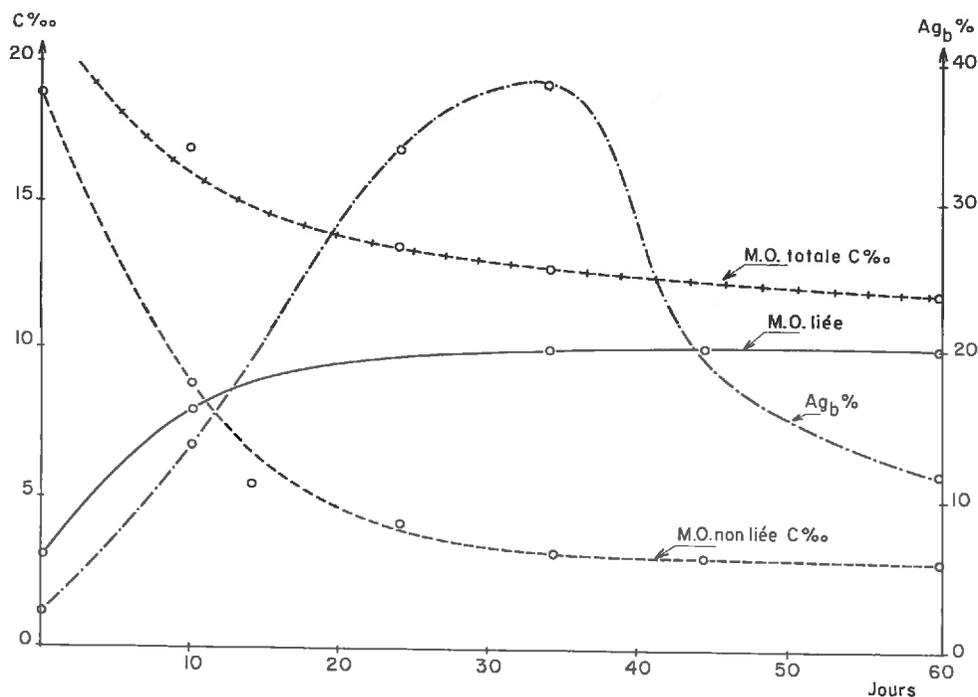
D'autre part le rendement de la transformation de la matière organique libre apportée en matière organique liée est relativement important pour l'ensemble de la période étudiée. En effet à la disparition de 16 p. 1 000 de carbone sous forme libre correspond une augmentation de 7 p. 1 000 de carbone sous forme liée soit un rendement de 45 p. 100 environ. Compte tenu de cette valeur et de la durée de notre expérience, nous avons tout lieu de penser que les matières liées ainsi fixées sont pour la plupart d'entre elles des produits préhumiques, donc transitoires.

Nous en aurons confirmation plus loin (voir p. 68)

Parallèlement à cette évolution, les modifications de stabilité structurale

(Ag_b p. 100) sont sensibles dès le 10^e jour. Le taux d'agrégats stables après prétraitement au benzène croît jusque vers le 10^e jour où l'on atteint des valeurs de Ag_b proches de 40 p. 100. Cette date correspond par ailleurs au ralentissement de la liaison des matières organiques, et vraisemblablement à la fin d'un premier cycle de développement des micro-organismes. En effet dans les semaines suivantes, la teneur en agrégats stables décroît jusqu'à des valeurs de 26 p. 100 environ. Pendant la durée de notre expérience il semblait qu'un palier était atteint.

Si maintenant nous examinons plus précisément la relation entre la matière organique liée et le taux d'agrégats stables Ag_b , nous constatons qu'au 60^e jour 7 p. 1000 de carbone nouvellement lié ont provoqué un accroissement de 15 à 20 p. 100 d'agrégats stables alors que au 30^e jour la fixation d'une quantité inférieure de carbone avait assuré la stabilisation de près de 40 p. 100 de Ag_b supplémentaires.



GRAPHIQUE 8. — Évolution d'un sol au cours de la fermentation de farine de jain de Luzerne

On peut interpréter cette différence en supposant qu'au 15^e jour, la stabilité est assurée simultanément par des produits de dégradation de la luzerne et par des corps microbiens hydrophobes. Ces derniers peuvent être progressivement détruits entre le 30^e et le 60^e jour par de nouveaux micro-organismes ne possédant pas des propriétés aussi marquées vis-à-vis de l'eau. SWABY a déjà signalé l'existence de telles successions dans les populations de micro-organismes et nous avons vu ici même dans le cas du glucose que la stabilisation par les corps microbiens n'était pas durable. Lorsque l'action intense mais éphémère des corps microbiens s'est atténuée on peut considérer que les produits de la fermentation sont responsables de la plus grande part de la stabilité restante.

Si cette hypothèse est fondée il est probable que bien que de plus en plus lente l'évolution de ces produits transitoires vers l'humus se poursuit provoquant ainsi une diminution progressive de la stabilité du sol. C'est effectivement ce que l'on peut constater, nous le verrons, lorsqu'on étudie des essais de longue durée comportant l'enfouissement au champ de foin de luzerne.

En conclusion, lorsqu'on passe d'une source de carbone telle que le glucose peu susceptible de fournir des sous-produits de fermentation actifs vis-à-vis de la stabilité du sol à des matières organiques fermentescibles plus complexes et dont la dégradation microbienne conduit à la formation de substances susceptibles de modifier le comportement du sol vis-à-vis de l'eau, on conserve les grandes lignes du phénomène. Toutefois, deux facteurs au lieu d'un seul se manifestent alors : ce sont d'abord les micro-organismes eux-mêmes dont l'action brutale mais éphémère suit de très près l'incorporation ; ce sont, dans un deuxième temps, les produits d'évolution, pour la plupart transitoires, dont l'action spécifique est plus faible, mais aussi plus durable. C'est donc dans cette deuxième phase que nous nous placerons pour comparer à un moment donné le rôle des produits de fermentations formés et fixés au sol dans diverses conditions.

II. — ESSAIS DE FERMENTATION EN TUBES

Pour préciser ces conditions d'efficacité des produits préhumiques dont l'essai précédent a mis en évidence l'influence sur la stabilité structurale, nous avons adopté une technique expérimentale appropriée à l'étude séparée au laboratoire de quelques facteurs principaux.

Le dispositif devait nous permettre de faire varier la nature du matériel végétal apporté et les conditions d'aération de la fermentation. Nous avons également cherché à pouvoir juger séparément l'efficacité des produits immédiatement fixés au sol à leur point de formation et celle des produits ayant migré. Enfin il nous fallait obtenir pour chaque catégorie une gamme de teneurs en carbone lié suffisamment progressive et étendue pour permettre la recherche des relations quantitatives entre la concentration en produit et les répercussions sur les différentes formes de stabilité.

Mode opératoire

Des agrégats de l'horizon B de Versailles calibrés de 0,2 à 2 mm constituent le support minéral. Des tubes de 5 cm de diamètre, et d'une vingtaine de cm de hauteur, dont l'ouverture inférieure est obturée par une étamine de nylon surmontée d'un lit de graviers de 1 cm d'épaisseur sont remplis pour moitié avec le mélange opéré à sec d'agrégats d'horizon B et de la quantité choisie (variant de 2 à 10 p. 100 pour chaque type) d'une farine végétale déterminée et pour moitié d'agrégats d'horizon B purs. La colonne est alors imbibée d'eau par capillarité de façon à obtenir une humidification complète avec une destruction minime des agrégats.

Lorsqu'on désire que la fermentation ait lieu en milieu aérobie, le mélange horizon B-farine végétale est disposé dans la partie supérieure du tube et repose sur une colonne de hauteur équivalente d'horizon B pur. L'humidification terminée, le tube est suspendu à un support de façon à ce que son drainage s'effectue librement puis il est gardé dans une pièce à température constante. Son poids est apprécié

aussitôt après la fin du drainage et maintenu constant par des apports d'eau quotidiens à la partie supérieure du tube. Cette dernière est obturée par un tampon humide d'éponge de manière à éviter toute évaporation au niveau supérieur du tube. Cette évaporation a lieu par contre d'une façon intense en raison de la température élevée (25°) et de la ventilation dans l'enceinte de fermentation, au niveau de la toile de nylon qui supporte la colonne de terre. Dans ces conditions, un milieu aérobie prévaut dans l'ensemble de la colonne de terre. Dans la moitié supérieure du tube prennent naissance des substances dont une partie se fixe aux particules de terre qui sont immédiatement à leur contact au moment de leur formation. La percolation de l'eau apportée quotidiennement pour compenser les pertes par évaporation entraîne les substances les plus mobiles vers la partie inférieure du tube où se trouvent des agrégats d'horizon B sur lesquels elles se fixent. Le demi-tube inférieur se trouve donc enrichi en produits capables de migrer qui se fixent en quantités variables suivant la cote des agrégats considérés (distance au front d'évaporation et à la source de substances mobiles).

Lorsqu'on désire que la fermentation ait lieu en milieu anaérobie, le mélange horizon B-matière organique est déposé dans le fond du tube directement au-dessus de la toile de nylon ; la colonne d'horizon B pur occupe alors la partie supérieure du tube. Après imbibition capillaire dans les mêmes conditions que précédemment, chaque tube est déposé dans un récipient rempli d'eau de façon à ce que le niveau y atteigne la limite supérieure de la colonne de mélange horizon B-matière organique qui se trouve ainsi entièrement saturée d'eau. Dans l'enceinte de fermentation, chaude et ventilée, une évaporation assez intense se produit au niveau supérieur du tube. Cette perte est compensée par la remontée capillaire, à travers le tube, de l'eau en réserve dans le récipient dont le niveau est maintenu constant par des additions quotidiennes. On voit que par un processus analogue à celui qui se produit dans les tubes aérobies il y a transport de la zone de fermentation vers la colonne d'horizon B pur d'une partie des produits mobiles.

On aboutit ainsi, après un délai de quelques semaines et dépotage des tubes par tranches successives, à la constitution d'une série d'échantillons contenant, les uns un reste de matière organique libre et les produits qui se sont fixés sur place, les autres des quantités variables des produits d'imprégnation. Suivant les cas la fermentation a eu lieu en milieu aérobie ou en milieu anaérobie.

Dans tous les cas l'expérience a été poursuivie pendant deux mois et demi, c'est-à-dire suffisamment pour que la période initiale d'action brutale des micro-organismes soit dépassée (voir p. 47) et que l'on ait principalement affaire à l'action des produits de la décomposition.

Les échantillons ont été débarrassés, par fractionnement densimétrique, des résidus non fixés de la fermentation et soumis à une série de mesures portant sur les taux de carbone organique lié et d'agrégats stables après les différents prétraitements classiques de l'analyse d'agrégats.

En résumé, les divers échantillons obtenus présentent les caractéristiques résultant de la combinaison des différents facteurs suivants :

Nature du matériel végétal.

Nous avons opéré à partir de farine de luzerne caractérisée par la finesse de sa granulométrie et sa relative richesse en azote (C/N = 15), de farine de paille de blé,

beaucoup plus grossière et de C/N élevé, et de farine de paille d'avoine voisine du blé pour le C/N et intermédiaire entre la luzerne et le blé quant à la finesse.

Conditions d'aération.

Rappelons que la matière organique pouvait être placée dans des conditions d'anaérobiose strictes (immersion dans de l'eau) ou d'aérobiose, l'humidité du sol étant alors maintenue à un niveau voisin de la capacité au champ. Dans tous les cas les produits de migration ce sont déposés en milieu aéré.

La solubilité des produits de décomposition.

Nous avons pu étudier séparément l'action sur la terre, au niveau même des matières végétales, des substances fixées sur place qui comprenaient essentiellement des corps microbiens et des produits pré-humiques ou humiques faiblement solubles ou insolubles ; en effet, la circulation de l'eau a été telle, à ce niveau, tout au long de l'expérience, que l'on peut admettre que la grande majorité des produits solubles a été entraînée. Ces derniers, en se déposant, en conditions aérobies dans tous les cas sur d'autres particules d'horizon B, nous ont fourni une gamme d'échantillons plus ou moins enrichis en matières toujours solubles au départ mais formées dans des conditions d'aération différentes. Nous désignerons par « produits de transport » ou d'« imprégnation » les substances ayant ainsi migré et par « produits fixés sur place » les substances du premier type.

Teneur en produits de décomposition.

Suivant la quantité de matière végétale incorporée, sa nature, les conditions de fermentation, la distance des particules enrichies au lieu de formation des produits de transport et à la surface d'évaporation, les teneurs en carbone ont été suffisamment différentes (4 à 20 p. 1 000) pour nous fournir une gamme d'échantillons permettant d'établir des relations statistiques entre la concentration en produits et ses répercussions sur les différentes formes de stabilité.

Nous étudierons successivement ces différents points tout en soulignant qu'il s'agit là d'une division quelque peu arbitraire si l'on envisage la transposition des résultats dans le milieu naturel où dans la plupart des cas il y a succession dans le temps ou juxtaposition des diverses conditions que la nécessité d'une analyse des phénomènes nous a contraint d'isoler.

Comparaison des différentes matières végétales incorporées

Une telle étude doit porter sur deux aspects des phénomènes survenus au cours de la fermentation.

Tout d'abord, nous avons comparé la quantité de substances fixées au sol au bout d'un temps déterminé et à partir d'un apport donné de matière sèche végétale.

Le tableau 8 présente les résultats moyens obtenus à partir d'apports de matières végétales correspondant à 10 p. 100 de la masse de terre.

On constate que la quantité de substances formées à partir de la luzerne est sensiblement plus élevée que les quantités formées à partir des parties de blé ou d'avoine. Le rapport C/N de l'apport organique semble donc être le facteur déter-

minant de l'intensité de l'évolution au moins dans les conditions où nous nous trouvons, c'est-à-dire dans le cas d'un sol pratiquement dépourvu d'azote minéral.

Par contre la finesse relative de la farine de paille d'avoine ne semble pas avoir permis une décomposition supplémentaire par rapport au blé.

TABLEAU 8

Comparaison des teneurs moyennes en carbone lié (C ‰) 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

Ces conclusions semblent valables aussi bien pour les produits de transport que pour les produits fixés sur place et cela quelles que soient les conditions de fermentation.

Le deuxième point de cette étude a porté sur l'efficacité spécifique des produits formés à partir des différentes matières végétales incorporées.

Sans préjuger de la loi régissant les rapports entre la teneur en carbone et la stabilité nous avons comparé les taux d'agrégats stables obtenus à partir d'échantillons présentant des teneurs en carbone lié comparables mais provenant de la décomposition des trois matières végétales étudiées (tabl. 9.)

TABLEAU 9

Comparaison de l'efficacité des substances issues de matières végétales différentes (Produits fixés sur place)

Condition de fermentation	Matière végétale	C lié ‰	Ag _a	Ag _b	
Anaérobiose	luzerne	7,45	38	52	
		blé	7,25	40	51,4
	blé	avoine	5,5	24	32,6
		avoine	5,6	28,2	33,2
Aérobiose	luzerne	blé	10	56	74
		blé	9,2	49	70,4
		avoine	9,5	55	69
Témoin sans matière organique		3,8	16	3,0	

Il ressort de ces résultats que pour des conditions données d'aération de la fermentation, les produits issus des trois matières végétales étudiées ont une action spécifique tout à fait comparable.

Par ailleurs en supposant cette conclusion acquise c'est-à-dire en admettant qu'il est licite de considérer comme une seule population et donc de confondre sur un même graphique les points représentatifs de la teneur en carbone et de la stabilité de structure des divers essais quelle que soit la substance incorporée au départ, nous avons constaté que ces points se situaient autour de la courbe représentative de la fonction de régression lorsque celle-ci existe sans que la nature de matériel végétal se manifeste.

Il n'en reste évidemment pas moins que la stabilisation obtenue sera très variable en raison des différences d'intensité de la décomposition des matières organiques apportées, différences que le tableau 8 a nettement mises en évidence.

Étude de la stabilisation par les substances organiques fixées sur place

Notre méthode a consisté à rechercher les liaisons pouvant exister entre la teneur en carbone organique lié et les taux d'agrégats stables après prétraitement à l'alcool éthylique ou au benzène des différents échantillons.

Dans ce cadre, nous avons abordé séparément l'étude des substances formées en milieu aérobie et celle des substances formées en milieu anaérobie ; mais conformément à la conclusion énoncée plus haut, nous avons traité simultanément de l'action de ces substances quelle que soit leur origine végétale.

a) Stabilité après prétraitement à l'alcool.

Les graphiques 9 et 10 montrent l'allure de la relation entre la teneur en carbone lié des échantillons et leur taux d'agrégats stables à l'alcool dans les deux conditions de fermentation (aérobie et anaérobie). Rappelons que les variations du taux d'agrégats stables à l'alcool A_{g_a} p. 100 peuvent être interprétées comme reflétant les variations de « cohésion » des échantillons à l'état humide.

Le calcul statistique a permis de calculer entre ces deux séries de données des régressions linéaires d'équation :

$$\begin{array}{ll} \text{en milieu aérobie} \dots & y = 2,66 x + 23,6 \quad (P = 1 \text{ p. } 100) \\ \text{en milieu anaérobie} \dots & y = 4,8 x + 1,3 \quad (P = 10 \text{ p. } 100) \end{array}$$

dans lesquelles y représente le taux d'agrégats stables après prétraitement à l'alcool éthylique et x la teneur en substances fixées exprimée en C p. 1 000. On constate que seule la première de ces régressions a une signification statistique.

L'examen direct des graphiques fait cependant apparaître que les deux nuages de points ne diffèrent sensiblement que pour les valeurs de x inférieures à 7 p. 1 000. Nous avons alors calculé les régressions pour les valeurs de x supérieures à ce seuil :

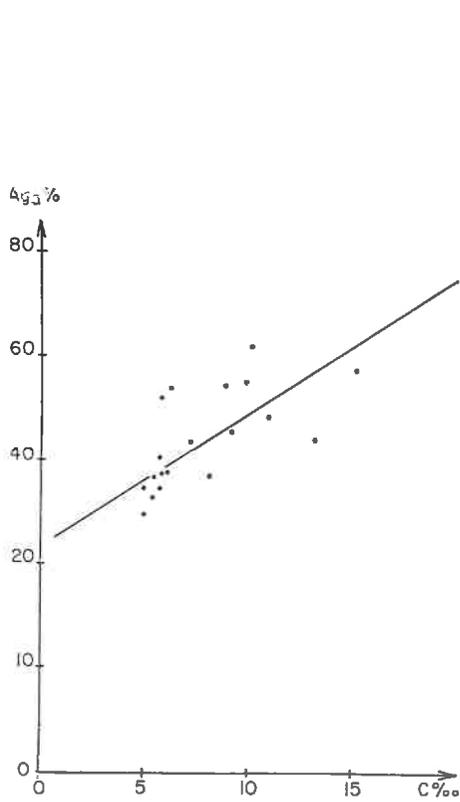
$$\begin{array}{ll} \text{milieu aérobie} \dots\dots\dots & y = 2,48 x + 24,9 \quad (P = 1 \text{ p. } 100) \\ \text{milieu anaérobie} \dots\dots\dots & y = 3,2 x + 19,8 \quad (P = 1 \text{ p. } 100) \end{array}$$

qui sont l'une et l'autre significatives.

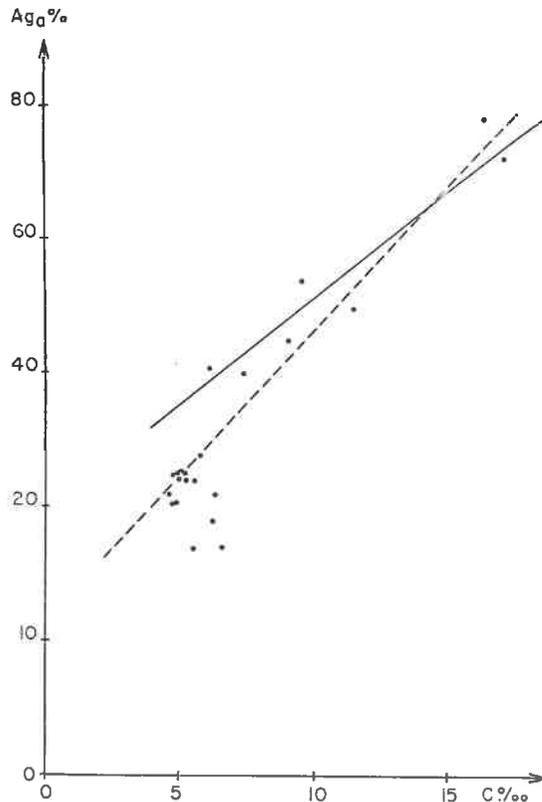
L'ensemble de ces résultats peut alors être interprété de la façon suivante :

Pour les valeurs de x inférieures à 7 p. 1 000, qui correspondent à la fixation de

faibles quantités de substances la cohésion de la terre humide, reflétée par le taux d'agrégats stables après prétraitement à l'alcool, dépend étroitement des conditions physiques dans lesquels se sont trouvées les tranches de sol correspondantes au cours de l'expérience. Ces conditions ont été évidemment beaucoup plus sévères en milieu anaérobie gorgé d'eau. Effectivement, pour l'ensemble des échantillons faiblement enrichis en milieu anaérobie le taux Ag_a p. 100 est en moyenne de 23 p. 100 pour 5,48 p. 1 000 de carbone en milieu anaérobie tandis qu'il s'élève à 41 p. 100 pour



GRAPHIQUE 9. — Action des produits fixés sur place sur la cohésion de la terre humide. Conditions aérobies



GRAPHIQUE 10. — Action des produits fixés sur place sur la cohésion de la terre humide. Conditions anaérobies

une teneur moyenne en carbone équivalente à la précédente (5,6 p. 1 000) en milieu aérobie.

Par contre, pour les quantités de substances fixées supérieures à un seuil correspondant à 7 p. 1 000 de carbone l'allure de la variation de Ag_a p. 100 en fonction de la teneur en matières organiques liées est comparable, aussi bien en ce qui concerne la pente que l'ordonnée à l'origine ($x = 7$) de la droite de régression, quelles que soient les conditions de fermentation. Ce phénomène d'accroissement de cohésion est dans les deux cas de faible intensité, chaque unité p. 1 000 supplémentaire de carbone fixée ne provoquant qu'une augmentation moyenne d'environ 3 p. 100 d' Ag_a .

b) *Stabilité après prétraitement au benzène.*

Les relations entre la teneur en carbone et le taux d'agrégats stables au benzène (Ag_b p. cent (graph. 11 et 12) apparaissent fort différentes des précédentes. Ce résultat était prévisible étant donné que les variations d' Ag_b p. 100 traduisent celles de la mouillabilité et non plus celles de la cohésion des agrégats.

La position des points expérimentaux correspondant à l'une et l'autre conditions de fermentation nous a incité à rechercher une relation de régression de la forme générale :

$$y = \lambda e^{-\left(\frac{\mu}{x}\right)^n}$$

Une telle fonction répondait en effet à un certain nombre d'exigences évidentes telles que de passer par l'origine et de tendre vers une valeur asymptotique lorsque x augmente indéfiniment. Le calcul des paramètres correspondant au meilleur ajustement possible à cette fonction a permis d'écrire les équations de régression suivantes :

$$\text{milieu aérobie} \quad y = 98,6 e^{-\left(\frac{7 \cdot 0}{x}\right)^3} \quad P = 0,1 \text{ p. } 100$$

$$\text{milieu anaérobie} \quad y = 91,2 e^{-\left(\frac{6 \cdot 1}{x}\right)^4} \quad P = 0,1 \text{ p. } 100$$

λ représente la limite vers laquelle tend le taux d'agrégats stables après prétraitement au benzène lorsque la teneur en carbone de l'échantillon augmente. Cette valeur devrait théoriquement être égale à 100 puisque les tubes ont été remplis d'agrégats tous supérieurs à 0,2 mm. qui est la limite retenue pour le tamisage sous l'eau.

Mais ce maximum ne pourrait être atteint que si au cours de la fermentation, il n'y avait pas eu de dégradation structurale. En fait les valeurs numériques de λ tirées des équations de régressions sont légèrement plus faibles, ce qui peut être attribué à la destruction d'une partie des agrégats au cours de la mise en fermentation.

Les différences observées suivant les conditions de fermentation s'expliqueraient alors par le fait que la dégradation a été plus importante en milieu anaérobie ($\lambda = 91,2$) gorgé d'eau, qu'en milieu aérobie ($\lambda = 98,6$)

Cette explication, malgré son caractère hypothétique, rend parfaitement compte des différentes conditions de l'expérience. L'interprétation de μ et de n serait beaucoup plus hasardeuse et nous nous bornerons à supposer que ces paramètres sont rattachés à l'activité spécifique des 2 groupes de matières organiques étudiées et à la nature du support minéral.

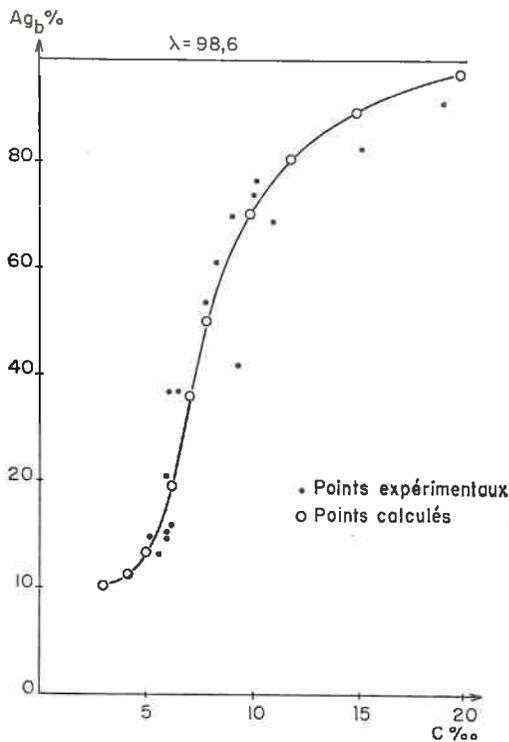
En fait la fonction, rappelons-le, est issue d'un ajustement statistique ; elle ne semble pas avoir une signification physique simple.

c) *Comparaison des stabilités après prétraitement alcool et benzène.*

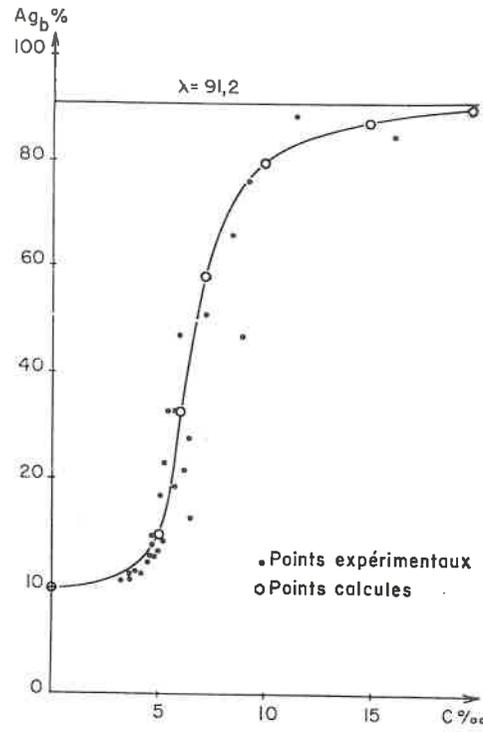
Nous avons par ailleurs cherché à comparer les activités spécifiques des substances fixées sur place d'une part sur la cohésion de la terre humide (Ag_a p. 100) et d'autre part sur la mouillabilité du sol (Ag_b p. 100).

On constate tout d'abord que contrairement à ce qui se passe pour le taux Ag_a p. 100, Ag_b p. 100 est lui modifié par la fixation de très faibles quantités de substances. Ceci est à relier aux modifications de mouillabilité que l'on peut obtenir avec des quantités très petites de substances hydrophobes (S. HÉNIN). La répartition et le mode de fixation de ces dernières jouent alors un rôle déterminant.

D'autre part, si comme cela paraît une approximation raisonnable, nous assimilons à des segments de droite les parties des courbes exponentielles précédentes correspondant aux teneurs en carbone comprises entre 5 et 10 p. 1 000, nous constatons que ces segments ont des pentes voisines de 17 pour les produits anaérobies et de 13 pour les produits aérobies. Ces deux valeurs qui mesurent l'activité spécifique des substances fixées sur la mouillabilité du sol sont donc 4 à 6 fois plus élevées que celles qui expriment l'activité spécifique des mêmes substances, fixées en quantité équivalente, sur la cohésion de la terre humide.



GRAPHIQUE 11. — Action des produits fixés sur place sur la mouillabilité du sol. Conditions aérobies

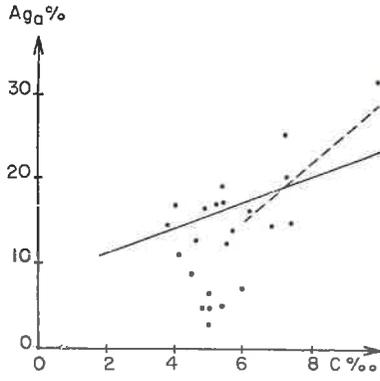


GRAPHIQUE 12. — Action des produits fixés sur place sur la mouillabilité du sol. Conditions anaérobies

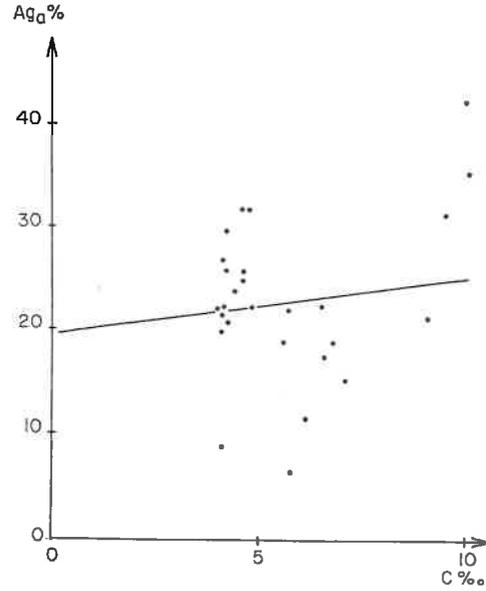
Stabilisation par les produits dits de « transport » ou d'« imprégnation »

Rappelons qu'il s'agit de substances qui après s'être formées dans la partie du tube ayant reçu un apport de matières libres ont migré avant de venir imprégner des agrégats d'horizon B pur.

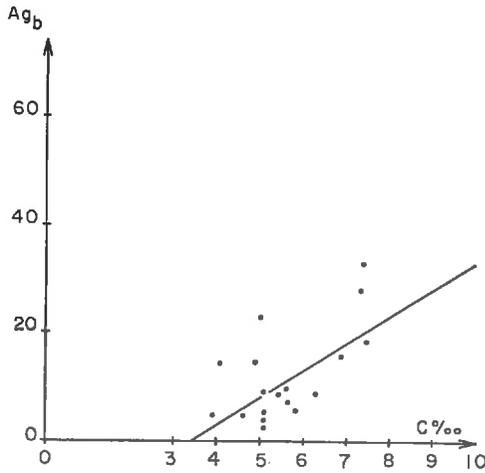
Nous ferons la même distinction que dans le paragraphe précédent suivant que ces substances se sont formées dans des conditions d'aérobiose ou au contraire en l'absence d'oxygène. D'une façon générale, les teneurs en carbone organique ne sont jamais très élevées et il s'ensuit que la gamme des variations sera moins étendue que dans le cas des produits fixés sur place ; ceci rendra plus difficile l'établissement de coefficients d'activité établis à partir de fonctions de régression.



