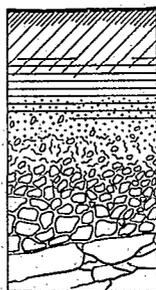


G. BACHELIER

**CONTRIBUTION  
A L'ÉTUDE  
DE  
LA MINÉRALISATION  
DU CARBONE DES SOLS**



OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ET TECHNIQUE OUTRE-MER



# OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER

## CATALOGUE SOMMAIRE des Publications <sup>(1)</sup>

### DIFFUSION - VENTES

Tant pour les abonnements aux revues périodiques que pour l'achat d'ouvrages ou de cartes, il convient d'adresser les commandes imper-sonnellement à :

Monsieur le Chef du Service Central de Documentation de l'O.R.S.T.O.M.,  
70-74, route d'Aulnay — 93 - BONDY.

Les paiements seront effectués par virements ou chèques postaux, au profit de :

Régisseur des Recettes et Dépenses des S.S.C. de l'O.R.S.T.O.M.,  
70-74, route d'Aulnay — 93 - BONDY.  
C.C.P. 9152-54 PARIS.

Exceptionnellement, achat au comptant possible auprès de  
l'O.R.S.T.O.M. - Bibliothèque Annexe,  
24, rue Bayard — PARIS (8<sup>e</sup>).

### I. ANNUAIRE HYDROLOGIQUE

Première série de 1949 à 1959. 1 volume entoilé :

France 55 F ; Étranger 60 F.

Nouvelle série depuis 1959.

En deux tomes : Tome I. États africains d'expression française et République Malgache.

Le volume relié, 18 × 27 :

France 70 F ; Étranger 75 F.

Tome II. Territoires et départements d'Outre-Mer.

Le volume relié, 18 × 27 :

France 16 F ; Étranger 22 F.

### II. BULLETINS ET INDEX BIBLIOGRAPHIQUES (format rogné : 21 × 27, couverture bleue)

— Bulletin bibliographique de Pédologie.

Trimestriel.

Abonnement : France 55 F ; Étranger 60 F.

— Bulletin signalétique d'Entomologie médicale et vétérinaire.

Mensuel.

Abonnement : France 55 F ; Étranger 60 F. Le numéro 6 F.

— Index bibliographique de Botanique tropicale.

Semestriel.

Abonnement : France 10 F ; Étranger 11 F. Le numéro 6 F.

### III. CAHIERS O.R.S.T.O.M. (format rogné : 21 × 27, couverture jaune)

#### a) *Séries trimestrielles.*

Cahiers ORSTOM. Série Pédologie.

Cahiers ORSTOM. Série Océanographie.

Cahiers ORSTOM. Série Hydrobiologie (2).

Cahiers ORSTOM. Série Sciences humaines.

Cahiers ORSTOM. Série Hydrologie.

Cahiers ORSTOM. Série Entomologie médicale.

Abonnement : France 70 F ; Étranger 75 F. Le numéro 20 F.

#### b) *Séries non encore périodiques.*

Cahiers ORSTOM. Série Géophysique.

Cahiers ORSTOM. Série Biologie.

Cahiers ORSTOM. Série Géologie (prévue en 1968).

Prix selon les numéros.

(1) Tous renseignements complémentaires dans le catalogue général des publications, à demander : SCD ORSTOM - 70-74, route d'Aulnay, 93-Bondy.

(2) Cette nouvelle série reçoit les articles de cette discipline précédemment publiés dans la série Océanographie.

**CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE LA MINÉRALISATION  
DU CARBONE DES SOLS**

sa mesure en laboratoire et sur le terrain,  
sa nature, son dynamisme et son intérêt

MÉMOIRES ORSTOM n° 30

**G. BACHELIER**

**CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE LA MINÉRALISATION  
DU CARBONE DES SOLS**

**sa mesure en laboratoire et sur le terrain,  
sa nature, son dynamisme et son intérêt**

O R S T O M

PARIS

1 9 6 8

# Introduction

La Biologie du Sol est actuellement devenue une discipline très volumineuse, qui s'est progressivement imprégnée d'Écologie, en faisant de chaque sol un équilibre biodynamique extrêmement complexe, dont faute d'un travail en équipe on ne peut plus étudier à la fois tous les facteurs et dont l'étude des interrelations et des variations saisonnières requiert une très grande somme de travail.

Devant l'impossibilité d'analyser la vie des sols aussi facilement qu'on en fait la description morphologique ou même l'analyse physico-chimique, et pour si fructueuse et nécessaire que soit cette Biologie analytique des sols, de nombreux chercheurs ont été amenés à considérer le sol comme un organisme vivant dont il convenait d'étudier la physiologie des fonctions et l'activité biologique globale, d'où les diverses études sur les activités enzymatiques et les mesures du métabolisme.

Les travaux sur les enzymes ont confirmé la grande complexité de la physiologie des sols, étroitement liée à la diversité des microflores et des faunes. L'extrême variabilité des réactions biochimiques qui se manifestent dans les sols ne permet pas d'en juger avec assez de certitude l'activité biologique globale par la seule estimation d'un ou deux enzymes, aussi les travaux sur le métabolisme global des sols font-ils de préférence appel actuellement à la mesure de l'activité respiratoire.

Les travaux de calorimétrie, délicats et nécessitant des microcalorimètres trop coûteux, n'ont pas jusqu'ici été poussés très loin.

C'est après nous être initié à la Pédologie générale et à la Faune des sols, que nous avons abordé les méthodes d'analyse globale de l'activité biologique des sols. En choisissant l'étude de l'activité respiratoire des sols, nous avons été amené à rechercher la signification qu'il convient de donner à leur dégagement de  $\text{CO}_2$ , tant en laboratoire que sur le terrain.

On sait maintenant que la respiration n'est pas une combustion de matières organiques par l'oxygène de l'air, comme l'imaginait Lavoisier, mais un processus extrêmement fractionné, une chaîne de réactions successives catalysées par des déshydrogénases, des oxydases et des carboxylases ; enzymes dont la recherche dans les sols tend maintenant à se développer sans qu'on puisse encore les utiliser pour évaluer avec certitude l'activité biologique globale.

Les premières phases anaérobies de déshydrogénation sont suivies d'un deuxième ensemble de réactions aérobies où l'hydrogène enlevé est alors combiné à l'oxygène de l'air, accepteur définitif. Bien que chacune des phases du processus respiratoire ne libère qu'une faible quantité d'énergie, en fin de compte la respiration dépassant la fermentation procède à une oxydation complète des matières organiques ; si la respiration n'est pas une combustion, elle peut néanmoins en être regardée comme l'équivalent.

Aussi considérerons-nous le dégagement de  $\text{CO}_2$  des sols en milieu aérobie comme le produit d'intégration de l'ensemble des processus respiratoires qui correspondent à l'activité biologique globale de la microflore hétérotrophe, et donc indirectement à l'intensité de minéralisation des substances organiques.

Où se situent dans les sols les substances organiques susceptibles d'être immédiatement minéralisées ? Comment les divers facteurs climatiques, pédologiques ou artificiels peuvent-ils influencer la minéralisation de ces substances ? Quel rôle éventuel ces substances peuvent-elles avoir sur les sols, et plus particulièrement sur leur stabilité structurale ? Telles sont les premières questions qui se sont posées à nous.

Nous avons été ensuite amené à nous pencher sur la nature et le degré d'oxydation de ces substances organiques facilement minéralisables, notre intention étant de parvenir à une conception différentielle du catabolisme des sols par la comparaison de la minéralisation potentielle de certaines de leurs fractions carbonées ; ceci, compte tenu de l'influence éventuelle de l'azote, compte tenu du cycle des substances humiques, et en abordant aussi pour certains sols, notamment les sols salins, le rôle respectif que la faune et la microflore peuvent avoir dans la dégradation des substances énergétiques.

Après avoir acquis la possibilité d'établir pour les échantillons de sols convenablement séchés à l'air un schéma élémentaire de la dynamique de la dégradation terminale de leurs matières organiques, il était nécessaire de rechercher les variations saisonnières possibles de cette dynamique et la signification qu'il convenait d'accorder aux substances facilement minéralisables présentes dans les sols.

Passant du laboratoire au terrain, nous nous sommes alors efforcé de relier l'activité biologique naturelle des sols au cours de l'année à leurs variations de teneur en substances organiques facilement minéralisables, substances que selon le stade d'évolution nous qualifierons par la suite de carbone facilement minéralisable ou de carbone immédiatement minéralisable.

Après un rapide examen de la quantité de carbone qui peut se minéraliser annuellement dans les sols et un bref aperçu sur l'atmosphère des sols, problème intimement lié à celui de la minéralisation du carbone, il nous est apparu nécessaire de faire à ce stade le bilan des principaux résultats acquis tant sur le plan scientifique que méthodologique et à illustrer par quelques exemples les voies d'application et de développement qui nous paraissent actuellement envisageables.

Tel est dans ses grandes lignes le plan de ce travail, au cours duquel nous nous sommes toujours efforcé de citer les travaux antérieurs, dont nous avons connaissance.

# Sols et techniques utilisés

## A. SOLS ET COLLECTIONS DE SOLS UTILISÉS

Étant donné la conception actuelle d'équilibre biodynamique que l'on a maintenant des sols, il nous est apparu nécessaire de travailler sur des sols différents tant tropicaux que métropolitains, afin de pouvoir juger de la généralisation des conclusions et bénéficier d'exceptions qui, plus que les données courantes, aident souvent à la compréhension des faits. Les sols utilisés au cours de ce travail sont par suite assez nombreux. L'énumération en est faite ici d'après la classification française (AUBERT, 1965) et pour plus de clarté toute donnée pédologique en est exclue ; celles-ci seront si nécessaire fournies en cours de texte ou éventuellement rejetées en annexe.

### SOLS CALCOMAGNÉSIMORPHES

- Horizon Al sablo-limoneux d'une rendzine à horizons.

France (78-Montainville)

M 11 (3-12 cm)

- Horizon brun calcaire sablo-argileux.

France (93-Bondy)

profil B1 et éch. moyen B  
profil B2 :

prélèvements mensuels sur 4 profondeurs : 0-5, 5-10, 10-15 et 15-20 cm.

### VERTISOLS

- Vertisols topolithomorphes et non grumosoliques, sablo-argileux et sur roches basiques (granodiorites et gneiss calco-alcalins).

Togo (Station de Kolocopé)

8 profils, 16 échantillons

P

0-15 cm : P1-1A, P2-2A, P3-1A, P5-4A, P6-3A, P6-4A, P7-3A, P8-2A.

15-30 cm : P1-1B, P2-2B, P3-1B, P5-4B, P6-3B, P6-4B, P7-3B, P8-2B.

- Vertisols hydromorphes et non grumosoliques, sablo-argileux à argilo-sableux et sur matériel d'apport calcaire.

Sénégal

3 profils, 14 échantillons

route de M'Bour à Kaolak

BAV 1

route de Rufisque à Kaolak

BAV 2

route de M'Bour à Kaolak

BAV 3

BAV 11 (0-10 cm), 12 (10-20 cm), 13 (30-40 cm), 14 (40-45 cm).

BAV 21 (0-10 cm), 22 (30-40 cm), 23 (90-100 cm), 24 (120-130 cm), 25 (150-160 cm).

BAV 31 (0-5 cm), 32 (15-25 cm), 33 (30-40 cm), 34 (70-80 cm), 35 (110-120 cm).

## SOLS A MULL

France (Vosges)

- Mull calcique argilo-limoneux de sol brun calcimorphe à tendance vertique V<sup>65</sup>-5 (0-20 cm)
- Mull limono-argileux de sol brun lessivé V<sup>65</sup>-1 (5-15 cm)
- Mull-moder de sols bruns acides sur grès V<sup>65</sup>-2 et V<sup>65</sup>-3 (2-7 cm)
- Mull-moder limono-sableux de sol brun acide rouge sur grès V<sup>65</sup>-4 (2-7 cm)

## PODZOLS ET SOLS PODZOLIQUES

- Mor et moder de podzols et sols podzoliques.

France (Vosges gréseuses)

7 échantillons 2-7 cm

Moder de sol podzolique : V<sup>63</sup>-6Mor de sols podzoliques : V<sup>65</sup>-6, V<sup>65</sup>-7Mor de podzols : V<sup>63</sup>-4, V<sup>63</sup>-7, V<sup>63</sup>-9, V<sup>63</sup>-10, V<sup>63</sup>-22

• Sol faiblement podzolique sur pseudogley, limoneux à limono-sableux, et formé sur limons de plateaux remaniant le cailloutis pliocène.

France (Forêt de Sénart)

profil F2

prélèvements mensuels sur 4 profondeurs : 0-5, 5-10, 10-15 et 15-20 cm.

## SOLS A SESQUIOXYDES ET A MATIÈRE ORGANIQUE RAPIDEMENT MINÉRALISÉE

- Sols ferrugineux tropicaux.

a) peu lessivés et sableux (*sols diors*).

Sénégal (route de Bambey à Thiès)

3 profils, 15 échantillons

BAD 1, 2 et 3

BAD 11 (0-2 cm), 12 (2-10 cm), 13 (10-20 cm), 14 (40-50 cm), 15 (100-110 cm).

BAD 21 (0-2 cm), 22 (2-10 cm), 23 (22-32 cm), 24 (50-60 cm), 25 (100-110 cm).

BAD 31 (0-10 cm), 32 (10-20 cm), 33 (35-45 cm), 34 (65-75 cm), 35 (100-110 cm).

b) lessivés et sablo-argileux à argilo-sableux.

Sénégal

3 profils, 14 échantillons

sans concrétions : route de Velingara à Koukané

CD 9

quelques concrétions : route de Biaron à Bodonto

CC 16

à concrétions : route de Velingara à Badiara

CB 4

CD 90 (0-10 cm), 91 (20-30 cm), 92 (50 cm), 93 (80 cm), 94 (100 cm).

CC 160 (0-10 cm), 161 (20-30 cm), 162 (50-60 cm), 163 (100 cm).

CB 40 (0-10 cm), 41 (30 cm), 42 (50 cm), 43 (80 cm), 44 (100-110 cm).

Casamance (Sénégal), Station de la C.G.O.T.

8 échantillons 0-10 cm de nature sableuse.

- Sols ferrallitiques.

a) Sols faiblement ferrallitiques modaux.

Côte d'Ivoire (forêt de Yapo)

Sol sablo-argileux sur schistes à arkose (route Divo-Tiassalé)

YAPO 11 (0-5 cm)

12 (10-40 cm)

Sol argilo-limoneux puis argileux sur micaschistes

DIVO 11-1 (0-15 cm)

11-2 (40-60 cm)

République Centrafricaine

(Station agricole de Grimari)

Sol sablo-argileux. Prélèvements mensuels 0-15 cm. 48 échantillons GRI-Savane GRI-Culture

(Station agricole de Bambari)

Sol argilo-sableux. Prélèvements 0-15 cm. 53 échantillons : BAM.

savane non cultivée	BAM-S
coton depuis 5 ans sans apport	BAM-T
coton depuis 5 ans avec paillis régulier et sissongos	BAM-P
coton depuis 5 ans avec apport de fumier	BAM-F
coton depuis 5 ans avec apport de fumier et paillis de sissongos	BAM-FP
coton depuis 5 ans avec apport d'engrais minéraux ( $\text{NH}_4\text{SO}_4$ et $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ )	BAM-E
coton depuis 5 ans avec apport d'engrais minéraux et paillis de sissongos	BAM-EP
coton depuis 5 ans avec apport d'engrais minéraux et de fumier	BAM-EF
coton depuis 5 ans avec apport d'engrais minéraux, de fumier et paillis de sissongos	BAM-EFP

b) Sols ferrallitiques typiques.

Cameroun (région de Bertoua)

Sol ferrallitique rouge et argileux sur granite et sous forêt secondaire. BAC 64-11 (0-10 cm)

Cameroun (Adamaoua)

3 profils, 9 échantillons

Sol sablo-argileux sur arène granitique. AD 9

AD 91 (0-3 cm), 92 (3-10 cm), 93 (10-20 cm), 94 (20-40 cm), 95 (80 cm).

c) Sols ferrallitiques humifères à sols fortement ferrallitiques sur roches volcaniques d'âge différent.

Cameroun (Adamaoua)

7 profils, 32 échantillons

Sol ferrallitique brun argilo-limoneux sur basalte récent (lac Sabéréion AD 6, lac Tissong AD 50). AD 6, AD 50

AD 61 (0-5 cm), 62 (5-15 cm), 63 (15-25 cm), 64 (42 cm), 65 (60 cm), 66 (94 cm).

AD 501 (0-3 cm), 502 (3-10 cm), 503 (10-20 cm).

Sol ferrallitique brun-rouge argileux sur basalte sub-récent (volcan Mabala AD 1, Wakwa AD 38). AD 1, AD 38

AD 11 (0-5 cm), 12 (5-10 cm), 13 (23-38 cm), 14 (55-65 cm), 15 (98-122 cm), 16 (188 cm).