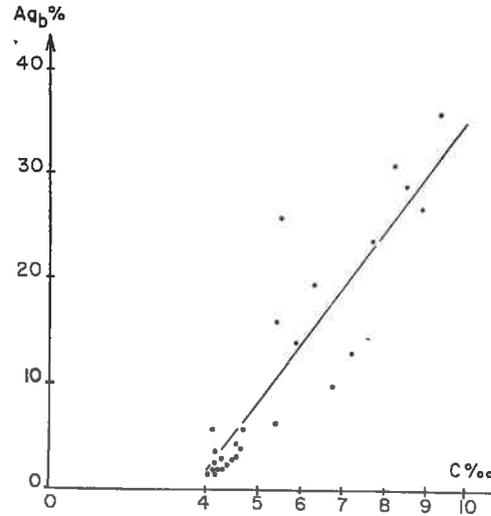
GRAPHIQUE 13. — Action des produits de transport sur la cohésion de la terre humide. Conditions aérobies



GRAPHIQUE 14. — Action des produits de transport sur la cohésion de la terre humide. Conditions anaérobies



GRAPHIQUE 15. — Action des produits de transport sur la mouillabilité du sol. Conditions aérobies



GRAPHIQUE 16. — Action des produits de transport sur la mouillabilité du sol. Conditions anaérobies

a) *Action sur la cohésion (Ag_a)*

En milieu aérobie. — L'action des produits d'imprégnation sur la cohésion présente, pour l'ensemble des teneurs en carbone, une faible intensité qui se traduit par une pente de la droite de régression égale à 1,46. Cette régression linéaire d'équation

$$y = 1,46 x + 8,44 \quad (P = 10 \text{ p. } 100)$$

n'est d'ailleurs significative qu'au seuil $P = 10 \text{ p. } 100$ c'est-à-dire qu'on ne peut la considérer que comme plausible. Si, compte tenu de l'observation faite au sujet des produits insolubles nous retenons seulement les valeurs de x supérieures ou égales à 7 p. 1 000, la régression devient :

$$y = 3,49 x - 6$$

significative au seuil $P = 5 \text{ p. } 100$. L'action des produits de transport issus de fermentations aérobies sur les agrégats qu'ils imprègnent et sur leur cohésion est donc du même ordre de grandeur que celle que nous avons relevée pour les produits fixés sur place.

Dans les conditions d'anaérobiose. — La stabilisation conserve le même caractère. La régression, calculée pour l'ensemble des teneurs en carbone, entre ces dernières et les taux d'agrégats stables après prétraitement au benzène ;

$$y = 0,55 x + 19,9,$$

n'est pas significative. Si l'on considère que la presque totalité des teneurs en carbone des échantillons intéressés sont inférieures à 7 p. 1 000 on peut y voir la confirmation d'une conclusion précédente : cette teneur en carbone représente approximativement un seuil pour l'action sur la cohésion de l'horizon B humide de tous les produits quelles que soient leur solubilité et les conditions dans lesquelles ils ont pris naissance.

b) *Action sur la mouillabilité (Ag_b)*

Par contre en ce qui concerne l'influence des substances d'imprégnation sur l'affinité du sol pour l'eau exprimée en Ag_b p. 100 on constate une forte différence entre les divers produits selon qu'ils se sont formés en milieu aérobie ou en milieu anaérobie. Dans le premier cas, la pente de la droite de régression du taux d'agrégats stables après prétraitements benzène en teneur en carbone organique

$$y = 2,42 x - 6,51$$

significative au seul $P = 0,1 \text{ p. } 100$, est relativement faible.

Dans le deuxième cas, l'équation de régression devient

$$y = 5,51 x - 19,4$$

significative au seuil $P = 0,1 \text{ p. } 100$. L'interprétation de cette différence considérable d'activité entre ces produits semble devoir être rattachée aux propriétés des complexes organoferriques. BÉTRÉMIEUX (1951) a en effet montré qu'en milieu anaérobie la migration du fer dans le sol se faisait sous forme de complexes organo-ferreux solubles qui précipitaient sous forme de complexes organo-ferriques en milieu oxydant. Il semble donc que ce soit les propriétés hydrophobes de ces derniers qui

provoquent une stabilisation des agrégats imprégnés par les produits formés en milieu anaérobie tandis que l'action des produits issus de fermentation aérobie ne serait due qu'aux matières organiques seules.

Nous trouverons plus loin (p. 70) une confirmation de ce rôle joué par le fer combiné aux substances organiques, dans la diminution de l'affinité du sol pour l'eau. Notons dès à présent que certains sols humifères et imprégnés d'oxyde de fer par suite de leur inondation prolongée au cours de l'hiver manifestent une hydrophobie extrême allant jusqu'à poser de sérieux problèmes cultureux dès qu'ils sont aérés et séchés au printemps.

Conclusions

1° Ces essais indiquent que la vitesse d'évolution des matières organiques qui s'exprime par la proportion de substance liée dans un temps donné est essentiellement fonction de la teneur en azote du matériel initial. C'est du moins ce qui apparaît quand on compare l'évolution des essais avec introduction de luzerne de de farine de céréales dans un milieu pauvre en azote.

2° L'homogénéité de la relation teneur en matières organiques liées-agrégats stables montre que *dans la limite de précision des expériences* les substances obtenues n'ont pas d'effet spécifique du matériel végétal qui est à leur origine.

Ceci conduit à dire que si l'introduction de luzerne suivie de fermentation accroît davantage le pourcentage d'agrégats stables, la différence tient à la plus grande proportion de matière organique transformée et fixée à partir de la luzerne et non à un effet spécifique supérieur de celle-ci.

3° Il n'y a pas de différence importante entre les actions des divers produits de fermentation sur la cohésion du sol évaluée par le taux d'agrégats stables après prétraitement à l'alcool éthylique. L'activité de l'ensemble des substances étudiées, à cet égard, n'est sensible que pour des teneurs en carbone supérieures à un seuil que l'on peut supposer être fonction des propriétés du support minéral. Au-delà de ce seuil cette activité est modérée dans tous les cas.

Notons enfin que l'existence d'un tel seuil restreint considérablement les possibilités d'interprétation. En effet la relation $Ag_n - C$ p. 1 000 n'existe que pour des échantillons dont la mouillabilité est déjà fortement réduite. Il devient alors difficile d'admettre *a priori* que le résultat du prétraitement à l'alcool éthylique est indépendant de la mouillabilité du sol (voir p. 36).

4° Le principal mécanisme de stabilisation consiste en une diminution de la mouillabilité du sol. Ce phénomène se produit dès la fixation des plus faibles doses de carbone ; mesuré par l'accroissement du taux d'agrégats stables après prétraitement au benzène, il présente une grande intensité.

La solubilité des produits formés et les conditions de fermentation interviennent dans ces modifications de mouillabilité du sol.

Ce sont ces produits fixés sur place qui présentent l'action spécifique la plus importante et, à ce niveau, c'est en milieu anaérobie que la stabilisation maxima est le plus vite atteinte.

Cette influence des conditions de formation des substances est cependant beaucoup plus spectaculaire encore sur l'action des produits d'imprégnation. Cette dernière, en moyenne moins forte que la précédente, passe en effet du simple à plus du

double lorsqu'on passe de substances formées en milieu aérobie à des substances formées en milieu anaérobie.

5° Le rôle du fer, que l'on peut invoquer pour expliquer cette différence, est confirmé par les résultats d'une expérience annexe où les matières végétales ont été apportées au-dessus du sol à la partie supérieure du tube, l'ensemble de la colonne de sol restant aéré. Il n'a pas été possible dans ces conditions de dégager une relation entre les quantités de carbone fixées par le sol représentant les produits solubles issus de ce « *mulch* » et un accroissement quel qu'il soit de stabilité. L'interprétation la plus immédiate de cette particularité pourrait être fournie en supposant que les fermentations se produisant en dehors du sol et en milieu aéré n'entraînent pas de solubilisation du fer, qui confère ultérieurement aux produits fixés leur stabilité de liaison et leur caractère hydrophobe. Bien que cette conclusion doive être encore considérée comme hypothétique, nous avons fourni en sa faveur quelques arguments qui nous semblent assez convaincants ; si elle était définitivement établie, elle représenterait un élément fondamental du mode d'action des matières organiques.

CHAPITRE V

MODIFICATION EXPÉRIMENTALE DE STABILITÉ

Dans cette série d'expériences nous avons cherché à modifier les propriétés de matières organiques d'origines diverses, par des traitements tels que mise en fermentation ou chauffage à différentes températures. On pouvait en effet espérer mettre en évidence par ces procédés des particularités dans le comportement de certaines substances, permettant par la suite soit d'identifier, soit de préciser le mécanisme de leur action.

A. Action du chauffage

D'une façon générale le chauffage à des températures relativement basses des matières organiques produit une transformation qui s'accomplit le plus souvent dans le sens d'une polymérisation. Celle-ci résulte d'une condensation de fonctions constituant les groupes hydrophiles les plus actifs. Le résultat probable de ces traitements devait donc *a priori* se traduire par un accroissement des propriétés hydrophobes du sol.

D'autre part, la combustion des matières organiques dans les champs est à la base de pratiques traditionnelles de l'agriculture telles que l'essartage et l'écobuage. Si la première de ces techniques consiste en une destruction par le feu de la masse végétale recouvrant le sol qui se trouve alors assez peu modifié, l'écobuage, par contre, par lequel on s'efforce de faire brûler la matière organique en mélange intime avec la terre, a une action beaucoup plus marquée. Traditionnellement, on considère que cette technique allège les terres fortes, ce qui implique une certaine dénaturation de l'argile. L'art traditionnel du briquetier et du potier confirme l'existence de telles modifications lorsque le chauffage est intense.

Par ailleurs les résultats récents de LEBORGNE (1960) mettent en évidence une transformation des oxydes de fer se traduisant par l'apparition d'« espèces » à hautes susceptibilités magnétiques bien au-dessous des températures de cuisson technologique. Comme nous le verrons, cet effet est d'ailleurs lui aussi lié à la transformation des matières organiques sous l'influence du chauffage.

Nos expériences ont été poursuivies aussi bien au champ qu'au laboratoire. Nous étudierons donc successivement ces deux aspects de notre travail.

I. — CHAUFFAGE AU LABORATOIRE

a) *Comportement d'un sol pauvre en matières organiques*

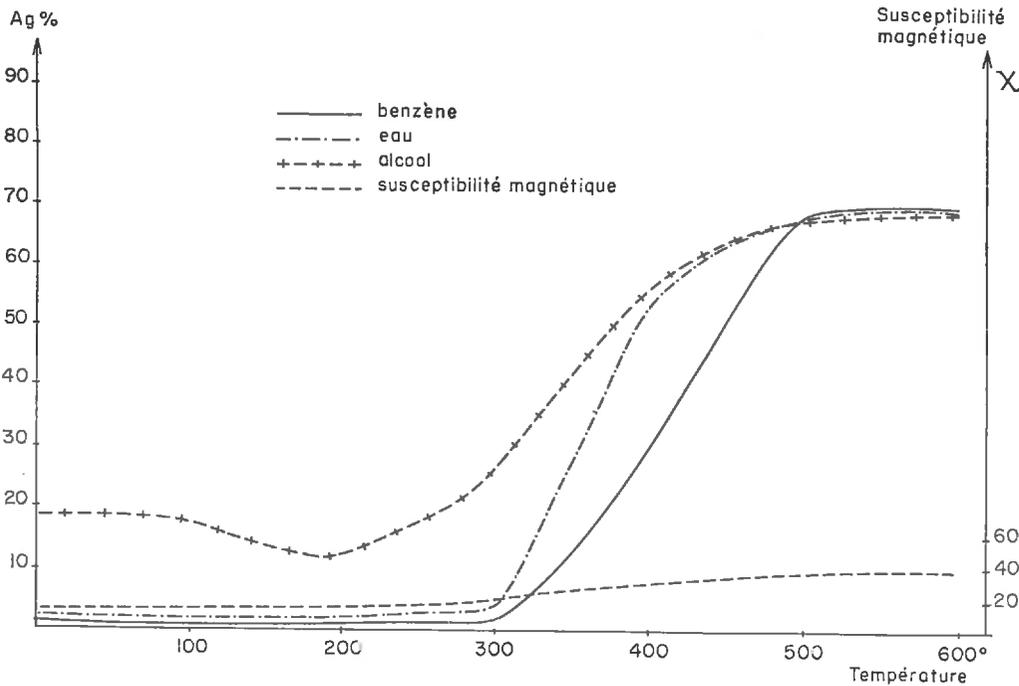
Il était nécessaire tout d'abord d'examiner l'action du chauffage sur un sol dépourvu de matières organiques. Nous avons choisi pour cela des agrégats calibrés (0,2 à 2 mm.) de l'horizon B du sol de limon de Versailles qui ont été portés au four

à moufle pendant 3 ou 4 heures à des températures variables allant de 100 à 600°. Le graphique 17 indique le sens général de variation des différents taux d'agrégats stables.

L'examen comparé des différents tests de stabilité structurale permet de préciser les trois étapes successives de cette variation :

— entre 200 et 300°, seul le traitement « alcool » met en évidence une légère augmentation de la cohésion ;

— entre 300 et 400°, la cohésion devient suffisante pour être décelable par une action non ménagée de l'eau (Ag_e p. 100) et même, dans une moindre mesure, après prétraitement au benzène ;



GRAPHIQUE 17. — *Évolution sous l'influence du chauffage des propriétés d'un sol pauvre en matières organiques (Horizon B de Versailles)*

— entre 400 et 500°, la cohésion devient très forte puisque à 500° le prétraitement au benzène donne des résultats identiques à ceux des autres prétraitements.

D'une façon générale, nous voyons qu'il s'agit essentiellement ici d'une augmentation de la « cohésion » des agrégats dont, en collaboration avec R. BÉTRÉMEUX et E. LEBORGNE, (1960), nous avons cherché à analyser le mécanisme. Il ressort de cette étude basée sur la comparaison de l'analyse granulométrique des échantillons chauffés pratiquée avant et après une déferrification ménagée par la méthode de DEB (1950) que les oxydes de fer jouent le rôle de ciments dans cette évolution.

En résumé, il apparaît que dans le cas d'un sol pauvre en matières organiques, les variations de la stabilité structurale provoquées par le chauffage, et qui sont liées

à un accroissement de la cohésion des agrégats terreux, sont explicables par un effet de frittage. Au-dessous de 500°, le frittage se fait par l'intermédiaire des oxydes de fer et les liaisons ainsi créées ne résistent pas plus à une dispersion chimique énergique qu'à l'action brutale du prétraitement benzène ; au-dessus de 500°, le traitement DEB ne libère plus qu'une fraction de particules initiales bien que les minéraux argileux de l'horizon B ne soient pas encore détruits : il est alors possible que des aluminosilicates participent également au frittage et les liaisons qui en résultent sont suffisamment solides pour que le taux d'agrégats stables après un traitement au benzène soit aussi élevé que dans les autres traitements de l'analyse d'agrégats.

b) *Comportement d'un sol enrichi en acides humiques*

Ce résultat étant acquis, nous avons imprégné les mêmes agrégats d'horizon B de 1 p. 100 d'acides humiques extraits de purin ; et ces échantillons ont été portés dans les mêmes conditions aux mêmes températures que dans l'expérience précédente. Le graphique 18 rassemble les résultats obtenus pour les différents tests de l'analyse d'agrégats. La comparaison avec le graphique 17 met en évidence un certain nombre de différences dans le comportement des échantillons chauffés.

Tout d'abord, un premier phénomène qui n'existait pas en l'absence de matières organiques se produit aux environs de 200°. Il s'agit d'une augmentation sensible du taux d'agrégats stables après prétraitement au benzène accompagnée de la légère diminution de Ag_a et Ag_e déjà notée en l'absence de matières organiques. Rappelons que les résultats de l'analyse granulométrique nous avaient alors fait conclure à une dispersabilité plus élevée de l'échantillon chauffé.

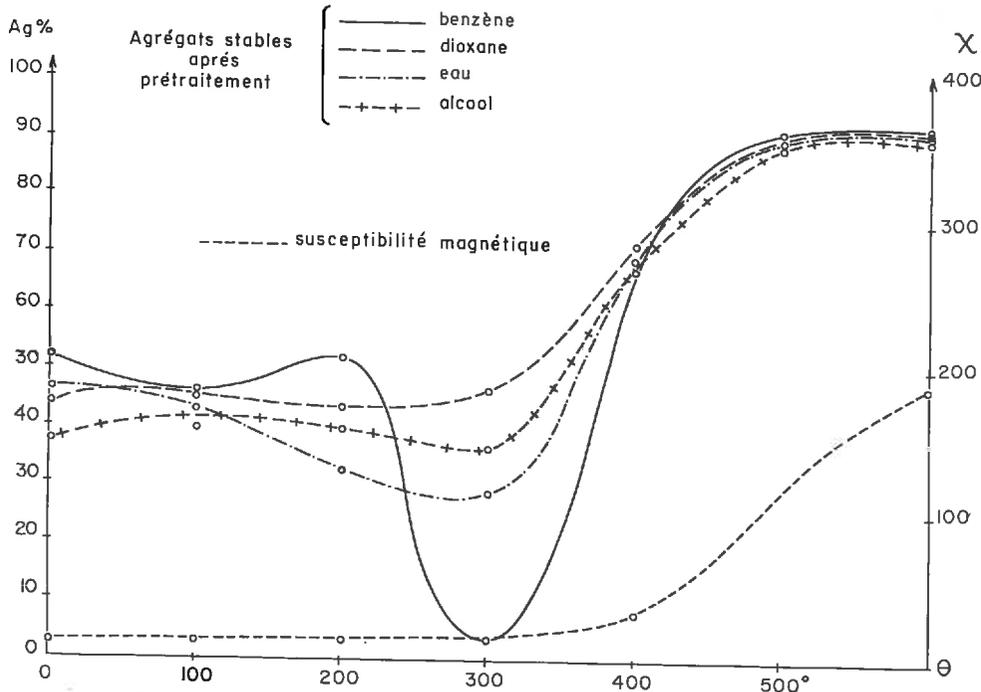
On peut donc interpréter raisonnablement cet accroissement de Ag_b p. 100 comme une diminution de mouillabilité due à une transformation des acides humiques.

A 300°, on assiste, sans modification importante des taux d'agrégats stables à l'alcool et sans prétraitement, à un effondrement du taux d'agrégats stables au benzène dont la valeur rejoint celle de l'échantillon homologue sans matières humiques. Cette évolution peut être rapprochée de celle des teneurs en carbone organique qui baisse entre 200 et 300° de 8,2 à 3 p. 1 000.

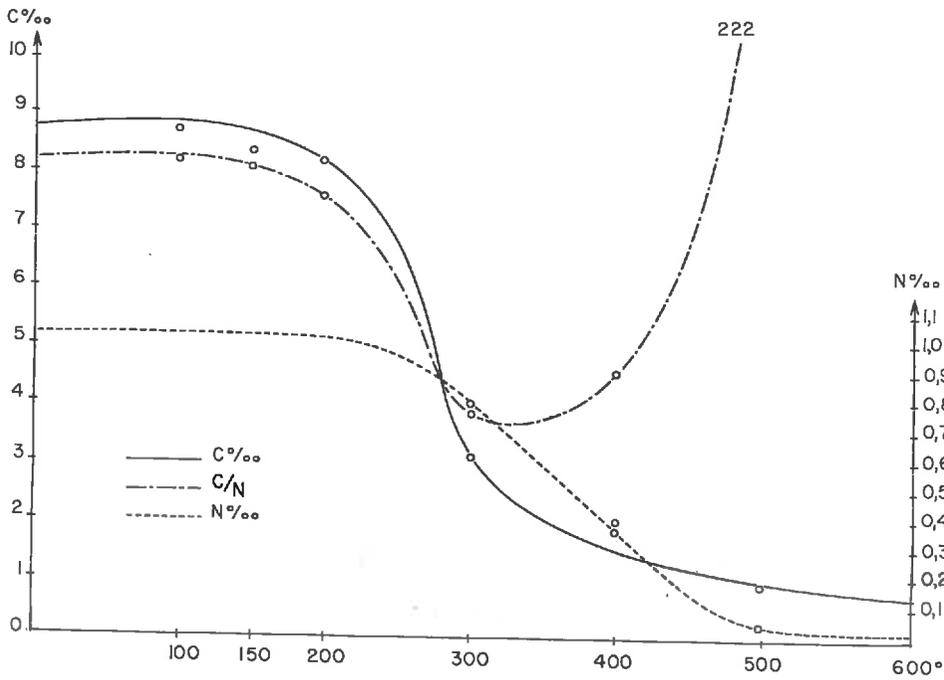
A partir de 300°, l'évolution devient très comparable à celle que nous avons pu observer en l'absence de matières humiques. Le taux de carbone baisse régulièrement pour atteindre vers 600° des valeurs inférieures à 1 p. 1 000 avec toutefois cette particularité qu'au-dessus de 300°, contrairement à ce qui s'était passé auparavant, l'azote organique disparaît plus vite que le carbone puisqu'à 500° les produits résiduels ont un rapport C/N supérieur à 200.

Par ailleurs, il apparaît que l'accroissement de cohésion est plus rapide qu'en l'absence de matières humiques : à 400°, tous les taux d'agrégats, quel que soit le prétraitement, atteignent 70 p. 100 alors que dans l'expérience précédente, cette valeur n'était atteinte qu'à 500° par tous les prétraitements tandis qu'à 400°, Ag_b p. 100 était encore moitié moindre que les taux des agrégats provenant des deux autres prétraitements.

Enfin, le plafond de stabilité atteinte est supérieur dans cette deuxième expérience. Tout se passe comme si les matières organiques résiduelles avaient favorisé les phénomènes de frittage ou comme si les traces organiques à rapport C/N très élevé encore présentes au-dessus de 500° avaient une activité sur la stabilité suffisante



GRAPHIQUE 18. — Évolution sous l'influence du chauffage des propriétés d'un sol enrichi en substances organiques



GRAPHIQUE 18 bis — Évolution des substances humiques d'un sol au cours du chauffage

pour expliquer les 15 à 20 p. 100 d'agrégats supplémentaires dont le graphique montre l'existence.

En résumé, les matières organiques semblent intervenir à deux stades : à relativement basse température, (vers 200°), les acides humiques ou ce qu'ils sont devenus, diminuent sensiblement la mouillabilité du sol mais cette propriété ne résiste pas à une augmentation supplémentaire de température et disparaît complètement à 300°, température de traitement pour laquelle la stabilité est minimum. D'autre part, la présence de matières organiques accélère et intensifie l'apparition de la cohésion que nous avons notée en l'absence de matières humiques à partir de 4 à 500°.

c) Chauffage de divers échantillons

Nous avons cherché à chauffer à 200°, c'est-à-dire à la température où les matières humiques semblent jouer un rôle qui leur est propre sur la mouillabilité du sol, une série de terres enrichies artificiellement ou au champ par des matières organiques de natures diverses. Le tableau 10 ci-dessous rassemble les résultats comparés avant et après chauffage à 200° sur ces divers échantillons.

TABLEAU 10

Modification de stabilité structurale par chauffage à 200°

Échantillons	Variation Ag _a %		Variation Ag _b %	
	Avant chauffage	Après chauffage	Avant chauffage	Après chauffage
Horizon B (H.B.) Témoin	17,4	16,4	1,6	1,8
H.B. + carboxyméthylcellulose	77,0	11,8	17	4,8
H.B. + polyacrylate (krilium).....	69,0	18	12,2	6,2
H.B. + cire d'abeille.....	4	77,0	13,0	91,0
H.B. + acides humiques	22,8	24,0	5,4	16,6
Horizon B fermenté en présence de :				
Glucose	27,0	12,0	18,4	9,8
Farine Luzerne	23,0	16,4	13,8	8,4
Racines Ray-Grass.....	22,4	10,0	3,8	5,0
Racines de Dactyle	25,4	15,8	5,2	5,0
Limon enrichi par fumier.....			15,7	51,8
Sol sous jeune prairie.....			25,2	37,6
Terre de marais récemment défriché			46,1	75,4

On constate que les échantillons qui contiennent soit des corps microbiens, soit des produits pré-humiques voient leur stabilité baisser dans des proportions variables. Par contre, l'action anti-mouillante de la cire d'abeille est encore accrue de même que celle des échantillons riches en acides humiques, soit artificiellement, soit naturellement (c'est le cas du sol de prairie, du sol de marais, ou du sol d'une parcelle ayant reçu depuis trente ans des doses massives de fumier).

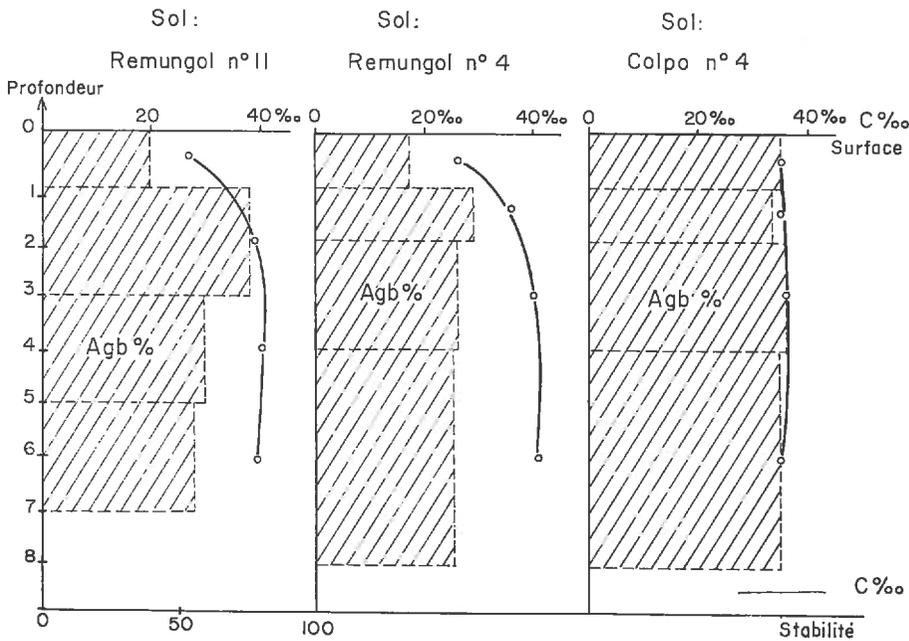
Il ressort de cet ensemble de résultats que s'il n'est pas possible d'établir de

règle générale la nature des matières organiques intervient considérablement pour déterminer la présence et l'intensité de l'accroissement de stabilité mise en évidence.

Il est possible qu'une étude plus fine permette de préciser le résultat qui se dessine : les cires et les substances réellement humiques manifestent après chauffage des propriétés hydrophobes accrues ; au contraire les substances agissant comme ciment et les matières organiques peu évoluées voient leur activité sur la stabilité pratiquement annihilée.

II. — ACTION DES FEUX EN PLEIN CHAMP SUR LA STABILITÉ DES SOLS

Nous avons en premier lieu étudié le comportement de différents sols sous des feux de paille et de fagots. Les profils de stabilité que l'on trouve ci-contre mettent en évidence la relation qui existe entre la distance des échantillons à la surface, donc entre la température à laquelle ils ont été portés d'une part, la teneur en carbone et la stabilité au benzène d'autre part (graph. 19). On constate que chaque fois



GRAPHIQUE 19. — Chauffage de profils de sols en place

que la couche superficielle (en l'occurrence le premier cm) a perdu une quantité importante de matières organiques, le taux d'agrégats Ag_b p. 100 a été fortement diminué. La couche sous-jacente, de 1 à 3 cm de profondeur dont la teneur en carbone organique n'a été que peu diminuée par le feu, voit sa stabilité au benzène sensiblement améliorée. Au-dessous de 3 ou 4 cm, dans le cas de feux d'intensité moyenne, ni la teneur en carbone, ni la stabilité structurale n'ont subi de variations. On peut admettre pour interpréter cette répartition de l'influence du feu suivant la

profondeur que dans la couche la plus superficielle la température devait être de l'ordre de 300 à 400° ce qui correspond à un abaissement très général de la stabilité du sol. Par contre, il est probable que la couche immédiatement sous-jacente a été portée à cette température particulière de 200° qui diminue toujours la mouillabilité d'une partie au moins des matières organiques du sol : celles qui se rattachent au groupe des acides humiques.

Pour préciser ces observations, nous avons comparé sur le sol de limon de la ferme expérimentale de l'I. N. R. A., à la Minière près de Versailles, l'action de deux feux d'intensité différente. Le premier était alimenté par de la paille et du foin mélangé alors que le deuxième était alimenté avec des fagots de bois. Le tableau II permet de comparer la stabilité de 4 couches d'un témoin et de la terre chauffée aux deux intensités différentes.

TABLEAU II
Chauffage de sol — La Minière
(Taux d'agrégats stables après chauffage.)

Profondeur (cm)	Ag _a %	Ag _c %	Ag _b %
1° Témoin			
0-1	10,4	2,8	5,0
1-4	14,8	3,7	3,5
4-8	17,2	3,6	3,7
8-15	14,2	3,5	3,6
2° Feu de paille et foin			
0-1	28,3	25,4	38,0
1-4	14,8	8,8	30,8
4-8	17,4	4,4	4,7
8-15	12,1	4,5	4,9
3° Feu de bois			
0-1	50,9	46,4	52,0
1-4	20,2	12,2	25,9
4-8	14,3	5,4	11,6
8-15	11,5	4,5	4,2

Il ressort de ces chiffres que sous le feu « paille et foin » on note une augmentation considérable de la stabilité au benzène jusqu'à une profondeur de 4 cm alors que seul le premier cm voit sa stabilité alcool augmenter. On peut déduire que l'intensité du feu n'a permis d'atteindre une température permettant un accroissement de cohésion que dans le cm superficiel, la couche de 1 à 4 cm ayant été portée à une température vraisemblablement voisine de 200° ne permettant qu'une diminution de la mouillabilité du sol donc un accroissement de Ag_b p. 100. Par contre, sous le feu de bois, la cohésion est accrue jusqu'à 4 cm et la mouillabilité diminuée jusqu'à 8 cm en raison de l'intensité supérieure du chauffage. Il reste que dans le cas des feux couramment utilisés en agriculture lors du brûlage des pailles de céréales par exemple, seule la stabilité des mottes situées au-dessus de la surface du sol et qui pour cette raison ont pu être portées à une température suffisante voient leur stabilité

quelque peu affectée. En revanche, il apparaît que les feux utilisés lors du défrichage de forêts ou de landes peuvent avoir des conséquences extrêmement sensibles sur les 8 premiers cm du sol, c'est-à-dire sur une partie importante de la future couche arable.

Si nous voulons résumer les enseignements tirés de l'étude des échantillons de sol chauffés, nous pouvons dire que l'intervention des matières organiques dans leur comportement est spécifique des températures inférieures à 400°. Dans la plupart des cas, pour les échantillons naturels, c'est-à-dire pour les échantillons contenant un grand nombre de substances organiques diverses, il se produit aux environs de 200° une diminution de mouillabilité pour au moins quelques unes de ces substances ce qui entraîne un accroissement toujours sensible et parfois extrêmement important de stabilité structurale. D'autre part, il se produit généralement aux environs de 300° une perte en carbone brutale, qui peut aboutir à l'apparition d'un minimum de stabilité.

Pour les températures supérieures à 500°, la stabilisation importante observée semble essentiellement due à des phénomènes de frittage auxquels participent les oxydes de fer et peut-être les alumino-silicates, l'influence des matières organiques n'ayant pour effet que de hâter, c'est-à-dire de faire apparaître à des températures inférieures, cette cohésion et peut-être dans une certaine mesure d'augmenter la cohésion maxima atteinte.

Les résultats obtenus par chauffage expérimental de matières organiques diverses ont montré que c'était essentiellement le groupe des acides humiques, à l'exclusion des produits transitoires de fermentation ou des substances organiques à longue molécule, qui provoquait les diminutions de mouillabilité observées à 200°. Si l'on note que le chauffage d'un échantillon contenant seulement 3 p. 1 000 d'acides humiques permet de faire passer sa stabilité au benzène de 15 à 50 p. 100, on comprendra que les échantillons de sol naturels qui contiennent toujours une certaine quantité de ces substances humiques, réagissent toujours à un chauffage à 200°.

Ainsi on retrouve bien dans le milieu naturel les faits typiques observés au laboratoire à partir des acides humiques. Notre conclusion précédente sans être encore définitive se trouve néanmoins nettement renforcée par cette convergence.

B. Modification expérimentale de la stabilité par fermentation

Les résultats que nous avons obtenus à la suite des expériences d'enrichissement d'échantillons de sol par des produits de fermentation ont mis en évidence, rappelons-le, le rôle très important des corps microbiens et des produits transitoires de l'humification sur la stabilité structurale. Ces conclusions nous ont fait penser qu'il pouvait être intéressant de tester la permanence des effets obtenus. En effet, on pouvait admettre qu'une stabilisation réalisée à partir de substances organiques biologiquement stables avait plus de chance d'être durable que si elle était due à des produits qui ne sont qu'un stade dans le processus général d'humification. Nous verrons d'ailleurs qu'il s'agit là d'un problème qui se pose d'une façon très concrète dans le milieu naturel où l'on doit envisager simultanément l'intensité d'une stabilisation par une technique culturale donnée et la durée de l'effet obtenu.

Nous avons donc examiné quel était le comportement de sols après fermentation d'un mois en présence et en l'absence d'azote minéral. Une technique basée sur ce

principe a été proposée par HÉNIN et ses collaborateurs (1956) pour tester la permanence des conditionneurs dans le sol. Nous avons toutefois préféré le nitrate de calcium à l'urée comme source d'azote : on évite ainsi en effet les perturbations dues aux propriétés dispersantes de l'ammoniaque qui se forme à partir de l'urée. Les échantillons constitués par des agrégats calibrés ont été amenés à une humidité voisine de leur capacité au champ par une pulvérisation fine et placés à l'étuve à 30°, une série comportant l'addition d'azote minéral sous forme de nitrate de calcium ; la quantité de N apportée représente 10 p. 100 de la quantité de carbone présente dans le milieu. Le tableau 12 ci-après rassemble les taux d'agrégats stables après prétraitement au benzène après un mois de fermentation.

TABLEAU 12

Évolution de la stabilité structurale (A₉₀ %) à la suite de fermentation

Échantillons	Sans azote	Avec azote
Sol sous jeune prairie	51	49
Sol sous vieux pâturage	92	94
Sol enrichi par fumier	83	76
Pédologie expérimentale		
H.B. + luzerne fermenté 2 mois	45	35
(Horizon B + glucose) fermenté 45 jours	98	22
Terre de marais très humifère	98	95
Horizon B + polyacrylate	96	91
Horizon B + carboxy méthyl cellulose	55	38
Sol enrichi par du fumier et chauffé à 200°..	103	105

Il s'agit de valeurs indexées ; la base 100 représente, pour chaque échantillon, le taux A₉₀b % avant fermentation.

On constate que l'évolution de la stabilité est très variable suivant les échantillons. Pour certain nombre d'entre eux, il n'y a pas de baisse de stabilité sensible ; c'est le cas de certains sols présentant des teneurs élevées en carbone organique, de l'échantillon enrichi en krillium et d'un échantillon organique chauffé au préalable à 180° mais que nous avons eu la précaution de réensemencer avec une certaine quantité de poudre de l'échantillon non chauffé de façon à ce que les germes détruits par le chauffage soient de nouveau présents dans le milieu. Par contre, d'autres échantillons tels qu'une terre de jeune prairie, un échantillon d'horizon B imprégné de produits pré-humiques issus de la fermentation de luzerne en milieu anaérobie et l'échantillon enrichi en carboxyméthylcellulose et surtout l'horizon B fermenté en présence de glucose voient leur stabilité descendre jusqu'à 20 à 40 p. 100 de sa valeur initiale. En fait, il semble, en ce qui concerne les échantillons naturels, que chaque fois qu'il existait un stock important de matière organique dans le milieu et que les produits « jeunes » ne représentaient qu'une part relativement faible de l'ensemble, la fermentation n'a pas modifié le comportement du sol. La comparaison d'une vieille prairie

et d'une prairie temporaire de trois ans est à cet égard particulièrement significative et nous verrons que cette observation obtenue en un mois au laboratoire confirme l'évolution au champ de la stabilité structurale du sol de ces différentes prairies après leur retournement.

Le comportement comparé de l'échantillon enrichi en kriliium et de celui qui avait reçu de la carboxyméthylcellulose est également instructif et confirme les observations de HÉNIN et *al.* Ces auteurs avaient en effet montré que l'un des tests essentiels pour l'appréciation de la valeur d'une substance comme conditionneur de sol devait être un test de fermentescibilité et ils avaient montré que le kriliium résistait aux micro-organismes alors que la carboxyméthylcellulose était assez rapidement détruite.

En conclusion, il semble que de tels tests de fermentescibilité présentent un certain intérêt puisqu'ils permettent de se faire une idée de la perennité d'une amélioration donnée, et peut-être dans certains cas d'apprécier la contribution de produits « jeunes » biologiquement instables, à cette amélioration.

CHAPITRE VI

INFLUENCE DE DIFFÉRENTS CATIONS ASSOCIÉS A LA MATIÈRE ORGANIQUE SUR LA STABILITÉ STRUCTURALE

On considère généralement que la nature des cations qui sont associés à la fraction humique des matières organiques a une influence importante sur les propriétés de cette fraction vis-à-vis de la structure du sol. C'est ainsi que la stabilité structurale des rendzines et sols bruns calcaires par exemple est reliée à la présence d'humates calciques et que les humates alcalins, aisément dispersés des sols salés n'atténuent pas le mauvais comportement de ces sols.

Par ailleurs, nous avons noté (voir p. 58) que le fer semblait jouer un rôle déterminant dans la stabilisation par des substances issues de fermentations.

Nous avons cherché à préciser ces actions sur un type de matière organique déterminé : celui des acides humiques. Nous avons opéré sur une suspension d'horizon B désaturé (horizon B H⁺) et d'acides humiques, dispersée en milieu légèrement ammoniacal. La dose d'acides humiques correspondait à 0,5 p. 100 du poids de terre sèche.

La cofloculation de l'horizon B H⁺ et de l'humus a été effectuée à l'aide de solutions de différents chlorures et d'acide chlorhydrique.

Après lavage à l'eau distillée par centrifugation pour éliminer l'excès de sel les différents floculats ont été essorés sur Buchner et séchés à la température du laboratoire. Les galettes de terre ainsi obtenues ont été forcées à la main au travers d'un tamis à mailles carrées de 2 mm. d'ouverture et soumises à des tamisages sous l'eau après différents prétraitements, dans les conditions standard de l'« analyse d'agrégats ».

Le tableau 13 présente les résultats obtenus, exprimés en taux d'agrégats stables > 200 μ.

TABLEAU 13

Influence du cation sur l'activité stabilisatrice de divers humates

Prétraitement	Agent floculant				
	ClH	Cl ₂ Mg	Cl ₂ Ca	Cl ₃ Al	Cl ₃ Fe
Dioxane	10,8		12,0	8,4	13,2
Alcool éthylique	5,8	5,3	4,8	7,0	5,6
Air		1,2	2,8	2,0	1,3
Benzène	6,0	1,0	1,6	22,8	27,6
Nitrobenzène	38,7	17,0	22,0	46,0	53,0

Il ressort de ces chiffres deux informations principales :

— Tout d'abord nous trouvons ici une confirmation du fait que la fixation au sol d'acides humiques ou de leurs sels de métaux di- et trivalents ne provoque pas de modification sensible de la cohésion du sol telle qu'elle apparaît au travers des tests comportant prétraitement à l'alcool ou au dioxane. Cette conclusion apparaît de plus *indépendante du mode opératoire*, fort différent ici de celui utilisé pour la fabrication des « échantillons-modèles ».

— La deuxième information concerne l'action des humates di- et trivalents et celle des acides humiques sur la mouillabilité du sol (prétraitements au benzène et au nitrobenzène). On constate qu'une diminution de mouillabilité sensible n'est observée que pour les terres floculées par l'acide chlorhydrique et les chlorures de fer et d'aluminium. Les humates alcalinoterreux et singulièrement les humates de calcium ne semblent pas montrer, à ces concentrations du moins, les propriétés stabilisantes particulières qu'on leur attribue couramment.

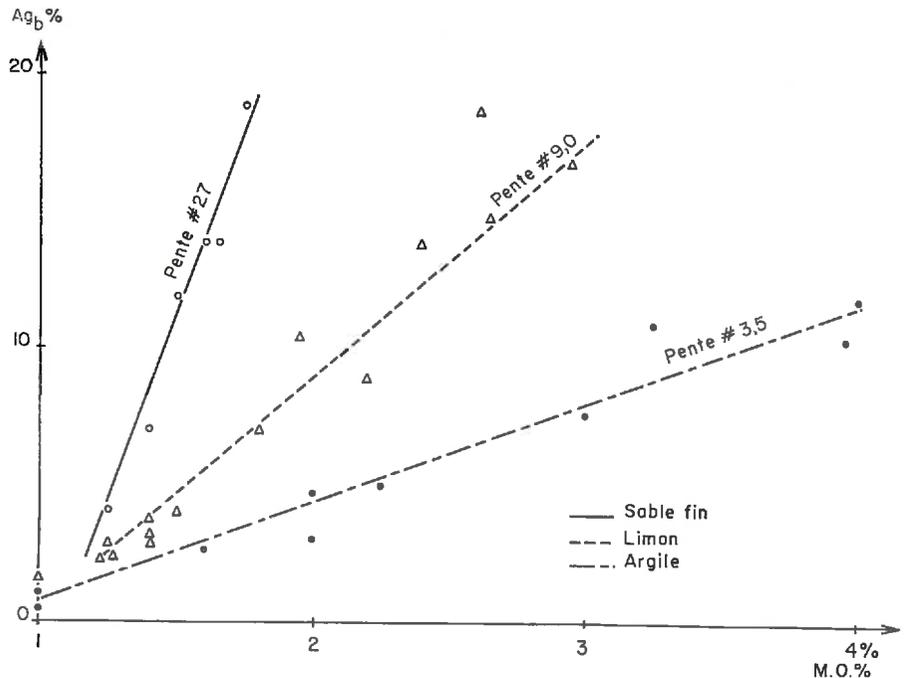
Par contre les humates d'aluminium et surtout de fer ainsi qu'à un degré moindre les acides humiques séchés se montrent beaucoup plus fortement hydrophobes.

Nous retrouvons donc ici un élément supplémentaire en faveur du rôle important joué par le fer associé à des matières organiques dans les phénomènes de stabilisation de la structure.

CHAPITRE VII

RELATIONS ENTRE LA NATURE DU SUPPORT MINÉRAL ET L'EFFICACITÉ DES MATIÈRES ORGANIQUES

Nous avons étudié jusqu'ici l'action de substances diverses mais qui étaient toutes fixées sur un même support minéral. Ce parti pris avait été adopté, rappelons-le pour faciliter la comparaison des résultats.



GRAPHIQUE 20. — Allure de la stabilisation par la matière organique de 3 sols de textures différentes

Il est toutefois apparu au cours de ces recherches qu'il pouvait exister une certaine interaction entre l'efficacité des matières organiques et la nature du support minéral et plus particulièrement sa texture.

Pour préparer la transposition au milieu naturel des conclusions dégagées nous avons cherché à préciser l'importance de cette interaction.

Il s'agit là d'un problème particulièrement difficile : on ne peut en effet admettre *a priori* qu'une telle interaction sera indépendante du type de matière organique et de son mode d'action principal sur la stabilité structurale.

Nous nous sommes bornés à l'étude du cas moyen présenté par la matière organique de sols sous prairie. Trois séries d'échantillons représentant chacune un type de texture ont été soumises au laboratoire aux tests de stabilité structurale et on a dosé la matière organique liée qu'ils contenaient.

Pour chaque série nous avons établi graphiquement la relation existant entre le taux d'agrégats stables après prétraitement au benzène Ag_b p. 100 et le taux de matières organiques liées. Le graphique 20 permet de constater que la pente des droites représentatives de ces relations sont extrêmement différentes suivant la texture de la série correspondante. C'est ainsi qu'une augmentation de 1 p. 100 du taux de matière organique liée provoque pour un sable fin, pauvre en argile et en limon, un accroissement de 27 p. 100 d'agrégats stables après prétraitement benzène tandis que cet accroissement n'est que de 9 p. 100 pour un sol de limon et de 3,5 p. 100 pour une terre très argileuse. Cette constatation est en accord avec nos conclusions concernant le mécanisme d'action des matières organiques. En effet, si ce dernier consiste bien pour l'essentiel en une diminution de la mouillabilité du sol l'action des matières organiques doit être liée à un phénomène d'enrobage et leur efficacité, à une dose déterminée, doit être d'autant plus faible que la surface à protéger est plus portante. Notons que cette surface est principalement sous la dépendance de la teneur du sol en éléments inférieurs à 2μ (argile granulométrique).

Une confirmation de cette hypothèse nous est fournie par la comparaison des deux graphiques 21 et 22 établis pour une série d'échantillons de textures très différentes renfermant des quantités variables de matières organiques d'origines diverses.

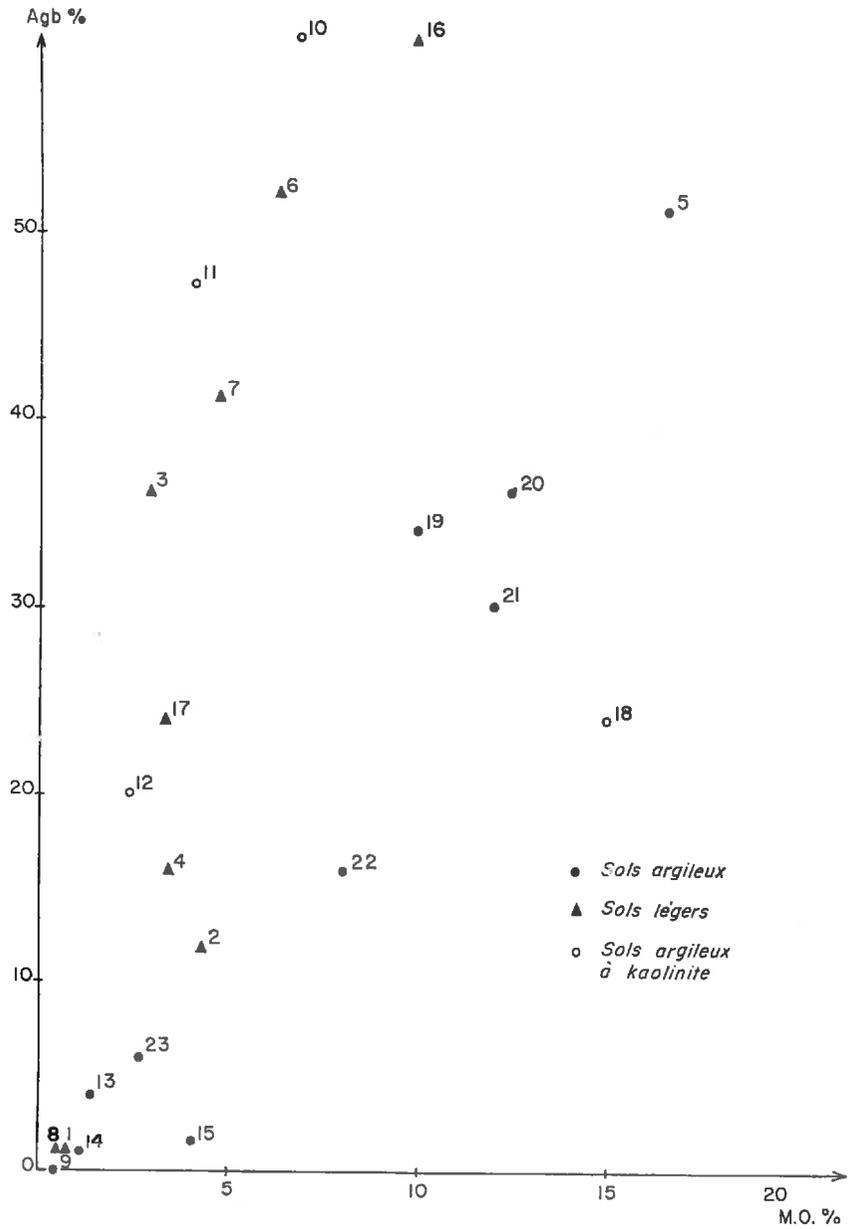
Sur le premier graphique nous avons porté en abscisse la teneur en matières organiques liées et en ordonnée le taux d'agrégats stables après prétraitement au benzène. On constate que les points représentatifs des différents échantillons sont très dispersés. De plus et à 3 exceptions près (points 10, 11 et 12) pour une teneur en matière organique donnée les terres argileuses présentent des taux d'agrégats stables Ag_b p. 100 plus faible que les sols plus légers.

Mais si, comme nous l'avons fait sur le deuxième graphique nous remplaçons en abscisse le taux de matières organiques liées par le rapport $\frac{\text{matière organique liée p. 100}}{\text{argile p. 100}}$ de façon à tenir compte de l'importance de la surface à protéger, nous voyons que l'ensemble des points (à l'exception encore des 10, 11 et 12) se regroupent le long d'une courbe et cela d'une façon apparemment indépendante de la texture des sols qu'ils représentent.

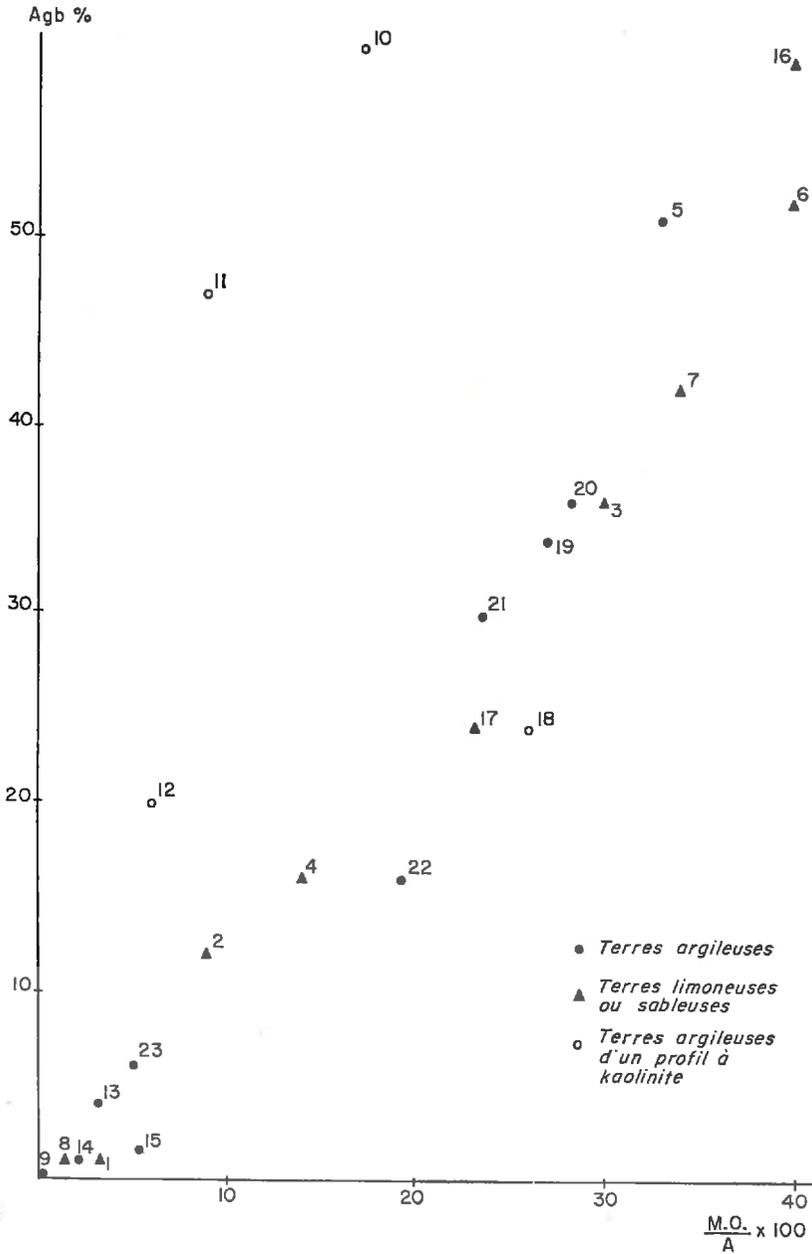
Il semble donc qu'on puisse considérer comme acquise l'importance de l'interaction entre les teneurs en matières organiques et en argile, vis-à-vis de la mouillabilité du sol.

L'exception à cette règle des points 10, 11 et 12 qui représentent 3 échantillons à 45 p. 100 d'argile issus d'un même profil de sol souligne toutefois l'insuffisance de la seule teneur en argile à définir la surface interne du sol. Le fait que ces trois points représentent des échantillons riches en kaolinite alors que les autres sols contiennent essentiellement d'autres types de minéraux argileux, conduit à penser qu'une étude plus approfondie à ce sujet devrait tenir compte de la nature des minéraux des argiles au même titre que de la teneur en éléments de diamètre moyen inférieur à 2μ .

Par ailleurs, un certain nombre d'auteurs tels que S. MÉRIAUX (1958), MOREL et MASSON (1958), G. MARTIN (1963), A. COMBEAU (1960) ont présenté des relations



GRAPHIQUE 21. — Relation existant pour des sols de textures très variées entre la teneur en matières organiques et la stabilité (Agb %)



GRAPHIQUE 22. — Relation existant pour des sols de textures très variées entre le rapport Matière organique/Argile et la stabilité

établies indépendamment de la texture entre la teneur en matière organique et l'aspect de la stabilité structurale qui se traduit par le taux Ag_0 p. 100. Le fait que ces relations aient pu être établies montre seulement que les sols étudiés avaient une homogénéité granulométrique suffisante pour que la teneur en matières organiques soit le facteur principal.

Rappelons enfin que nous avons noté (p. 23) que la teneur en matières organiques des agrégats stables au benzène, très variable, est généralement beaucoup plus élevée que la teneur des terres totales correspondantes ; un examen plus précis permet de constater que cette teneur en p. 100 de Ag_0 est d'autant plus élevée que le sol est plus argileux.

Le prétraitement au benzène aboutit ainsi à trier parmi les agrégats du sol ceux qui présentent une teneur en matière organique supérieure à un seuil. La valeur de ce seuil paraît être en relation avec la surface interne spécifique du sol, elle-même fonction de sa granulométrie et de la nature minéralogique des fractions.

En conclusion nous pensons avoir montré par plusieurs voies différentes qu'il existait une interaction importante entre la texture du sol et sa stabilisation par les matières organiques en général. Ce phénomène apparaît d'ailleurs clairement dans ses conséquences au champ sur le comportement de différents sols soumis à un même système de culture. Nous aurons donc à revenir sur ce point dans la deuxième partie de ce travail.

Conclusions de la première partie

Les conclusions des études relatées dans la première partie de ce mémoire concernent tout d'abord les mécanismes du ralentissement de la dégradation structurale du sol.

Parmi les facteurs susceptibles d'intervenir dans les processus de destruction des agrégats terreux, il est apparu que les principaux étaient la mouillabilité du sol, facteur actif, et la cohésion de la terre humide, facteur de résistance. Il s'agit donc là d'une confirmation de la théorie de HÉNIN pour lequel, rappelons-le, la stabilité peut être évaluée comme la différence entre la cohésion de la terre humide et la pression capillaire dans les pores du sol, elle-même proportionnelle à la mouillabilité des parois pour chaque classe de taille des pores du sol.

Compte tenu des difficultés que l'on rencontre lorsqu'il s'agit d'apprécier directement, même si c'est d'une manière relative, ces deux facteurs, il est apparu qu'il était d'un grand intérêt de disposer d'une méthode permettant d'apprécier les conséquences de la variation de ces facteurs sur la stabilité structurale. L'ensemble des tests que nous avons utilisés répond à cette exigence. Tout en permettant d'obtenir un indice reflétant globalement la stabilité du sol, certains tests fournissent des résultats en bonne corrélation avec une estimation directe soit de la mouillabilité soit de la cohésion du sol à l'état humide. Nous avons donc eu ainsi la possibilité d'interpréter les modifications de comportement que nous avons provoquées sans avoir recours à des appréciations directes qui ne restent valables, nous l'avons vu, que comparativement lorsque les autres caractéristiques du sol restent inchangées.

En ce qui concerne le mécanisme propre de l'action des matières organiques, nous avons dans un premier temps étudié les aspects liés à la nature et aux propriétés physico-chimiques de substances définies. Ce travail, effectué à partir d'échantillons-modèles a mis en évidence l'importance des modifications de mouillabilité par rapport aux modifications de cohésion. En effet, la grande majorité des substances testées ont eu une action du premier type. De plus, une modification de mouillabilité suffisante pour entraîner une variation sensible de stabilité peut être obtenue à partir de très petites quantités de substances actives.

Dans un deuxième stade, nous avons fait intervenir des phénomènes plus complexes permettant de se rapprocher des processus intervenant dans le milieu naturel et liés essentiellement à l'évolution des matières organiques. Leur analyse, possible dans les conditions du laboratoire a permis de dégager un certain nombre de conclusions :

Les fermentations jouent un rôle prépondérant dans l'accroissement de stabilité qui suit la mise au contact d'agglomérats terreux et de débris organiques. Les agents de la fermentation eux-mêmes (champignons, bactéries...) sont chronologiquement les premiers à modifier le comportement du sol. Leur action présente

souvent un caractère explosif : elle est très importante mais de courte durée et cela d'autant plus que le métabolite de départ est plus fermentescible.

Ensuite, les produits transitoires de la fermentation interviennent. Leur efficacité spécifique reste très élevée et liée aux conditions de la fermentation et en particulier à la répartition des débris organiques qui leur ont donné naissance, (c'est la règle du mélange) à l'aération du milieu et à sa richesse minérale. Il ne semble pas que la qualité de ces derniers, leur origine végétale en particulier, intervienne autrement qu'en accélérant les processus de formation.

Quant aux produits terminaux de l'évolution, ceux que l'on peut regrouper sous la dénomination d'humus, leur activité est sensiblement plus faible mais de plus longue durée ; il semble alors que les conditions dans lesquelles s'effectue leur liaison à la partie minérale du sol, les interactions entre la quantité qu'ils représentent et la texture des matériaux stabilisés jouent un rôle tout à fait capital.

En résumé l'incorporation au sol d'une matière organique peut avoir des effets très différents non seulement par l'intensité de l'augmentation de stabilité qui en résulte mais aussi par la durée de cette action. Cet aspect dynamique est important à considérer car les stabilisations de courtes durées paraissent jouer un rôle de premier plan.

DEUXIÈME PARTIE

Introduction

Dans la première partie de ce travail, nous nous sommes efforcés d'analyser le mécanisme des différents modes d'action des matières organiques sur la stabilité de la structure des sols.

Nous allons maintenant confronter aux conditions de la pratique les règles ou les tendances qui ont pu être dégagées. Cette orientation nous a paru fondamentale : elle est en effet le seul moyen de vérifier qu'au laboratoire nous avons isolé des mécanismes réellement fondamentaux et non subordonnés aux conditions particulières de l'étude. Par ailleurs cette transposition doit nous permettre de déboucher sur l'action technique et de retirer ainsi les bénéfiques pratiques des résultats obtenus.

Mais l'attitude que l'on peut adopter du point de vue de l'étude des phénomènes est alors bien différente surtout dans un domaine aussi complexe. Certes dans le protocole des essais ou dans le choix des observations on s'efforce de comparer un ou plusieurs traitements et un témoin. Malheureusement les objets de l'expérience vont provoquer des actions très diverses dans le milieu si bien que l'on ne peut plus dire que l'on isole des variables indépendantes ; pour les modifier on provoque un changement global qu'il faut analyser.

C'est ainsi que chaque technique culturale faisant intervenir un type d'apport de matières organiques devra faire l'objet d'une étude particulière dans laquelle nous nous efforcerons de mettre en évidence les différents effets du traitement dont, bien entendu, ceux qui ont entraîné une modification de la stabilité structurale du sol.

I. Rôle complexe des matières organiques dans le sol en place

La méthode d'appréciation de la stabilité structurale des sols sur laquelle nous nous sommes appuyé au cours de la première partie de ce mémoire permet de mettre en évidence les modifications de comportement du sol vis-à-vis de l'eau dans des conditions standard qui reflètent, il faut le souligner, celles qui prévalent d'une manière très générale au sein de la couche arable d'un sol considéré dans son ensemble et par rapport à un climat déterminé. Il n'empêche que le comportement du sol en place peut être également influencé par des facteurs secondaires qui jouent en modifiant l'agressivité de l'eau. Par exemple, pour une stabilité donnée, la structure se dégradera plus ou moins rapidement suivant que la configuration générale du profil du sol permettra un contact plus ou moins prolongé entre chaque particule de terre et l'eau en excès. Aussi, nous semble-t-il nécessaire, avant de rechercher si les mécanismes dont nous avons parlé interviennent bien dans les conditions de la pratique, de passer en revue les influences moins directes que peuvent avoir les techniques culturales basées sur l'utilisation des matières organiques, vis-à-vis du comportement du sol.

a) *Actions mécaniques des débris organiques.*

L'incorporation de débris végétaux à un sol cultivé peut avoir des conséquences diverses selon les modalités techniques de l'enfouissement. Suivant que les débris seront localisés au fond du labour ou incorporés en bandes obliques leur présence aura des répercussions fort différentes sur l'infiltration superficielle et la circulation de l'eau de pluie.