AD 381 (0-3 cm), 382 (3-10 cm), 383 (20-40 cm), 384 (100 cm), 385 (200 cm),

Sol ferrallitique rouge argileux sur basalte ancien (près de Wakwa) AD 49

AD 491 (0-3 cm), 492 (3-10 cm), 493 (10-20 cm), 494 (20-40 cm), 495 (80 cm).

Sol ferrallitique rouge argileux sur basalte ancien rajeuni par l'érosion (près de Wakwa) AD 41

AD 411 (0-3 cm), 412 (3-10 cm), 413 (10-20 cm), 414 (40-50 cm), 415 (80 cm).

## SOLS HALOMORPHES A STRUCTURE DÉGRADÉE

- Sols argileux lessivés et généralement dessalés, formés sur argile calcaire d'origine marine.

France (Marais Poitevin)

12 profils, 23 échantillons

MP 10 (0-4 cm), 11 (4-14 cm) / MP 21 (0-20 cm) / MP 30 (0-5 cm), 31 (5-14 cm) / MP 40 (0-5 cm), 41 (5-15 cm) / MP 50 (0-5 cm), 51 (10-20 cm) / MP 60 (0-5 cm), 61 (5-30 cm), 62 (35-45 cm) / MP 7-11 (0-3 cm), 7-12 (5-25 cm), 7-13 (35-45 cm) / MP 7-21 (0-10 cm) / MP 7-31 (0-10 cm) / MP 81 (0-20 cm), 82 (20-40 cm) / MP 91 (0-5 cm), 92 (5-25 cm), 93 (30-45 cm) / MP 101 (0-20 cm).

## SOLS HYDROMORPHES

- Sols peu humifères à hydromorphie temporaire (nappe permanente située en dessous du dernier échantillon prélevé).

Sénégal

3 profils, 9 échantillons

Sol peu humifère à gley et pseudogley de profondeur, sableux à sablo-limoneux (Km 2 à l'ouest de Gambissa-route de Gambissa à Boya) CCB 33

CCB 330 (0-10 cm), 331 (15-35 cm), 332 (50-70 cm), 333 (95-105 cm).

Sol peu humifère à pseudogley à taches, sableux à sablo-limoneux (Basse-Casamance) CCB 31

CCB 310 (0-5 cm), 311 (30-50 cm), 312 (65-80 cm), 313 (130-150 cm).

Sol peu humifère argileux sur alluvions France (Vosges)	Guédé 1 ( 0-20 cm)
Sol limono-argileux intensément colonisé par les vers de terre • Sols à nappe permanente proche de la surface. France (Alsace)	V <sup>63</sup> - 5 ( 0-10 cm)
Anmoor de gley humique sous prairie récemment drainée	V <sup>63</sup> - 3 ( 5-20 cm)
Hydromor de gley humique sous sphaignes	V <sup>63</sup> -22 (10-35 cm)

## B. TECHNIQUES DE LABORATOIRE UTILISÉES

STOTZKY (1965) a dressé un inventaire très détaillé des diverses méthodes d'analyse utilisées dans les recherches sur la respiration des sols : analyse du gaz carbonique dégagé, analyse de l'oxygène absorbé, mesure en continu de la respiration, évaluation du quotient respiratoire. Seules seront par suite indiquées ici, avec une bibliographie restreinte à l'essentiel, les techniques que nous avons utilisées ou éventuellement mises au point.

### 1. ÉVALUATION DU POTENTIEL D'ACTIVITÉ BIOLOGIQUE D'UN SOL PAR MESURE DE SON DÉGAGEMENT DE GAZ CARBONIQUE EN RÉCIPENT FERMÉ

Cette technique très simple consiste à amener un poids de terre donné à l'humidité voulue et à le placer dans un récipient, où se trouve une base susceptible de fixer le gaz carbonique dégagé par la terre. La température et le temps d'incubation sont fonction de l'expérimentation.

Cette technique très ancienne a déjà été décrite par de nombreux chercheurs. Parmi les derniers en date, DOMMERGUES (1960) en a fait une étude critique dans un article sur la notion de coefficient de minéralisation du carbone dans les sols, et MOUREAUX (1959) l'a utilisée, après enrichissement du sol en glucose, pour définir un « indice glucose » rentrant lui-même dans un indice plus général de fertilité. Nous-même en avons récemment publié une description technique à laquelle nous renvoyons pour les détails opératoires (BACHELIER, 1966 b).

L'expérience nous a montré que dans cette mesure le dégagement de gaz carbonique est bien proportionnel au poids de terre placé en incubation (cf. fig. 10, chap. 2, § A-1b), pour autant que le gaz diffuse normalement à travers l'échantillon et qu'il reste toujours les 2/3 de l'oxygène du départ. Aussi, pour un bocal d'un litre et des mesures de 7 jours à 30°, est-il bon de prendre 50 à 25 g de terre pour 25 ml de potasse N/5, en descendant si nécessaire jusqu'à 10 g de terre dans le cas des échantillons très organiques (mor de podzol par exemple). Avec des échantillons particulièrement actifs, on peut être amené à effectuer des dosages plus rapprochés dans le temps, et à cumuler les résultats sur 7 jours. Pour les terres argileuses et compactes, il est nécessaire de toujours vérifier avec des poids de terre différents la bonne diffusion des gaz à travers les échantillons.

L'expérience montre qu'avec une terre tamisée à 2 mm et bien homogénéisée, l'erreur entre les divers dosages ne dépasse pas 2 %.

La critique principale que l'on puisse faire à cette technique est que l'échantillon respire dans une atmosphère progressivement appauvrie en oxygène, encore que cela soit sans importance au-dessus d'un certain seuil d'appauvrissement.

Pour répondre à cette critique, de nombreux auteurs ont préféré mesurer le dégagement de gaz carbonique des sols en entraînant ce gaz au fur et à mesure de son dégagement dans une circulation

d'air préalablement purifié et en le fixant ensuite dans un barboteur à baryte ou à potasse de titre connu. Ce système théoriquement plus satisfaisant se prête cependant moins bien aux analyses de série, car il nécessite un travail et un matériel plus importants, ainsi que des renouvellements d'air assez fréquents. Le maintien de l'humidité de l'échantillon peut aussi poser des problèmes.

CORNFIELD (1961) a proposé de remplacer la potasse par du peroxyde de baryum en solution, qui pour une molécule de  $\text{CO}_2$  fixé, libère approximativement une molécule d' $\text{O}_2$ , en maintenant ainsi constante la pression de ce gaz. Le carbonate de baryum formé est dosé par calcimétrie. Cette méthode, pour si satisfaisante qu'elle soit dans son principe, nous apparaît cependant plus délicate et moins précise que celle à la potasse.

### **Influence du gaz carbonique**

Le couvercle des bouches ayant été équipé d'un robinet et d'un entonnoir, la potasse fixatrice n'y a été introduite qu'en fin d'incubation des terres, et grâce à une dépression déterminée par refroidissement. L'expérience a confirmé que les échantillons de sol dégagent moins de gaz carbonique en présence d'une atmosphère riche en ce gaz : l'échantillon de sol brun calcaire (B1) a ainsi dégagé 20 % de moins de gaz carbonique et l'échantillon de sol ferrallitique (DIVO 11-1) 27 % de moins. Dans l'atmosphère des sols, le gaz carbonique peut se trouver à une concentration beaucoup plus forte que dans l'air atmosphérique et déterminer alors un ralentissement de la respiration microbienne (cf. chap. 4, § E).

Mais inversement, il ne semble pas que la raréfaction du gaz carbonique, en dessous de sa teneur normale de 0,03 %, puisse au cours des mesures contribuer à en accroître le dégagement.

### **Humidité de l'échantillon**

L'humidité à laquelle doit être porté l'échantillon de sol, dont on désire mesurer le dégagement de gaz carbonique, dépend du but de l'expérience. Pour la comparaison d'échantillons différents, il est nécessaire d'amener ces échantillons à leur propre valeur de rétention d'eau. Comme cette valeur dépend de la nature des sols et peut varier de pF 3 pour les sols sableux à pF 2 pour les sols argileux, nous préférons mesurer la rétention d'eau des échantillons avec la vieille technique du buchner et de la pompe à vide ; technique adaptée pour la circonstance et qui nous donne une rétention d'eau bien reproductible et correspondant à un pF de 2 à 2,2 selon les sols. L'étude de l'influence de l'humidité sur la minéralisation du carbone des sols justifie le choix de cette humidité (cf. chap. 2, § A).

La mesure de la rétention d'eau des sols peut facilement s'effectuer sur creuset filtrant de porosité 1 ou 2. On place au fond du creuset une rondelle de papier filtre que l'on recouvre d'environ 1,5 cm de terre. On humidifie cette terre par ascension en plongeant le creuset dans un cristalliseur d'eau et on laisse la terre s'imbiber une nuit.

Le lendemain, on place le creuset sur un récipient à vide, après avoir mis le haut de ce creuset en communication avec une arrivée d'air humide (flacon à bulles fines ou ballon à air saturé d'eau). Sans ouvrir l'arrivée d'air humide, on draine l'eau imbibant la terre sous une dépression de 75 cm de mercure, puis on casse le vide avec l'air humidifié pendant 1 ou 2 minutes, et l'on rétablit ensuite à nouveau le vide ; cette opération est à répéter 2 ou 3 fois avant la mesure de l'eau retenue par les échantillons.

Plusieurs creusets peuvent être montés ensemble sur une plaque d'acier perforée, reposant par un joint caoutchouc sur un fond de dessiccateur relié à une trompe à vide (cf. fig. 1).

## **2. ADAPTATION D'UN SYSTÈME MANOMÉTRIQUE ET ÉLECTRIQUE POUR MESURE SIMULTANÉE DE LA CONSOMMATION D'OXYGÈNE, ÉVALUATION DU QUOTIENT RESPIRATOIRE ET ÉTUDE DE SON ÉVOLUTION DANS LE TEMPS**

Connaissant le gaz carbonique dégagé par un échantillon de sol, il est possible d'en connaître le quotient respiratoire (Q.R.) si l'on peut aussi en mesurer dans le même temps l'absorption d'oxygène.

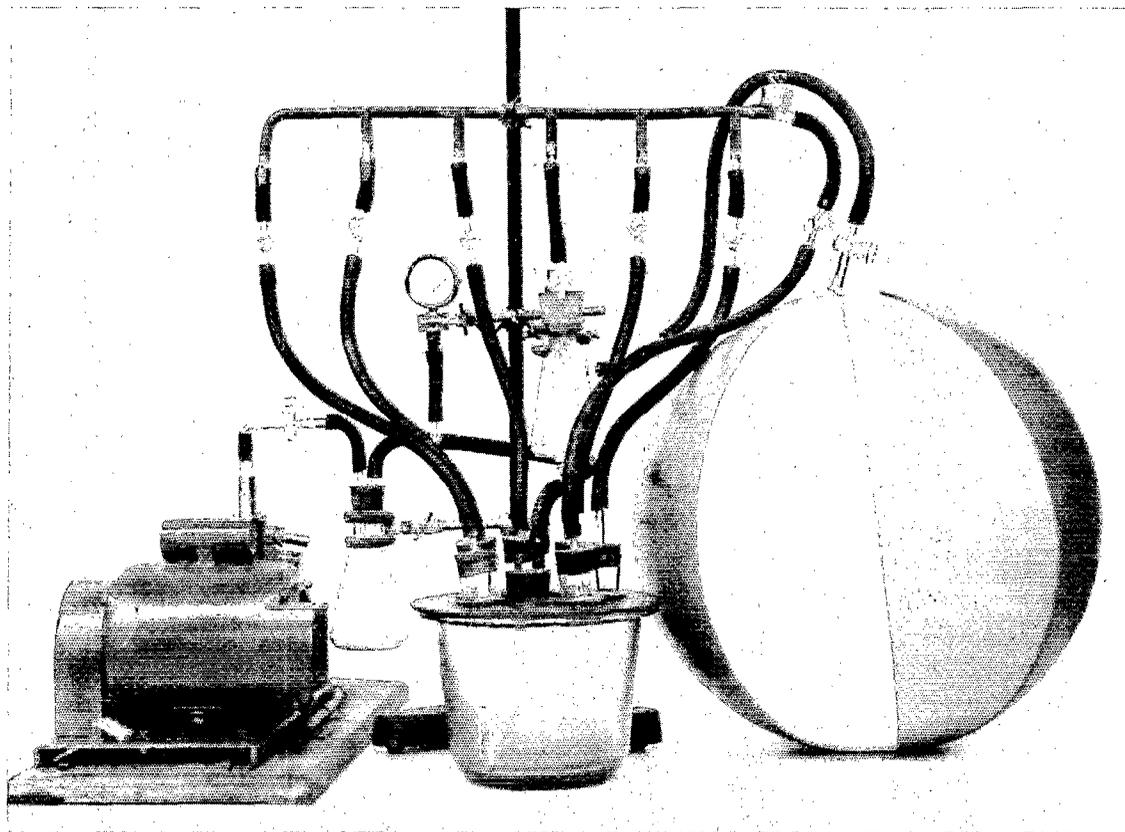


FIG. 1. — Installation pour la mesure de la rétention d'eau sur creuset filtrant.

Pour cela, les appareils de type Warburg sont très précis, mais ils ne permettent de travailler que sur de faibles quantités de sols et n'apparaissent pas à l'échelle des mesures pédologiques. L'utilisation de micromètres à lecture directe (GILSON, 1963) et l'agrandissement des chambres de respiration devraient permettre l'apparition sur le marché de respiromètres mieux adaptés aux mesures pédologiques.

Une autre technique très élégante et d'avenir, mais se prêtant mal à la grande série, est la technique électrolytique où la dépression causée par l'absorption d'oxygène déclenche l'électrolyse d'une solution d'acide sulfurique (SWABY et PASSEY, 1953, (WIERINGA et MOGOT KERKHOF, 1957) ou de sulfate de cuivre (KEHREN, 1953-54) (DROBNIKOVA et DROBNIK, 1965). L'oxygène dégagé à l'anode remplace l'oxygène absorbé, jusqu'à rétablissement de la pression initiale qui coupe alors provisoirement le courant d'électrolyse. Le volume d'hydrogène dégagé à la cathode est récupéré dans une burette graduée et correspond au double du volume d'oxygène consommé.

Personnellement, et compte tenu de nos moyens, nous avons eu recours à des mesures manométriques et à l'électrode à oxygène Beckman.

La figure 2 montre l'installation manométrique que nous avons utilisée et qui s'inspire de celle décrite par LEES (1949).

L'équilibre thermique de l'ensemble étant atteint, on ferme le bocal de mesure par l'intermédiaire du robinet  $R_2$  et on « enferme » dans le flacon T et sa branche manométrique la pression de départ p de l'expérience. Au moment de la lecture, on ferme le robinet  $R_3$  et on égalise par l'intermédiaire du flacon à niveau la pression de la partie droite de l'appareil avec celle de la partie gauche correspondant au flacon témoin. L'équilibre étant atteint, on fait la première lecture  $n_1$  sur le tube gradué. On ouvre alors le robinet  $R_2$  mettant ainsi le bocal de mesure en communication avec sa branche manométrique et on rétablit à nouveau la pression p par l'intermédiaire du flacon à niveau. On effectue alors la deuxième lecture  $n_2$  sur le tube gradué.

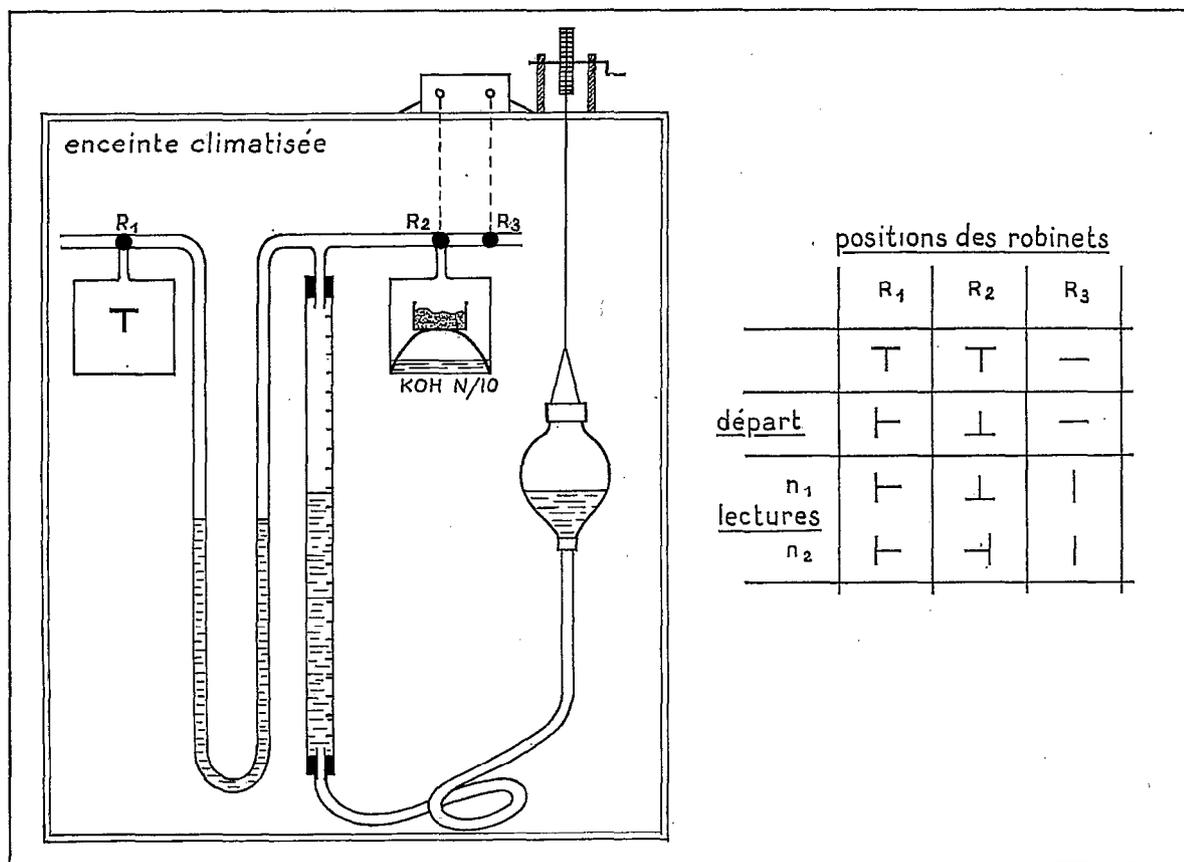


FIG. 2. — Installation manométrique, pour mesure en laboratoire de l'absorption d'oxygène par un échantillon de sol conjointement à la mesure globale de son dégagement de gaz carbonique.