D'autre part lors des processus de reconstitution de la structure qui se déclenchent au cours des périodes de gel ou des successions d'humectation et de dessiccations, la présence de débris organiques crée des hétérogénéités et donc des points de rupture favorisant la création d'éléments structuraux de taille plus fine. Ce mécanisme aura évidemment des résultats d'autant plus importants que la répartition des débris sera plus régulière dans la masse de terre intéressée.

b) *Apparition de phénomènes de réduction.*

Les fermentations qui se produisent au sein des matières organiques libres enfouies consomment l'oxygène de l'atmosphère du sol. Si la diffusion de l'oxygène est plus faible que sa consommation dans le milieu, ce dernier devient rapidement asphyxiant et il a été montré par divers auteurs (R. BÉTRÉMIEUX et R. GRAS 1957) qu'il se produisait alors une dispersion du complexe argilo-humique aboutissant à une dégradation structurale plus ou moins intense. L'apparition de tels phénomènes dits « gley » est sous la dépendance étroite des possibilités d'aération au niveau des matières enfouies ; la plus ou moins grande profondeur à laquelle ces matières ont été localisées, la porosité et l'humidité du sol à ce même niveau, enfin les possibilités de renouvellement de l'air dans la zone de fermentation sont donc autant de facteurs qui commandent la gleyfication.

c) *Action sur la faune du sol.*

Les vers de terre, acariens, collemboles, etc. qui existent dans le sol, voient leur activité augmenter par des apports de matière organique fraîche qui constitue pour eux une source d'alimentation. Ces animaux jouent plusieurs rôles aussi bien directement sur la structure que sur la stabilité structurale.

En ce qui concerne le premier point, les galeries que certains d'entre eux creusent dans le sol maintiennent dans les couches où ils vivent une porosité pouvant compenser l'effondrement de la structure survenant en raison d'une stabilité structurale insuffisante. Les galeries de vers de terre, particulièrement, jouent tous les rôles habituellement dévolus à la fissuration naturelle du sol. Elles assurent la circulation de l'eau : le phénomène est particulièrement visible lorsqu'on observe une tranchée récemment ouverte dans un sol gorgé d'eau mais dont la masse est peu perméable ; on peut alors remarquer que les canaux de vers de terre se comportent comme des petits drains. Ces galeries assurent également la circulation de l'air : on en tiendra pour preuve le fait que dans une couche où prévaut un milieu réducteur, ce sont les parois des galeries de vers qui se réoxydent les premières, le phénomène se concrétisant par l'apparition d'un manchon d'oxyde de fer autour de ces cavités. Enfin, les racines des végétaux cultivés empruntent fréquemment ces voies de pénétration dans les sols dont la structure est continue ou à l'occasion du franchissement de

certaines obstacles localisés (fonds de labour lissés par le talon de la charrue par exemple).

Mais les petits animaux du sol jouent également un rôle en assurant le brassage de la terre entre les différentes couches du sol ; c'est ainsi que sous les prairies permanentes où les conditions de milieu (absence de travail du sol, abondance de matières organiques fraîches) favorisent la pullulation des vers de terre, nous avons pu récolter dans le sous-sol une proportion de plus de 5 p. 100 de terre de surface provenant des déjections déposées lors de la descente de ces animaux dans les couches profondes du sol. Le tableau 14 montre quel est l'ordre de grandeur de l'amélioration structurale d'un sous-sol de prairie par cette action.

TABLEAU 14

Importance du mélange des couches de sol par les vers de terre

Sologne Fosse n° 2	Ag _a %	Ag _e %	Ag _b %	S	K	C lié ‰
Sol	10,9	5,0	10,6	1,12	5,12	25,6
Sous-sol (moyenne)	4,8	2,7	0,8	4,25	1,85	
Sous-sol (déjections de vers)	15,3	8,1	10,5	1,00	2,80	32,9
Sous-sol (sans déjections)	3,5	1,9	0	5,17	1,63	10,4

Enfin, la faune du sol assure la fragmentation et le mélange à l'ensemble de la masse du sol des matières organiques fraîches qui viennent d'y être incorporées et ainsi participe dans une large mesure à l'action de ces dernières sur la stabilisation de la structure. On peut également noter que certains auteurs ⁽¹⁾ ont mis en évidence la contribution de diverses espèces aux processus d'humification ; à ce titre également, la faune du sol joue un rôle moins bien défini, mais vraisemblablement important, en accroissant l'efficacité des apports organiques.

Il apparaît donc que l'enfouissement de matières organiques peut avoir sur l'ensemble des propriétés physiques du sol des conséquences très diverses qui s'ajoutent à la stabilisation de la structure.

Tout au long de cette deuxième partie, cet aspect de la question avec ses incidences favorables ou défavorables sera rappelé. Dans de nombreux cas en effet, l'action directe sur la stabilité de la structure ne représente qu'une part infime de l'efficacité d'une technique basée sur l'utilisation des matières organiques. La transposition des résultats des seuls tests de stabilité ne parviendrait pas à rendre compte des modifications radicales de comportement du sol observées à la suite de l'application d'une telle technique.

⁽¹⁾ MEYER L., (1943) ; FRAUG H. et LEITENEERGER L. (1948) ; AVEL M. (1929) ; BACHELIER G. (1961).

L'introduction de ces nouvelles données dans notre étude en milieu naturel implique l'utilisation de méthodes permettant de les analyser.

Nous devons, tout d'abord, constater un certain nombre de difficultés résultant de la complexité du sol et de ses hétérogénéités, difficultés qui se manifestent lors des observations du sol en place et lors des prélèvements d'échantillons. Certaines variations sont aléatoires : d'un point à un autre, pour un ensemble de causes imprévisibles les propriétés du sol changent. Il suffit alors théoriquement de se borner à l'étude d'une parcelle plus petite mais homogène. Dans le cas où cette solution est impraticable du fait de l'exiguïté des zones homogènes, on doit multiplier les observations et les prélèvements de façon à obtenir une représentation moyenne de la parcelle étudiée. S'il s'agit là d'un problème commun à toutes les sciences du milieu naturel, il faut souligner toutefois que l'hétérogénéité en physique du sol aboutit fréquemment à des variations telles qu'une étude précise devient extrêmement laborieuse et dans certains cas pratiquement impossible.

Mais il existe aussi une hétérogénéité systématique. Dans une première dimension, selon la profondeur, l'observation permet de mettre en évidence des couches différenciées qui devront bien entendu faire l'objet d'échantillonnages séparés ; par exemple l'étude de la stabilisation sous une prairie devra tenir compte du fait que les différentes couches du sol sont très différemment exploitées par les racines et sont donc diversement enrichies en matières organiques. Mais des hétérogénéités systématiques peuvent également, et cela même dans le cas d'une parcelle plane, exister latéralement. C'est ainsi que le travail du sol, un labour par exemple, peut occasionner la localisation en bandes d'une matière enfouie et qu'il sera nécessaire de tenir compte de ce fait pour une juste appréciation des modifications du sol qui peuvent en résulter.

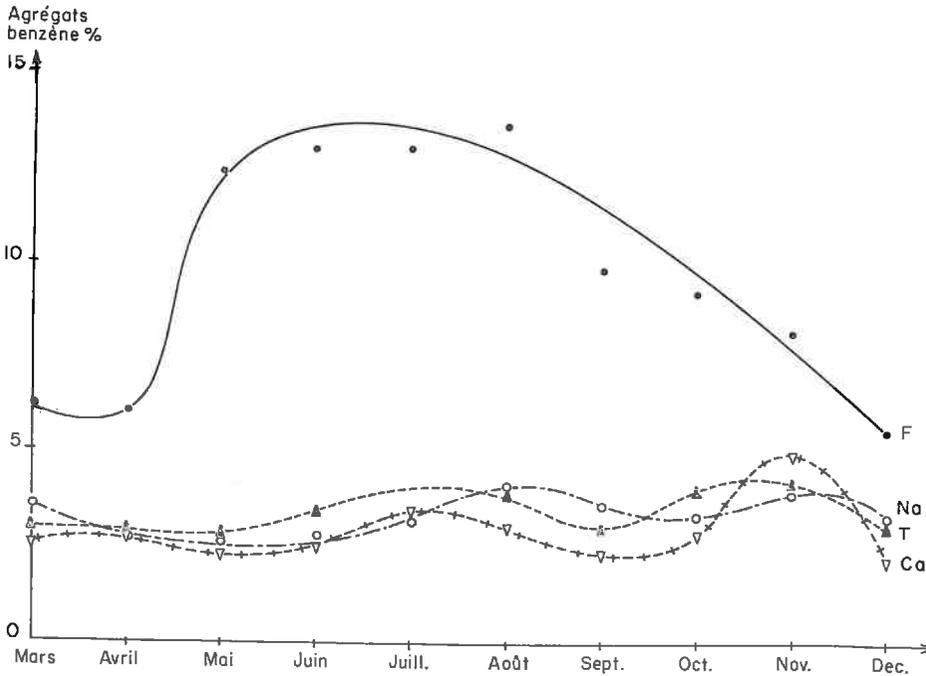
Enfin, on doit tenir compte des variations dans le temps et particulièrement au cours d'une même année, de la stabilité structurale. S. HÉNIN et L. TURC (1949) ont déjà mis en évidence ce phénomène. Le graphique suivant (23), que nous avons établi à partir de mesures mensuelles effectuées sur le dispositif dit, des 42 parcelles, au C. N.R. A. de Versailles indique clairement que ces variations saisonnières sont pour une grande part dues à l'évolution des matières organiques selon les conditions de température et d'humidité des différents mois de l'année et que par conséquent, toute étude visant à rechercher les variations d'une année sur l'autre de la stabilité du sol à la suite de l'incorporation de matières organiques doit tenir le plus grand compte de ces variations ; la date du prélèvement doit être fixée une fois pour toutes à une période de l'année où les variations mensuelles sont faibles.

Il apparaît ainsi que les servitudes résultant de ces hétérogénéités nous conduisent, elles aussi, à utiliser des méthodes complémentaires qui auront donc un double but : d'abord permettre le prélèvement d'un matériau bien déterminé pris dans un cadre connu, ce qui est une condition indispensable à l'interprétation des résultats de son étude au laboratoire ; ensuite faire la part entre l'action directe, sur la structure, de l'incorporation au sol d'une matière organique et l'action sur la stabilité structurale dont les conséquences culturales à court terme peuvent être masquées par les actions du premier type.

La plus importante de ces méthodes d'étude repose sur l'examen du profil cul-

tural. Ce dernier peut être défini comme : « l'ensemble constitué par la succession des couches de terre, individualisées par l'intervention des instruments de culture, des racines de végétaux et des facteurs naturels réagissant à ses actions ». (S. HÉNIN et coll., 1960).

L'examen de ce profil suppose l'ouverture d'une tranchée dont les dimensions et la profondeur sont fonction de la dimension des hétérogénéités portant sur l'une quelconque des caractéristiques du sol. Une paroi bien éclairée de la tranchée sera ensuite « préparée » à l'aide d'un couteau qui, manié convenablement, permettra



GRAPHIQUE 23. — Variations saisonnières du taux d'agrégats $Ag_b\%$ pour différents sols

T : témoin sans fumure

F : parcelle recevant du fumier

Na : parcelle recevant du nitrate de sodium

Ca : parcelle chaulée ($CaCO_3$)

de faire réapparaître la disposition naturelle des éléments constitutifs, disposition masquée dans la plupart des cas par le lissage des outils lors de l'ouverture de la tranchée. On notera alors systématiquement un certain nombre de points :

— L'humidité du sol et particulièrement la présence d'eau libre à certains niveaux.

— La texture, appréciée au toucher, et la présence d'éléments grossiers.

— La forme, la compacité et la dureté (si le sol est sec) des éléments structuraux c'est-à-dire des masses de terre dont le volume est délimité par des fissures. Il sera en même temps noté la trace du travail des outils de culture (semelle de labour, de façon superficielle, etc.).

— La répartition et l'état des matières organiques libres dans le profil ; on

s'attachera plus particulièrement à l'aspect, à la consistance et à l'odeur de ces substances ainsi qu'à la couleur du sol immédiatement à leur contact. Observations permettant de diagnostiquer la présence de gley.

— La présence de taches de rouille, de concrétions permettant de déduire que le sol a subi une phase réductrice.

— Enfin, la répartition, la forme et l'état sanitaire des racines, éventuellement dans le cas d'un sol sous culture au moment de l'observation.

Cet examen permettra un prélèvement judicieux d'échantillons ; mais, de plus l'observateur pourra relever un certain nombre de symptômes caractérisant l'état du sol au moment de l'observation. Il s'agit là d'une démarche qui s'apparente à plus d'un titre à celle du médecin : l'intervention débute par un examen systématique ; puis, la recherche de la convergence de plusieurs symptômes ou de la dominance de l'un d'entre eux permet dans certains cas de prononcer un diagnostic. Dans le cas où ce dernier n'est pas possible par suite de moyens d'investigation insuffisants ou d'une connaissance imparfaite du phénomène dominant, il reste une analyse systématique de la situation qui seule pourra permettre de replacer dans leur cadre et d'interpréter correctement les résultats de l'étude complémentaire au laboratoire.

Il est évidemment nécessaire d'utiliser en plus et à l'appui de cet examen tout le jeu des méthodes statistiques de contrôle des observations et des expérimentations, ceci afin de tenir compte des variations aléatoires inhérentes au milieu naturel.

Enfin, on ne saurait trop insister sur la nécessité d'une collaboration des différentes disciplines qui s'occupent du sol. L'introduction d'une technique nouvelle peut en effet modifier une caractéristique du sol non seulement par une voie directe décelable par les méthodes en usage dans la discipline directement intéressée, mais aussi par des voies détournées, telles que l'interaction en chaîne de plusieurs facteurs ; dans ce dernier cas, une analyse en équipe du phénomène aura plus de chance de fournir une explication et donc de permettre la généralisation éventuelle du résultat.

CHAPITRE PREMIER

ÉTAT ET ÉVOLUTION DES MATIÈRES ORGANIQUES DANS LE SOL

La matière organique d'un sol cultivé provient essentiellement des débris végétaux laissés par les différentes récoltes ou d'amendements organiques divers apportés par l'homme.

Au cours d'un premier stade, ces débris, encore peu décomposés, sont seulement juxtaposés à la masse minérale du sol dont ils peuvent être séparés assez facilement par la méthode densimétrique que nous avons décrite (p. 25). Cette première fraction organique peut être globalement caractérisée par un rapport C/N variable suivant sa nature, mais généralement élevé, et par le fait qu'elle est susceptible d'une évolution rapide lorsque les conditions sont favorables.

Dans ce dernier cas, sous l'action des micro-organismes du sol, ces débris végétaux subissent des transformations fermentatives dont les produits se fixent aux constituants minéraux du sol. Cette deuxième fraction, dite liée, présente, dans son ensemble, un rapport C/N constant et voisin de 10. De plus, ces matières organiques liées sont en majorité biologiquement stables à court terme. Elles possèdent donc l'ensemble des propriétés rattachées à la notion d'humus et l'on peut dans une première approximation dont nous examinerons plus loin les limites, confondre les deux définitions.

Étant donné que nous disposons d'une méthode permettant une séparation de ces deux types de matières organiques, nous avons cherché en collaboration avec S. HÉNIN et L. TURC à étudier séparément leur dynamique dans le sol (1959). Nous nous sommes basés sur une formule proposée par HÉNIN et DUPUIS (1945) qui traduit la dynamique des matières organiques totales du sol et que nous avons appliquée successivement à chacune des deux fractions. Signalons que dans une mise au point récente (KORTLEVEN, 1963) cette formule est reconnue comme reflétant de façon satisfaisante l'évolution réelle de la teneur en matière organique des sols.

Si A représente le stock de matières organiques labiles présent dans le sol, m l'apport annuel et α un paramètre de « disparition » de la matière organique sous forme libre, la formule d'HÉNIN et Dupuis revient à écrire, t représentant le temps :

$$\frac{dA}{dt} = m - \alpha A$$

d'où

$$A = \left(A_0 - \frac{m}{\alpha} \right) e^{-\alpha t} + \frac{m}{\alpha}$$

Lorsque le temps croît indéfiniment le stock de matières organiques libres tend vers une valeur à l'équilibre $A = \frac{m}{\alpha}$.

Quelques valeurs du coefficient α établies approximativement à partir d'une appréciation de A et de m dans quelques situations caractéristiques à l'équilibre sont rassemblées dans le tableau 15.

TABLEAU 15
Valeurs du coefficient α
(d'après S. HÉNIN, G. MONNIER et L. TURC (1959)
(Unité de temps : l'année)

Désignation des sols	Valeurs de α
Sol en bon état de culture	0,5 à 1
Rendzine sols humides	0,1 à 0,02
Sols acides, Terres de bruyère. Horizon A_0 de podzol	de l'ordre de 0,03

Ces chiffres signifient que si dans les conditions normales des terres cultivées ($\alpha = 1$) le sol ne contient sous forme libre que les matières organiques incorporées dans l'année, dans les conditions défavorables (excès de sécheresse ou d'humidité... acidité prononcée... etc.), il se produit une accumulation de matières organiques libres. Il suffit généralement de modifier le milieu par un drainage ou un travail du sol par exemple pour augmenter α , c'est-à-dire accélérer la transformation de ce stock inerte en matières liées actives. Cette réserve peut donc être considérée comme une potentialité dont l'utilisation dépend du choix des techniques culturales appropriées.

Si nous désignons maintenant par B la matière organique liée assimilable à l'humus, nous pouvons écrire, toujours suivant le même schéma et compte tenu de ce qui précède :

$$\frac{dB}{dt} = k_1 \alpha A - k_2 B$$

ou k_1 représente le coefficient isohumique, c'est-à-dire le rendement en humus de la matière organique labile αA évoluant pendant l'unité de temps. et k_2 un paramètre de destruction de l'humus par minéralisation.

D'où, en remplaçant A par sa valeur et en intégrant :

$$B = \left(B_0 - \frac{k_1 m}{k_2} \right) e^{-k_2 t} + k_1 \left(A_0 - \frac{m}{\alpha} \right) (e^{-k_2 t} - e^{-\alpha t}) + \frac{k_1 m}{k_2}$$

Le niveau humique d'un sol à l'équilibre est donc égal à $k_1 m / k_2$.

De nombreux auteurs se sont attachés à déterminer les ordres de grandeurs des deux paramètres k_1 et k_2 . En ce qui concerne ce dernier les valeurs de loin les plus fréquentes se situent entre 0,008 et 0,012, avec des valeurs extrêmes de 0,004 et 0,04.

Le tableau 16 ci-après rassemble quelques valeurs de k_1 .

On constate d'abord que les valeurs de k_1 varient suivant la nature des apports organiques. Un fumier bien décomposé par exemple présente un coefficient isohumique plus élevé qu'un fumier pailleux ; un engrais vert pauvre en lignine, composé nécessaire à l'élaboration de l'humus (BREMNER, FLAIG, FORSYTH) et riche en hydrate de carbone très fermentescible, a un rendement humique à peu près nul.

TABLEAU 16

Valeurs du coefficient isohumique k_1

Matières organiques	Coefficient k_1	Remarques
Parties de céréales	0,08 à 0,20	Suivant état de décomposition
Résidus de prairies temporaires et artificielles	0,15 à 0,30	
Fumiers	0,15 à 0,45	
Tourbe	1	
Engrais vert jeune.....	voisin de 0	

Mais pour un type d'apport donné on constate également que les valeurs proposées pour k_1 sont très diverses. S'il est vraisemblable que les conditions dans lesquelles se déroule l'humification influent sur k_1 , il semble difficile d'expliquer ainsi la totalité de ces variations. Les erreurs d'appréciation de m , principalement lorsqu'il s'agit de résidus de récolte, et du stock d'humus sont, elles, suffisamment importantes pour expliquer la plupart des divergences.

En particulier le fait de se baser sur les variations de la matière organique totale et non pas sur celles des seules matières organiques liées, conduit à des erreurs particulièrement importantes lorsque la variation du stock humique est faible par rapport à celle du stock de matières labiles.

La séparation des deux formes par fractionnement densimétrique permet de réduire ces erreurs et nous verrons que l'évolution apparemment anormale de la matière organique totale dans certaines situations peut être partiellement expliquée en tenant compte séparément des deux formes de matières organiques.

Il faut toutefois souligner que la fraction organique liée que nous avons globalement assimilée à l'humus biologiquement stable du sol contient également, le plus souvent en faible quantité, des produits transitoires dont nous avons mis en évidence le rôle important sur la stabilité structurale. Le fractionnement densimétrique malgré la très sensible amélioration qu'il a permis d'apporter à l'étude de la dynamique des matières organiques n'a donc pas entièrement résolu le problème et il est bon de garder présent à l'esprit ses limites. Celles-ci sont liées à l'imprécision du concept d'humus.

Quoiqu'il en soit, malgré ces approximations et celles qu'implique l'adoption de toute formule, le schéma que nous venons de présenter a l'avantage d'être en bon accord avec les résultats d'essais de longue durée (MOREL, et coll, 1956). De plus, il permet de rendre compte de différentes situations : accumulation dans certains sols des matières organiques libres ou au contraire mobilisation du stock existant

lors d'un drainage ou d'un retournement de prairie, dégradation humique liée à l'adoption de tel système de culture ou de tel assolement ; et ces situations seront celles auxquelles nous devons faire face lors de l'étude des techniques d'amélioration de la structure et de sa stabilité en liaison avec l'emploi des matières organiques.

CHAPITRE II

LES RÉSIDUS DE RÉCOLTE

Bilan organique et structural des rotations sans fumure organique

Les résidus de récolte sont constitués par la partie du système racinaire et des organes aériens qui restent à la surface ou à l'intérieur du sol lorsque la récolte proprement dite a été enlevée.

On a cherché à chiffrer pour les principales cultures la masse de matière organique que représentent ces résidus.

Le tableau 17 rassemble quelques unes de ces évaluations.

TABLEAU 17

Résidus de récolte de diverses cultures

Culture	Rendement — Mode de récolte	Masse des résidus exprimée en kg/ha de M.S.
Betterave	45 t/ha	6 000
Pomme de terre		très faible
Mais	50 q/ha Paille enfouie	5 000
Blé	40 q/ha } Récolte à la lieuese	4 000
Orge	40 q/ha } Paille enlevée	2 000
Luzerne	2 ans	7 000
Prairie temporaire	3 ans	15 à 18 000

Il ne s'agit évidemment que d'ordres de grandeur. Il est en effet très difficile d'apprécier la masse de la fraction souterraine des résidus. D'autre part, le rendement, et le mode de récolte, entre autres, sont des facteurs importants de variation. Toutefois à partir des données précédentes on peut comparer *les restitutions moyennes annuelles* de quelques rotations (tableau 17 bis).

On constate que les différences sont considérables, puisque pour les exemples choisis, qui ne représentent pourtant pas des cas extrêmes, les restitutions moyennes varient presque du simple au triple.

De plus les différentes cultures ne fournissent pas des résidus comparables quant à leur nature et à leur répartition en parties aériennes et souterraines. Ainsi

les 6 000 kg restitués par une culture de betterave le sont essentiellement sous forme de collets et de feuilles laissés en surface. Par contre, dans le cas d'une prairie il s'agit surtout de racines souvent plus lignifiées et déjà intimement mélangées à la masse du sol. Nous verrons lors de l'étude des engrais verts quelles peuvent être les conséquences de ces diverses répartitions sur l'amélioration de la structure du sol.

TABLEAU 17 bis
Restitutions moyennes de quelques rotations

Rotation	Restitution moyenne annuelle en kg de M.S./ha
Pomme de terre — blé* — orge*	2 000
Betteraves — blé* — orge* — luzerne (2 ans)	3 800
Maïs ** — blé* — prairie temporaire (2 ans)	5 400

* Paille emportée.
** Paille enfouie.

Nous citerons deux exemples pour illustrer l'importance des résidus de récolte dans le bilan humique et le niveau des propriétés physiques du sol. Le premier concerne les « prises » de la baie de l'Aiguillon en Vendée. Ces terres ont été gagnées sur la mer à différentes époques connues ce qui permet de dater leur évolution. Dans certaines exploitations, toutes les pailles de féverolle et d'orge qui sont les principales cultures sont transformées en fumier qui est vendu à l'extérieur de la région. Les fumures minérales sont faibles. Si l'on compare 2 « prises » ainsi exploitées présentant les mêmes caractéristiques générales, mais dont l'une est cultivée depuis 150 ans de plus que l'autre, on constate dans la première une baisse sensible du taux de matières organiques et de la stabilité structurale :

	S	M. O. p. 100
Prise ancienne	8,2	1,9
Prise récente.....	2,8	3,1

Il s'agit évidemment d'un cas extrême mais qui a l'avantage de montrer *a contrario* de façon particulièrement nette l'importance d'une utilisation judicieuse des résidus de récolte.

Sans être aussi spectaculaire, une évolution comparable a pu être mise en évidence en Champagne en comparant le long d'une limite de remembrement deux parcelles voisines soumises au même assolement mais dont l'une recevait au cours des 20 dernières années une fumure minérale beaucoup plus importante que l'autre et fournissait corrélativement de bien meilleurs rendements.

Les chiffres consignés ci-dessous indiquent que le niveau humique et la stabilité

structurale sont maintenus à un niveau plus élevé dans la parcelle convenablement fertilisée :

	Ag %	S	M. O. %
Zone à forts rendements	12,7	1,05	2,9
Zone à faibles rendements	6,9	3,40	2,65

Ce phénomène peut expliquer que dans certains cas l'intensification de la culture, même lorsqu'elle est accomplie aux prix de la suppression de soles dites « améliorantes », conduise à une évolution favorable des propriétés physiques. Il est évident en effet qu'une bonne culture peut produire autant d'effet qu'une mauvaise prairie à faible rendement et enracinement superficiel.

Plus directement l'importance du rôle des résidus de récolte ressort de la comparaison des pertes annuelles de différents sols et des quantités d'humus que peuvent restituer diverses rotations.

Si nous reprenons l'exemple des 3 rotations du tableau 17 bis, en admettant un coefficient isohumique moyen de 0,2 les restitutions humiques peuvent être évaluées comme suit :

Rotation n° 1	400 kg d'humus/ha
Rotation n° 2	760 kg d'humus/ha
Rotation n° 3	1 080 kg d'humus/ha

Les pertes annuelles sont, suivant l'hypothèse que nous avons adoptée, proportionnelles à la quantité d'humus contenue dans la couche arable. Cette quantité sera donc fonction du taux de matière organique et de la masse de terre.

Le tableau 18 souligne les incidences de la quantité de cailloux présents dans le

TABLEAU 18
Bilan humique de quelques sols cultivés

Type de sol	Profondeur max. du labour (cm)	Poids de terre fine dans 1 dm ³ de sol en place (kg)	Masse de couche arable (t/ha)	M.O. (1) (%)	Stock humus (T/ha)	Pertes annuelles (kg/ha) (2)
(Normandie) Limon blanc	20	1,5	3 000	1,8	54	540
(Région Parisienne) Limon moyen	30	1,6	4 800	2,0	96	960
(Poitou) Rendzine rouge caillouteuse	15	1,1	1 650	4	66	660
(Champagne) Rendzine blanche sur craie	20	1,4	2 800	4	112	1 120

(1) Ces teneurs correspondent à un état physique satisfaisant pour les différents cas présentés.

(2) Le coefficient K₂ est supposé égal à 0,01.

sol et de la profondeur maximum des labours pratiqués dans une parcelle, sur le montant du stock humique et corollairement sur les pertes annuelles. Les exemples de calcul qu'il contient et qui correspondent à des cas réels montrent que les évaluations faites à partir d'une masse de terre arable « standard » de 3 000 t/ha ne constituent qu'une première approximation assez grossière qu'il est possible de préciser :

On constate que les pertes sont du même *ordre de grandeur* que les restitutions moyennes des trois rotations-types. Les résidus de récolte sont donc l'élément principal de l'équilibre du bilan humique.

Toutefois des nuances très importantes sont à considérer. Il apparaît par exemple que le sol 4 a besoin d'une rotation de type 3 tandis que la rotation 1 entraînera dans tous les cas un déficit humique. C'est pour combler les déficits résultant d'un déséquilibre entre les pertes et les restitutions de la rotation utilisée sur une exploitation ou pour pallier les inconvénients qui en résultent que l'on fait appel aux différentes techniques que nous allons passer en revue.

Problème particulier de l'enfouissement des pailles

Beaucoup d'agriculteurs, conscients de la nécessité de maintenir un stock humique suffisant dans leur sol, ont pensé qu'il était nécessaire de compenser la suppression des apports de fumier consécutive à l'abandon de la traction animale et de l'élevage, par l'enfouissement de la totalité des pailles de blé ou d'orge qui étaient autrefois restituées après transformations en fumier. Toutefois, cette technique présente de telles difficultés que certains d'entre eux se posent le problème de sa nécessité. Les inconvénients sont de plusieurs sortes. :

Tout d'abord, dans de nombreuses terres, la paille se décompose mal et l'on en retrouve des paquets peu évolués longtemps après l'incorporation.

Ensuite, il y a le problème de la consommation d'azote minéral par les micro-organismes cellulolytiques dont on craint qu'elle ne contrarie la nutrition azotée des cultures ou pour le moins qu'elle ne nécessite des apports supplémentaires.

D'autre part, les pailles abritent fréquemment les formes de maintien de certains parasites et des graines de plantes adventices qui constituent un danger particulièrement dans le cas de cultures céréalières successives.

Enfin, argument souvent implicite, le brûlage des pailles a pu être reconnu ayant à court terme en effet favorable sur la végétation de la culture suivante et les agriculteurs sont tentés de généraliser cette pratique souvent plus facile à réaliser.

Il ne nous appartenait pas d'aborder tous les aspects de ce problème complexe dont certains débordent le cadre de la physique du sol. Nous avons cherché à analyser les phénomènes rattachés à notre discipline qui se produisent dans le sol à la suite d'un enfouissement de paille et à mettre en évidence une évolution générale lorsque ces enfouissements sont répétés. Nous nous sommes basés pour ce travail sur un certain nombre d'essais culturaux et sur des observations isolées.

La constatation de départ est la suivante : lorsqu'une parcelle a subi plusieurs enfouissements de paille, ses propriétés physiques considérées d'une manière générale (facilité de travail, perméabilité aux pluies violentes, etc.) sont dans la grande généralité des cas améliorées. Tout se passe comme si la stabilité structurale du sol

avait été augmentée dans une large proportion. Nous avons donc recherché sur des essais de longue durée à mettre en évidence des différences éventuelles de stabilité entre parcelles ayant ou non reçu des apports de paille.

Les résultats que nous avons obtenus à partir d'un premier essai mis en place par G. BARBIER sur un sol de limon au C. N. R. A. à Versailles et dans lequel sont comparées sur une rotation betterave-blé de printemps en place depuis 1954 trois doses d'azote sans paille avec trois doses d'azote sur paille enfouie (8 tonnes par ha. et par an) sont consignés dans le tableau 19.

TABLEAU 19

*Essais « enfouissement de paille 1954 » (Closeaux),
Évolution de la teneur en matière organique et de la stabilité structurale
(Résultats moyens)
Agb %*

Traitements	Ag _a	Ag _b	S	C %/100 total	C/N total
Sans paille 80 N (1) ...	4,95	2,60	18,6	11,25	11,6
Sans paille 120 N (5) ...	5,55	2,70	15,2	12,25	11,45
Sans paille 160 N (6) ...	4,90	2,55	17,6	12,40	12,0
Avec paille 80 N (2) ...	6,5	3,55	13,1	13,60	12,4
Avec paille 120 N (3) ...	5,55	3,50	14,4	13,75	12,7
Avec paille 160 N (4) ...	5,85	3,25	14,9	13,05	12,2

Il ressort de ces chiffres que, bien qu'elle soit, statistiquement parlant, significative, l'augmentation de stabilité structurale observée à la suite de l'incorporation de pailles de blé, pourtant à des doses annuelles élevées, n'est qu'extrêmement faible. L'indice général S passe en moyenne de 17,1 dans les parcelles-témoin à 14,1 dans les parcelles ayant reçu des apports de paille. Parallèlement, le niveau humique s'est légèrement élevé, passant de 9,05 à 9,5 p. 1 000 de carbone sous forme liée.