L'échantillon de sol a absorbé  $n_2 - n_1$  ml d'oxygène à la pression  $p$  et à la température  $t$  de l'enceinte climatisée

$$O_2 \text{ ml (0}^\circ,76 \text{ cm Hg)} = \frac{(n_2 - n_1) p}{76 (1 + \alpha t)}$$

Par ailleurs, le titrage de la potasse indique le volume de gaz carbonique dégagé dans le même temps par l'échantillon,

$$CO_2^{\uparrow} \text{ mg} \times 0,509 = CO_2^{\uparrow} \text{ ml (0}^\circ,76 \text{ cm Hg)} \text{ et } \frac{CO_2^{\uparrow} \text{ ml}}{O_2^{\uparrow} \text{ ml}} = \text{Q.R.}$$

La mesure du quotient respiratoire ainsi exposée demeure toutefois une mesure globale, du fait que le gaz carbonique n'est dosé qu'une fois et en fin d'expérience. Aussi, pour suivre l'évolution du quotient respiratoire d'un échantillon de sol en présence de potasse, est-il nécessaire de multiplier le nombre des bocal en les munissant de robinets à rodages sphériques, qui permettent de n'utiliser qu'une seule et même installation manométrique. WOLF, BROWN et GODDARD (1952) ont pu cependant suivre le quotient respiratoire d'un même échantillon de sol en présence de potasse par détermination manométrique de l'oxygène absorbé et détermination du changement de conductivité électrique de la solution alcaline fixatrice, technique qui demande un circuit électrique assez délicat et un étalonnage précis.

Par contre, en absence de potasse fixatrice dans le bocal de mesure, il est possible de suivre

facilement l'évolution du quotient respiratoire d'un échantillon de sol au sein d'un seul et même bocal. On a pour cela (cf. fig. 3) soudé dans le couvercle du bocal de mesure une électrode à oxygène (en plus du robinet R<sub>2</sub> lié au système manométrique.) Cette électrode à oxygène rattachée à son appareil de lecture (appareil Beckman) permet de connaître à chaque moment le pourcentage d'oxygène présent dans l'atmosphère du bocal ; bocal dont il convient alors de mesurer le volume d'air libre par remplissage à l'eau en fin d'expérience.

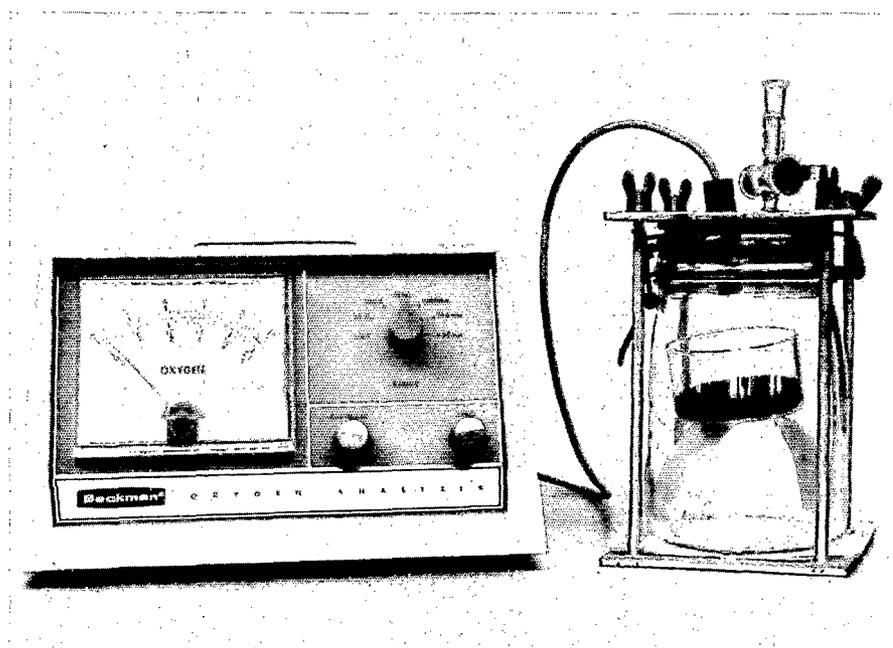


FIG. 3. — Installation pour mesure du quotient respiratoire des sols.

$$\text{Dépression} = O_2' - CO_2' \quad \text{et} \quad \text{Q.R.} = \frac{O_2' - \text{dépression}}{O_2'}$$

encore convient-il que l'azote demeure constant

#### Constance de la teneur en azote

Cette constance de l'azote dans les bocaux de mesure a été vérifiée à l'aide d'un appareil d'analyse de gaz classique muni d'un dispositif compensateur pour les variations de pression. Le gaz carbonique y est fixé par de la potasse à 40 % et l'oxygène par une solution alcaline de pyrogallol (20 g de pyrogallol dissous dans 40 ml d'eau distillée et versés avec précaution dans 100 g de potasse à 40 % au moment de la mesure).

Une fraction de l'atmosphère des bocaux de mesure a été prélevée après 7 jours d'incubation à 30° et les teneurs en azote de ces prélèvements ont été comparées (à volume et température constants) à la teneur en azote de l'atmosphère de départ. On a utilisé pour cette expérience l'échantillon de vertisol P8-2A, l'échantillon de sol brun calcaire B, le mor de podzol V<sup>63</sup>-10 et l'échantillon de sol ferrallitique DIVO 11-1, aussi bien en présence qu'en absence de potasse. Les résultats (voir tableau p. 18) montrent que les variations possibles de l'azote au cours des mesures sont trop faibles pour être cause d'erreur.

La figure 4 montre une concordance satisfaisante entre ces deux mesures et indique que l'électrode à oxygène généralement conçue pour des mesures en milieu liquide peut être aussi utilisée en atmosphère humide, pour autant qu'il ne se produise pas de condensation sur la membrane teflon de l'électrode.

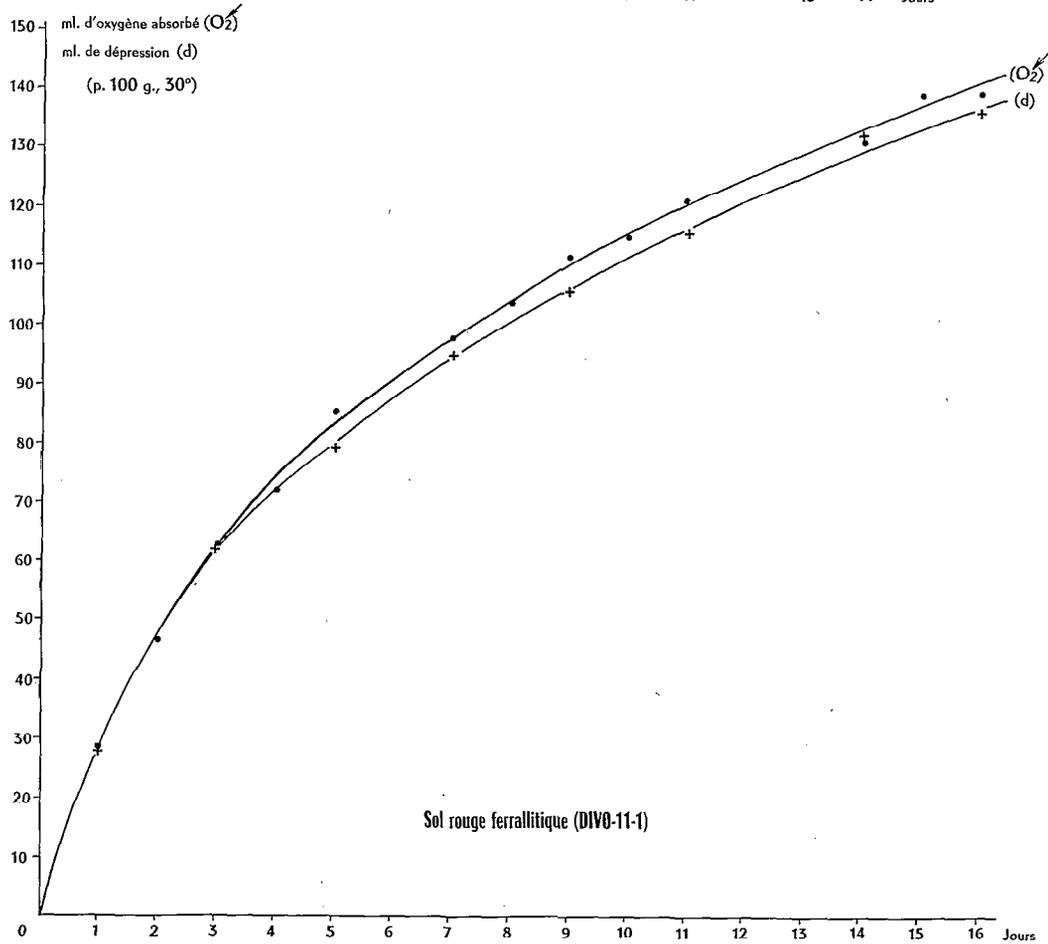
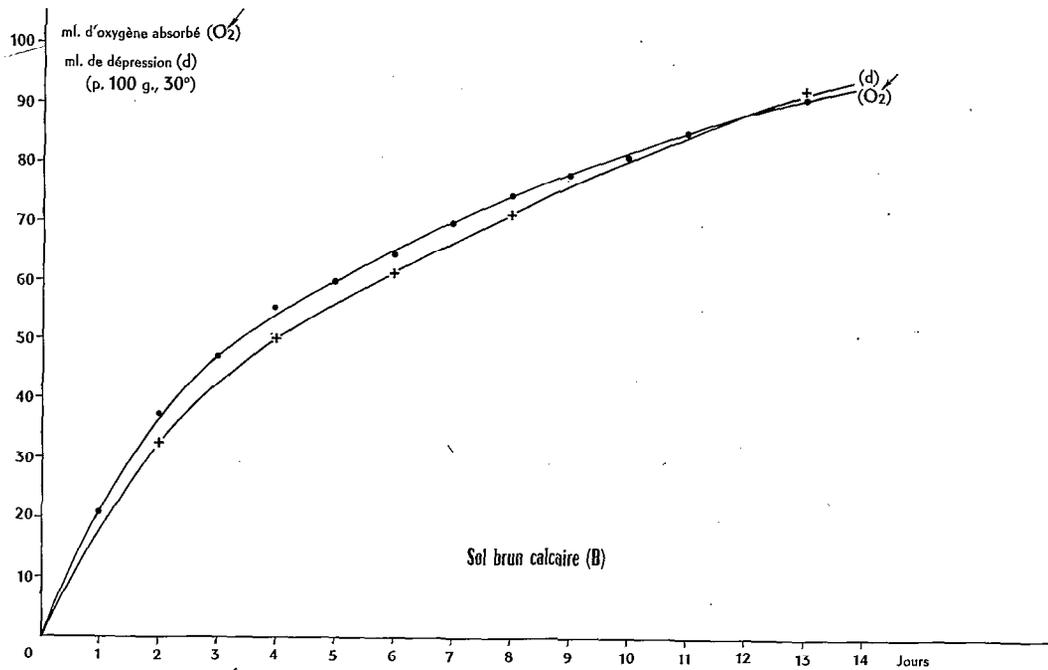


FIG. 4. — Absorption d'oxygène mesurée en présence de potasse à la fois par l'électrode à oxygène et la dépression.

	« azote + gaz rares » p. 100 ml de l'atmosphère du bocal			
	Sans potasse fixatrice		Avec potasse fixatrice	
	Au départ	Après 7 jours	Au départ	Après 7 jours
Vertisol P8-2A .....	78,85	78,66	78,85	78,20
Sol brun calcaire B .....	»	78,08	»	78,37
Mor de podzol V <sup>63</sup> -10 .....	»	78,54	»	78,20
Sol ferrallitique DIVO 11-1 .....	»	78,89	»	78,57

### 3. ABSORPTION D'OXYGÈNE EN FLACON D'EAU

(Mode opératoire détaillé en annexe)

Le principe de cette technique proposée pour la première fois par DUCHÉ en 1958 est de doser l'oxygène absorbé par un poids de terre déterminé dans un certain volume d'eau et dans des conditions expérimentales strictement définies. C'est une variante de la technique utilisée jadis par les hygiénistes pour juger du degré de pollution des eaux.

La mise au point de cette technique montre que ses résultats dépendent étroitement de ses conditions de réalisation et l'étude critique que nous en avons faite (BACHELIER, 1960) nous a amené à adopter pour elle les conditions expérimentales suivantes :

— les échantillons dont l'on désire comparer les absorptions d'oxygène en flacon d'eau, doivent être préparés de façon identique et notamment avoir été séchés et tamisés de la même manière.

— pour des flacons d'un litre à bouchon de verre rodé, il est bon de prendre des échantillons de sol de 3 g, ou si nécessaire de 1 à 6 g, mais en n'oubliant pas que les résultats ne peuvent être comparés entre eux d'une manière absolue que si moins de 17 à 20 % de l'oxygène dissous ont été absorbés au cours des mesures ; l'absorption d'oxygène tend en effet à se ralentir au-dessus de cette limite.

« Toutes conditions expérimentales étant égales, on ne peut pas dire qu'une terre, dont 3 g ont absorbé 300 centièmes de mg d'oxygène dans un flacon d'eau en renfermant 880, a eu une activité microbienne double d'une terre dont 3 g n'en ont absorbé que 150, mais on peut dire qu'elle a eu une activité microbienne « au moins double », car la valeur 300 est sous-estimée par rapport à la valeur 150. Passé la partie approximativement rectiligne des courbes d'absorption d'oxygène, nous n'avons plus que des valeurs relatives et non des valeurs absolues. »

— les échantillons placés sur papier-filtre doivent être imbibés par capillarité pendant au moins 1/4 d'heure avant d'être transvasés dans les flacons de mesure. Cette technique d'imbibition des échantillons de sol s'avère en effet la meilleure pour éliminer l'air des échantillons.

— les flacons sont à remplir avec une *eau distillée* qui a été aérée toute une nuit par barbotage d'air à l'aide d'une pompe à aquarium. L'eau déminéralisée est à proscrire<sup>1</sup>.

— les flacons soigneusement bouchés (et ne devant donc pas renfermer de petites bulles d'air) sont retournés deux ou trois fois pour ensemencement homogène, puis conservés à 20° et à l'obscurité pendant une semaine, laps de temps après lequel est dosé l'oxygène dissous restant dans l'eau. Par différence avec l'oxygène de flacons témoins remplis seulement d'eau distillée, on connaît l'oxygène absorbé par les échantillons de sol.

En dosant l'oxygène ainsi absorbé, on mesure l'activité des microorganismes qui se développent dans les conditions de cette mesure ; développement qui dépend essentiellement de la richesse de l'échan-

1. L'eau déminéralisée sur résines est à rejeter, car bien que pouvant avoir une résistivité extrêmement forte, elle renferme toujours des traces de résines échangeuses qui, dans certaines conditions mal définies et variables selon les échantillons, semblent déterminer une absorption d'oxygène. Cette absorption paraît, même à des températures supérieures à 20-25°, pouvoir devenir très importante.

tillon de sol en éléments nutritifs, tant minéraux qu'énergétiques. Ainsi que nous l'ont montré des expériences de stérilisation et de réensemencement spécifique ou multispécifique, ce ne sont ni les espèces, ni leur importance quantitative, mais les possibilités qui leur sont offertes pour se développer qui déterminent en fin de compte l'importance de l'absorption d'oxygène. Les plaques microbiennes que l'on peut faire sur les terres récupérées en fin de mesure montrent une grande diversité de bactéries en cours de développement, car il y a généralement dans les sols toujours assez de bactéries susceptibles de se développer dans les conditions de cette mesure.

Toutefois, pour certains sols chimiotrophes, comme par exemple les sols salés, si l'absorption d'oxygène traduit ici encore l'importance de l'activité microbienne, la signification de cette activité ne doit plus être la même, car la microflore correspond alors à quelques bactéries spécialisées et non plus à une population bactérienne diversifiée.

Il est enfin à noter que le fait de mesurer une absorption d'oxygène en flacon d'eau ne signifie nullement qu'on opère en milieu anaérobie. Pour un litre d'eau distillée renfermant en effet au départ 800 centièmes de mg d'oxygène dissous, il en reste, après 7 jours et pour une consommation de 20 %, encore plus de 600 centièmes de mg. GREENWOOD (1961) a montré que pour de très nombreux sols saturés d'eau, le passage du métabolisme aérobie au métabolisme anaérobie se situait en dessous de 10 centièmes de mg d'oxygène au litre (soit approximativement  $3 \times 10^{-6}$  M au litre), compte tenu qu'à cette très faible concentration d'oxygène, de nombreux microorganismes peuvent encore respirer à plus de 50 % de leur capacité maxima. C'est seulement en dessous de  $1 \times 10^{-6}$  M d'oxygène au litre que toute respiration se trouve inhibée.

Pour une collection de sols de même nature ou de même dynamisme, la corrélation entre l'oxygène absorbé en flacon d'eau et le  $\text{CO}_2$  dégagé en bocal apparaît généralement très bonne, ainsi que le montre la figure 5 avec une collection de sols de l'Adamaoua (Cameroun) allant de sols ferrallitiques bruns sur basalte récent à des sols ferrallitiques rouges sur basalte ancien.

Il est à noter que la corrélation linéaire entre le  $\text{CO}_2$  dégagé et l'oxygène absorbé ne passe généralement pas, si on la prolonge, par l'origine des coordonnées, mais coupe l'axe des abscisses ou l'axe des ordonnées. Selon que l'axe coupé correspond au dégagement de  $\text{CO}_2$  ou à l'absorption d'oxygène, le rapport  $\text{CO}_2$  dégagé sur oxygène absorbé diminue ou augmente régulièrement avec l'accroissement des valeurs de respiration. Ainsi, avec la collection de sols de l'Adamaoua de la figure 5, il s'agit d'une légère diminution de ce rapport. Les plus faibles valeurs de respiration correspondent en effet aux horizons les plus profonds des profils et cette diminution du rapport  $\text{CO}_2$  dégagé sur oxygène absorbé traduit le fait que dans ces sols, la matière organique immédiatement minéralisable est plus oxydée en profondeur qu'en surface.

Dans un autre exemple cité plus loin et où il s'agit d'un même sol ayant subi différents traitements agricoles (BACHELIER, 1963c), on a le cas inverse et une augmentation du rapport en question avec les plus fortes valeurs de respiration. Nous examinerons ce deuxième exemple et l'importance qu'il est nécessaire d'accorder à cette oxydation de la matière organique minéralisable en traitant du quotient respiratoire au chapitre 3, § A.

#### 4. DOSAGE CHIMIQUE DU CARBONE, DES GLUCIDES ET DE L'AZOTE SOLUBLES

##### 4a. Extraction des composés solubles

50 ou 60 g<sup>1</sup> de terre sèche et tamisée à 2 mm (ou un poids équivalent de terre humide dont on connaît l'humidité) sont placés dans une fiole cylindro-conique, que l'on remplit de 300 ml d'eau distillée, que l'on bouche et que l'on porte ensuite au bain-marie à 70° pendant 3 heures avec agitations intermittentes (le choix de 70° est justifié par le fait que pour de nombreux sols, il se manifeste une dispersion des colloïdes à l'approche des températures d'ébullition, sans que pour cela l'extraction

1. 50 g avec le dosage des glucides solubles par la méthode colorimétrique à l'antrone, 60 g avec le dosage de ces mêmes glucides par la méthode colorimétrique à l'orcinol.

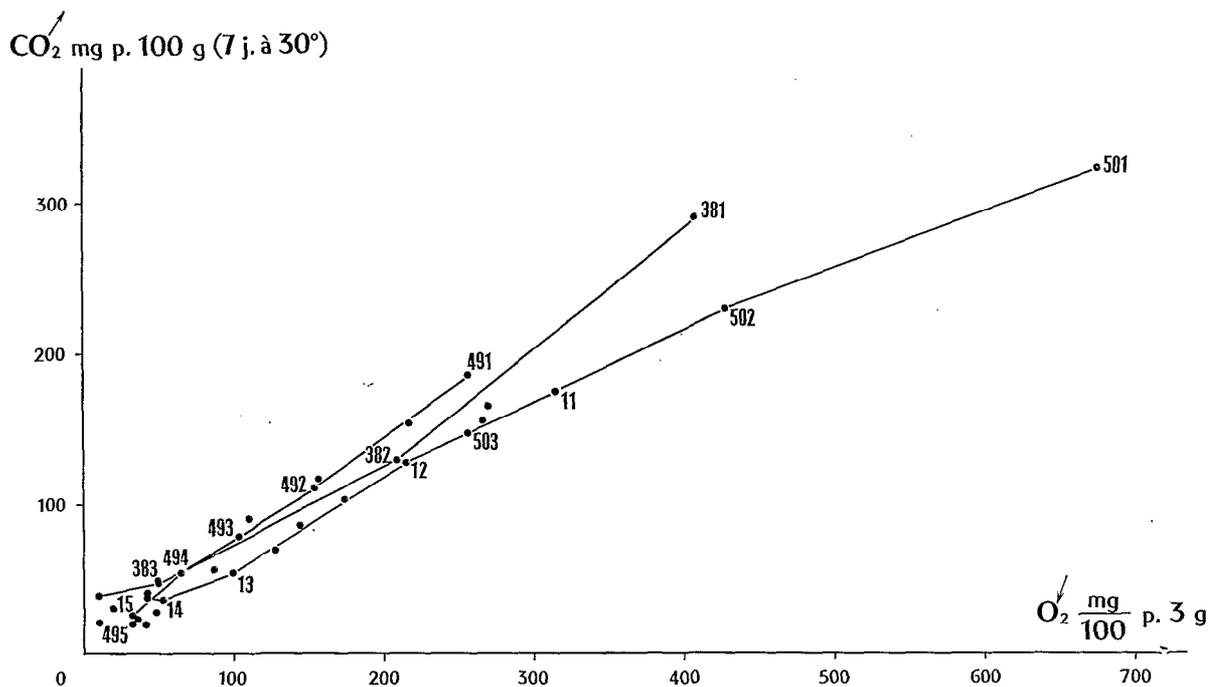


FIG. 5. — Dégagement de CO<sub>2</sub> en bocal et absorption d'O<sub>2</sub> en flacon d'eau pour des sols de l'Adamaoua (Cameroun) (Collection AD).

des éléments solubles ne s'en trouve accrue). Pendant l'échauffement à 70° de l'eau des fioles, on débouche plusieurs fois ces dernières pour rétablir leur pression et éviter que les bouchons ne sautent.

Après une nuit de repos des fioles au frigidaire, on en centrifuge le contenu 10 minutes à 2 500 tours/minute. On filtre la fraction liquide ainsi obtenue et on la conserve au froid dans l'attente des dosages.

#### 4b. Dosage par manganimétrie du carbone réducteur soluble<sup>1</sup>

50 ml de la fraction liquide (ou moins si nécessaire, mais alors avec complément d'eau distillée à 50 ml) sont additionnés de 3 ml d'acide sulfurique pur et 20 ml de KMnO<sub>4</sub> environ N/10. On porte à l'ébullition et on maintient cette ébullition exactement 10 minutes sur une plaque chauffante dont la température doit demeurer constante tout au cours des dosages. Après ces 10 minutes d'ébullition, on ajoute 20 ml d'acide oxalique N/10 exact et on titre l'acide oxalique en excès par le permanganate N/10.

A 1 ml de KMnO<sub>4</sub> N/10 exact correspond 0,3 mg de C réducteur ; deux essais à blanc sont nécessaires.

#### 4c. Dosage des glucides solubles

##### *Examen des techniques*

Le dosage des sucres réducteurs s'effectue habituellement par réduction en milieu alcalin d'une solution d'ions cuivriques en ions cuivreux qui précipitent. Ces derniers peuvent être déterminés :

- par la méthode de Bertrand dans le cas des solutions assez riches en sucres (10 mg au minimum dans les 20 ml de la prise d'essais).
- par la méthode de Somogyi qui permet de doser des quantités de sucres mille fois plus faibles que la méthode de Bertrand.

1. Ce dosage n'est pas valable pour les sols renfermant des éléments minéraux réducteurs (fer ferreux ou sulfures).

HANOVER (1964) décrit en détail ces deux premières méthodes.

- par la méthode colorimétrique de Nelson (NELSON, 1944) qui, assez complexe dans ses réactions, utilise un réactif à base de molybdate d'ammonium et arséniate de sodium pour développer une coloration bleue proportionnelle à la quantité de sucres.

Seules les méthodes de Somogyi et de Nelson seraient assez sensibles pour être utilisées au dosage des glucides présents dans les sols, mais leur adaptation à ce dosage les rendrait assez longues et difficiles, aussi leur préfère-t-on les méthodes colorimétriques à l'anthrone et à l'orcinol, réactifs qui colorent directement en milieu acide les solutions d'extraction. Ces méthodes sont très sensibles et permettent de doser les glucides à partir de 10 millièmes de mg de glucose par ml de solution. Elles ont aussi l'avantage d'être très simples à réaliser et de bien se prêter aux analyses de grande série, tout en demeurant assez précises.

— La méthode colorimétrique à l'anthrone<sup>1</sup> a été conseillée par DREYWOOD en 1946. Étudiée par MORRIS en 1948, elle a depuis été utilisée par de nombreux chercheurs, dont BRINK, DUBACH et LYNCH (1960) ou GRAVELAND et LYNCH (1961) sur des hydrolysats de matière organique du sol, et par ROUQUEROL (1965) pour une étude sur l'apparition dans le sol de substances énergétiques de nature glucidique susceptibles de provoquer l'activité des *Azotobacter*<sup>2</sup>.

— La méthode colorimétrique à l'orcinol, moins connue que celle à l'anthrone, a été utilisée par TILLMANS et PHILIPPI (1929) dans l'étude de la teneur en glucides des protéines les plus importantes, et notamment le dosage du sucre dans l'albumine.

L'étude de ces deux méthodes colorimétriques pour le dosage des sucres solubles présents dans les sols (BACHELIER, 1966a) (BACHELIER et GAVINELLI, 1966d) nous a montré que leurs résultats se recoupaient, encore que ceux de la méthode à l'anthrone soient généralement un peu supérieurs à ceux de la méthode à l'orcinol. La méthode colorimétrique à l'anthrone est plus rapide que la méthode colorimétrique à l'orcinol ; cette dernière nécessite en effet une concentration de la solution d'extraction, plusieurs ajustements de volume et un bain-marie supplémentaire. La méthode à l'anthrone réclame toutefois une gamme d'étalonnage avec chaque séries de dosages, et la possession d'un photolorimètre à filtre approprié (580 à 600 m $\mu$ ). Partant d'un poids de terre légèrement inférieur et ne nécessitant pas la concentration de la solution d'extraction des glucides solubles, la méthode à l'anthrone apparaît plus sensible que celle à l'orcinol. Ses résultats sont aussi plus précis, puisqu'estimés à + ou - 2 %, alors que ceux de la méthode à l'orcinol ne le sont qu'à + ou - 5 %.

Seule l'existence du disque colorimétrique Lovibond nous a incité à utiliser la méthode colorimétrique à l'orcinol, en attendant de pouvoir adopter celle à l'anthrone. Ce disque colorimétrique, en évitant la réalisation et le renouvellement des échelles colorimétriques à partir du glucose, permet en effet de faire rapidement des dosages isolés, tout en rendant plus sûre une échelle colorimétrique qui, avec l'orcinol, porte à la fois sur une variation de couleur et une variation d'intensité de teinte, ainsi que le montrent les courbes d'absorption en U obtenues au photolorimètre.

### *Méthode colorimétrique à l'anthrone*

L'anthrone, d'après MORRIS (1948), réagit avec tous les oses, diosides et polysaccharides essayés, dont notamment l'amidon et les diverses dextrines. Il paraît aussi réagir avec les polysaccharides de nombreuses gommés bactériennes. A poids égal, glucose et fructose donnent avec l'anthrone la même réaction colorée. MORRIS a aussi montré que l'anthrone développe pratiquement la même couleur pour un composé sucré ou les produits d'hydrolyse de ce composé ; des poids égaux de glucose (sucre en C 6), de maltose, de saccharose (diosides) et de glycogène (polyoside) donnent à peu de chose près la même couleur, que ces sucres soient ou non hydrolysés au préalable.

Dissous en milieu sulfurique concentré, l'anthrone apparaît de couleur jaune clair et donne avec les solutions de glucides une coloration bleue, d'où selon la concentration de ces solutions une gamme assez lumineuse allant du vert au

1. L'anthrone est l'oxo-9 dihydro-10 anthracène, forme tautomère cétonique de l'anthranol.

2. ROUQUEROL préparait ses extraits de terre sans hydrolyse, mais en milieu alcoolique : 5 g de sol pour 50 ml d'éthanol 50°, à 70 °C pendant une demi-heure sur table secoueuse.

bleu-vert. Une certaine fluorescence pourrait apparaître avec les diosanes et une couleur rouge se développer avec les protéines (MORRIS, 1948).

Pour le dosage global des glucides solubles du sol par colorimétrie à l'anthrone, 100 ml de la solution centrifugée et filtrée (cf. plus haut « Extraction des composés solubles ») sont additionnés de 1 ml de  $H_2SO_4$  au  $\frac{1}{2}$ , puis après agitation, abandonnés une nuit au frigidaire.

5 ml de cette solution sont titrés le lendemain. Placés dans un tube en verre de 25 mm de diamètre, on y ajoute 10 ml du réactif sulfurique à l'anthrone (1 g d'anthrone dissous dans un demi-litre d'acide sulfurique pur + 25 ml d'eau distillée).

Après agitation tournante du tube pour homogénéisation, ce dernier est placé au moins 10 mn dans un portoir et la couleur qui se développe au cours de l'échauffement du mélange est ensuite mesurée dans un photolorimètre à filtre coloré de 580  $m\mu$  (orange) ou 620  $m\mu$  (rouge). Un blanc, réalisé avec le réactif et de l'eau distillée, permet le réglage au 0 du photolorimètre. Une courbe d'étalonnage avec des solutions plus ou moins diluées de glucose est à refaire à chaque série de mesures.

La dissipation plus ou moins rapide de la chaleur de réaction, qui se développe quand on ajoute les 10 ml de la solution acide d'anthrone aux 5 ml de la solution aqueuse, a une influence certaine sur le développement de la couleur, d'où l'importance du diamètre et de l'épaisseur des tubes de réaction (MORRIS, 1948) (BACHELIER et GAVINELLI, 1966d). Il est nécessaire de préparer un réactif frais pour chaque série journalière de dosages et de veiller à la propreté rigoureuse des tubes.

### *Méthode colorimétrique à l'orcinol*

Alors que l'oxydation des oses en milieu alcalin conduit à un mélange complexe de corps réducteurs, elle donne naissance en milieu acide, d'une part à des dérivés aldéhydiques d'un hétérocyclique oxygéné (le furane), en particulier à du furfurole, et d'autre part à des méthylfurfuroles substitués (TIAN et ROCHE, 1950).

Ces dérivés du furane ont la propriété de se combiner au bain-marie à des diphénols (resorcinol et orcinol) ou à des triphénols (phloroglucine) en formant des pigments dont la coloration dépend du phénol et du glucide employés.

Pour le dosage global des glucides solubles du sol par colorimétrie à l'orcinol (et à l'aide du disque colorimétrique Lovibond), 150 ml de la solution centrifugée et filtrée (cf. plus haut « Extraction des composés solubles ») sont additionnés de 1 ml d' $H_2SO_4$  au  $\frac{1}{2}$ , puis réduits sur plaque chauffante et sans ébullition à environ 20 ml. Après refroidissement, ces 20 ml sont ajustés à 25 ml, 50 ml, ou même encore plus si cela est nécessaire, comme c'est souvent le cas avec des échantillons organiques.

Après filtration sur laine de verre de la solution ajustée, 1 ml du filtrat est additionné de 10 ml d'une solution d'acide sulfurique 66 % en volume (552 ml d'acide sulfurique  $d = 1,83$  amenés à 1 000) et à 0,2 % d'orcinol. Après homogénéisation du mélange, on porte ce dernier au bain-marie bouillant pendant 12 minutes.

On laisse refroidir et on ajuste à 50 ml. Après nouveau refroidissement, le dosage est réalisé à l'aide du colorimètre et disque colorimétrique Lovibond gradué directement en millièmes de mg de glucose pour 10 ml de solution (il convient donc de multiplier par 5 les résultats pour les ramener à 50 ml).