On peut conclure de cet essai tout d'abord que le coefficient isohumique K₁ calculé en supposant que les pertes de matières organique par minéralisation de l'humus ont été les mêmes dans les deux cas, apparaît ici comme étant inférieur à 0,1. Cette valeur relativement faible du coefficient isohumique de la paille vient d'ailleurs confirmer d'autres résultats obtenus en particulier par HÉNIN et TURC, SOUBIES et GADET dans la région toulousiane et par MULLER dans la région méditerranéenne.

On peut remarquer également le désaccord profond entre ces résultats obtenus au champ et ceux qui s'étaient dégagés des expériences de laboratoire que nous avons décrites dans la première partie. En effet, dans ces dernières, la fermentation au sein du sol de fragments de paille finement divisés avaient abouti à une augmentation considérable de stabilité principalement due à une diminution de la mouillabilité du sol et ceci pour des augmentations du taux de carbone lié relativement peu importantes. Pour expliquer ce désaccord, plusieurs hypothèses sont possibles : on peut tout d'abord imaginer que la date du prélèvement n'a pas été judicieusement choisie et qu'elle est intervenue à un moment où les produits transitoires de l'humification

avaient disparus. Il ne semble pas, malgré la grosse importance qu'on doit attacher à ce problème, qu'il y ait là une explication satisfaisante. En effet, on trouvera dans le tableau 20 une série de comparaisons relevées dans la région parisienne entre parcelles ayant ou non reçu de la paille et pour lesquelles les prélèvements avaient été effectués à différentes périodes de l'année. Dans aucun de ces cas, on ne trouve de différence plus considérable.

TABLEAU 20

Agb %

Date de prélèvement	Octobre	Octobre	Août	Mars	Mai
Avec paille	1,7	1,2	5,6	3,45	3,6
Sans paille	0,88	1,0	4,4	2,6	3,1

En fait, il semble qu'il faille bien plutôt rendre responsable de cette faible augmentation de stabilité le mauvais mélange de la paille à la couche arable. Dans nos expériences de laboratoire chaque particule de terre se trouvait au contact de particules de paille et les corps microbiens responsables de la transformation ainsi que les produits fixes sur place pouvaient pleinement trouver leur efficacité sur toute la masse de l'échantillon expérimenté. Au contraire, l'enfouissement des pailles aboutit généralement, et c'était vrai dans tous les cas étudiés ici, à localiser la matière organique dans le fond de la couche travaillée. Ceci explique qu'à chaque instant on prive le sol de la stabilisation brutale due aux fermentations pour ne conserver qu'une amélioration très faible due à la légère augmentation du taux d'humus stable peu à peu mélangé au cours des années à l'ensemble de la couche arable par les labours et les diverses façons culturales.

On pouvait d'ailleurs imaginer que cette localisation au fond du labour entraînerait une légère augmentation de stabilité de la couche immédiatement sous-jacente par suite de l'imprégnation de cette dernière par les produits mobiles issus de la fermentation. Le tableau 21 montre qu'il en est effectivement ainsi dans l'essai des Closeaux, bien que, là encore, l'amélioration soit minime et, semble-t-il, sans grande influence sur le comportement du sol.

Il apparaît donc que c'est par un autre mécanisme que celui d'une augmentation

TABLEAU 21

Stabilité de la couche immédiatement sous le fond du labour
(Valeurs moyennes ; Indice 100 = témoin)

Témoin	Paille de blé	Luzerne	Fumier
100	122*	136*	108

* Significativement différent du témoin ($P = 0,01$).

de stabilité que les enfouissements de paille provoquent l'amélioration à court et moyen terme des propriétés physiques du sol. L'observation comparée de profils avec ou sans incorporation de pailles permet de mettre en évidence la plupart des différents effets annexes dont nous avons parlé au début de ce chapitre.

Tout d'abord, on remarque une pullulation de vers de terre qui, principalement dans les terres de limon où ces animaux semblent se déplacer plus aisément que dans les sols lourds ou sableux, régénèrent tout au long de la période de culture la structure de leurs zones d'action en créant un réseau de galeries facilitant l'infiltration et la circulation de l'eau, le développement des racines en profondeur, l'aération du sol. Ensuite, la présence de lits obliques de paille constitués au travers de la couche arable dans le cas d'un labour relativement dressé, peut permettre un meilleur ressuage au cours de l'hiver, atténuant ainsi les phénomènes de battance ou de dégradation par les gelées survenant en terre exagérément humide (essais de Gif-sur-Yvette 1960-61).

D'autres observations montrent également certaines conséquences néfastes des localisations de paille au fond du labour. Nous trouvons des phénomènes de gleyfication (essai de Gif-sur-Yvette) ou la formation de couches « barrières » qui s'opposent à la descente des racines dans le sous-sol et aux petits transferts d'eau *per ascensum* dont nous avons parlé plus haut. (Fère-Champenoise).

Il nous reste dans ces conditions à examiner comment améliorer la technique d'enfouissement pour obtenir une meilleure action stabilisante et une diminution des risques d'accident tout en maintenant les aspects bénéfiques que nous avons déjà observés. A partir des considérations ci-dessus, on peut résumer, en les regroupant ainsi, les exigences auxquelles on doit satisfaire :

- assurer un mélange aussi intime que possible de la paille à l'ensemble de la couche arable ;
- améliorer autant que possible la décomposition de la paille ;
- éviter que le « coup de feu » de la fermentation qui, surtout s'il se produit dans une période où le sol est humide, c'est-à-dire moins bien aéré, est responsable des phénomènes réducteurs, ne se produise alors que la culture suivante est déjà installée.

Compte tenu de ces exigences, on peut définir les grandes lignes d'une technique d'enfouissement permettant d'éviter autant que faire se peut, les principaux inconvénients dont nous avons parlé :

Assurer le mélange revient tout d'abord à fragmenter les brins de paille le plus finement possible et à les répartir régulièrement sur toute la surface du champ alors qu'ils ont été laissés à peu près intacts et localisés en andains par la moissonneuse-batteuse. Il existe pour ce faire des machines spécialisées qui sont de plus en plus largement utilisées par les agriculteurs. En ce qui concerne le mélange à la couche arable, il semble que pour l'assurer convenablement, il soit nécessaire de s'y prendre en deux fois : dans un premier temps on commence par mélanger la paille aux 5 à 10 premiers centimètres du sol par un déchaumage profond opéré avec un *cover-crop* ou par un léger pré-labour. Le labour proprement dit devra être aussi dressé que possible de façon à ce qu'une part importante de la couche enrichie en brins de paille, parce que disposée en bandes obliques et non localisée au fond du labour, reste accessible aux dents des instruments de pseudo-labour qui parferont ainsi le mélange lors de la préparation du lit de semence de la culture suivante.

La décomposition est d'ailleurs elle aussi améliorée par le broyage qui brise la couche de cires hydrophobes qui gaine la paille et ralentit son humectation. Le pré-labour qui assure le contact entre la paille et le sol à une époque où la température est encore assez élevée pour autoriser l'activité microbienne est également un facteur d'accélération dans la décomposition de la paille. Cette dernière peut être encore activée par l'installation sur le pré-labour, lorsque les conditions climatiques le permettent, d'une culture dérobée d'engrais verts qui sera incorporée au moment du labour et qui fournira une matière verte très fermentescible apte à jouer le rôle d'un « pied de cuve » pour la décomposition de la paille. Ce perfectionnement, s'il semble très efficace, à condition qu'une dose suffisante d'engrais azoté apportée à l'engrais vert permette d'obtenir une quantité de matière verte suffisante, n'en reste pas moins aléatoire en raison de sa dépendance des conditions météorologiques de l'automne.

La mise en fermentation de la paille immédiatement après la récolte dans des conditions d'aérobiose suffisantes assure déjà l'agriculteur dans une assez large mesure contre les risques d'accident par asphyxie sur la culture qui suivra. De plus, le meilleur mélange ainsi obtenu à la fois par le pré-labour et par un labour dressé atténue encore les risques de glyfication qui se produisent, nous l'avons vu, principalement lorsque une matière non encore fermentée est enfouie profondément à l'abri de l'air.

En conclusion, il apparaît que si l'incorporation de paille ne présente pas avec les techniques couramment utilisées jusqu'ici d'intérêt immédiat en ce qui concerne l'amélioration de stabilité structurale, elle n'en a pas moins des conséquences évidentes et favorables sur les propriétés physiques du sol considérées dans leur ensemble.

Tout d'abord, les effets annexes d'un enfouissement de pailles semblent, sans même faire intervenir une influence probable sur l'économie de l'azote, justifier à eux seuls une telle pratique à condition que des précautions soient prises pour éviter les accidents de végétation susceptibles de se produire.

Ensuite, si l'on considère le bilan humique dont l'équilibre semble devoir assurer une constante de base à la stabilité structurale, l'incorporation de pailles dans les systèmes de culture céréaliers semble seule susceptible de fournir l'appoint nécessaire aux restitutions qui assurent cet équilibre.

Enfin, il ne paraît pas exclu, et des études ultérieures doivent préciser ce point, que le fait d'assurer un meilleur mélange lors de l'enfouissement puisse avoir pour conséquence d'augmenter la stabilité dans des proportions qui, si elles approchaient seulement de celles que nous avons pu noter dans les expériences de laboratoire, aboutiraient à une amélioration considérable. Certes, il s'agirait alors d'une augmentation épisodique dont l'effet ne dépasserait guère une durée de quelques mois et disparaîtrait avec les dernières traces de paille sous forme libre. Toutefois, comme cette action viendrait s'ajouter aux précédentes, elle ferait, semble-t-il, pencher la balance en faveur de l'enfouissement. Il nous faut ajouter que le brûlage pourrait dans cette optique intervenir de temps à autre en tant que mesure sanitaire ou bien dans les cas où les conditions d'exploitation particulières à une année le rendraient intéressant, sans mettre en danger l'avenir de la parcelle puisqu'aussi bien nous avons vu que le manque à gagner du sol en humus consécutif à ce brûlage reste excessivement faible, sinon, pour une seule année pratiquement négligeable.

CHAPITRE III

LES FUMIERS ET AUTRES PRODUITS ORGANIQUES SEMI-FERMENTÉS OU FERMENTÉS

Nous traiterons dans ce chapitre de tout un ensemble de matières organiques plus ou moins couramment utilisées mais qui ont ceci de commun de n'être pas des substances « fraîches », ce qualificatif étant pris dans le sens où nous l'avons utilisé jusqu'à présent c'est-à-dire désignant des produits non fermentés. On trouvera dans ce groupe d'amendements organiques outre le produit le plus important, le fumier, des produits divers : résidus humiques industriels, tourbe, engrais organiques divers.

I. Les fumiers

Il s'agit là traditionnellement de l'amendement organique par excellence : celui auquel on pense en premier lieu dès que l'on évoque le maintien du niveau humique des sols et plus généralement le maintien de la fertilité. En fait, la dénomination de fumier recouvre tout en ensemble de matériaux organiques divers en ce qui concerne leur origine et leur degré d'évolution. C'est ainsi qu'on distingue les fumiers suivant leur origine : fumiers de bovins, de chevaux, de moutons, pour ne citer que les principaux ; et aussi leur état, lequel est fonction à la fois de la proportion de résidus végétaux qui en constituent le support et du stade de décomposition auquel l'ensemble paille + déjection animale est parvenu. On parle ainsi de fumier pailleux de fumier bien fait, de fumier sec, de fumier gras, etc.

On conçoit qu'il soit difficile dans ces conditions de présenter un mode d'action du fumier alors qu'en fait il ne peut y avoir qu'une série de variantes dépendant de la nature du fumier.

a) *Évolution du fumier dans le sol*

Au cours de sa fabrication, le mélange de la litière et des déjections a déjà subi un certain nombre de transformations fermentatives allant jusqu'à la formation d'acides humiques.

L'intensité de ces fermentations se manifeste d'ailleurs par l'élévation de température qui se produit au sein d'un tas de fumier. Ce dernier représente donc un produit concentré et déjà plus ou moins évolué.

Ces caractéristiques ont chacune leur conséquence pratique :

— La fermentation « explosive » qui a lieu lorsque les conditions de milieu le permettent peu de temps après l'incorporation au sol d'une matière fermentescible est d'autant plus faible que le fumier est plus décomposé. Il s'ensuit que les risques d'accidents par apparition de conditions réductrices dans le sol varient selon la qualité du fumier mais sont moins importants que lors d'enfouissement de matières « fraîches ».

— D'autre part le rendement de la transformation en humus dans le sol, c'est-à-dire le coefficient isohumique K_1 est plus élevé que dans le cas de matériaux non fermentés. Il a été chiffré à des valeurs allant de 0,15 à plus de 0,50 suivant les auteurs et le type de fumier étudié. La conséquence de ce meilleur rendement sur le niveau humique du sol doit cependant être précisé par rapport à l'action d'un apport de paille.

En effet on peut considérer que pour des *apports égaux* de matière sèche la fourniture d'humus est proportionnelle au coefficient isohumique. Dans ces conditions le fumier fournira 2 à 5 fois plus d'humus que la même quantité de paille. Par contre il en va différemment si l'on compare comme nous le verrons plus loin, un apport de paille donné à la même quantité de paille préalablement transformée en fumier artificiel on peut alors parler d'apports non plus *égaux* mais *équivalents*.

L'apport humique H_p de la paille reste si Q est la quantité apportée et K_{1p} le coefficient isohumique de la paille.

$$H_p = K_{1p} \times Q$$

L'apport humique du fumier, lui, est égal à :

$$H_f = K_{1f} \times f \times Q$$

où K_{1f} est le coefficient isohumique du fumier en question et f le rendement en matière sèche de la transformation de paille en fumier.

$$\text{Le rapport } \frac{H_f}{H_p} \text{ n'est plus égal à } \frac{K_{1f}}{K_{1p}} \text{ mais à } \frac{K_{1f} \times f}{K_{1p}}.$$

Par exemple, dans l'essai des Closeaux dont nous avons parlé page 95 certaines parcelles avaient reçu un fumier pailleux pour lequel $f = 0.5$. K_{1f} devrait donc être au moins égal à 2 K_{1p} pour qu'à quantités *équivalentes* le fumier fournisse plus d'humus que la paille.

b) *Action sur la stabilité structurale*

Si l'on compare, comme dans le tableau 22 l'amélioration de stabilité provoquée par apport de fumier dans les 20 centimètres superficiels d'un sol de limon avec celle qu'on peut déceler dans la couche homologue d'un sol comparable après 3 ans de prairie temporaire (ray-grass anglais), on constate une différence fondamentale. Tout d'abord, l'augmentation de stabilité, qui est de 115 p. 100 par rapport au témoin non fumé à la suite d'apports annuels de 100 tonnes de fumier à l'ha pendant 25 ans, est de 200 p. 100 après 3 ans de repos sous prairie temporaire. D'autre part, ces augmentations de stabilité ne sont en aucun cas en rapport avec les accroissements qui leur correspondent du taux de matière organique du sol. Ceux-ci, très importants à la suite des apports de fumier, sont relativement faibles sous prairie. Il s'agit donc de deux formes de matières organiques ayant des activités spécifiques extrêmement

différentes. Enfin, nous avons vu dans la première partie de ce mémoire, (p. 68), que si l'on soumettait un échantillon amélioré par 3 ans de prairie temporaire à une fermentation au laboratoire dans des conditions standard, 50 p. 100 de l'amélioration disparaissait au bout d'un mois tandis que dans le cas d'une terre améliorée par des apports de fumier, seulement 20 p. 100 de l'amélioration disparaissait dans les mêmes conditions.

TABLEAU 22

Traitement	100 t fumier/ha/an			Repos sous prairie temporaire 3 ans		
	Parcelle fumée	Témoin	Augmentation % du témoin	Parcelle en prairie	Témoin	Augmentation % du témoin
Agb %	11,0	5,1	115	5,1	1,7	200
M.O. totales	4,34	1,74	150	1,65	142	16

A partir de cet ensemble de faits, on peut élaborer un schéma représentant le mode d'action du fumier sur la stabilité structurale.

Les améliorations observées seraient dues essentiellement à une élévation du taux de matières humiques stables. Ces dernières, en effet, se forment en quantité relativement importantes, nous l'avons vu, au cours de la décomposition du fumier dans le sol ; mais leur activité spécifique est faible, si on le compare à celle des produits transitoires de l'humification. L'exemple précédent le montre et nous avons déjà obtenu des résultats analogues en comparant au laboratoire l'activité d'acides humiques à celle d'autres substances organiques. Ces produits transitoires ne représentent pas un apport important dans le cas du fumier pour deux raisons principales :

— d'abord parce qu'une grande partie d'entre eux s'est formée puis a disparu au cours de la fabrication du fumier, c'est-à-dire hors du sol.

TABLEAU 23

Essai des Closeaux (dispositif 1949)

Parcelles	Ag _a %	Ag _b %	S	C °/00 total
sans fumure org.	5,15	3,1	10,8	11,7
avec Fumier	6,9	4,2	8,15	13,7

— ensuite, comme dans le cas des pailles, le mauvais mélange du fumier résultant des enfouissements couramment pratiqués ne permet pas aux produits « jeunes » qui se forment encore dans le sol de se fixer sur une masse de terre suffisante pour que leur action se manifeste.

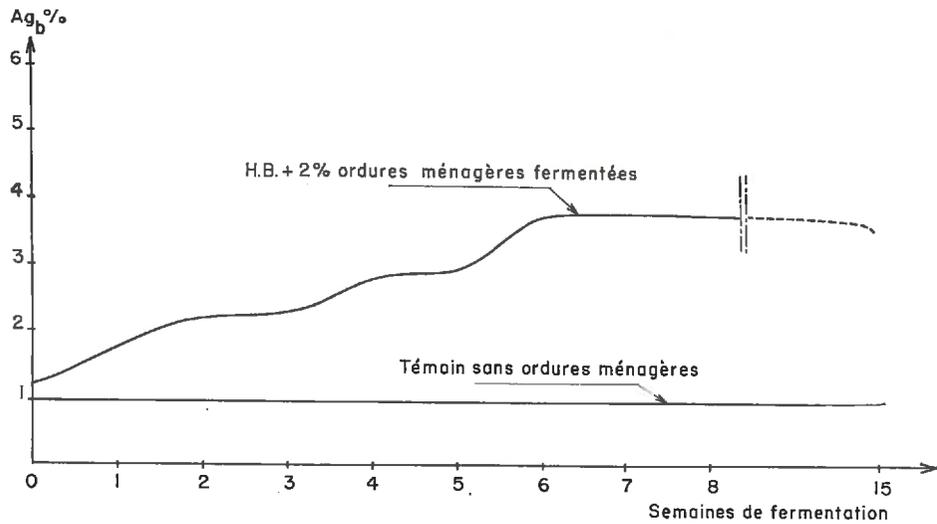
Une confirmation de ce point de vue nous est fournie par le comportement comparé des parcelles ayant reçu du fumier et de la paille dans le dispositif expérimental des Closeaux.

On constate que l'augmentation de stabilité de même que l'augmentation du taux de matière organique sont du même ordre de grandeur que dans le cas d'un apport de paille. L'équivalence dans la variation du taux d'humus peut s'expliquer par le fait que la quantité de fumier apporté a été calculée de façon à assurer l'équivalence des matières fraîches de départ (voir p. 100).

Quant à l'action sur la stabilité structurale, elle n'est donc ni plus ni moins importante que lors de l'enfouissement d'une paille et la faveur que connaît le fumier auprès des agriculteurs ne semble pas devoir être rattachée à une amélioration de stabilité seule mais plutôt à un ensemble d'avantages : participation à la fertilisation azotée et minérale, faibles risques d'accidents cultureaux, facilité technologique de l'enfouissement, auxquelles s'ajoute bien entendu l'action sur la faune du sol commune à l'incorporation de tous les amendements organiques.

II. Engrais organiques divers, tourbe, etc.

Les engrais organiques présentés dans le commerce peuvent être rattachés à deux grandes catégories : la première comprend les produits à base de tourbe plus ou moins enrichis en germes microbiens, tandis que la deuxième correspond à des matériaux directement comparables à des fumiers artificiels : c'est le cas des amendements à base d'ordures ménagères fermentées.



GRAPHIQUE 24. — Évolution au cours du temps de la stabilité d'un sol ayant reçu un compost d'ordures ménagères

Dans le cas des tourbes ou des amendements à base de tourbe il s'agit le plus souvent de produits déjà très humifiés, qui ne subissent qu'une évolution très lente après leur enfouissement, se fixent difficilement aux particules terreuses. Leur efficacité déjà relativement faible comme celle des produits évolués en général s'en trouve encore réduite. Dans ces conditions, l'amélioration de la stabilité par leur intermédiaire nécessiterait des doses d'amendement considérables et l'on ne peut que poser la question de la rentabilité de l'opération.

En ce qui concerne les ordures ménagères fermentées un essai de laboratoire suivant les modalités de l'essai « durée de fermentation » à partir de farine de foin de luzerne (voir p. 46) a montré que leur évolution reflétée par leur liaison à la partie minérale du sol est très lente. Parallèlement la stabilité structurale croît régulièrement bien que faiblement (graph. 24) sans que l'on puisse noter le phénomène de stabilisation intense qui se produit dans le cas d'un apport de matière fermentescible.

Il semble donc qu'on puisse assimiler ces produits à des fumiers pour ce qui est de leur action sur la stabilité de la structure. Encore faut-il tenir compte des variations saisonnières intervenant dans leur qualité et dont l'amplitude est reconnue comme importante (BARBIER et KEILING (1)).

En conclusion commune à ce que nous avons vu de l'action des produits étudiés dans ce paragraphe, nous soulignerons l'intérêt qu'il y a à ne pas confondre rendement humique élevé et action stabilisatrice intense. Les deux aspects ont leur intérêt propre, le premier à long terme, et le deuxième en ce qui concerne une valeur-précédent immédiate.

L'intérêt d'un système mixte agriculture-élevage est de combiner l'action du fumier particulièrement intéressante en ce qui concerne le maintien à long terme du taux d'humus et des propriétés structurales de base qui en dépendent et celle des prairies dont nous examinerons plus loin l'influence sur les propriétés physiques du sol.

(1) *Techniques agricoles*. Éditions techniques, Paris.

CHAPITRE IV

LES ENGRAIS VERTS

Ce sont des cultures installées dans le but de fournir de la matière végétale qui sera enfouie dans le sol. Les mécanismes invoqués pour expliquer les variations de rendements qui peuvent résulter de l'application de cette pratique sont divers : enrichissement en humus, protection du sol, activation de la vie microbienne, action sur la dynamique des éléments fertilisants, etc.

En fait les essais culturaux, s'ils permettent d'évaluer les effets sur la récolte, sont rarement conçus de façon à mettre en évidence l'importance du ou des divers facteurs de la fertilité qui ont été modifiés au cours de la culture de l'engrais vert ou après son enfouissement. Nous retrouvons donc la nécessité d'envisager l'ensemble des processus qui peuvent être déclenchés par l'introduction d'une culture d'engrais vert et de mettre en évidence leurs conséquences parfois opposées. C'est seulement après ce travail d'analyse et d'explication qu'il sera possible d'interpréter certains résultats culturaux contradictoires et d'énoncer des règles générales. Notre but est de contribuer à la compréhension des mécanismes d'action des engrais verts sur les propriétés physiques du sol et particulièrement sur la stabilité structurale.

I. Différents types d'engrais verts

Une des raisons de la variabilité des résultats nous paraît être la grande diversité des actions effectivement pratiquées. Ces différences se situent d'ailleurs à plusieurs niveaux :

a) *La place de l'engrais vert dans la rotation*

On peut en effet distinguer les engrais verts en « culture dérobée », c'est-à-dire dont la végétation prend place entre deux cultures, à une période où, normalement, le sol resterait nu ; les engrais verts « assolés », c'est-à-dire ceux se substituant à une culture intervenant ainsi à part entière dans l'assolement ; enfin les engrais verts en culture « associée » par exemple ceux qui occupent pendant une partie de l'année le sol d'un verger.

b) *L'espèce végétale cultivée*

Les engrais verts appartiennent généralement à l'une des trois familles suivantes : Légumineuses, Graminés, Crucifères. Ces familles se distinguent par la masse et la qualité de la matière végétale produite, en particulier par la répartition du poids

total du végétal entre les fractions aériennes et souterraines et aussi à un tout autre point de vue par le coût de l'installation (prix de la semence) qui est sensiblement plus élevé pour les Légumineuses.

c) *Le stade végétatif*

L'engrais vert au moment de son enfouissement, et plus particulièrement son degré de lignification, sont importants à considérer, car ils déterminent dans une large mesure l'évolution et le rendement en humus de la matière végétale dans le sol.

La plupart de ces caractéristiques paraissent susceptibles d'influer, directement ou non, sur les modalités ou l'intensité de l'action des engrais verts sur les propriétés physiques du sol. Elles constituent donc des éléments de base du problème posé.

La quantité de matière végétale dont l'importance est évidente varie suivant l'espèce, les conditions climatiques, la fertilisation et la durée de végétation de la culture. Dans le cas, le plus fréquent en grande culture, d'un engrais vert en « dérobée » où la durée de végétation n'est que de quelques semaines (fin de l'été, début de l'automne) ce sont principalement la pluviométrie et la fertilisation qui déterminent le tonnage de matière végétale produite.

Un deuxième point concerne les qualités de cette matière. La proportion entre les parties aériennes (tiges et feuilles) et les parties souterraines (racines) est essentiellement fonction de la famille et de l'espèce botanique. Mais le rendement de la culture peut le modifier (tabl. 24).

TABLEAU 24

*Masse végétale fournie par divers engrais verts,
Répartition en fractions aériennes et souterraines
(Tonnes/ha)*

Type d'engrais vert	Parties aériennes	Racines	Total
Graminées			
Ray-Grass Italien (1)	2,5	9,5	12
Légumineuses			
Vesce (1)	5,3	3,8	9,1
Trèfle incarnat (1)	6,8	3,5	10,3
Pois d'hiver (1)	4,5	2,8	7,3
Crucifères			
Siletta	2,95	2,6	5,55
Colza <i>L'ho</i> (faible rendement)	4,4	4,2	8,6
Colza <i>L'ho</i> (fort rendement)	10,1	4,3	14,4

(1) D'après MAC VICKAR et al. (1960).

D'autre part le degré de lignification est lui fonction de l'espèce et du stade végétatif auquel a lieu l'enfouissement. Ce dernier est le résultat du jeu de plusieurs facteurs tels que le climat de l'année, la nature des cultures qui précèdent et suivent l'engrais vert et aussi de la décision de l'agriculteur.

II. Les différents modes d'action des engrais verts sur la structure du sol et sa stabilité

Une première caractéristique générale de la masse végétale fournie par la culture des engrais verts est sa rapidité de fermentation. On constate couramment que quelques semaines après enfouissement d'une végétation jeune toute trace des parties aériennes a disparu. Il arrive par contre qu'on puisse retrouver des débris de racines lorsque celles-ci étaient très abondantes comme c'est le cas par exemple pour une Graminée telle que le Ray-grass d'Italie.

Cette vitesse de décomposition implique qu'il se soit produit dans le sol une fermentation de caractère explosif comparable à celle que nous avons observée au laboratoire au cours de nos expérimentations à partir de glucose. Cette tendance générale est, bien entendu, plus ou moins accusée, selon la qualité de la matière végétale considérée.

Quant au coefficient isohumique, c'est-à-dire au rendement en humus des matériaux envisagés, il est lui aussi fonction des caractéristiques de la matière végétale. On sait, après les travaux de divers auteurs (BREMNER, FLAIG, FORSYTH) que les acides humiques et l'humus sont caractérisés par la présence de composés contenant des noyaux benzéniques et certaines chaînes latérales tels qu'en fournissent les résidus d'attaque des lignines. Corollairement, certains auteurs ont montré qu'un enfouissement d'engrais vert n'augmentait pas sensiblement le taux d'humus du sol et pouvait même accroître la vitesse de destruction de l'humus. Le tableau 25, établi d'après des données de BRADT, indique qu'en sol de verger et pour une période de 10 ans les variations du taux de matière organique totale du sol restent négligeables

TABLEAU 25

*Variation du taux de matière organique de la couche arable
d'un sol de verger après 10 ans de culture d'engrais vert
(D'après BRADT)*

Nature de l'engrais vert	Variation du taux de matières organiques %
Sarrazin	
1 culture par an	— 0,1
2 cultures par an	— 0,1
Seigle — Soja	+ 0,1
Seigle — Trèfle	+ 0,2

Il semble que d'une façon générale on puisse admettre que les coefficients isohumiques seront d'autant plus faibles que l'engrais vert sera plus jeune et donc moins lignifié et que la masse des racines sera plus faible par rapport à la masse végétale totale.

Le faible rendement en humus de la transformation exclut la possibilité d'une amélioration sensible de stabilité provenant d'un relèvement du taux d'humus du sol. D'ailleurs, dans le cas de cultures dérobées, il n'a jamais été possible, à notre connaissance, de déceler un changement quelconque *d'une année sur l'autre* de la stabilité structurale.

Par contre il est très probable, bien que cela n'ait pas été montré de façon irréfutable, qu'il existe pendant une courte période après l'enfouissement une stabilisation assez éphémère, et ne portant que sur les particules terreuses au contact direct des matières végétales en décomposition. Ce caractère localisé dans le temps et dans l'espace de l'amélioration correspond au développement d'une microflore abondante visible directement dans le sol, à certaines époques, comme c'était le cas dans les fermentations de laboratoire à partir de glucose. Il explique la difficulté que l'on rencontre lorsqu'on veut mettre en évidence au champ ce phénomène. Il faut souligner de plus que dans les conditions naturelles le facteur « temps » devient très relatif et devrait être pondéré à l'aide d'un coefficient indiquant pour chaque période au moins la température et l'humidité moyenne du sol.

Nous avons présenté cette hypothèse sur le mode d'action des engrais verts en nous référant à un modèle de laboratoire mais aussi en nous appuyant sur le comportement du sol au champ. Deux observations viennent le confirmer.

D'abord, BENOIT *et al.* (1962) ont constaté que pour un enfouissement d'engrais vert effectué en avril l'augmentation de stabilité structurale évaluée par une méthode différente de celle que nous avons utilisée, était très sensible au mois de mai et avait presque entièrement disparue au mois de septembre (tabl. 26).

TABLEAU 26

*Stabilité des agrégats (exprimée en valeur indexée sur un témoin sans engrais vert)
après enfouissement d'un seigle au mois d'avril
(D'après BENOIT *et al.* 1962)*

Date de prélèvement	Mai	Septembre
Témoin	100	100
Engrais vert total	161	119
Racines seulement (parties aériennes exportées) ⁽¹⁾	150	116

⁽¹⁾ On notera l'importance du rôle de la fraction souterraine de la plante.

La deuxième observation est due à KONONOVA et BELCHIKOVA qui ont noté l'importance du délai écoulé entre l'enfouissement d'un engrais vert et l'installation de la culture suivante.

Enfin il existe en dehors de ces influences fugaces sur la stabilité d'autres modalités d'intervention des engrais vert directement sur la structure.