Si la solution s'avère trop concentrée et dépasse la valeur maxima de la graduation du disque colorimétrique Lovibond, on a rapidement formation d'un précipité brun-rouge, et plutôt que de diluer la solution colorée, il faut diluer la solution d'extraction ajustée, en reprendre 1 ml et porter à son tour ce nouveau ml au bain-marie bouillant après addition de 10 ml de la solution d'orcinol.

Les valeurs élevées de la graduation du disque sont contrôlées par une dilution au  $\frac{1}{2}$  de la solution de dosage.

Les résultats sont à plus ou moins 5 % près.

#### **4d. Dosage de l'azote soluble**

L'azote soluble est toujours très faible dans les sols, aussi est-il nécessaire pour le doser d'avoir recours à des techniques particulières. Le dosage de cet azote par la méthode de Berthelot à l'auto-

analyseur Technicon permet de déceler jusqu'à 1 p.p.m. d'azote, soit avec nos dilutions 0,005 ‰ d'azote.

La méthode de Berthelot est basée sur la réaction produite par le mélange « phénate + hypochlorite (ou hypobromite) » en milieu alcalin sur l'ammonium. Sous l'action de l'hypochlorite ou de l'hypobromite, deux noyaux phénol fixent un atome d'azote pour donner l'indophénol. Il se produit une coloration bleue, dont l'intensité est en raison directe de la proportion d'indophénol et de l'azote qu'il renferme. Avec l'hypochlorite, la réaction est sensible à la température ; avec l'hypobromite elle se fait à froid.

43,75 ml de la solution d'extraction précédemment envisagée sont amenés à 50 ml avec 6,25 ml d'acide sulfurique pur. Après homogénéisation, refroidissement, repos, et éventuelle décantation, cette solution est directement passée à l'autoanalyseur Technicon.

## 5. AUTRES TECHNIQUES

- Granulométries : Méthode pipette Robinson. Dispersion à l'hexamétaphosphate de sodium 4 %.
- pH : Méthode électrométrique. Rapport sol/solution : 1/2,5.
- pF : Presse à membrane pour pF 4,2 et autocuseur à plaque de porcelaine poreuse pour les pF inférieurs.
- Is (Indice d'instabilité structurale) : Méthode de Hénin.

$$I_s = \frac{\text{argiles} + \text{limons dispersés naturellement}}{\frac{\Sigma \text{ fractions agrégées eau, alcool, benzène} - 0,9 \text{ sables grossiers}}{3}}$$

le tout exprimé en %.

- Porosité : par dégazage sous vide en présence de pétrole.
- Carbone total : Méthode Walkley et Black.
- Azote total : Méthode Kjeldahl, catalyseur de Pregl.
- Éléments échangeables : extraits par lessivage à l'acétate d'ammonium N. Calcium et magnésium dosés par complexométrie, potassium et sodium par spectrométrie de flamme.
- S (Somme des bases échangeables) : somme des éléments échangeables, ou dosage global par dessiccation et calcination de l'extrait, puis reprise par HCl N/10 et titrage par la soude.
- T (capacité de fixation) : évaluation par saturation au calcium, déplacement du calcium par le potassium et dosage du calcium par colorimétrie.
- Éléments totaux : SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> par attaque aux trois acides.
- Acides humiques et acides fulviques : extraction par le pyrophosphate de sodium M/10 et dosage par manganimétrie.

## C. TECHNIQUES DE TERRAIN UTILISÉES

### 1. MESURE IN SITU DU DÉGAGEMENT DE GAZ CARBONIQUE DES SOLS A L'AIDE DE L'AMPOULE DE KOEPF

#### 1a. Diversité des techniques de mesure in situ du dégagement de gaz carbonique des sols

La mesure in situ du dégagement de gaz carbonique des sols et l'étude de ses variations, tant journalières que saisonnières, s'est considérablement développée au cours de ces dernières années.

Un appareil enregistreur à absorption d'infra-rouge, qui permet de suivre d'une manière continue la teneur en CO<sub>2</sub> d'une atmosphère, est certainement très utile, et KOEPF lui-même a été amené à

l'utiliser (KOEPP, 1953a), mais cet appareil n'est guère mobile et doit être relié aux cloches de capture des gaz, ce qui en rend l'installation coûteuse et en limite l'usage. Toutefois, inclus dans un grand ensemble électronique d'enregistrement automatique des diverses caractéristiques climatiques du sol, il a permis à la Station de Climatologie des Végétaux de Dahlem, près de Berlin, d'obtenir des résultats tout à fait remarquables et précis sur la dynamique annuelle de la respiration du sol et de son atmosphère superficielle sous culture (TAMN et KRZYSCH, 1965) (TAMN, KRZYSCH et FUNKE, 1965) (KRZYSCH, 1965).

La plupart des chercheurs se contentent toutefois de mesures discontinues avec le dosage du gaz carbonique diffusant dans une cloche de capture plus ou moins profondément enfoncée dans le sol. A part quelques exceptions (HUMFELD, 1930) (WALLIS et WILDE, 1964), la plupart des chercheurs laisse cette diffusion du gaz carbonique s'opérer naturellement et ne l'accélère pas par aspiration.

Trois méthodes principales ont été jusqu'ici utilisées pour doser le gaz carbonique diffusant dans les cloches de capture :

- 1) La fixation directe par la potasse du  $\text{CO}_2$  dégagé à l'intérieur de la cloche de capture.
- 2) La méthode de la circulation d'air, qui consiste à faire passer lentement un courant d'air à travers la cloche de capture, dont la pression interne ne doit pas être modifiée. Le  $\text{CO}_2$  dégagé par le sol est entraîné par cette circulation d'air et capturé à la sortie dans un barboteur à potasse ou à baryte. La différence avec le témoin ( $\text{CO}_2$  d'un même volume d'air non enrichi) donne le  $\text{CO}_2$  dégagé par le sol pendant le temps de la mesure.
- 3) La méthode de l'enrichissement en  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère de la cloche de capture, avec prélèvement d'une fraction de cette atmosphère et dosage de sa teneur en gaz carbonique.

Le prélèvement s'effectue soit à l'aide d'un flacon, où l'on a au préalable fait le vide (ou que l'on remplit par le jeu d'un flacon à niveau), soit à l'aide d'un sac en caoutchouc inclus dans un récipient à dépression.

Le dosage du  $\text{CO}_2$  est rarement effectué par microanalyse manométrique (YAMANE, 1961), mais plus habituellement par barbotage dans une solution de potasse ou de baryte.

### **1b. Mesure à l'aide de l'ampoule de Koepf (BACHELIER, 1966c)**

Une technique pratique consiste à effectuer le prélèvement de gaz dans une ampoule, où l'on peut effectuer secondairement l'électrolyse d'une solution de chlorure de sodium. La soude alors libérée neutralise, tout en le dosant, le  $\text{CO}_2$  du prélèvement. Il s'agit là de l'ampoule à électrolyse de Koepf (KOEPP, 1952) réutilisée récemment par HILGER (1963), DELECOUR (1965), et nous-même.

Comme on peut le voir sur la figure 6, l'appareillage se compose :

- d'un cylindre métallique qu'on enfonce dans le sol,
- d'une cloche de capture des gaz en plastique et munie d'un agitateur,
- d'une ampoule à électrolyse munie d'un flacon à niveau,
- d'un circuit électrique d'alimentation.

L'ampoule décrite par KOEPP, et reprise par HILGER, possède à la cathode une électrode en platine, où se dégage le sodium (qui, réagissant sur l'eau, donne de la soude avec un petit dégagement d'hydrogène), et à l'anode une électrode en platine recouverte d'un film d'argent où vient se bloquer le chlore sous forme de chlorure d'argent. Cette dernière électrode est décrite en platine et recouverte d'un film d'argent, vraisemblablement pour la raison que l'argent ne peut pas se souder directement au verre. Nous avons personnellement préféré adopter une électrode entièrement en argent traversant un bouchon caoutchouc, et donc enlevable, ce qui rend le rinçage de l'ampoule et le nettoyage de l'électrode bien plus aisé. De plus, on évite que le film d'argent, venant à disparaître, le chlore ne se dégage alors sur le platine mis à nu, neutralisant la soude formée, détruisant la phénolphthaléine et faussant la mesure. L'électrode usée est aussi plus facile à remplacer.

Pour le circuit électrique, nous avons utilisé 3 piles de 4,5 V montées en série, un ampèremètre gradué de 0 à 3 mA et un potentiomètre bobiné de 5 000  $\Omega$  maximum et de puissance 5 W.

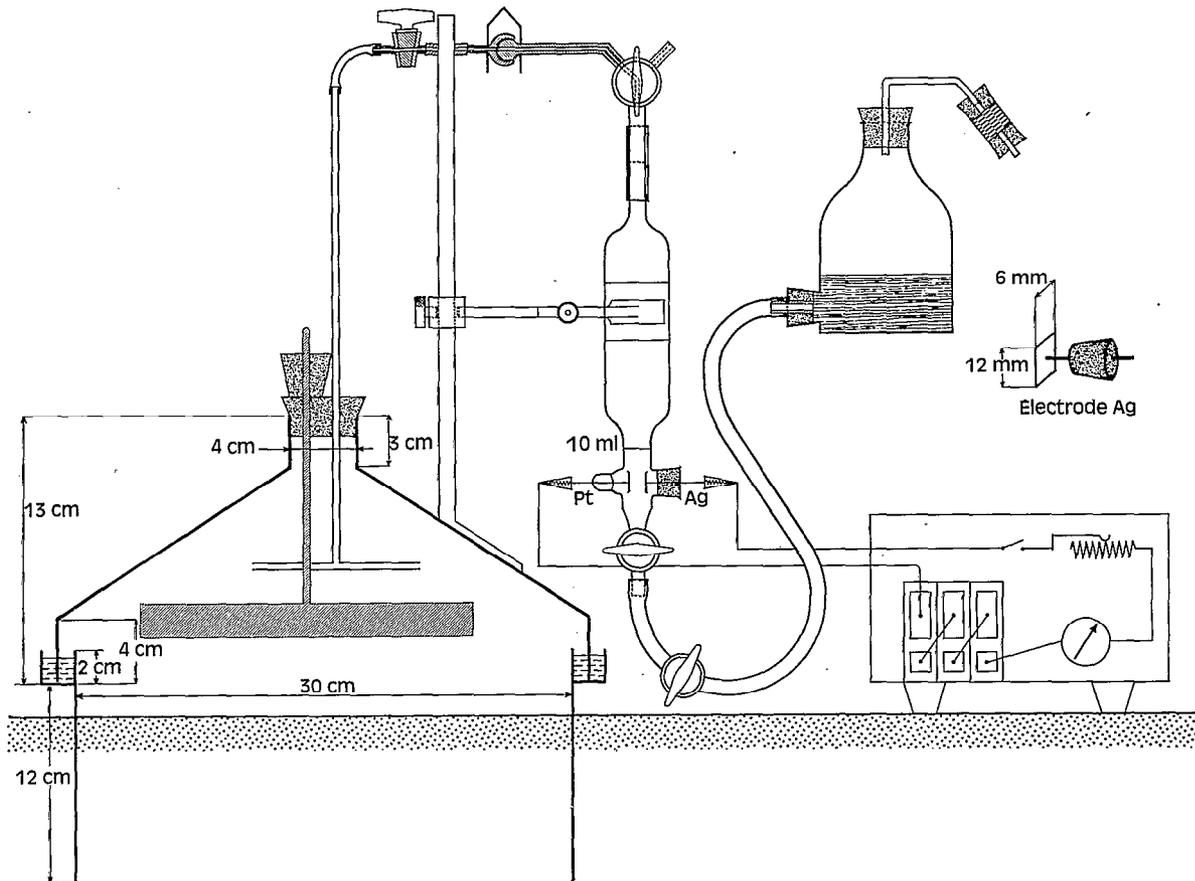


FIG. 6. — Schéma de l'installation destinée à la mesure in situ du dégagement de  $\text{CO}_2$  du sol par l'ampoule de Koepf.

On place la cloche mobile sur le cylindre qui demeure en permanence dans le sol, et on assure l'étanchéité de l'ensemble par de l'eau versée dans la gouttière du cylindre. On ferme alors le robinet de la cloche.

Après le temps de mesure choisi, on relie l'ampoule à la cloche par l'intermédiaire d'un raccord sphérique convenablement graissé et on remplit le flacon à niveau d'une solution de  $\text{NaCl}$  0,1N (amenée à pH 9,1 par environ 3 ml de  $\text{NaOH}$  0,1N à 0,5 % de phénolphaléine fraîchement préparée) (DELECOUR, 1965).

Élevant le flacon à niveau, on remplit l'ampoule de la solution salée jusqu'à son robinet supérieur. Après brassage de l'air de la cloche par l'intermédiaire de l'agitateur, on met l'ampoule en communication avec le conduit de la cloche et on abaisse le flacon à niveau, faisant ainsi descendre la solution salée jusqu'au repère 10 ml de l'ampoule. On ferme alors tous les robinets et on sépare l'ampoule de la cloche et de son flacon à niveau.

L'ampoule ainsi isolée est retournée et agitée énergiquement plusieurs minutes. Une fois l'ampoule remise en position normale, on en branche convenablement les électrodes au circuit électrique (électrode en platine au pôle — et électrode en argent au pôle +). On fait passer un courant d'intensité connue jusqu'à recoloration de la solution. On retourne de nouveau l'ampoule pour l'agiter énergiquement, et on recommence électrolyses et agitations jusqu'à recoloration stable de la solution.

Après 3 ou 4 mesures, il est bon d'enlever l'électrode d'argent, noircie par le chlorure d'argent qui s'y est formé et de laisser tremper cette électrode 10 minutes dans de l'ammoniaque pure, puis de bien la laver et rincer à l'eau distillée avant de la remettre en place, l'électrode ayant dû alors retrouver son éclat.

D'après la loi de l'équivalent électrochimique de Faraday, la quantité de  $\text{CO}_2$  (en mg) existant dans l'échantillon d'air prélevé est :

$$\text{mg CO}_2 = 0,456 \times 10^{-3} \times i \times t$$

$i$  étant l'intensité du courant d'électrolyse (en mA)

$t$  étant le temps de passage du courant (en secondes).

La cellule de titrage renfermant un échantillon de gaz de volume E ml, la teneur en CO<sub>2</sub> de l'air analysé est :

$$(2) \quad \text{mg CO}_2 \text{ au litre} : \frac{0,456}{E} \times i \times t$$

Le CO<sub>2</sub> en mg s'échappant de 1 m<sup>2</sup> de sol pendant 1 heure est :

$$(3) \quad \text{mg CO}_2 \text{ p. m}^2 \text{ et h.} = (C-c) \times \frac{V}{1\,000} \times \frac{60}{T} \times \frac{10\,000}{S}$$

avec C = teneur en CO<sub>2</sub> de l'air de la cloche (en mg/l) (cf. 2).

c = teneur en CO<sub>2</sub> de l'air atmosphérique (en mg/l) (cf. 2).

V = volume d'air emprisonné dans la cloche (en ml).

S = surface de sol délimitée par l'anneau (en cm<sup>2</sup>).

T = temps compris entre la mise en place de la cloche et le prélèvement de l'échantillon de gaz (en minutes).

Le remplacement des termes de l'expression (3) par leurs valeurs respectives permet une grande simplification de la formule.

DELECOUR (1965) a montré que les mesures du dégagement de gaz carbonique par titrage électrolytique étaient reproductibles et du même ordre de grandeur que les mesures faites avec des absorbeurs à chaux sodée.

Le dégagement de gaz carbonique des sols étant à la fois fonction de leur teneur en matières organiques minéralisables et de leur température, il est impossible de fixer a priori, pour tous les sols et pour toutes les saisons, un temps de mesure identique. Pour autant que la teneur de l'air analysé ne dépasse pas 2,5 à 3 mg de CO<sub>2</sub> par litre, le dégagement de gaz carbonique par le sol s'effectue à vitesse constante, mais alors que l'été la teneur de 2,5 mg de CO<sub>2</sub> par litre peut être facilement atteinte et même dépassée en 20 minutes elle peut demander en saison froide 3 heures ou plus pour être éventuellement atteinte. Un temps d'électrolyse de 3 minutes sous 3 mA apparaît comme un temps à ne pas dépasser.

HILGER (1963) indique une précision de plus ou moins 5 secondes pour un courant d'électrolyse de 2,3 mA. Étant donné à la fois le temps assez long de fixation du CO<sub>2</sub> et la difficulté de bien apprécier les faibles variations de teinte de la phénolphatléine virant au rose, nous préférons admettre une précision de plus ou moins 10 secondes sous 3 mA, soit approximativement avec notre appareillage 0,1 mg de CO<sub>2</sub> par litre et une marge d'erreur de 4 à 10 % selon l'importance du dégagement et la teneur en CO<sub>2</sub> de l'air analysé.

## 2. MESURE DU CO<sub>2</sub> DANS L'ATMOSPHERE DES SOLS (BACHELIER, 1968)

Nous avons trouvé pratique d'utiliser pour cette mesure le détecteur de gaz Drager, qui utilise des tubes réactifs tout gradués, au travers desquels on fait passer un volume d'air connu à l'aide d'une pompe à main étalonnée. Le gaz carbonique de l'air ainsi pompé réagit dans le tube réactif avec une combinaison de l'hydrazine, et la transformation de cette dernière y est mise en évidence par un réactif coloré.

Pour les prélèvements d'air, nous avons planté en permanence dans le sol des sondes de différentes longueurs. Ces sondes sont constituées par des tubes de cuivre de diamètre 14-16 mm enfoncés dans des trous préalablement forés. Ces trous sont de 2 à 3 cm plus profonds que les sondes, afin de constituer une petite chambre d'air à la base de celles-ci. Les sondes dépassent la surface du sol de 5 cm, et sont munies au niveau de cette surface d'une large collerette soudée. Ces collerettes sont collées sur le sol au plâtre de Paris et assurent superficiellement une certaine étanchéité. Les sondes sont bouchées à leur ouverture supérieure par un simple bouchon de caoutchouc.

La lecture du  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère du sol se fait en introduisant rapidement le tube réactif dans la sonde à l'aide d'un tube prolongateur muni d'une bague caoutchouc, qui ferme la sonde à son ouverture supérieure. L'air aspiré par la pompe à main passe à travers le tube réactif gradué, qui, pour un volume d'air déterminé, se colore sur une plus ou moins grande longueur en fonction du  $\text{CO}_2$  présent. Le détecteur de gaz Drager peut aussi remplacer l'ampoule de Koepf.

## D. EXPRESSION DES RÉSULTATS

Dans les études de laboratoire concernant la variation de la minéralisation du carbone des sols en fonction de facteurs extérieurs, telles l'humidité ou la température, on exprime généralement les résultats en « mg de  $\text{CO}_2$  dégagé par un poids de terre donné », en précisant les conditions de la mesure : humidité de l'échantillon, température et temps d'incubation. De nombreux résultats seront ainsi exprimés en « mg  $\text{CO}_2$  p. 100 g (7 jours, 30°) », la mesure étant faite sur l'échantillon à son humidité naturelle (mesure sur échantillon fraîchement prélevé), à une humidité définie par l'expérience, ou plus généralement encore à l'humidité de rétention d'eau au buchner (pF 2 à 2,2) (mesures sur échantillons réhumidifiés).

Cette expression des résultats par rapport à un poids de terre déterminé, si elle permet d'étudier les variations possibles de la minéralisation du carbone en fonction de facteurs extérieurs, ne permet toutefois pas de comparer quantitativement entre eux les différents sols, car d'une part les échantillons naturels ont souvent une densité très différente (songeons par exemple à la différence de densité existant entre un sol hydromorphe argileux compact et un horizon humifère de sol brun ou de sol podzolique), et d'autre part il est évident que la quantité de  $\text{CO}_2$  dégagé, qui dépend directement de la teneur en carbone du sol, n'aura de valeur comparative que si on considère cette valeur par rapport à la teneur en carbone total de l'échantillon étudié, d'où la nécessité d'exprimer les résultats en « mg  $\text{CO}_2$  p. 1 g C ».

Il est à noter que, si dans ce mode d'expression des résultats, on remplace le  $\text{CO}_2$  dégagé par sa valeur correspondante en carbone, on exprime alors le coefficient de minéralisation du carbone (Q.M.) :

$$\text{Q.M.} = \frac{\text{C du CO}_2}{\text{C total}} \times 100$$

DOMMERGUES (1960) a montré l'intérêt de ce coefficient qui rappelle celui du coefficient de minéralisation de l'azote (pourcentage d'azote se minéralisant en 28 jours à 30 °C) : « Bien que ces deux coefficients soient entachés d'un caractère artificiel et conventionnel et qu'ils ne donnent des phénomènes de minéralisation qu'une image globale, ils n'en sont pas moins très pratiques, car ils permettent de se faire rapidement une idée assez précise du métabolisme du carbone et de l'azote dans le sol. »

Les figures 6 et 7 nous montrent les différences que l'on peut observer sur un certain nombre d'échantillons dans l'expression des résultats du dégagement de  $\text{CO}_2$ , selon que l'on exprime ces résultats par rapport à 100 g de sol, à 100 ml de sol ou à 1 g de carbone total, qu'il s'agisse de terre tamisée (divers échantillons de la figure 7) ou de mottes de terre naturelles (échantillons MP de la figure 8)<sup>1</sup>.

La figure 7 nous montre que des échantillons très organiques, comme les horizons humifères de type mor, qui manifestent un fort dégagement de gaz carbonique, peuvent posséder en fait un très faible coefficient de minéralisation du carbone, alors que des sols très peu organiques à dégagement moyen ou même faible de gaz carbonique, tels les sols diors (éch. BAD 1, 2 et 3), peuvent posséder un très fort coefficient de minéralisation du carbone.

La figure 8, qui rassemble les résultats acquis sur une collection homogène de sols de même nature (sols halomorphes du Marais Poitevin), nous montre l'idée de plus en plus précise que l'on a de la valeur de minéralisation du carbone de ces sols, en considérant successivement les résultats de

1. Le volume des mottes est mesuré dans l'eau après pesée des mottes sèches et paraffinage. Le volume de la terre tamisée est mesuré par remplissage d'une éprouvette avec tassement contrôlé.

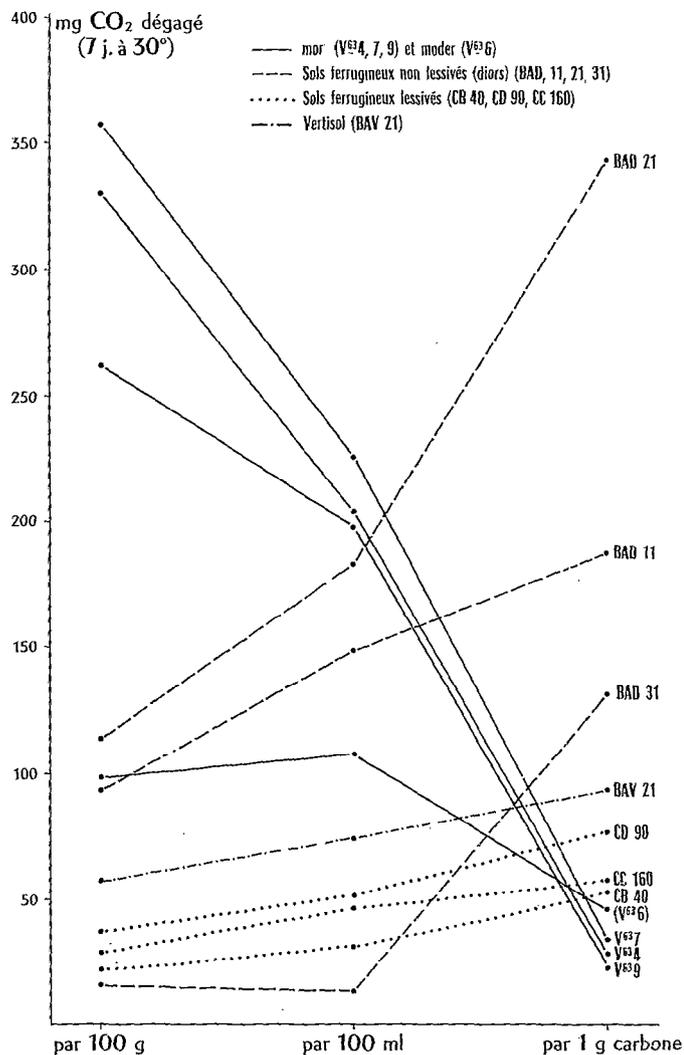


FIG. 7. — CO<sub>2</sub> dégagé par 100 g, 100 ml ou 1 g de carbone total de divers sols tamisés à 2 mm.

leur dégagement de gaz carbonique par rapport à 100 mg de sol tamisé, à des mottes sèches de 100 ml, à des mottes saturées d'eau de 100 ml et enfin à 1 g de carbone total. Les échantillons 10 et 40, les plus riches en carbone (16,8 et 12,7 %) correspondent à des matelas de racines superficiels. L'échantillon 60 correspond à un horizon organique très riche en racines et galeries de vers (C = 10,7 %). Ces échantillons ont une faible densité mais retiennent bien l'eau, d'où leurs courbes sur la figure 8. Par contre, l'échantillon 91, qui ne renferme que 6,2 % de carbone, correspond à un horizon organique argileux et tassé par le piétinement du bétail, d'où sa densité assez forte et le profil de sa courbe, identique à celles des autres échantillons moins organiques et plus denses.

Rappelons que pour les mesures in situ du dégagement de CO<sub>2</sub>, les résultats sont exprimés en « mg CO<sub>2</sub> p. m<sub>2</sub> et p. heure ».

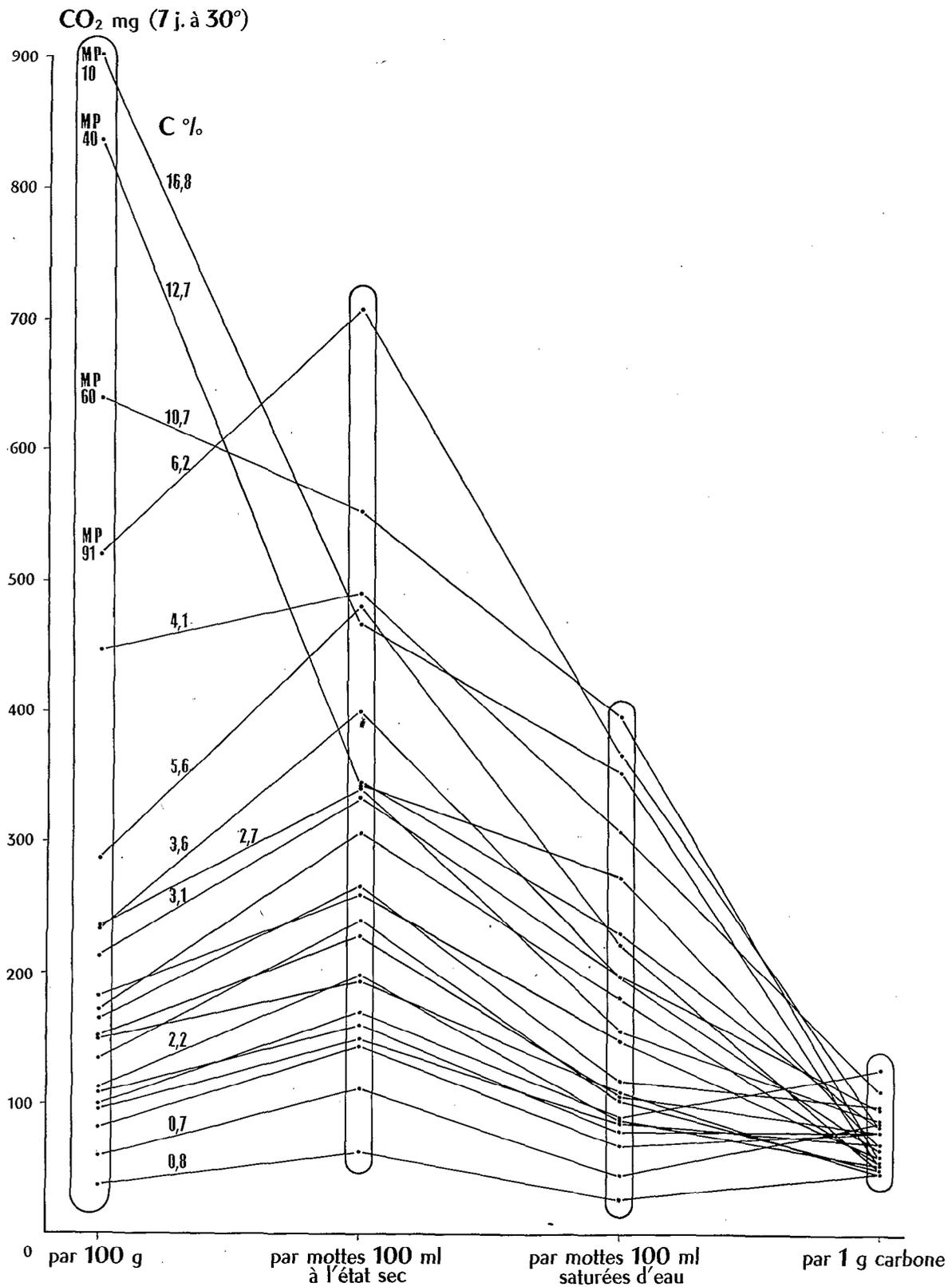


FIG. 8. — CO<sub>2</sub> dégagé par des sols halomorphes argileux du Marais Poitevin (éch. M.P.). Mesure faite sur terre 2 mm séchée à l'air et réhumidifiée. Résultats exprimés par rapport à un poids de terre, à un volume de terre sèche, à un volume de terre saturée d'eau ou à 1 g de carbone total.

# Minéralisation du carbone des sols

## A. FACTEURS INFLUENÇANT LA MINÉRALISATION DU CARBONE

### 1. FACTEURS CLIMATIQUES

#### 1a. Humidité et pF

La minéralisation du carbone est pratiquement stoppée dans les échantillons secs à l'air à pF voisin de 6. DOMMERGUES (1962) a montré que dans les sols, la glucolyse pouvait démarrer à pF 5,4, l'amylolyse à pF 5,0-5,2 et la cellulolyse à pF 4,0-4,5. Cet auteur a montré que dans les sols n'ayant reçu aucun apport, la minéralisation du carbone démarrait généralement entre les pF 5,2 et 4,2 selon les sols ; les sols ferrugineux tropicaux lessivés, les sols d'argile noire tropicale et le sol hydromorphe étudiés par cet auteur manifestèrent des seuils de minéralisation du carbone plus élevés que les sols ferrugineux tropicaux peu ou pas lessivés et le sol ferrallitique soumis à la même étude (pF de 4,9 pour les premiers et pF compris entre 4,2 et 4,9 pour les seconds).

SEIFERT (1965) sur des échantillons non séchés a montré qu'avec l'accroissement de l'humidité le nombre de bactéries augmente régulièrement jusqu'à un maximum d'autant plus élevé qu'on passe d'un sol podzolique à un sol brun forestier, à un chernozem et à une rendzine. Ce maximum se situe à 50 % d'humidité pour le sol podzolique, 60 % pour le sol brun forestier et le chernozem, 90 % pour la rendzine. Passé ce maximum, le nombre de bactéries rediminue d'autant plus fortement que l'on passe de la rendzine (droite régulière), au chernozem (courbe en canne), au sol brun forestier (courbe en cloche non terminée) et au sol podzolique (courbe en cloche complète).

D'une manière générale, la minéralisation du carbone pratiquement inexistante au-dessus de pF 5 démarre rapidement avec la diminution du pF. Elle peut déjà être très active à pF 4,2 qui correspond au point de flétrissement, elle augmente régulièrement jusqu'à pF 2,5 (la rétention d'eau correspond à pF 3 pour les sols argileux et à pF 2 pour les sols sableux), puis son augmentation s'infléchit rapidement et elle se maintient ensuite en un long palier plus ou moins bombé de pF 2,2 à pF 1. Elle rediminue alors avec les boues collantes puis les boues liquides, tout en se maintenant à un niveau au moins égal à celui de pF 4,2 dans les sols submergés.

L'importance de l'humidité dans les variations saisonnières du dégagement de gaz carbonique aux champs sera vue au chapitre 4.

Pour ce qui est de son importance dans les mesures de laboratoire, elle a déjà été fort étudiée par de nombreux auteurs, aussi ne l'illustrerons-nous ici que par les courbes de la figure 9 concernant des échantillons de sol séchés à l'air et réhumidifiés ensuite par adjonction directe d'eau avec malaxage et repos avant mesure. Il est à noter que dans ces courbes la respiration des échantillons à très faible humidité, et notamment celle des échantillons secs à l'air, n'est pas nulle ou tout au moins insignifiante, du fait que les échantillons se trouvant dans les bocaux de mesure au contact d'une atmosphère humide se sont progressivement mis en équilibre avec cet atmosphère.