Nous retrouvons ici la plupart des actions déjà mentionnées dans le cas des enfouissements de paille. La faune du sol, les vers de terre en particulier (tabl. 27) prolifèrent et accroissent la porosité du sol.

TABLEAU 27

Action des engrais verts sur la prolifération des vers de terre
(D'après J. VAN RHEE et al. 1961)

	Nombre de vers au mètre carré
Sol nu	30
Engrais vert	100
Gazon	400

D'autre part, dans le cas de plantes à tige rigide ou très riches en racines, la matière enfouie constitue une armature provisoire interne du sol soutenant à bout de bras si l'on peut dire la structure. Enfin, au cours de la végétation, les espèces couvrantes atténuent l'action des gouttes d'eau et constituent donc sinon un correctif, du moins un palliatif à une stabilité insuffisante.

Nous citerons pour terminer un exemple cultural montrant que les engrais verts ont une action d'autant plus forte sur le rendement que le niveau humique et structural du sol est plus faible. Le tableau ci-dessous rassemble les résultats moyens d'un essai sur orge de printemps mis en place sur deux parcelles voisines de Champagne défrichées depuis des temps différents :

TABLEAU 28

Influence de l'enfouissement d'un colza Liho sur le rendement d'une culture d'orge

	Matière organique %	log ₁₀ 10 S	Rendement de l'orge en quintaux par ha	
			après engrais vert	Témoin
Parcelle défrichée depuis 4 ans	5,3	0,93	58,5	54,8
Parcelle défrichée depuis 10 ans	4,2	1,20	50	43,2

Si l'on se réfère aux expériences décrites dans la première partie de ce mémoire, concernant la mise en œuvre de substances aisément fermentes cibles, on peut s'attendre à ce que les engrais verts constitués généralement par des tissus jeunes donc pauvres en lignine et riches en azote exercent un effet comparable. En d'autres termes ils provoqueront sur la stabilité structurale un effet fugace dont l'intensité sera liée à la masse végétale enfouie, à sa répartition dans le sol et aux conditions de ferment-

tation (température, humidité, aération du milieu) au moment de l'enfouissement.

En ce qui concerne l'effet agronomique global, les fermentations intenses qu'ils peuvent produire, la porosité supplémentaire qui résulte de leur enfouissement peuvent expliquer leur influence favorable. Leur action d'activation sur la décomposition des pailles peut également être bénéfique. Par contre, dans les sols à mauvaise structure ils peuvent favoriser l'apparition de phénomènes réducteurs qui se manifestent par la formation de gley.

Dans les conditions de structure plus favorables ils semblent soit diminuer la valeur des coefficients K_1 isohumiques soit même augmenter le coefficient K_2 de destruction de l'humus. Leur enfouissement répété risque ainsi d'aboutir à un abaissement de la réserve organique du sol.

En dépit de son action favorable évidente dans certains cas, l'engrais vert doit être considéré comme une technique d'utilisation délicate aux effets incertains tant que ses conditions d'applications n'auront pas été précisées.

CHAPITRE V

REPOS DU SOL SOUS UNE VÉGÉTATION PERMANENTE

De nombreuses agricultures se fondent encore sur le système de la jachère ⁽¹⁾ le mot étant employé ici dans son sens le plus général. Ce système correspond à un assolement comprenant une part plus ou moins importante des terres cultivables abandonnées au repos, une ou plusieurs années, avant d'être remises en culture. Les raisons de l'augmentation de fertilité consécutive à une jachère sont parfois autres que celles qui pourraient justifier leur place dans cette étude. Nous nous en tiendrons aux pratiques visant à assurer et à utiliser la reconstitution de la fertilité du sol sous une végétation permanente. Dans certains cas, en particulier lors de la mise en valeur de régions non cultivées, le problème reviendra à examiner l'évolution des propriétés physiques du sol consécutive au défrichement. Ce problème ne présente d'intérêt général que dans les pays tropicaux d'agriculture itinérante où l'assolement consiste en une certaine répartition entre la surface cultivée et la brousse secondaire ; il se pose plus rarement en région tempérée. Par contre, il existe, pour les assolements les plus intensifs actuellement pratiqués dans certains systèmes de cultures, une surface réservée à des cultures pluri-annuelles fourragères qui jouent le rôle des jachères de la culture extensive.

Après avoir examiné rapidement un exemple d'évolution du sol après défrichement forestier, nous nous attacherons à étudier plus longuement le mécanisme de l'amélioration structurale des sols sous prairie temporaire assolée. Nous aurons en fait à examiner quels sont les facteurs qui permettent ou qui limitent les bénéfices que l'on peut retirer d'un système de culture qui tend à se développer dans les régions à système mixte mais intensif d'agriculture et d'élevage, système généralement désigné sous le terme anglo-saxon de « *ley-farming* » ⁽²⁾.

Évolution du sol consécutive à des défrichements

Nous prendrons pour exemple d'une telle évolution celle qui a affecté les sols de la Champagne crayeuse mis en culture après défrichement des forêts de pins noirs. Cette évolution se manifeste par le fait qu'au fur et à mesure que ces terres « vieillissent » c'est-à-dire qu'il s'est écoulé plus d'années depuis leur mise en culture, il apparaît dans leur conduite un certain nombre de difficultés qui découlent d'une lente dégradation de leurs propriétés physiques. Nous avons regroupé dans le ta-

⁽¹⁾ On appelle jachère un terrain ne portant pas de plantes donnant lieu à exploitation. Il peut être maintenu nu par des façons aratoires ; on peut au contraire le laisser se recouvrir d'une végétation naturelle.

⁽²⁾ Il s'agit uniquement là de la reprise de rotations classiques traditionnellement utilisées dans certaines régions françaises (Ardennes, Centre-Est, etc.)

bleau 29 les résultats concernant les deux tests de stabilité structurale (analyse d'agrégats et perméabilité) se rapportant à différentes parcelles défrichées depuis des laps de temps variables. Dans tous les cas, il s'agit de sols appartenant au groupe des rendzines grises ou blanches caractérisées par la présence d'une teneur extrêmement élevée en calcaire (60 à 80 p. 100) presque entièrement réparti entre les fractions granulométriques correspondant au limon et aux sables grossiers. On constate une nette évolution dans un sens défavorable : après 15 ans de culture les sols passent d'une classe à très bonne stabilité à une classe inférieure qui, tout en conservant des propriétés structurales moyennes, commence à poser certains problèmes culturaux. L'explication d'une telle dégradation semble essentiellement liée à la diminution du taux de matières organiques contenu dans le sol.

TABLEAU 29

Evolution des sols après défrichement en Champagne

Désignation des sols	Matière organique totale %	Matière organique liée %	Stabilité structurale (moyenne)	
			log 10 S	log 10 K
1^{re} catégorie				
Terres défrichées depuis moins de 15 ans	n° 1	5,1	4,82	
	n° 2	6,7		
	n° 3	4,7		
	n° 4	4,0		
Moyenne	5,12		0,71	2,21
2^e catégorie				
Terres défrichées depuis plus de 15 ans et moins de 50 ans	n° 5	3,7	3,15	
	n° 6	3,75		
	n° 7	3,65		
Moyenne	3,7		0,88	2,01
3^e catégorie				
Terres défrichées depuis plus de 50 ans	n° 8	3,3	2,38	
	n° 9	2,6		
	n° 10	2,8		
	n° 11	3,0		
Moyenne	2,91		1,13	1,65

En fait, il est à peu près obligatoire que le stock très important de matière organique accumulée sous la forêt de pins en raison de conditions correspondant à un coefficient α extrêmement faible, subisse une diminution sensible après modification de ces conditions par le travail de défrichement et les conditions de la culture

en raison de la destruction de la fraction libre. Le problème qui se pose est celui de se maintenir à un niveau suffisamment élevé pour conserver des propriétés structurales convenables. Un exemple de calcul peut fournir un ordre de grandeur des restitutions théoriquement nécessaires pour maintenir le taux de matière organique à un niveau voisin de 4 p. 100. Il s'avère en effet que cette teneur représente la limite en deçà de laquelle des difficultés culturales commencent. Parmi les éléments du calcul, on doit faire intervenir la profondeur du sol qui n'excède généralement pas une quinzaine de cm en moyenne, ce qui représente, compte tenu de la présence de 20 p. 100 environ d'éléments grossiers (cailloux calcaires) un tonnage de terre fine équivalent à 2 000 tonnes/ha. soit pour le niveau critique 80 tonnes d'humus. Si l'on admet un coefficient k_2 de minéralisation de ce dernier égal à 1,5 p. 100 c'est une quantité annuelle de 1 200 kg d'humus qu'il sera nécessaire de restituer. Il est douteux, nous l'avons vu (voir p. 93), que les seuls résidus de récolte puissent participer pour plus de 5 à 600 kg à cette restitution. Aussi semble-t-il nécessaire de recourir à un assolement faisant intervenir une sole de repos sous prairie temporaire. Il semble bien d'ailleurs que dans les exploitations où l'on s'est orienté vers une solution de ce type, les problèmes dus à de mauvaises propriétés physiques voient leur apparition retardée.

Si les conditions économiques ne permettent pas l'adoption d'un système mixte agriculture-élevage, il faut trouver des palliatifs tels qu'une incorporation systématique des pailles et d'engrais verts et l'utilisation de méthodes de travail du sol adaptées aux terres à stabilité structurale insuffisante.

Influence du repos sous prairie sur les propriétés physiques du sol

La méthode la plus évidente pour apprécier la valeur d'une période de repos sous prairie en tant que précédent cultural consiste à comparer les rendements de cultures installées respectivement sur défriche de prairie et sur des parcelles voisines en culture continue depuis de nombreuses années. Différents auteurs ont présenté des résultats de cet ordre intéressant la culture de défriche ainsi que la deuxième et la troisième culture suivantes. Nous citerons un exemple proposé par des chercheurs anglais en soulignant que l'essai en question est très orienté au départ: les cultures n'y reçoivent en effet pas d'azote, ce qui laisse supposer que pour ces expérimentateurs, le bénéfice principal d'une augmentation de la matière organique du sol telle qu'elle apparaît en particulier sous prairie devait être *a priori* d'augmenter le stock d'azote disponible. La nutrition azotée devient dans de tels essais le facteur limitant du rendement et les auteurs constatent, ce qui paraît très logique, que ce dernier est en corrélation étroite avec la quantité d'azote minéralisable présente dans le sol au moment du retournement. Le tableau suivant 30 présente les rendements de trois récoltes successives : blé, chou et orge, obtenus soit sur terre de vieille culture, soit sur précédent-prairie.

On constate tout d'abord qu'il existe une arrière-action favorable de la prairie qui dans le cas présent peut se chiffrer à 6 quintaux de céréales par ha environ ou à 4 tonnes de choux ; cet arrière-effet se prolonge dans le cas présent au moins trois ans. D'autre part il est intéressant de noter qu'un apport supplémentaire de 30 unités d'azote sur la troisième année de culture : l'orge, augmente d'une dizaine de quintaux

les rendements moyens mais n'atténue pas la différence de rendement en fonction du précédent. Il apparaît donc que ce dernier agit autrement que comme une simple source d'azote.

De nombreux autres résultats, que nous ne citerons pas dans le détail, vont dans le même sens. Toutefois en France certaines observations, non chiffrées il est vrai, sont contradictoires, certaines prairies temporaires passant pour être de mauvais précédents culturaux. En fait, trop de facteurs interviennent pour que le seul résultat global d'une variation du rendement, qu'elle soit en plus ou en moins, ait une valeur généralisable. Il convient d'abord de faire l'inventaire des répercussions d'une prairie sur le sol. Nous nous bornerons ici aux aspects se rattachant aux propriétés physiques du sol et principalement à l'enrichissement en matière organique et aux modifications de stabilité structurale.

TABLEAU 30

Exemple d'augmentation de rendement sur retournement de prairie temporaire

Précédent	Rendement
<i>Première récolte : blé</i>	
Vieille culture rotation cultivée de 4 ans	39,4 q/ha
Précédent prairie (moyenne générale) espèces traitements.....	44,6 q/ha
<i>Deuxième récolte : choux</i>	
Vieille culture	38,9 t/ha
Blé sur prairie	43 t/ha
<i>Troisième récolte : orge</i>	
Vieille culture (6 ans).....	33,5 q/ha
Augmentation par apport de 30 kg/N/ha	10,2 q/ha
Précédent prairie	39 q/ha
Augmentation par apport de 30 kg/N/ha	9,7 q/ha

I. — MÉCANISME DE L'AMÉLIORATION STRUCTURALE

Enrichissement en matières organiques

Le tableau 31 présente les teneurs en matières organiques totales d'échantillons représentant les 25 cm superficiels de sols cultivés et de sols de prairie situés à proximité immédiate.

On constate que les sols de prairies contiennent des quantités sensiblement plus importantes que les sols cultivés et cela d'autant plus que la prairie est plus ancienne.

Une première explication de ce phénomène peut être fournie en supposant qu'en l'absence de tout travail du sol la minéralisation de l'humus est extrêmement lente sous prairie. Toutefois cette raison ne peut être suffisante. En effet dans le cas de la prairie de 3 ans de l'Eure du tableau 31 ci-dessus, la terre comporte 0,35 p. 100 de matières organiques totales de plus que sous culture. Si nous supposons que le coef-

ficient K_2 est nul sous prairie pendant les 3 ans et de 0,03 sous culture, ce qui représente une hypothèse extrême, nous n'expliquons ainsi que le 1/4 de la différence constatée. La conclusion est la même dans le cas des comparaisons de la Manche ou de La Minière.

TABLEAU 31

Comparaison des teneurs en matières organiques totales de la couche arable de sols cultivés et de sols sous prairie

Origine	Matières organiques totales %		
	Sols cultivés	Prairie de 3 ans	Prairies de plus de 15 ans
Eure	1,3	1,65	3,78
Manche	1,42	1,42	4,26
Seine-et-Oise	1,33	1,89	

Si maintenant, au lieu de considérer la teneur moyenne en matières organiques des 25 cm. superficiels, nous examinons séparément les couches successives du sol de 5 cm d'épaisseur, nous constatons (tabl. 32) que cette différence est surtout sensible dans les couches superficielles qui renferment une quantité importante de racines alors qu'elle devient négligeable au-dessous de 10 à 15 cm de profondeur dans le cas étudié.

TABLEAU 32

Comparaison des teneurs en matières organiques totales dans les couches superficielles du sol sous prairies temporaire de 3 ans et sous culture (Bernay)

Profondeur (cm)	Prairie N° 1	Prairie N° 2	Prairie N° 3	Témoin cultivé
0-5	1,50	1,95	2,20	1,35
5-10	1,40	1,35	1,50	1,30
10-15	1,35	1,35	1,40	1,35
15-20	1,25	1,25	1,30	1,25
20-25	1,30	1,25	1,25	1,30

Il apparaît donc beaucoup plus probable que l'enrichissement en matières organiques sous prairie est dû pour sa plus grande part aux apports constitués par les racines où leurs produits de décomposition. Dans le but de préciser l'allure de ce phénomène, nous avons cherché à étudier séparément les matières organiques libres et les matières organiques liées.

Le tableau 33 ci-dessous indique quelle est, couche par couche, la répartition de ces deux formes dans un sol sous Ray-grass anglais et dans un sol sous Dactyle, les deux prairies étant installées depuis 3 ans.

TABLEAU 33

Enrichissement en matières organiques libres et liées des couches superficielles du sol sous deux types de prairies temporaires de 3 ans

Prairie	Profondeur (cm)	Matières organiques totales (C ‰)	Matières organiques libres			Matières organiques liées			Δ C lié Δ C libre
			C ‰	C/N	Δ C ‰ libre (*)	C ‰	C/N	Δ C ‰ lié (*)	
Ray grass anglais	0-5	20,0	1,74	20	1,22	18,2	11,5	3,3	2,7
	5-10	17,5	1,08	21,7	0,56	16,4	11,0	1,5	2,6
	10-15	16,6	0,88	28,5	0,36	15,5	11,0	0,8	2,2
	15-20	16,2	0,72	30	0,20	15,5	11,0	0,6	3,0
	20-25	15,4	0,67	32,5	0,15	14,7	10,0	— 0,2	—
Dactyle pelotonné	0-5	18,6	1,47	23,2	0,95	17,1	10,6	2,2	2,3
	5-10	16,5	1,08	24,0	0,56	15,4	9,8	0,6	1,1
	10-15	15,8	0,90	29,2	0,38	14,9	9,5	0	0
	15-20	15,9	1,05	33,0	0,53	14,9	9,6	0	0
	20-25	16,4	1,26	32,0	0,74	15,1	9,7	0,2	0,3
Témoin cultivé	0-25	15,4	0,52	28		14,9	9,6		

(*) Accroissement par rapport au témoin cultivé.

On constate tout d'abord que l'augmentation porte sur les deux formes de matières organiques. L'observation directe des profils de sol sur le terrain montre qu'il y a une concordance satisfaisante entre les quantités de matières organiques libres présentes dans chaque couche et la répartition en profondeur de l'enracinement des deux prairies. C'est ainsi que le système racinaire du Dactyle est encore abondant entre 20 et 25 cm de profondeur tandis que celui du Ray-grass anglais est presque entièrement localisé dans les 15 premiers centimètres du sol.

En ce qui concerne les matières organiques liées, il faut dès le départ distinguer les deux types de prairie.

— Sous Dactyle, Graminée à enracinement en grande partie *perenne*, l'augmentation de matière organique liée est faible et n'est sensible que dans les 5 ou 10 cm superficiels. Les racines ne se décomposant pas au cours de la vie de la prairie, ce résultat était prévisible. L'élévation du taux de matières liées en surface doit être due principalement à la décomposition de parties aériennes mélangées au sol par la faune (ver de terre).

— Sous Ray-grass anglais, plante à racines principalement *annuelles*, on peut noter que l'augmentation du taux de matières libres s'est accompagnée d'une augmentation de matières organiques liées 2 à 3 fois plus forte provenant de l'évolution dans le sol des générations précédentes de racines.

L'examen des rapports C/N confirme l'allure de ces deux mécanismes d'enrichissement. Ainsi sous Dactyle le C/N des matières liées reste inférieur à 10 et donc voisin de celui du témoin cultivé. Seule la couche superficielle (voir plus haut) présente un rapport C/N légèrement plus élevé révélant la liaison de certaines matières organiques libres. Sous Ray-grass, ce dernier phénomène est général, seule la couche la plus profonde — 20-25 cm — dans laquelle il n'y a pas eu d'augmentation de matières liées présente un rapport C/N proche de celui du témoin cultivé.

Au bout de 3 ans sous prairie, on note donc une nette augmentation du taux des deux formes de matières organiques présentes dans le sol. L'augmentation totale du taux de matières organiques qui en résulte varie avec la profondeur et n'intéresse en fait que, les 15 à 25 cm superficiels suivant les cas.

Les matières organiques libres présentes constituent un stock pouvant atteindre une dizaine de tonnes de matière sèche dans les 25 premiers centimètres du sol. Ce stock peut d'ailleurs s'élever à près de 50 t. pour des prairies de longue durée. Notons dès à présent que, lors du retournement de la prairie et de sa mise en culture, la décomposition d'une telle masse de matière organique pauvre en azote (C/N voisin de 30) posera le problème de la fertilisation azotée de la culture « de défriche ».

Parallèlement à cet enrichissement en matières organiques libres on note un accroissement en matières liées plus ou moins important suivant la profondeur et le type de prairie. Cette matière liée de formation récente ne peut pas dans sa totalité être assimilée à de l'humus. Nous verrons en effet qu'elle disparaît en partie dans les deux années qui suivent le retournement (p. 128). Elle semble constituée à la fois par des produits transitoires de l'humification et par des matières organiques biologiquement stables.

Il est à noter que le bilan ainsi établi au moment du retournement ne reflète que le résultat immédiat du mécanisme d'enrichissement.

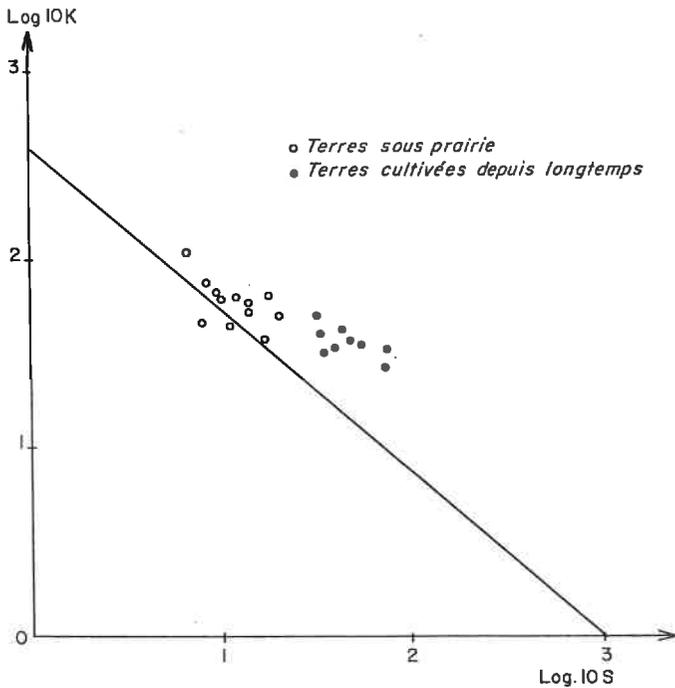
Ce point prendra toute son importance lorsqu'il s'agira d'évaluer l'augmentation de stabilité qu'on a pu observer à partir d'une prairie temporaire. Cette augmentation sera en effet lors du retournement pour une part effective et correspondant à l'accroissement de matière organique liée, et pour une part potentielle puisqu'elle dépendra de la décomposition ultérieure des matières organiques libres.

Amélioration structurale

Lorsqu'on examine le profil cultural sous une prairie convenablement exploitée (voir p. 122), on constate que, dans la plupart des cas, il existe à la surface du sol une couche plus ou moins épaisse, très riche en racines et présentant une structure fragmentaire fine de tendance grumeleuse, souvent même grumeleuse caractérisée. Au fur et à mesure que l'on descend dans le profil, les racines sont plus rares et la structure devient plus grossière, parfois continue. La relation étroite qui existe entre la présence de racines et la structure grumeleuse porte les observateurs à attribuer aux premières un rôle particulier d'agrégation du sol. Il apparaît cependant que si l'on sème une prairie sur un sol extrêmement compact, l'enracinement qui s'ensuit est très mauvais et l'amélioration structurale presque nulle. Les racines des graminées, même lorsqu'il s'agit d'espèces rustiques, n'ont pas le pouvoir de perforer les couches défavorables. Par contre, lorsqu'un enracinement puissant et dense a pu s'installer dans une couche de sol, cette dernière conserve une bonne structure qui peut même

s'améliorer vraisemblablement pour une bonne part en raison de l'augmentation de stabilité structurale que nous allons maintenant examiner.

Le graphique 25 où chaque sol est représenté par un point, dont les coordonnées sont l'indice d'instabilité $\log_{10} S$ et l'indice de percolation $\log_{10} K$ fait apparaître clairement que sur l'exploitation agricole dont sont issus tous les échantillons ici représentés, on peut distinguer deux grands types de comportement suivant que les sols sont depuis plusieurs années sous prairie ou en culture. Dans le premier cas, les valeurs de $\log_{10} S$ varient entre 0,90 et 1,30 et les valeurs de $\log_{10} K$ entre 1,55 et 2,10. Dans le deuxième cas, les valeurs de $\log_{10} S$ vont de 1,50 à 2 tandis



GRAPHIQUE 25. — Comparaison générale de stabilité entre des terres cultivées depuis longtemps et des terres sous prairies dans une même exploitation agricole.

que les valeurs de $\log_{10} K$ vont de 1,45 à 1,80. Il est donc évident qu'en moyenne sous prairie, dans ces sols de limon, la stabilité est nettement plus élevée. C'est principalement le test de tamisage sous l'eau qui permet de différencier les deux groupes : il n'y a en effet aucun chevauchement de leurs intervalles de variation en $\log_{10} S$. Par contre, comme on pouvait s'y attendre, les variations de $\log_{10} K$ ne sont pas suffisantes pour permettre de distinguer parfaitement les deux groupes de sols. Si l'on examine dans le détail les éléments constitutifs du calcul de S , on s'aperçoit que c'est principalement le taux d'agrégats stables après prétraitement benzène qui a permis la meilleure distinction. Ce phénomène est d'ailleurs général et le tableau 33 bis permet de comparer les éléments de stabilité de terres sous prairie et de terres de culture et l'on constate le même rôle privilégié du prétraitement au benzène.

Nous pouvons donc dès maintenant présumer à la lueur des enseignements tirés de la première partie de ce mémoire que l'amélioration de stabilité sous prairie sera liée à une moindre mouillabilité du sol et donc vraisemblablement aux matières organiques qu'il renferme, ce qui nous conduira à considérer comme moins importantes les possibilités de stabilisation par compression due à l'action mécanique des racines, hypothèse mise en avant par certains auteurs.

TABLEAU 33 bis

Stabilité comparée de terres sous prairie et sous culture
(Normandie)

	Ag _b		Ag _a		S	K
	%	Valeur indexée	%	Valeur indexée		
Prairie 0-15 (moyenne)	5,5	(289)	15	(203)	2,95	2,85
Témoin 0-15 (moyenne)	1,9	(100)	7,4	(100)	8,60	2,20

Mais il est possible de pousser un peu plus loin l'analyse. C'est ainsi qu'au cours de l'étude d'un essai, consacré à l'influence du mode d'exploitation de la prairie sur son enracinement, nous avons comparé les taux d'agrégats stables au benzène et la quantité de racines assimilées aux matières organiques libres de différentes couches de sol dans des parcelles ayant porté depuis trois ans une prairie de Dactyle ou de Ray-grass anglais. Nous avons pu constater à cette occasion qu'il existait une excellente corrélation entre les stabilité exprimée par Ag_b p. 100 et la quantité de matière organique libre. Ce résultat, paradoxal en apparence, puisqu'il ne semble pas pouvoir y avoir une influence des débris végétaux sur la mouillabilité des agrégats à leur contact, peut cependant être interprété en considérant qu'il existe dans le sol une masse de substances pré-humiques liées, très hydrophobes comme nous avons pu le constater au cours de nos expérimentations au laboratoire et qu'on peut raisonnablement estimer en quantité proportionnelle aux matières libres dont elles sont issues. Le tableau ci-dessous présente les régressions traduisant ces liaisons.

	$y = Ag_b\%$		Intervalle de var.	
	$x = \text{racines } \text{‰}$		pour racines ‰	
R.G.	$y = 0,47 x - 2,55$		8,5 à 35 ‰	P = 0,01
Dact.	$y = 0,23 x - 0,05$		10,6 à 32,3 ‰	P = 0,05

Il aurait été évidemment souhaitable de confirmer ce rôle des produits pré-humiques d'une façon plus directe. Pour cela, il aurait fallu pouvoir les doser séparément et faire une hypothèse concernant leur nature. Comme nous l'avons vu, une telle opération ne pouvait être que très hasardeuse car il est probable qu'ici aussi les substances en question sont constituées par un mélange de corps microbiens tels

que filaments mycéliens, par exemple, et substances pré-humiques proprement dites. Toutefois, deux faits viennent à l'appui d'une telle interprétation. D'abord, on constate, comme nous le verrons, qu'une grande partie de l'augmentation de stabilité obtenue sous trois ans de prairie est fugace, ce qui implique qu'elle soit due à des produits transitoires. Par ailleurs, nous constatons que le coefficient de régression obtenu pour le Ray-grass dans l'expérience précédente est sensiblement plus élevé que celui obtenu pour le Dactyle. Tout se passe donc comme si les racines de Ray-grass avaient une activité stabilisatrice supérieure. Or, on sait (p. 115) que les racines de Ray-grass sont en majorité annuelles tandis que celles de Dactyle sont pérennes au moins dans une certaine proportion. Il s'ensuit qu'il est plausible que la quantité de produits préhumiques actifs soit supérieure pour un taux de racines donné dans les sols sous Ray-grass que dans les sols sous Dactyle puisque dans le premier cas deux générations de racines sont en cours de décomposition la troisième année alors que dans le cas du Dactyle, seule une fraction des racines de ces générations a pu fournir des substances actives. Les résultats du tableau 33 viennent à l'appui de cette hypothèse. Il y a là une présomption supplémentaire en faveur de l'interprétation que nous avons proposée. Nous en trouverons confirmation lors de l'étude du retournement des prairies.

Une expérience de laboratoire nous a permis de préciser ce mode d'action des racines. La mise en fermentation par la méthode des flacons (voir p. 141) de 1 p. 100 de farine de racines de Graminées fourragères avec de l'horizon B du sol de limon de Versailles a provoqué, au bout d'un mois une augmentation sensible de la stabilité structurale. Comme dans le cas des échantillons de sol en place, cette stabilité s'est surtout manifestée ainsi que le montre le tableau 34 par une diminution de la mouillabilité se traduisant par une augmentation du taux d'agrégats stables au beuzène.

TABLEAU 34

	Témoin H. B.	H. B. + 1 % farine racines R.G.	H. B. + 1 % farine racines Dactyle
Ag _a % ...	17,4 (100)	22,4 (128)	25,4 (145)
Ag _b % ...	1,6 (100)	4,8 (300)	5,2 (325)

On constate que les résultats sont à peu près indépendants de la nature du matériel végétal utilisé, ce qui confirme que ce n'est vraisemblablement pas par raison spécifique tenant à la structure et aux propriétés de leur tissu que les racines de Dactyle sont dans le milieu naturel moins actives que les racines de Ray-grass anglais.

D'autre part, on peut également noter qu'il n'existe pas en ce qui concerne l'action des racines de prairie la divergence entre les résultats obtenus *in situ* et *in vitro*, que nous avons constatée à propos de l'action des pailles de céréales. En fait, dans les conditions du laboratoire, c'est-à-dire à partir d'un mélange soigneusement réalisé des matières organiques à la masse du sol les résultats sont équivalents ou tout au moins du même ordre de grandeur, quel que soit le matériel végétal utilisé (paille ou racines de Graminées). Par contre, seules les racines de prairie ont une

action au moins équivalente et même supérieure dans les conditions naturelles. Il semble donc bien que ce soit leur répartition très homogène dans le sol qui soit responsable du phénomène. Nous retrouverons indirectement ici le rôle prédominant des substances peu ou non solubles issues des fermentations mais dont l'efficacité est évidemment liée à une répartition aussi homogène que possible. Ceci, nous l'avons vu, est loin d'être réalisé lors des enfouissements de paille tels qu'ils sont le plus souvent réalisés dans la pratique agricole.

En résumé, l'amélioration de la structure d'un sol sous prairie peut être considérée à divers points de vue :

— Tout d'abord, dans un sol convenablement préparé, les racines par leur action mécanique assurent le maintien d'une structure déjà acquise et même améliorent cette structure. Cette action est complétée par celle de la faune qui prolifère dans les sols non travaillés et largement pourvus en matières organiques libres.

— Ensuite, intervient à long terme l'amélioration de stabilité structurale due à un relèvement du taux d'humus. L'importance des restitutions, peut-être aussi un certain ralentissement de la minéralisation de l'humus sous prairie font de cette dernière un appoint précieux pour l'équilibre humique des sols, appoint qui peut devenir indispensable dans les terres où le seuil minimum acceptable pour le maintien de propriétés physiques convenables est trop élevé pour que les pertes annuelles correspondant à ce seuil puissent être compensées par les seuls résidus de récolte, même s'ils sont enfouis dans leur totalité.

— Enfin, l'action la plus spécifique des prairies se rattache au rôle des produits transitoires de décomposition des racines qui, dans le cas des graminées, et sous réserve de certaines conditions dans la préparation du sol pour le semis et dans l'exploitation de la prairie, sont largement répartis dans le sol, assure une efficacité maxima aux sous-produits insolubles ou peu solubles des fermentations.

En définitive, l'amélioration du sol sous prairie, que l'on considère son intensité ou sa répartition suivant la profondeur, est liée au développement du système racinaire. Aussi est-ce en contrôlant ce dernier qu'on tiendra un moyen d'influer sur la première. C'est à cet aspect du problème que nous allons nous attacher maintenant à rechercher des solutions.

II. — MOYENS DE CONTRÔLE DE LA RÉPARTITION DES RACINES ET DE L'AMÉLIORATION STRUCTURALE

Choix botanique : influence de l'espèce

Les constituants des prairies temporaires se rattachent pour la plupart à deux grandes familles botaniques, les Graminées et les Légumineuses. En ce qui concerne ces dernières, les choses se passent très différemment suivant que l'on a affaire à des plantes à racine pivotante, comme la luzerne, ou à des plantes à enracinement branchu ou fasciculé, comme les différents trèfles, lotiers, etc. La luzerne représente typiquement la plante de prairie qui ne peut avoir d'action comparable à celles que nous avons analysées ci-dessus. En effet la densité de son enracinement est relativement faible, si bien qu'elle ne peut avoir *a priori* l'influence favorable sur la répartition des produits de décomposition, condition indispensable de leur efficacité. Le ta-

bleau 35 montre qu'effectivement après trois ans de luzerne, l'accroissement de stabilité structurale est pratiquement nul au moment du retournement et reste négligeable six mois après.

TABLEAU 35

Stabilité au benzène Ag₆ %
(Cases lysimétriques C. N. R. A., Versailles)

	Au moment du retournement	6 mois après
Témoin	2,9	2,8
Luzerne.....	3,1	3,3

Si nous nous reportons à la récapitulation des modes d'action possibles de la prairie, il apparaît que la luzerne peut influer, d'abord sur la structure par l'influence de ses racines ou par l'intermédiaire de la faune du sol dont elle favorise le développement ; elle agit aussi sur la stabilité structurale mais uniquement suivant le processus à long terme et peu apparent de l'élévation du niveau humique du sol. Toutefois, nous avons pu remarquer dans les sous-sols de parcelles cultivées, mais ayant porté quelques années auparavant une luzernière, une perforation verticale correspondant à l'ancien trajet des pivots, ces galeries étant habillées intérieurement d'un revêtement de substances organiques provenant de la décomposition de ces racines. On ne saurait sous-estimer l'importance en ce qui concerne principalement le drainage du sol, son aération et l'exploitation du sous-sol par les racines des cultures suivantes, de ces galeries dont le maintien en sous-sol très instable est vraisemblablement dû à cet enduit organique. Il s'agit là malgré tout d'un phénomène localisé n'intéressant pas toute la masse du sol et pour cette raison, on peut considérer comme nulle l'action stabilisatrice immédiate d'une luzerne. Il est à remarquer que très souvent le salissement des luzernières par des Graminées adventices, les dernières années de leur existence, peut avoir des conséquences heureuses sur l'amélioration, dans la masse cette fois, de la partie superficielle du sol.

Les trèfles n'ont pas fait l'objet de notre part d'une étude particulière dans la mesure où lorsqu'ils sont en culture pure, leur faible durée, de deux ans au maximum, ne permet pas de les comparer valablement à des prairies temporaires tandis qu'ils doivent plutôt être rattachés au groupe des engrais verts.

Pour les graminées, le tableau 36 rassemble quelques données concernant la répartition en profondeur du taux d'agrégats stables après prétraitement benzène sous trois prairies constituées respectivement de Ray-grass anglais — trèfle blanc, Dactyle — trèfle blanc, fétuque des prés-fléole des prés-trèfle blanc, âgées de trois ans et installées sur un même sol de limon. Précisons que les conditions d'exploitation ont été les mêmes dans toutes les parcelles et que le témoin représente une terre de vieille culture située à proximité immédiate.

On constate que dans tous les cas il existe une variation très prononcée en fonction de la profondeur et que l'amélioration se trouve localisée dans les 10 premiers

centimètres du sol encore que ce soit les 5 cm superficiels qui soient seuls profondément modifiés. La comparaison entre les différents types de prairie met en évidence l'activité moindre du Dactyle par rapport au Ray-grass anglais ou au mélange fétuque-fléole qui ont une efficacité respectivement triple et double dans les 5 cm superficiels. Les faibles valeurs obtenues sous Dactyle sont vraisemblablement liées au caractère

TABLEAU 36

*Comparaison de la stabilité sous trois prairies de graminées
(formations temporaires de 3 ans)*

Pourcentage d'agrégats stables au benzène Agt %				
Profondeur (cm)	Ray-grass	Fétuque- fléole	Dactyle	Témoir.
0-5	14,2	9,6	5,4	2,4
5-10	3,7	4,0	4,0	2,5
10-15	3,0	2,3	2,5	2,4
15-20	2,2	2,3	2,2	2,2
20-25	2,1	2,1	2,1	2,1
25-30	1,2	1,5	1,3	1,2

perenne de la majorité de ses racines et peut être également au fait que, comme nous le verrons, cette graminée n'a pas la même tendance que les trois autres à constituer un feutrage radiculaire superficiel lorsqu'elle est exploitée sévèrement, ce qui est précisément le cas dans l'exemple dont il est question ici.

Influence du mode d'exploitation de la prairie

Une observation effectuée dans le département de la Manche nous a conduit à préciser l'importance du mode d'exploitation de la prairie sur le développement du système radiculaire des espèces qui la constituent et donc sur la répartition en profondeur et l'intensité de l'amélioration structurale qu'on peut en attendre. A cette occasion, nous avons comparé l'état du sol sous deux prairies naturelles installées sur des sols comparables, mais qui, pour des raisons de distance à la ferme, avaient été exploitées depuis de longues années, l'une exclusivement en fauche, l'autre en pâturage.

L'examen du profil cultural sous la première fait apparaître une structure grumeleuse se développant sur 30 cm d'épaisseur. L'enracinement est bien réparti et il n'existe pas de feutrage radiculaire en surface. L'ensemble de la couche améliorée est sain, sans présence de gley ni de taches de rouille pouvant indiquer le caractère asphyxiant du sol pendant une partie de l'année. Par contre, sous la prairie pâturée, le système radiculaire est presque entièrement concentré dans les 10 premiers cm qui présentent une structure à éléments grumeleux et fibreux. Ces derniers proviennent de nombreux débris radiculaires en cours de décomposition. Au-dessous de 10 cm, les racines de Graminées sont rares et présentent un aspect filiforme et non

ramifié, une tenue rigide caractéristique d'un milieu défavorable. Dans cette couche, le sol est compact et on y observe des taches de rouille disséminées dans une masse, de teinte claire fréquemment rencontrée dans les sols de limon sous vieille prairie dégradée.

Les résultats du test de stabilité structurale consignés dans le tableau 37 où ils sont exprimés en pourcentage d'agrégats stables après prétraitement au benzène corroborent ces observations :

TABLEAU 37

Stabilités comparées sous prairies de fauche et sous pâture

Profondeur	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm
Prairie de fauche	57,4	33,0	17,9
Vieille pâture	47,2	11,5	3,3

On remarquera que la différence apparaît surtout dans la partie située entre 10 et 30 cm de profondeur, car dans les deux cas la couche superficielle, riche en racines, présente une stabilité élevée.

Plusieurs raisons peuvent être invoquées pour expliquer ce fait. Dans le cas de prairies naturelles, le mode d'exploitation peut modifier la composition botanique de la prairie et ainsi influencer sur la répartition des racines ; la compacité du sol à faible profondeur peut être expliquée par le piétinement des animaux lorsque le sol est détrempé. D'autre part, il semble que pour une même espèce, le comportement du système racinaire soit différent suivant que les parties aériennes sont supprimées fréquemment ou bien qu'on leur laisse la possibilité d'atteindre un développement plus avancé pouvant aller jusqu'à la floraison.

Pour vérifier cette hypothèse, nous avons entrepris l'étude d'un essai mis en place à la Station centrale d'Amélioration des Plantes du C.N.R.A., à Versailles, et comportant la comparaison sur Dactyle et Ray-grass anglais de trois types d'exploitation :

- 1° Fauche normale : trois coupes annuelles (A).
- 2° Pâturage par les moutons : cinq à six passages annuels (B).
- 3° Fauche au rythme de la pâture (C).

L'observation du sol sur les différentes parcelles après 3 ans de traitement fait apparaître nettement sous les Ray-grass anglais exploités à un rythme rapide la formation d'un feutrage de racines dans les 5 premiers centimètres du sol alors que dans les mêmes conditions ce phénomène n'est pas décelable sous Dactyle. Nous avons cherché à établir une estimation de la quantité de racines présentes dans le sol. Il est évidemment délicat, dès que la prairie a dépassé la deuxième année de séparer les racines vivantes des racines mortes ou des débris d'organes aériens enfouis. Nous nous sommes bornés à isoler l'ensemble de la matière organique libre, ce qui peut se justifier puisque c'est la totalité de cette fraction qui constitue à un moment donné l'apport de la prairie au sol. L'opération a toutefois été effectuée dans le cas présent

en deux temps : Un tamisage à sec d'un échantillon finement broyé représentatif de chaque couche de sol a permis d'isoler les grosses racines mécaniquement résistantes qui constitueront la fraction I de nos résultats. Les radicelles, les racines de tailles diverses plus ou moins décomposées ont été séparées ensuite par centrifugation dans un liquide de densité 2 et constitueront la fraction II. Les deux tableaux 38 et 39 rassemblent respectivement pour les deux espèces les teneurs globales en racines des différentes couches, exprimées en p. 1 000 de terre sèche.

TABIEAU 38
Enracinement du Dactyle

Exploitation	Fauche normale (A)			Pâturée réelle (B)			Fauche au rythme de la pâturée (C)		
	I	II	Total	I	II	Total	I	II	Total
0-5	4,6	2,1	6,7	4,7	2,7	7,4	5,2	2,6	7,8
5-10	2,0	1,6	3,7	1,1	2,0	3,1	1,5	3,1	4,6
10-15	1,3	1,3	2,6	0,6	1,1	1,7	0,4	2,5	2,9
15-20	0,5	1,6	2,1	0,2	1,1	1,3	0,2	1,4	1,6
20-25	0,5	1,7	2,2	0,2	1,3	1,5	0,1	1,3	1,4

TABIEAU 39
Enracinement du Ray-grass

Exploitation	Fauche normale (A)			Pâturée réelle (B)			Fauche au rythme de la pâturée (C)		
	I	II	Total	I	II	Total	I	II	Total
0-5	3,7	2,3	6,0	10,4	2,5	12,9	12,0	3,7	15,8
5-10	2,1	1,6	3,7	1,2	1,2	2,4	1,6	1,3	2,9
10-15	0,9	0,9	1,8	0,5	1,2	1,7	1,6	1,8	3,4
15-20	0,5	1,0	1,5	0	1,1	1,1	0	0,9	0,9
20-25	0,5	1,0	1,5	0	0,9	0,9	0	0,9	0,9

De l'examen de ces données on peut tirer un certain nombre de renseignements :

— La suppression fréquente des parties aériennes (traitements B et C) aboutit à une certaine concentration des racines dans les 5 premiers centimètres du sol. Parallèlement, la quantité de racines qui parviennent au-dessous de 15 cm décroît dans une proportion de 50 p. 100.

— Cette évolution est particulièrement nette pour le Ray-grass anglais qui présente un profil radulaire analogue à celui du Dactyle lorsqu'il est traité en fauche normale mais qui par contre, n'exploite plus que les 20 à 15 premiers centimètres du sol lorsqu'il est pâturé ou fauché fréquemment.

Comparaison de la répartition dans les différentes couches de sol des racines grossières (I) et des racines fines (II) suivant le type de Graminée et les conditions d'exploitation de la prairie.

— Ces évolutions opposées suivant les traitements sont particulièrement visibles sur les grosses racines (fraction I) qui constituent la partie stable du système racinaire : il semble que leur installation ne soit visible dans un horizon que lorsque l'équilibre s'est établi entre le traitement et la réaction de la plante.

— Les principales différences se situent entre la fauche d'une part, la pâture et la fauche au rythme de la pâture d'autre part. Toutefois ce dernier point ne semble pas devoir être généralisable. Le pâturage par les moutons en effet ne présente pas, ou tout au moins ne présente qu'à un degré moindre, l'inconvénient de provoquer un tassement du sol par suite du piétinement. Dans le cas d'un pâturage par gros bétail et particulièrement lorsque le sol est humide, la dégradation de la structure est beaucoup plus sensible. Il apparaît fréquemment dans les 10 cm superficiels une structure à tendance schisteuse dans laquelle les racines émises ultérieurement seront « piégées » comme dans les feuillets d'un livre.

Les conclusions pratiques de cet essai particulier seront d'abord de souligner l'importance de la fréquence des exploitations. WILLIAMS et BAKER (1957) avaient d'ailleurs abouti à des conclusions analogues sur l'enracinement d'un Ray-grass anglais. En ce sens, il semble bien que l'effet du surpâturage ne puisse être attribué uniquement au piétinement par les animaux. Enfin, les différentes espèces ne réagissent pas de la même manière aux conditions d'exploitation qu'elles subissent ; le Dactyle grâce à son enracinement perenne se montre à cet égard moins sensible au surpâturage. Par contre, il est important de remarquer que le système racinaire du Ray-grass anglais qui est réputé superficiel est très peu différent de celui du Dactyle dans le cas d'une exploitation à cadence relativement lente.

En conclusion, il convient de souligner l'importance du mode d'exploitation dans la prévision de l'effet escompté d'un repos sous prairie temporaire. En dehors des répercussions probables sur le rendement d'un approfondissement du système racinaire, particulièrement au cours des périodes de sécheresse, il faut noter les répercussions sur l'amélioration des propriétés physiques du sol qu'on peut attendre des prairies temporaires ou de longue durée. A la limite, un Ray-grass anglais surexploité n'améliorera que quelques centimètres très enrichis en matières organiques. Certes, les poids de racines à l'hectare que nous avons obtenu sous les différents traitements de l'essai décrit plus haut sont du même ordre de grandeur. Mais nous avons déjà souligné l'importance de la notion de mélange et de répartition qui est à l'origine de l'efficacité toute particulière des prairies sur la stabilité structurale. De plus, la localisation de la matière organique et de l'amélioration dans les quelques centimètres superficiels présente des inconvénients en ce qui concerne la valorisation de l'effet obtenu.

Influence des conditions d'installation de la prairie

L'enracinement de la prairie est influencé dès sa création par les conditions de la préparation du sol en vue de son installation. Les graines de graminées fourragères sont généralement de fort petite taille et difficilement mouillables. Il s'ensuit que les agriculteurs sont enclins à tasser fortement la couche superficielle pour assurer

l'humectation de la graine. Pour cela, on peut utiliser un rouleau lisse, qui a l'avantage de ne tasser que la couche immédiatement superficielle, mais qui présente le grave inconvénient d'avoir une action irrégulière, et de favoriser le glaçage du sol en cas de forte pluie ; c'est pourquoi les agriculteurs ont de plus en plus tendance à utiliser des rouleaux rayonneurs du type « *cultipacker* » qui ne présentent pas ces défauts, mais qui ont une action très énergique sur presque toute la couche arable. La conséquence de leur passage répété, lorsque le sol est humide, est de constituer à une profondeur variant entre 5 et 15 cm suivant l'humidité et la taille des mottes, une couche compacte qui gênera ultérieurement l'extension en profondeur du système racinaire. Il est certes indispensable, principalement dans les cas de semis de mélanges d'espèces, d'assurer de bonnes conditions de levée ; toutefois, l'expérience montre qu'il est parfois souhaitable de rechercher un compromis entre la réussite du semis et le développement satisfaisant du système racinaire qui, lui, conditionne le rendement et la durée de la prairie. Précisons que ce problème se pose principalement à l'occasion des semis de printemps où la partie inférieure de la couche labourée est rarement assez « ressuyée » pour supporter sans se gâcher le passage des engins de tassement.

Une autre opération extrêmement importante au cours de la phase d'installation de la prairie est la première exploitation, dite de « régularisation », dont le but est d'éliminer les mauvaises herbes annuelles qui ont levé en même temps que les graines semées et d'assurer un tallage précoce des Graminées. Cette opération gagnerait à être effectuée à l'aide d'une faucheuse afin d'éviter un piétinement trop précoce. Par ailleurs, la première véritable exploitation devrait pouvoir se faire sous forme de foin ou à la rigueur d'ensilage, la coupe au stade dit « pâture » d'une herbe de 20 cm de hauteur contrariant comme nous l'avons vu, et cela surtout l'année d'installation, l'implantation en profondeur du système racinaire.

Relation entre la durée de la prairie et la stabilisation de la structure du sol

La plupart des auteurs s'accordent à reconnaître qu'une prairie doit durer au moins trois ans pour assurer une stabilisation sensible du sol qui la porte. Le tableau 40 montre quelle peut être l'évolution de la stabilité structurale sous un Ray-grass anglais au cours des quatre premières années de son existence :

TABLEAU 40

Stabilité (Agb %) entre 0 et 15 cm

	Age de la prairie				
	Création	1 an	2 ans	3 ans	4 ans
Agb %	1,7	1,9	2,3	6,6	11,7

Il apparaît qu'effectivement ce n'est qu'entre la deuxième et la troisième année que se produit une amélioration importante de la stabilité structurale, ce qui confirme les données couramment admises. Cette durée minima de trois ans explique l'ab-

sence de réaction de la stabilité structurale du sol à la culture du Ray-grass d'Italie. Cette espèce qui est bisannuelle a la réputation très générale d'améliorer considérablement la structure du sol. Or, le tableau 41 ci-dessous rassemble quelques exemples de comparaisons entre témoins cultivés depuis longtemps et sols depuis deux ans sous Ray-grass d'Italie :

TABLEAU 41

Stabilité comparée (Agv%) de terres cultivées et sous Ray-grass d'Italie de 2 ans

	Versailles	Manche	Aspach ⁽¹⁾
Ray Grass d'Italie.....	1,9	6,7	4,8
Culture.....	1,8	6,2	5,0

(1) R.G. retourné depuis six mois.

On constate que dans aucun des cas présentés ici il n'y a eu d'amélioration sensible de stabilité structurale sous Ray-grass d'Italie. La réputation de cette espèce se justifie par contre si l'on s'en tient à la structure proprement dite qui est maintenue fragmentaire par le système racinaire puissant, très ramifié et à installation rapide de cette graminée. De plus, il est incontestable que l'apport organique qu'elle implique est une contribution positive au bilan humique du sol.

III. — ÉVOLUTION DU SOL APRÈS RETOURNEMENT DE LA PRAIRIE

Nous venons de passer en revue les principaux facteurs qui déterminent l'intensité et la répartition de la stabilisation de la structure dans un sol sous prairie. Nous allons maintenant examiner l'évolution du sol après la remise en culture.

Nous avons souligné (p. 115) la différence sensible existant entre l'action des prairies temporaires à racines annuelles et celle des prairies à enracinement perenne. Aussi les traiterons-nous dans des paragraphes distincts.

Cas des prairies à racines annuelles prédominantes

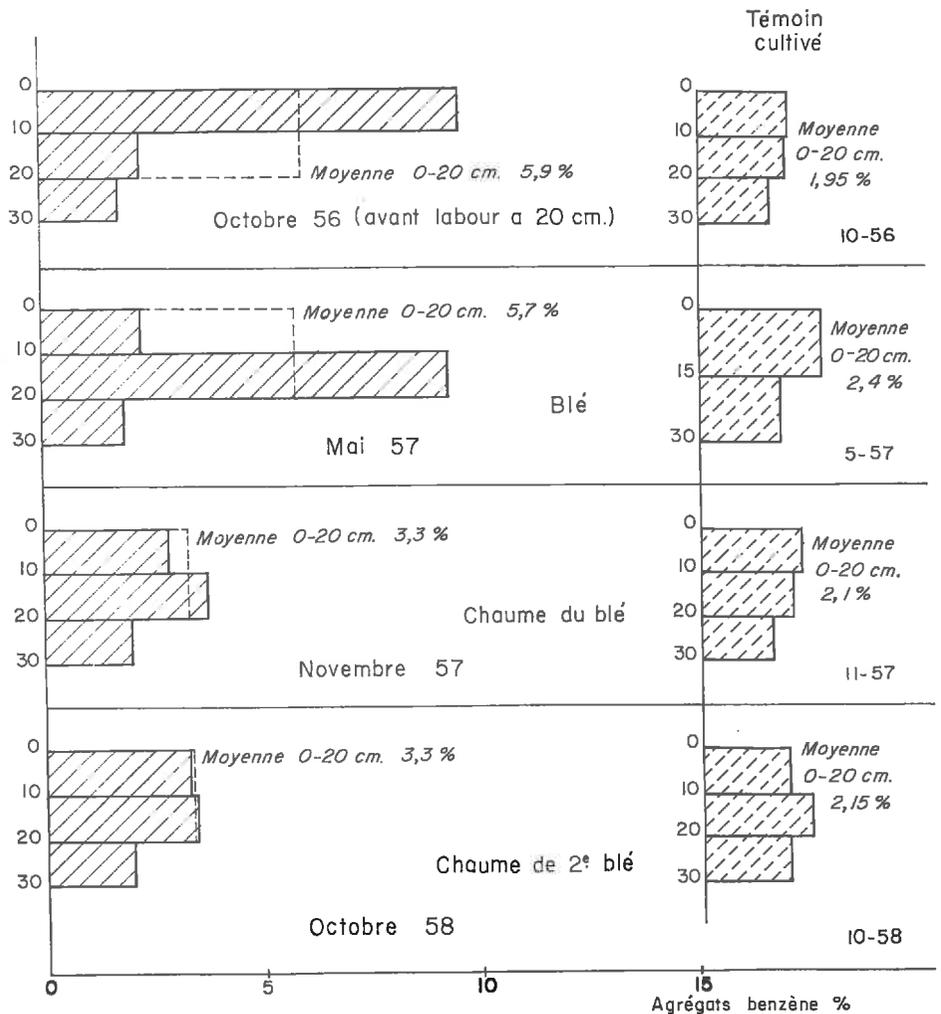
Le graphique 26 indique quelle a été l'évolution de la stabilité structurale dans les différentes couches du sol après retournement d'une prairie temporaire de trois ans composée d'une association Ray-grass anglais-Trèfle blanc installée sur un sol de limon léger en Normandie.

Ce graphique conduit à faire un certain nombre de constatations :

— Au cours de l'hiver suivant immédiatement le retournement, la stabilité qui existait sous la prairie s'est intégralement maintenue. On doit, par ailleurs, noter l'inversion complète du profil consécutive au labour ; celui-ci n'a assuré aucun mélange entre la couche riche en racines et la couche immédiatement sous-jacente. L'observation directe sur le terrain trouve ici une confirmation.

— Par contre pendant les mois chauds de la même année, la stabilité a subi une diminution notable dans la couche la plus améliorée (10-20 cm).

— Cette baisse ne s'est toutefois pas poursuivie au cours de l'année suivante et la stabilité des parcelles ayant porté cette prairie est restée au bout de deux ans sensiblement plus élevée que celle des parcelles voisines en culture continue depuis de nombreuses années.



GRAPHIQUE 26. — Retournement de prairie Ray-Grass anglais (3 ans)

Cette évolution peut trouver une explication logique à la lumière de nos conclusions sur les mécanismes de stabilisation sous prairie (p. 120). On peut en effet considérer que pendant la première période chaude après la remise en culture les produits préhumiques labiles responsables de la stabilité élevée notée avant retournement se sont décomposés. La stabilité résiduelle qui s'est maintenue après un an

de culture serait alors due principalement à des produits plus stables assimilables à de l'humus avec l'appoint de produits transitoires provenant des quelques débris de racines encore non décomposés à cette époque.

Cas de prairies à enracinement perenne prédominant

L'évolution du sol après retournement d'une prairie de Dactyle installée sur une parcelle voisine de la précédente est sensiblement différente. Ici en effet on peut noter un accroissement de stabilité après le retournement (tabl. 42).

TABLEAU 42

Évolution de la stabilité moyenne (A_{gb} %) de la couche arable du sol (0-20 cm) après retournement d'une prairie de Dactyle

Dates	Octobre 56 (1)	Octobre 57	Octobre 58
A_{gb} %	3,2	5,7	3,9

(1) Juste avant le labour.

Ce fait n'est pas surprenant car il correspond au caractère perenne des racines de Dactyle. Au cours de la végétation de cette graminée l'accroissement de stabilité du sol est minime en raison de la faible production de substances transitoires. Par contre, après le retournement les racines se décomposent toutes à la fois et les produits formés stabilisent la structure. Ce type d'évolution peut paraître plus intéressant puisqu'il assure le maximum de stabilité sous culture ; il l'est certainement si l'on s'en tient au seul point de vue des propriétés physiques du sol. Toutefois la décomposition simultanée d'une masse importante de matières organiques à rapport C/N élevé en l'absence de produits transitoires susceptibles de fournir un volant d'azote aisément minéralisable présente des inconvénients cultureux graves si bien que les formations pures de Dactyle sont fréquemment de mauvais précédents pour la culture de défriche, leur effet favorable n'étant apparent qu'en deuxième année de culture.

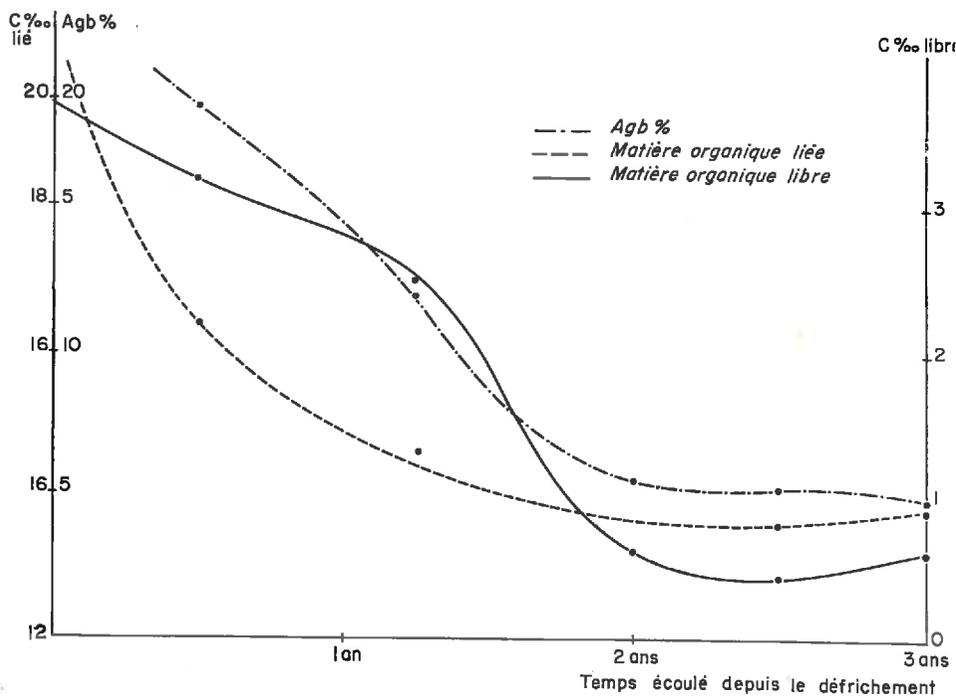
Cette particularité de l'action du Dactyle peut expliquer en partie les désaccords entre les différents auteurs au sujet de son efficacité sur la stabilité de la structure. Si en effet les prélèvements ont lieu un certain temps après le retournement la stabilité peut être plus élevée après Dactyle qu'après Ray-grass anglais par exemple, alors qu'à la fin de la vie de la prairie, les résultats sont inversés.

Relation entre l'âge de la prairie et la durée de son arrière-action sur la stabilité structurale

Dans les paragraphes précédents nous avons montré que, dans le cas le plus général de prairies temporaires de courte durée à racines annuelles, la majeure partie de l'amélioration disparaissait au cours de la première année. Ce phénomène est en

accord avec le comportement d'échantillons de sols prélevés sous de telles prairies et soumis à des fermentations à l'étuve (voir première partie, p. 68). Comme nous avons alors noté que la mise en fermentation ne modifiait au contraire que très peu le comportement de prairies plus anciennes, il nous est apparu que la durée de la prairie pouvait influencer sur la permanence de l'effet structural produit.

En fait lorsqu'on étudie le comportement de prairies naturelles anciennes après leur remise en culture on trouve deux types de résultats.



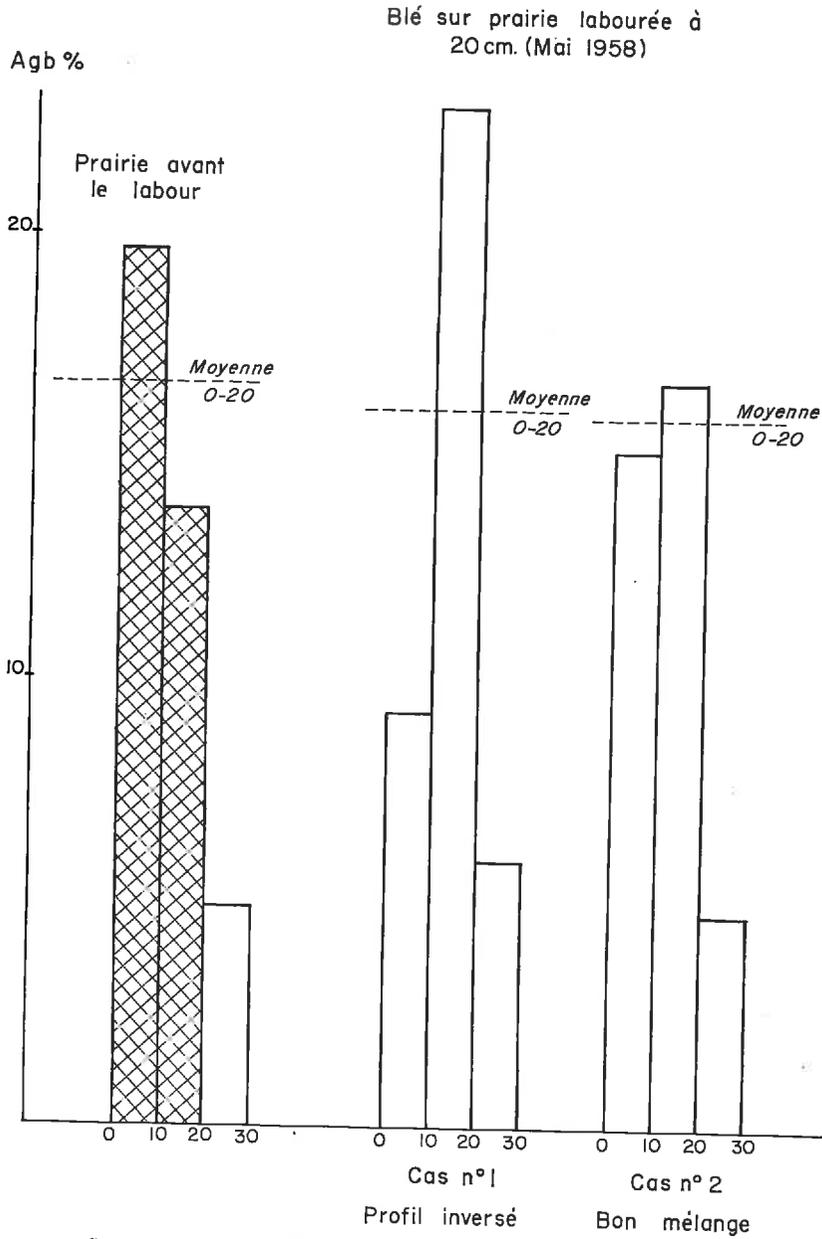
GRAPHIQUE 27. — Évolution de la matière organique et de la stabilité après le retournement d'une vieille prairie sur sable fin calcaire

Dans certains cas, l'évolution est très voisine de celle qui suit le retournement de prairie de courte durée : l'accroissement de stabilité est fugace.