Les courbes de la figure 9 confirment les observations de BERNIER (1960) qui avait noté, en étudiant le métabolisme respiratoire de divers humus forestiers, que la respiration optima de ces échan-

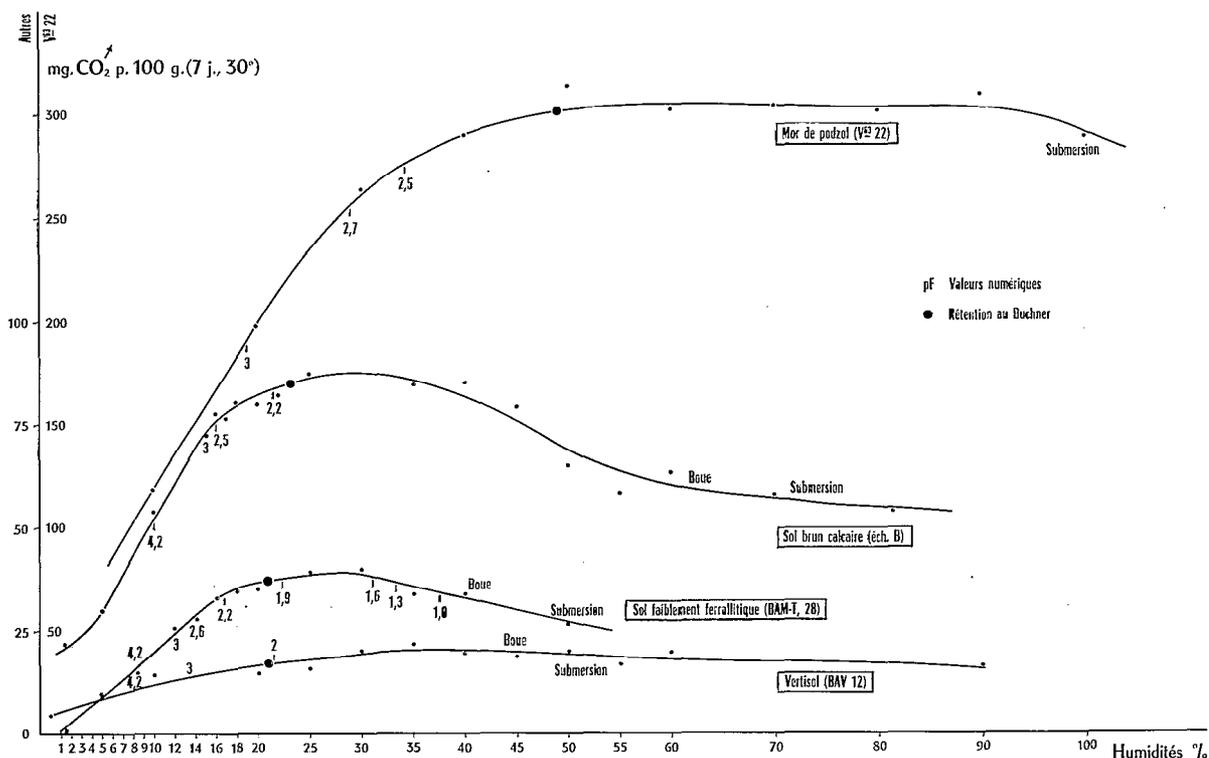


Fig. 9. — Influence de l'humidité sur la minéralisation du carbone.

tillons correspondait à une humidité égale à 120-160 % de celle de leur rétention d'eau à pF 2,7. Ici, l'échantillon B offre sa respiration la plus élevée à une humidité approximativement égale à 120 % de celle correspondant à pF 2,7, l'échantillon BAM 28 à une humidité égale à 160 % de cette même humidité et l'échantillon Ves 22 à une humidité égale à 169 %. ELKAN et MOORE (1960) ont aussi observé que la minéralisation du carbone dans une terre franche limono-argileuse (loam) était maxima pour une humidité de 30 %, bien que les bactéries aérobies, les actinomycètes et les champignons soient alors en partie inhibés au profit de bactéries plus anaérobies, de champignons hydrophiles et d'algues.

Pour toutes nos mesures de laboratoire sur échantillons préalablement séchés, rappelons que nous avons adopté comme humidité de réhumidification de ces échantillons leur rétention d'eau sous dépression de 75 cm de mercure ; cette rétention d'eau correspond approximativement selon les sols à pF 2 - 2,2 et d'une manière plus générale à la rétention d'eau aux champs. Bien que la respiration maxima des sols paraisse se situer à une humidité légèrement supérieure à cette valeur, nous avons cependant pensé préférable d'adopter cette dernière, étant donné sa réalité physique dans la nature et sa facilité de mesure à la fois précise et reproductible.

Les conséquences de la dessiccation des sols sur le dégagement de CO<sub>2</sub> seront traitées au § B.

**1b. Température**

Il est connu que la cinétique des phénomènes chimiques suit les lois de Van't Hoff et d'Arrhénius et que, pour un accroissement de 10 °C au voisinage de la température ordinaire, l'accélération des phénomènes chimiques est de l'ordre de 2 à 4 ( $Q_{10} = 2 \text{ à } 4$ ).

Toutefois, concernant les réactions biochimiques, il est à observer que si la température, contrairement à l'humidité, n'influence de 0° à 30° que très peu le nombre de bactéries et n'en modifie que l'activité (ROSS, 1964) (SEIFERT, 1965), elle tend par contre à accélérer puis à réduire les activités enzymatiques. De plus, pour les échantillons de sol, le dégagement de CO<sub>2</sub> dépend non seulement de leur teneur en carbone immédiatement minéralisable, mais aussi de leur teneur en carbone total susceptible de devenir facilement minéralisable dans le temps d'incubation de la mesure. Or, la minéralisation

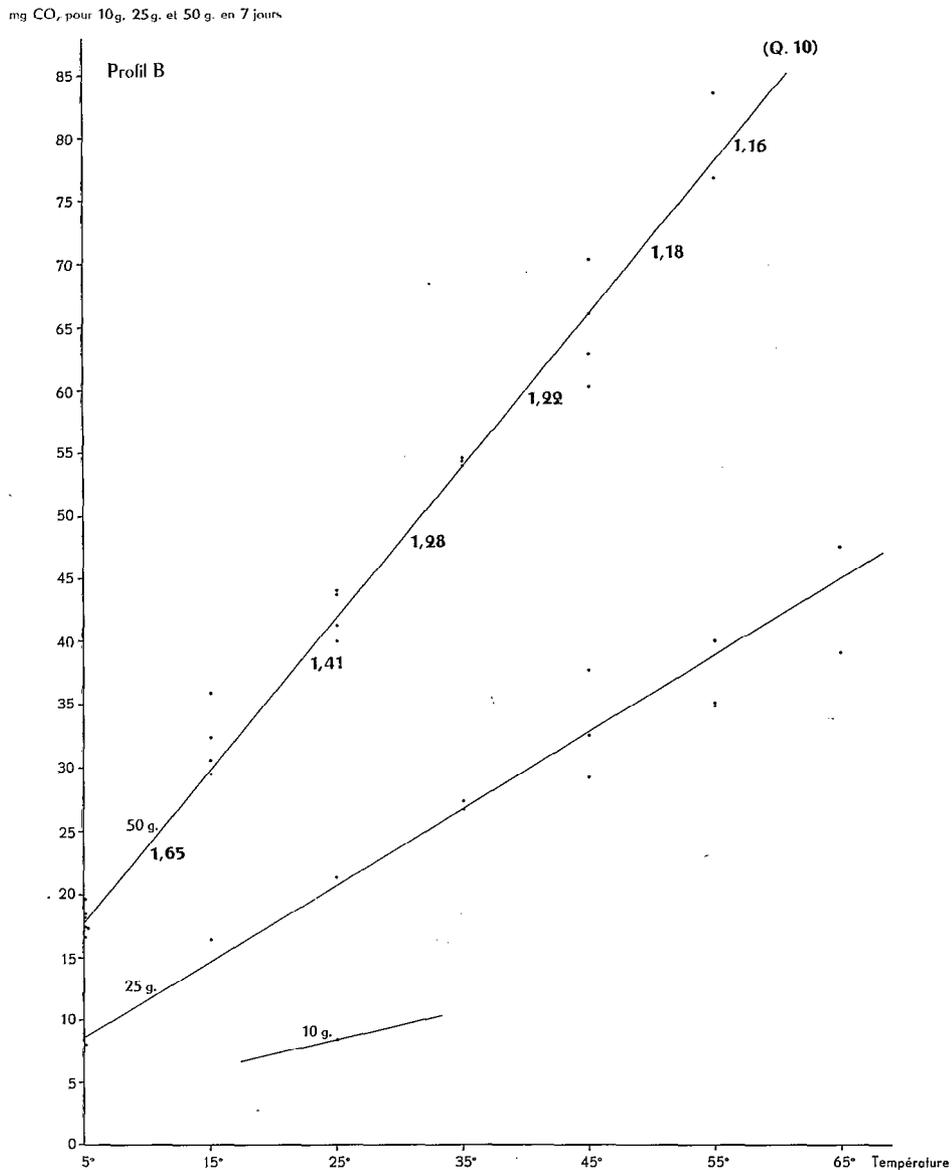


FIG. 10. — Influence de la température sur la respiration d'un sol brun calcaire. Proportionnalité des respirations pour des échantillons de poids différent.

du carbone et l'évolution des matières organiques sont liées à la nature des matières organiques, à la microflore, aux enzymes et donc en fin de compte à la nature et au dynamisme même des sols.

Les figures 10 à 15 montrent l'influence de la température sur le dégagement de gaz carbonique de divers sols de nature très différente.

Pour l'échantillon humifère de sol brun calcaire (à 1,07 % de carbone total) (cf. fig. 10)<sup>1</sup>, le dégagement de CO<sub>2</sub> est fonction linéaire de la température de 5° à 65° avec un Q.10 passant de 1,65 (5° à 15°) à 1,16 (55° à 65°). Le Q.10 < 2 des basses températures s'explique par la « protection » du carbone minéralisable dans ce sol ; sol qui est à la fois à humus de type mull, de nature calcaire, et à argile calcique énergiquement flocculée. L'accroissement de minéralisation du carbone avec l'augmentation de température est freinée au départ (de 5° à 15°) par la libération difficile du carbone minéralisable, et ensuite, au-dessus de 35° à 45°, par l'action labile possible de la température sur la microflore et les enzymes du sol. Ce sol brun calcaire est cependant biologiquement bien « tamponné » et une certaine décarbonatation chimique peut par ailleurs aux fortes températures (55° à 65°) compenser l'affaiblissement du dégagement de CO<sub>2</sub> d'origine biochimique, d'où la non-inflexion de la courbe du dégagement de CO<sub>2</sub> aux températures élevées, et cela bien qu'à 55°, 14,6 % du carbone total soit déjà minéralisé.

Avec les autres sols, correspondant aux figures 11, 12, 13 et 14, l'aspect linéaire de la proportion-

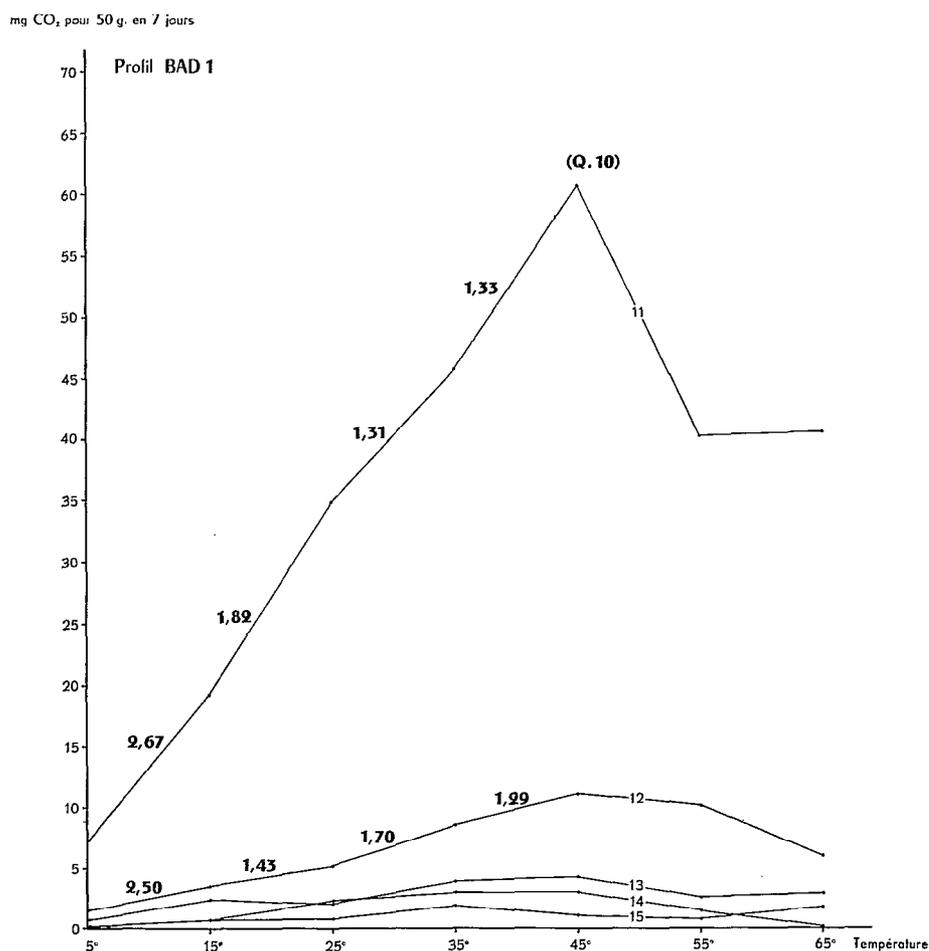


FIG. 11 (suite fig. 11 page suivante).

1. Nous pouvons aussi vérifier sur ce graphique que le dégagement de CO<sub>2</sub> est bien proportionnel au poids de l'échantillon, et qu'en conséquence les gaz diffusent bien à travers.

mg CO<sub>2</sub> pour 50 g. en 7 jours

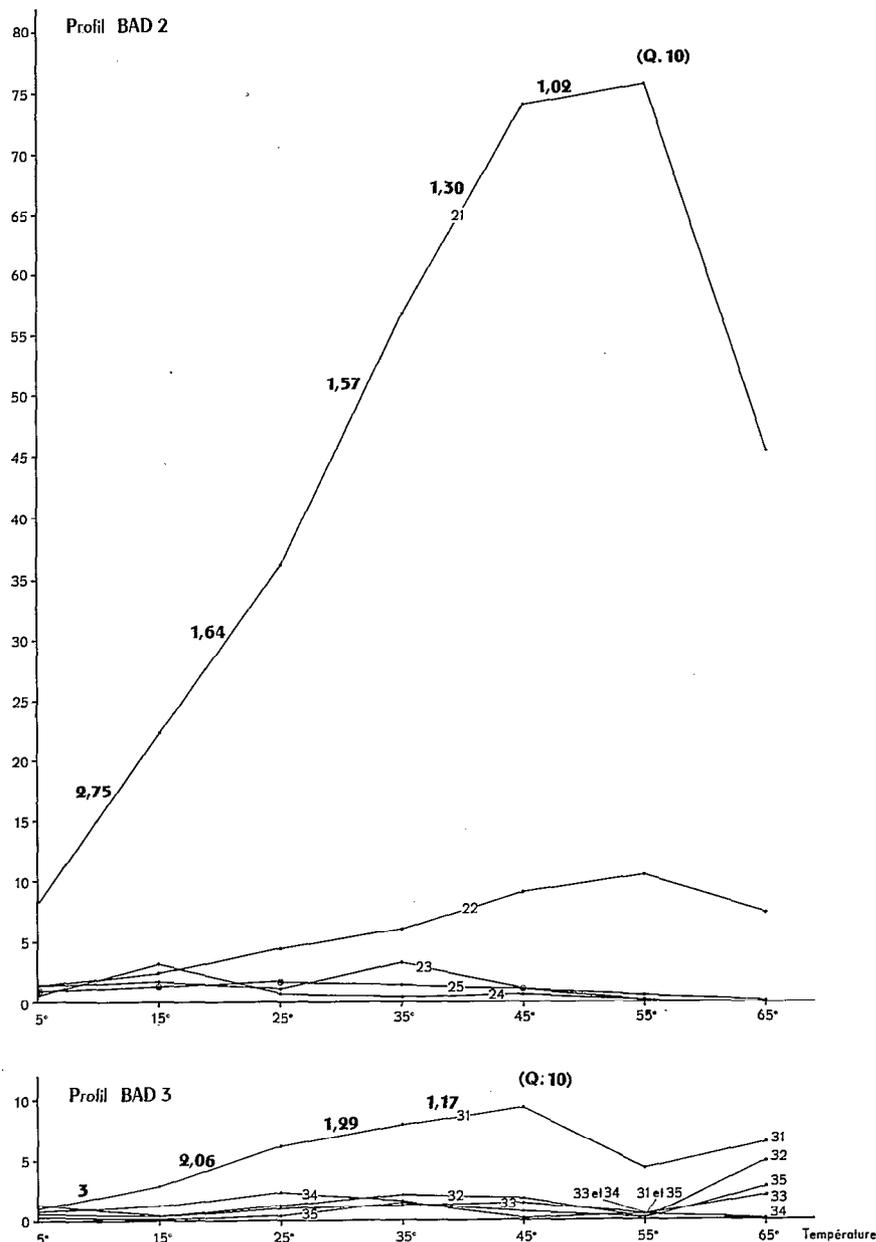


FIG. 11. — Influence de la température sur la respiration de 3 sols ferrugineux peu lessivés et sableux (sols diors).

nalité entre le dégagement de CO<sub>2</sub> et la température est moins net et n'existe plus tout au long de l'échelle des températures. Il est intéressant d'observer que les valeurs du dégagement de CO<sub>2</sub> en fonction de la température dessinent, avec les différents horizons d'un même profil, un ensemble de courbes caractéristiques du type de sol.