Ainsi le graphique 27 représente l'évolution du taux d'agrégats stables Ag_b p. 100 et des taux de matières organiques libres et liées après défriche d'une prairie très ancienne située sur un sol finement sableux et calcaire en arrière de la baie du Mont Saint-Michel.

On constate que la stabilité décroît très rapidement au cours des deux premières années de culture, de même que les taux des deux fractions de matières organiques. Il y avait donc eu sous cette prairie accumulation de produits transitoires et non pas formation d'humus stable.

Mais il existe également des sols qui, après avoir porté une prairie naturelle pendant une longue période, conservent une teneur en matière organique liée et une stabilité structurale élevée plusieurs années après leur remise en culture. Nous avons pu faire des constatations de ce genre dans des terres argilo-sableuses en Sologne et dans des marais argileux de la côte atlantique.



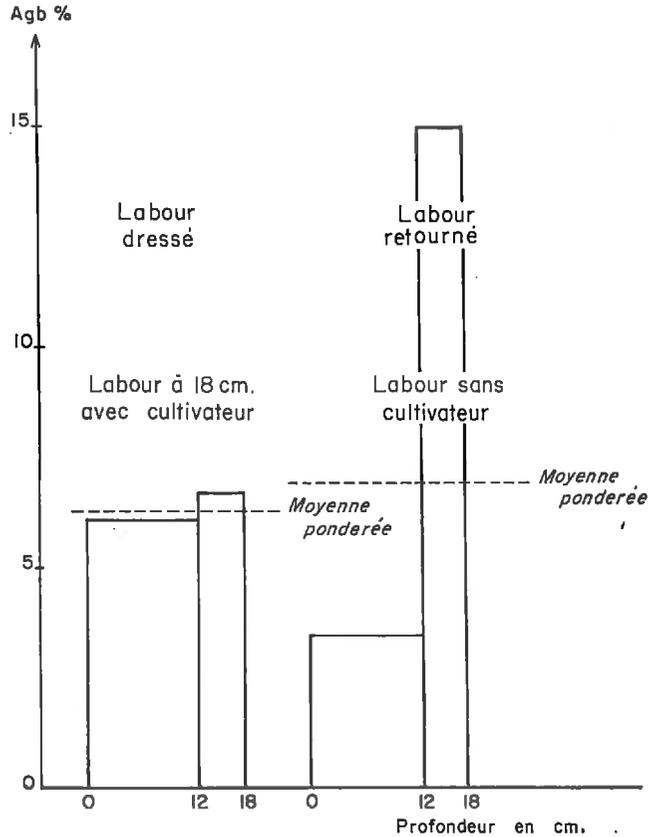
GRAPHIQUE 28. — Influence du mode de retournement des prairies sur la répartition dans le sol des couches stabilisées

C'est un cas de ce type que nous avons cité dans le tableau 12 de la page 68.

La durée de la prairie ne semble donc être qu'un des éléments intervenant pour déterminer la durée des arrières effets sur la stabilité structurale. Très probablement les conditions de l'humification sous la prairie jouent un rôle considérable dans ce domaine.

IV. — RETOURNEMENT DE LA PRAIRIE

Il ne suffit pas d'avoir considérablement amélioré le sol sous une prairie, encore faut-il assurer son retournement et sa remise en culture dans des conditions telles qu'on valorise au maximum l'effet structural obtenu tout en évitant des accidents culturaux qui sont fréquemment liés, ainsi que nous l'avons vu, à l'incorporation



GRAPHIQUE 29. — Influence du mode de retournement (type de labour et pseudo-labour) sur la répartition dans le sol des couches stabilisées

sans précaution de grosses quantités de matières organiques fermentescibles.

Nous avons vu que dans la plupart des cas l'enrichissement en matière organique par l'intermédiaire des racines de la prairie, l'amélioration structurale due à la présence de ces racines et la stabilisation de cette structure étaient concentrés dans la couche superficielle du sol, en moyenne les 8 à 10 premiers centimètres. Rappelons

que ce phénomène est d'autant plus net que la prairie est plus ancienne et qu'elle a été exploitée dans des conditions plus défavorables. En de tels cas, le labour peut conduire à ce que la partie du sol améliorée et riche en matière organique se retrouve au fond du labour alors que l'ancien proche sous-sol de la prairie peu amélioré, apparaît en surface : c'est le cas 1 du graphique 28. La conséquence d'un tel état de fait est d'abord que la culture immédiatement installée après le défrichement ne bénéficiera pas, au moins au cours des premières phases de son développement, de l'amélioration du sol. D'autre part, l'ancienne couche superficielle, très riche en matière organique fraîche et enfouie loin de l'atmosphère dont elle est séparée par une épaisseur de terre non améliorée et qui risquera à cause de cela de freiner les échanges gazeux, fermentera dans de mauvaises conditions et les risques d'accident par suite de phénomènes réducteurs apparaîtront.

On voit ainsi se dégager les deux grands principes qui doivent présider au retournement des prairies :

— Assurer aussi intimement que possible le mélange de la couche améliorée et riche en matière organique à l'ensemble de la couche arable.

— Assurer des conditions de fermentation des matières organiques telles qu'on évite les accidents par asphyxie partielle du sol.

Compte tenu de ces principes, nous nous proposons de décrire les diverses phases d'une méthode de retournement en indiquant au passage les variantes qui peuvent lui être apportées en fonction des circonstances.

a) *Destruction de la pelouse*

Cette opération toujours utile, devient indispensable dans tous les cas (vieille prairie ou prairie temporaire surpâturée) où il existe un feutrage superficiel. Ce dernier s'il n'est pas au préalable déchiqueté, sera beaucoup plus difficile à mélanger ultérieurement au reste du sol. Un passage de rotovator ou deux passages croisés de pulvérisateur à disques, de déchaumeuse ou même de cultivateur à faible profondeur permettent d'assurer la fragmentation de la couche de racines et de rhizomes. Le terrain est alors laissé quelque temps au repos pour permettre aux débris végétaux de sécher et de devenir plus fragile.

b) *Labour*

Le labour doit être dressé et juste assez profond pour éviter le retournement des bandes de terre. Un labour trop profond conduirait à diluer la partie améliorée dans une grande masse de terre de propriétés moins favorables et rendrait plus difficile le brassage ultérieur de toute la couche labourée. Il convient également d'éviter que les rasettes, mal réglées, rejettent au fond de la raie la couche végétale superficielle. Les risques de repousses de mauvaises herbes en seront augmentés mais ils semblent moins graves que les risques d'asphyxie.

c) *Opérations de pseudo-labour*

Si le semis de la culture suivante doit avoir lieu au printemps, le labour est laissé tel quel pendant l'hiver. Il est repris ensuite par des passages croisés de "cultivateur" travaillant à pleine profondeur de façon à assurer un mélange aussi intime que

possible des différentes couches de terre. Dans tous les cas et surtout avant une culture d'hiver, ces opérations gagnent à être effectuées quelque temps après le labour pour éviter d'enfermer à l'abri de l'air des matières organiques très fermentescibles. Le cas 2 du graphique 29 montre comment il est possible en utilisant une telle technique d'obtenir un sol homogène répondant aux diverses exigences que nous avons mentionnées plus haut.

Conclusion

En conclusion de cette étude des prairies, nous soulignerons les points d'accord entre les résultats au champ concernant l'amélioration structurale sous prairie avec ceux que nous avons obtenus par des expérimentations de laboratoire : l'importance des produits transitoires directement issus des matières organiques fraîches incorporée au sol peut être reliée à la durée relativement faible de l'arrière-effet obtenu. D'autre part, l'importance des produits peu solubles également soulignée au laboratoire peut être reliée à l'efficacité très supérieure de la prairie par rapport à d'autres formes d'apport (paille ou fumier par exemple), en raison de la meilleure répartition par les racines des graminées des produits stabilisateurs au sein du sol.

Au point de vue économique, il faut souligner que lorsqu'on étudie la valeur en tant que précédent cultural d'une prairie par l'intermédiaire du seul rendement, comme nous en avons montré un exemple au début de ce chapitre, on fait implicitement la synthèse de toutes les conséquences, positives ou négatives, qu'un repos sous prairie peut avoir sur le sol : bilan des éléments fertilisants, structure du sol, matière organique, faune du sol, parasites, etc. Dans ces conditions, il suffit qu'une de ces conséquences soit particulièrement défavorable sur une culture donnée pour que les effets bénéfiques voient leur action sur le rendement partiellement et même totalement masquée. Il devient dès lors évident que, pour que le principal effet favorable, c'est-à-dire l'effet structural, soit valorisé, toutes les conditions doivent par ailleurs être remplies, particulièrement les conditions de fertilisation.

On peut alors considérer que la prairie assolée constitue une possibilité exceptionnelle d'augmenter la productivité de nombreuses terres dont les propriétés physiques laissent à désirer. C'est même la seule solution pour les sols nécessitant des restitutions humiques très importantes. Mais il ne faut pas perdre de vue que si une prairie représente une potentialité d'amélioration, cette dernière n'est pas automatique. Les conditions d'installation de la prairie, sa composition, son exploitation et la fumure qu'on lui apporte compte tenu de cette exploitation, sa durée, son mode de retournement peuvent limiter et même dans certains cas annuler l'effet recherché. Notre but ici était seulement de préciser les incidences de quelques-uns de ces facteurs sur le poste « propriétés physiques » du bilan d'une prairie temporaire.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Nous allons maintenant tenter de faire apparaître d'une manière schématique l'essentiel des résultats de ce travail.

Il s'agissait, en partant de l'étude des mécanismes et des modalités de stabilisation de la structure par les matières organiques, de définir les conditions d'efficacité des différents apports tels que les réalise la pratique agricole.

A partir d'un certain nombre de modèles réalisés au laboratoire, nous avons d'abord cherché à dégager des règles d'action. Celles-ci figurent dans la première partie de ce mémoire, nous les rappellerons brièvement ici :

Les matières organiques présentent des modalités d'action différentes à chacun des stades de leur évolution dans le sol.

— Dans une première phase, les corps microbiens qui se développent abondamment à partir de substances fraîches provoquent des accroissements importants mais brefs de la stabilité structurale.

— Au cours d'une deuxième phase les substances responsables de la stabilisation sont les produits transitoires de l'humification. Leur activité spécifique est généralement inférieure mais la durée de leur action est plus longue que celle des corps microbiens.

A ces deux stades, l'efficacité des substances actives dépend essentiellement de leur répartition au sein du matériau à stabiliser ; les conditions de fermentation, la fermentescibilité des matières incorporées influent également sur l'allure de la stabilisation.

— Enfin, au terme de l'évolution, les produits humiques proprement dits, c'est-à-dire ceux qui sont biologiquement beaucoup plus stables que les précédents, ont une activité spécifique faible dans la plupart des cas. Les résultats obtenus dépendent surtout de la texture et des conditions de leur liaison à la partie minérale du sol. Par ailleurs, leur action est durable et peut donc être considérée comme cumulative.

Nous avons essayé d'établir un schéma général permettant de situer par rapport à ces données, et de discuter les conséquences diverses des techniques intéressées utilisées dans la pratique. C'est là l'objet du graphique 30.

On peut constater qu'en dépit de certaines imprécisions qu'il ne nous a pas été possible de dissiper, les résultats des expériences réalisées en plein champ trouvent une place logique par rapport à ceux qui ont été obtenus au laboratoire. Ceci confirme le caractère général des phénomènes observés sur les modèles. On peut donc considérer que nos conclusions précédentes sont valables en pratique, même si elles ne constituent qu'une première approximation.

Plus précisément, il apparaît que les trois stades d'évolution des matières organiques dans le sol se retrouvent avec les mêmes conséquences dont l'importance

Modèles de Référence
Facteurs Principaux d'efficacité
Remarques
Stabilité structurale

Glucose ou foin de luzerne dans les 15 premiers jours
Ferment tescibilité
Masse de matière enfouie
Mélange à la couche arable
Date d'enfouissement
Risques d'accidents (gley)

Pailles végétales 1 à 3 mois après la mise en fermentation
Mélange à la couche arable
Masse de matière enfouie
Conditions de fermentations
Risques d'accidents (gley)

Acides humiques
Masse enfouie
Coefficient isohumique
Épaisseur et texture du sol
Type d'action cumulative

Zone A

Zone B

Zone C

Prairie type Ray grass

Prairie type Dactyle

Cords microbiens

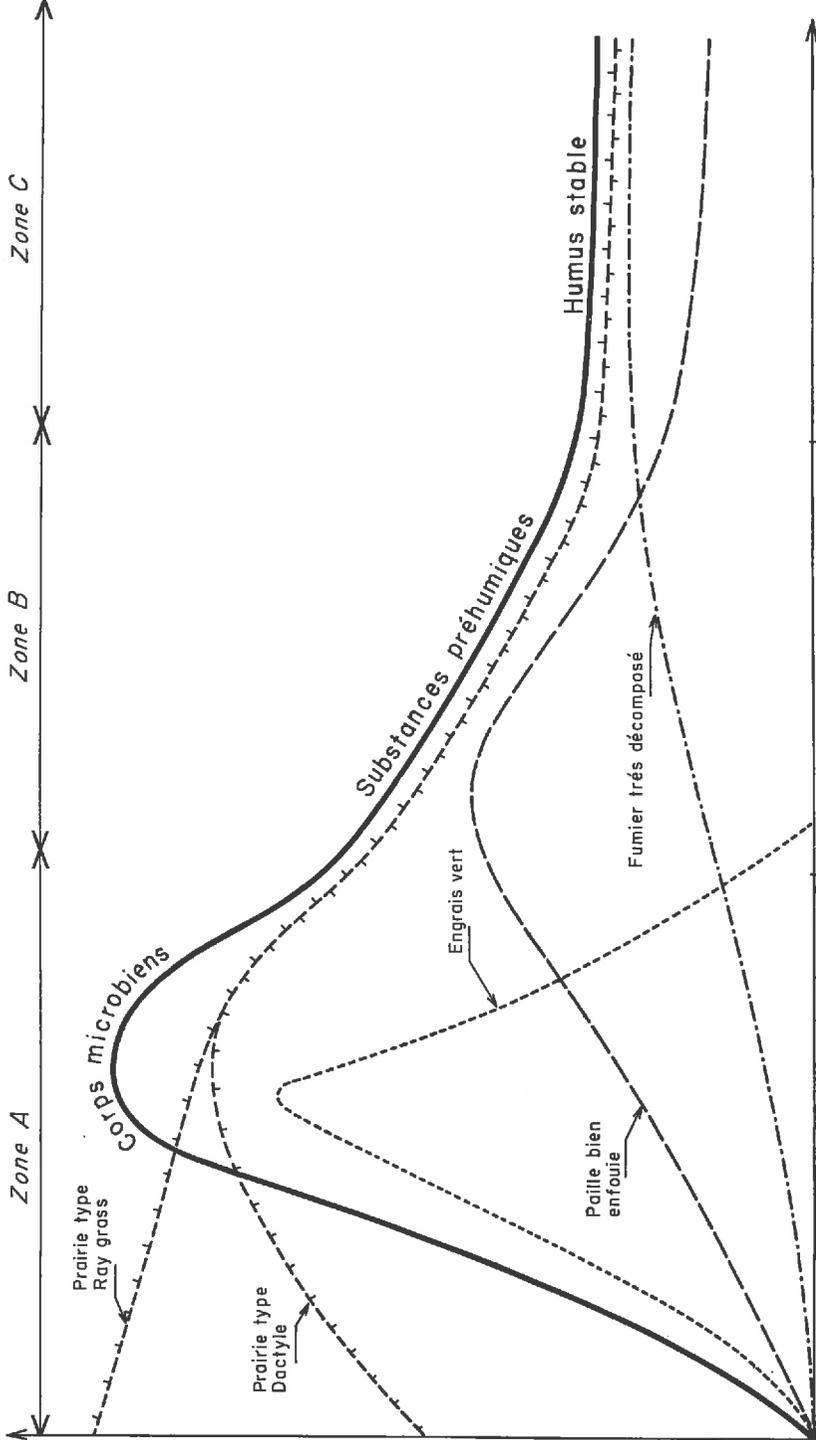
Substances préhumiques

Engrais vert

Paille bien enfouie

Humus stable

Fumier très décomposé



Stabilité structurale

Mat.

Commissar

Date de l'observation

relative est variable suivant la nature et la masse des matières végétales enfouies, les conditions de leur incorporation et de leur fermentation.

Comme au laboratoire, les modifications de stabilité sont sensibles, surtout au cours des deux premières phases. Il s'ensuit que les matières les plus fermentescibles sont à cet égard les plus efficaces ; mais corollairement leur action n'est que temporaire. Le résultat de l'enfouissement d'un engrais vert jeune est un exemple extrême de ce type de stabilisation. On retrouve également l'importance d'un bon mélange, qui découle du fait que les produits transitoires n'agissent qu'à proximité de leur point de formation. L'enracinement des prairies de graminées assure parfaitement ce mélange, du moins lorsque les conditions d'une installation et d'un développement normal des racines ont été remplies. C'est alors là qu'il faut trouver la raison de l'efficacité toute particulière à court terme des prairies temporaires sur la stabilité structurale.

Par ailleurs, la masse des produits incorporés et leur coefficient isohumique conditionnent leur contribution au maintien ou à l'augmentation du niveau humique dans le sol. Comme conséquence les mêmes facteurs commandent à moyen et à long terme ce que l'on peut appeler la « valeur-plancher » de la stabilité structurale d'un sol. En raison de la faible activité spécifique des produits humiques stables tels que les acides humiques lorsque la texture du sol n'est pas suffisamment légère le relèvement de ce plancher par un apport isolé n'est généralement pas sensible. Par contre les conséquences d'apports répétés sont cumulatives.

A ce point de vue les engrais verts dont le coefficient isohumique est extrêmement faible sinon nul ne peuvent avoir qu'une action directe immédiate et non cumulative. A l'opposé, des apports réguliers de fumier dont l'action à court terme est minime en raison de sa faible fermentescibilité contribuent au maintien ou à l'élévation de la valeur-plancher.

Quant aux prairies temporaires elles ont l'avantage de présenter successivement les deux modes d'action : la formation de produits transitoires à partir des racines, avant même le retournement (graminées à enracinement annuel) ou immédiatement après (Graminées à enracinement perenne), assure un accroissement considérable de stabilité à court terme.

Par la suite, la masse importante de matière sèche incorporée au sol aboutit à une élévation du taux d'humus stable et donc à la part de stabilité durable qui lui est liée.

Il faut noter, par ailleurs, que l'incorporation de matières végétales peut présenter de graves inconvénients : dans la mesure même où les fermentations sont rapides et contribuent ainsi à un accroissement important de la stabilité structurale, elles s'accompagnent de phénomènes secondaires provoquant l'apparition de conditions réductrices dans le sol. Fort heureusement la nécessité que nous avons mentionnée, d'assurer un mélange intime de l'amendement organique et du sol est aussi un facteur de sécurité à cet égard car il diminue le risque d'accidents dus à ces effets secondaires.

Il est possible, en partant d'un tel ensemble de données, de tenter de définir une " politique " des matières organiques en relation avec les conséquences de leur utilisation sur la structure du sol. Une telle politique doit se situer à deux niveaux :

Tout d'abord, la conservation du taux d'humus par le choix d'un assolement, d'un système de culture, de techniques culturales permettant d'équilibrer les pertes

annuelles. Les conséquences d'une telle orientation peuvent n'être sensibles qu'à long terme et il est difficile, lorsque des impératifs économiques vont à l'encontre de ces impératifs techniques là de trancher systématiquement en leur faveur.

Mais il existe aussi un autre point de vue lié à la dynamique des phénomènes et qui consiste à maintenir une stabilité suffisante en valorisant au maximum tous les produits transitoires provenant de la décomposition de la totalité des résidus de récolte.

Alors que dans le premier cas, il faut surtout s'attacher à conserver un minimum de « sécurité », dans le deuxième, on doit chercher à mettre au point des techniques adaptées aux conditions de chaque exploitation agricole permettant de faire rendre le maximum aux amendements organiques gratuits que constituent les résidus de récolte sous leurs différentes formes.

Enfin le dernier renseignement que nous avons tiré de cette étude est d'ordre méthodologique. Nous pensons en effet avoir montré que l'étude des phénomènes agronomiques dont on ne peut établir au champ que la tendance résultante à partir d'appréciations souvent très fluctuantes peut difficilement permettre une interprétation sans une analyse à l'aide de modèles. Ceux-ci sont constitués par des expériences de laboratoire et toute la difficulté consiste alors à vérifier qu'ils sont bien représentatifs. C'est par la variété des conditions et par le fait qu'en dépit de ces différences on aboutit à des conclusions convergentes, que l'on peut juger si l'analyse porte bien sur des aspects fondamentaux du phénomène. Réciproquement, les modalités des conditions expérimentales devront constituer les divers caractères que praticiens et techniciens s'efforceront de retrouver dans le milieu naturel pour raisonner les techniques culturales et plus encore pour en apprécier les effets.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANNE P., 1945. Dosage du carbone organique du sol. *Ann. agron.* Série A, p. 165.
- ANSTETT A., 1956. Sur une méthode rapide de détermination du rapport C/N dans les sols, les amendements organiques et les végétaux. *C. R. VI^e Congrès Sci. du Sol*, Vol. B, p. 693, Paris.
- AVET M., 1924. *Bull. Biol. Fr. et Belg.* Vol. 63, p. 149-318.
- BACHELIER G., 1961. *La jaune du sol et son action*. Orstom Paris.
- BARBIER G. et BOISCHOT P., 1954. Cinq années d'expérience sur la fumure à la paille. *C. R. Acad. Agric.* Séance du 13-1-54.
- BARBIER G. et CHABANNES J., 1961. Interaction de la fumure organique et de l'azote minéral. *Agrochimica* 5, n° 3, p. 217-227.
- BARBIER G. et KEILLING J., 1960. Le problème de l'humus dans l'agriculture moderne. *Tech. agric. Cah.* 1360, Paris.
- BENOIT et al., 1962. Effect of a rye winter cover crop on soil structure. *Agron. J.*, 54, n° 5.
- BÉTRÉMIEUX R., 1951. Étude expérimentale de l'évolution du fer et du manganèse. Thèse Paris, *Ann. agron.*, 2, 193-295.
- BÉTRÉMIEUX R., LE BORGNE E., et MONNIER G., 1960. Évolution de certaines propriétés du sol sous l'influence du chauffage. *C.R. Acad. Sci.* 251, 2753.
- BRADT et al. 1947-48. *Some change in a soil after ten years of sod green manure and fertilizer treatment*. Hortic. Exper. St. Rep., Ontario Dept. of Agric.
- BREMNER J., 1955. Recent work on soil organic matter at Rothamsted. *Z. f. Pflanzenerähr* 69, p. 32-38.
- CHAMINADE R., 1958. Influence de la matière organique humifiée sur l'efficacité de l'azote. *Ann. agron.*, 9, 167-192.
- COMBEAU A., 1960. Quelques facteurs de la variation de l'indice d'instabilité structurale dans certains sols ferrallitiques. *C. R. Acad. Agric.*, 109.

- DEB B. C., 1950. Dosage du fer libre dans le sol. *J. Soil Sci. Oxford*, **1**, 212.
- DEMOLON A., 1948. *Principes d'Agronomie*. Dynamique du sol., p. 99 Dunod, Paris.
- FEODOROFF A., 1960. Évaluation de la stabilité structurale d'un sol (Indices), Nouvelles normes d'emploi pour l'appareil à tamiser. *Ann. agron.*, **11**, 651-659.
- FLAIG W., 1955. In *Proc. nat. Acad. Allahabad*, **24**, A, Part. III.
- FORSYTH W. G. G., 1950. Studies on the more soluble complexes of soil organic matter. *Biochem. J.* **2**, 141-146.
- FRAUG H. et LEITENBERGER L., 1948. *Osterreich. Zool. Zeitschr.* **1**, 499-518.
- HÉNIN S., 1938. *Étude physicochimique de la stabilité structurale des terres*. Thèse Paris.
- HÉNIN S., 1944. Influence des corps microbiens sur la formation d'une structure stable. *C. R. Acad. Agric.*
- HÉNIN S. et DUPUIS M., 1954. Essai de bilan de la matière organique du sol. *Ann. agron.* **15**, 17.
- HÉNIN S. et TURC L., a, 1949. Essai de fractionnement des matières organiques du sol. *C.R. Acad. Agric.*, **35**, 41-43.
- HÉNIN S., et TURC L., b, 1949. Nouvelles observations sur la variation annuelle de la stabilité structurale du sol. *C.R. Acad. Agric.*, n° **35**.
- HÉNIN S., CARDEY F. et ROESCH A., 1956. Méthode permettant le contrôle de la résistance des conditionneurs de sols aux actions microbiennes. *C.R. Acad. Sci.*, **243**, 1899.
- HÉNIN S., et MONNIER G., 1956. Évaluation de la stabilité structurale du sol. *C. R. VI^e Congrès intern. de Sci. Sol.* Paris, vol. B., 49-52.
- HÉNIN S., et MONNIER G., et COMBEAU A., 1895. Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Ann. agron.* **9**, 73-92.
- HÉNIN S., MONNIER G., et TURC L., 1959. Un aspect de la dynamique des matières organiques du sol. *C.R., Acad. Sci.*, **248**, 138.
- HÉNIN S., FEODOROFF A., GRAS R., et MONNIER G., 1960. *Le Profil Cultural. Principes de physique du sol*. Société d'Édition des Ingénieurs agricoles. Paris.
- KORTLEVEN 1963. Quantitative aspekkte von humus bildung und humus abbau Verts. *Landbouwk Onderz.* **9**, 1 109.
- LE BORGNE E., et MONNIER G., 1959. Influence du feu sur certaines propriétés du sol. *C.R. Acad. Sci.* **248**, 1549.
- LE BORGNE E., 1960. Influence du feu sur les propriétés magnétiques du sol et sur celles du schiste et du granite. *Ann. de Géophys.* **16**, 2.
- MAC VICKAR et al 1946. The effect of cover crop on certain chemical and physical properties of Onslow fine sandy loam. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **11**, 47-49.
- MARSHALL T. J., 1962. The nature, development and significance of soil structure. *Transaction Joint meeting Comm. IV and V ISSS (New Zealand)*.
- MARTIN G., 1963. Dégradation de la structure des sols sous culture mécanisée dans la vallée du Niari. *Cahiers O.R.S.T.O.M., Pédologie*, **2**, 8.
- MÉRIAUX S., 1958. Stabilité structurale et composition des sols. *C. R. Acad. Agric.*
- MEYER L., 1943. *Bodenk. et Pfl.* **29** (74), 119-140.
- MONNIER G., 1957. Influence des prairies temporaires sur la structure d'un sol de limon. *C. R. Acad. Agric.* 20 février.
- MONNIER G., 1958. Influence du mode d'exploitation des prairies sur la profondeur de leur enracinement. Incidences sur l'amélioration de la structure et de la stabilité structurale du sol. *C.R. Acad. Agric.* 23 avril.
- MONNIER G., 1958. Mécanisme de l'enrichissement en matières organiques d'un sol de prairie. *C. R. Acad. Sci.* 247, 1769.
- MONNIER G., TURC L., et JEANSON-LUUSINANG V., 1962. Une méthode de fractionnement densimétrique par centrifugation des matières organiques du sol. *Ann. agron.* **13** (1), 55-63.
- MOREL R., RICHER A. et MASSON P., 1956. Étude expérimentale de la variation du taux de matière organique du sol dans le champ d'expérience de la station agronomique de Grignon. *Ann. agron.* **7**, 183.
- MOREL R. et MASSON P., 1958. Étude de la structure du sol des parcelles du champ d'expérience de Grignon. *C.R. Acad. Agric.*, **8**, 406-410.
- SCHLOESING Th., 1885. *Chimie agricole*. Encyclopédie Frémy. Dunod. Paris.
- SWABY R. J., 1950. Influence de l'humus sur l'agrégation du sol. *Journal soil Sci. T. I.*, 182-195.
- TURC L., 1949. Sur la matière organique du sol fractionnée par densité. *C. R. Acad. Sci.* **229**, 227-228.
- VAN RHEE J. A., et NATHAN, 1961. Observations on earthworm population in orchard soils. *Netherl. J. Agric. Sci.*, **9**, 94-1000.
- WILLIAMS T. E. et BAKER H. K., 1957. Studies on the root development of herbage plants. *J. Brit. Grassland Soc.*, **12** (1, 2 et 3).
- YODER A., 1936. A direct method of aggregate analysis of soil and study of the physical nature of erosion losses. *J. Amer. Soc. Agron.*, **28**, 357-351.

OUVRAGES CONSULTÉS

- BAVER L. D., 1956. *Soil physics*. Wiley New York 489.
- DEMOLON A., 1952. *Principes d'Agronomie. Dynamique du sol*. Dunod Paris 1 vol. 520 p.
- DUCHAUFFOUR Ph., 1960. *Précis de pédologie*. Masson et C^{ie} Paris.
- HÉNIN S., FEODOROFF A., GRAS R., et MONNIER G., 1960. *Le Profil Cultural. Principes de Physique du Sol*. Société d'Édition des Ingénieurs agricoles Paris.
- JACQUIN F., 1963. Notions récentes concernant le bilan humique d'un sol cultivé. *Bull. AFES*, 10 octobre 1963.
- KONONOVA. *Soil organic matter* (traduction anglaise) Pergamon Press Oxford, London, New York, Paris, 1 vol 450 p.
- POCHON J., et de BARJAC H., 1958. *Traité de microbiologie des sols*. Applications agronomiques. Dunod Paris.
- RUSSEL E. W., 1961. *Soil conditions and plant growth*. 9^e édition Longmans, Londres.
- TROUGHTON A., 1957. The underground organs of herbage grasses. *Commonweath Bureau of Pastures and Field Crops Hurley*. Berkshire. Bull. n° 44.
- KUTESCHERA LORE 1960. *Wurzel Atlas mittel europäischer Ackerunkräuter und Kulturpflanzen*. DLG. Verlag G. M. B. H. Francfort s.Main.
-

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté

« LE CONCEPT DE SOL ET SON ÉVOLUTION »

VU ET APPROUVÉ :

Paris, le 5 avril 1965

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

Marc ZAMANSKY

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :

Le Recteur de l'Académie de Paris,

Jean ROCHE

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 15-6-65.

Dépôt légal : 2^e trimestre 1965. N^o d'impression : 1052.