Pour les *sols diors* (sols ferrugineux peu lessivés et sableux) de la figure 11, l'horizon supérieur de ces sols est pauvre en carbone (BAD 11 = 0,49 %, BAD 21 = 0,33 % et BAD 31 = 0,12 %), mais ce carbone est très facilement minéralisable, d'où sa brutale minéralisation que souligne un Q.10 > 2,5 entre 5° et 15°. Les horizons sous-jacents de ces sols sont plus pauvres en carbone (respectivement

0,26 %, 0,22 % et 0,15 %) et dégagent beaucoup moins de  $\text{CO}_2$ , mais présentent le même infléchissement des courbes au-dessus de  $45^\circ$ . Les horizons plus profonds renferment très peu de carbone et, ce dernier étant par ailleurs peu minéralisable, le dégagement de  $\text{CO}_2$  reste faible. Ici aussi, le Q.10 diminue régu-

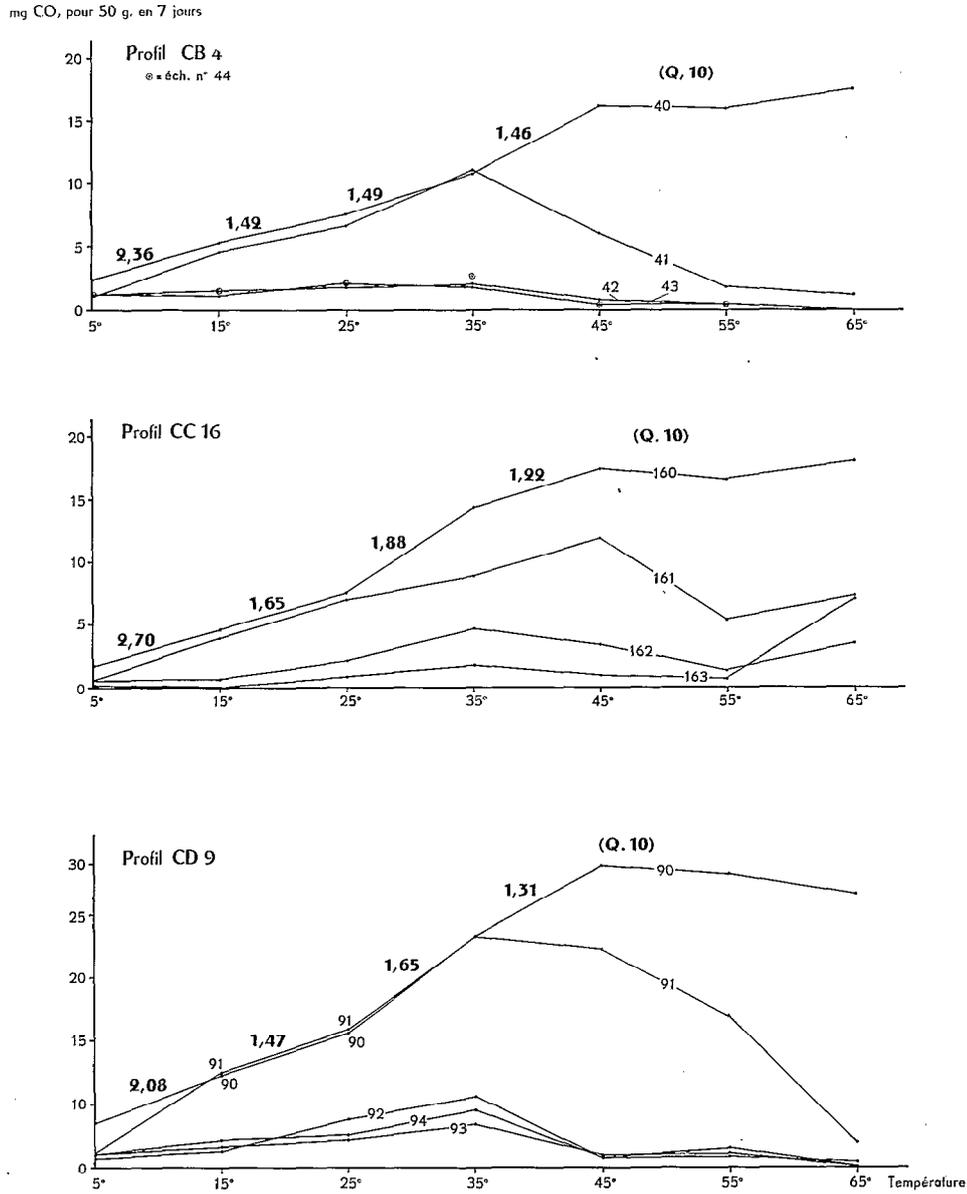


FIG. 12. — Influence de la température sur la respiration de 3 sols ferrugineux lessivés, sableux en surface et argilo-sableux en profondeur.

lièrement avec l'élévation de température et la minéralisation d'un carbone de moins en moins accessible, car dans ces sols le carbone immédiatement minéralisable peut facilement s'épuiser. 24,8 % du carbone total sont minéralisés à  $45^\circ$  dans BAD 11, 45 % dans BAD 21 et 15,7 % dans BAD 31, avec seulement 8,5 % dans BAD 12 et 9,4 % dans BAD 22, horizons sous-jacents.

Pour les *sols ferrugineux lessivés*, sableux en surface et argilo-sableux en profondeur (cf. fig. 12), les deux horizons supérieurs (0-10 cm et 20-30 cm) dégagent autant de  $\text{CO}_2$  l'un que l'autre jusqu'à  $35^\circ$ .

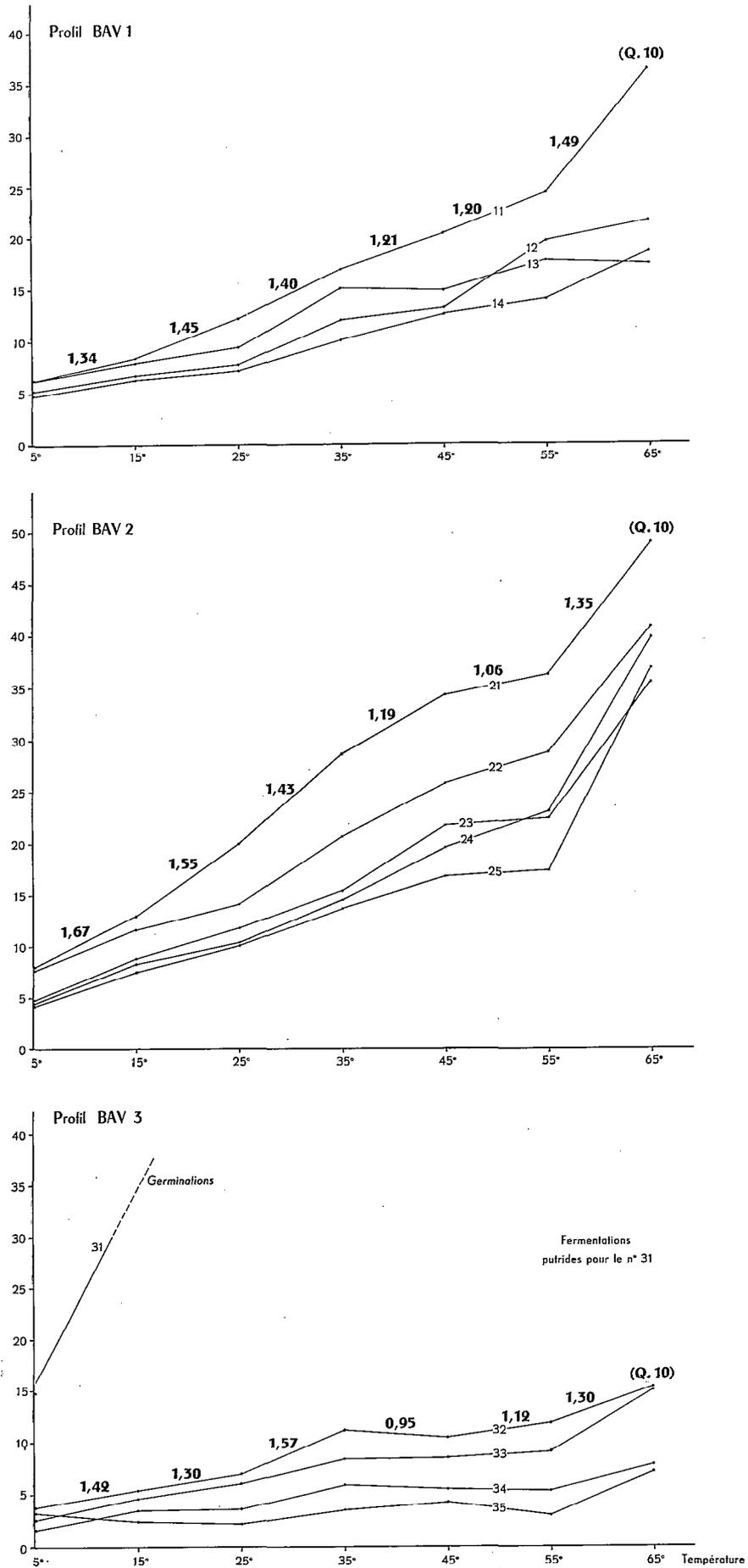


FIG. 13. — Influence de la température sur la respiration de 3 vertisols.

L'horizon de surface est plus riche en carbone total que l'horizon sous-jacent<sup>1</sup>, mais par suite du lessivage de ces sols une fraction importante du carbone aisément minéralisable s'est trouvée entraînée dans l'horizon 20-30 cm. Alors qu'au-delà de 35°, le dégagement de CO<sub>2</sub> de l'horizon supérieur croît encore jusqu'à 45° puis plafonne, le dégagement de CO<sub>2</sub> de l'horizon sous-jacent s'abaisse brutalement

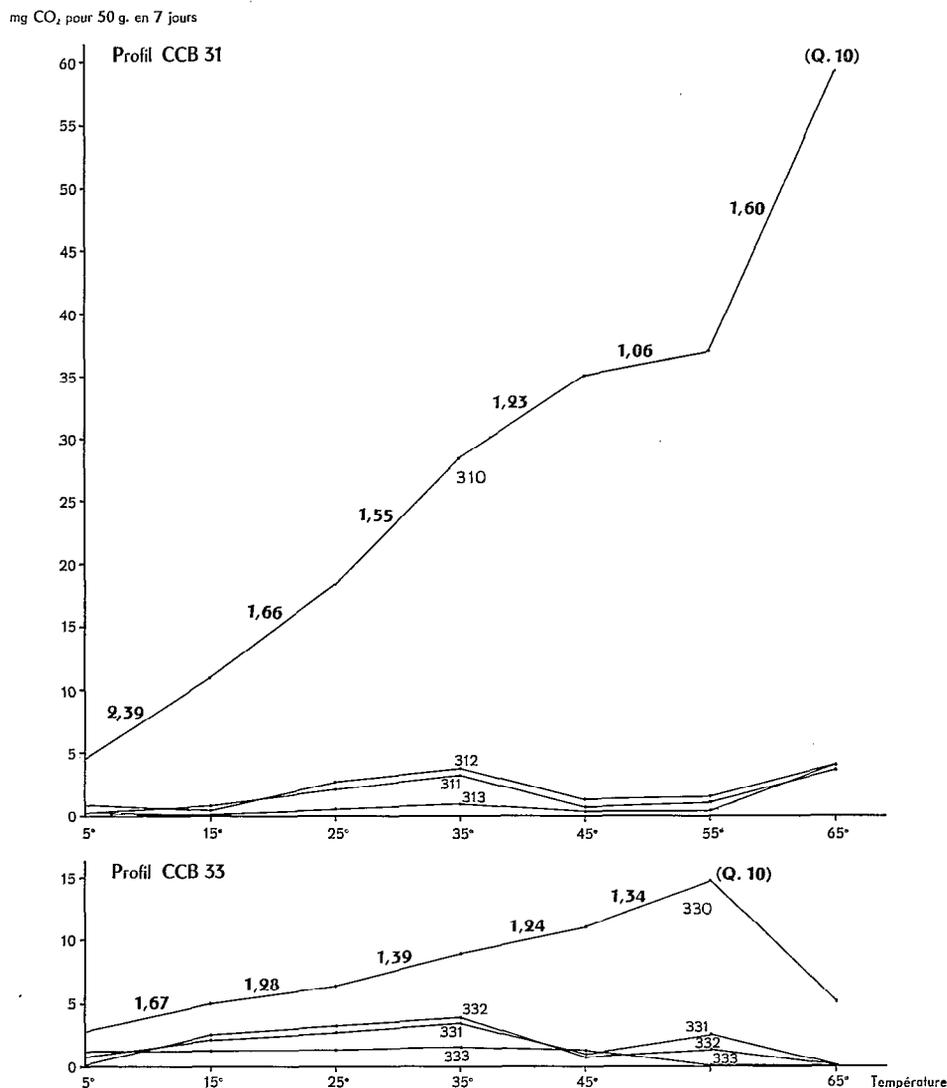


FIG. 14. — Influence de la température sur la respiration de 2 sols hydromorphes.

jusqu'à 65°, où il rejoint le dégagement de CO<sub>2</sub> très faible des horizons profonds. Là encore, le Q.10 compris entre 2 et 2,7 entre 5° et 15° s'abaisse progressivement jusqu'à 1,2-1,4 à 35°-45°.

Pour les *Vertisols* (cf. fig. 13), le dégagement de CO<sub>2</sub> dans les différents horizons des profils croît linéairement avec la température jusqu'à 55°, température à partir de laquelle la décomposition chimique du calcaire redresse alors la courbe de dégagement de CO<sub>2</sub>. Nous verrons en étudiant les

1. Carbone total :

CB 40 = 0,41 %	CD 90 = 0,48 %	CC 160 = 0,50 %
CB 41 = 0,32 %	CD 91 = 0,30 %	CC 161 = 0,37 %

coefficients de minéralisation que dans les vertisols, contrairement à la plupart des autres sols, le carbone y est d'autant plus facilement minéralisable qu'il appartient à un horizon plus profond, d'où à travers ces profils une diminution régulière du carbone total compensée par une minéralisation plus facile, ce qui fait que dans les mesures de laboratoire le dégagement de CO<sub>2</sub> des horizons profonds reste important et peu inférieur à celui des horizons supérieurs.

Le carbone de ces sols est très fortement protégé étant donné l'importance de l'argile, sa nature (fort pourcentage de montmorillonite) et son état très flocculé, avec un complexe d'absorption essentiel-

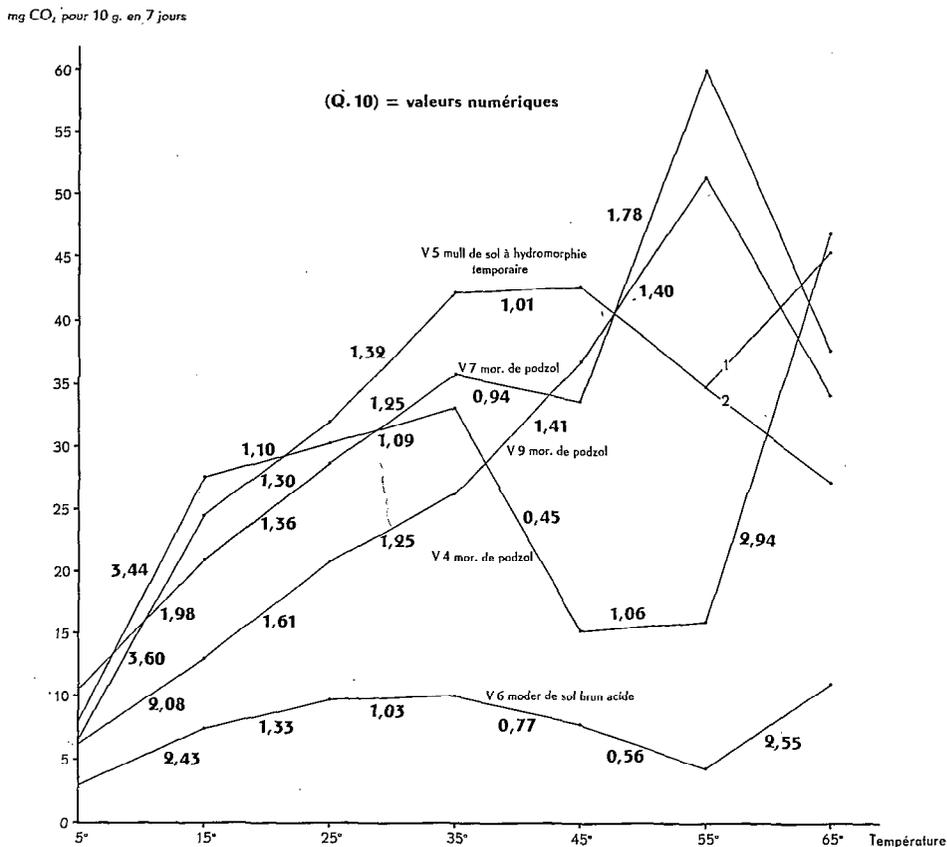


FIG. 15. — Influence de la température sur la respiration d'horizons organiques de sols de région tempérée.

lement calcique. Comme pour le sol brun calcaire (éch. B), le Q.10 est ici aussi inférieur à 2 (et souvent même 1,5) entre 5° et 15°, avec une lente diminution de cette valeur jusqu'à 1-1,2 entre 45° et 55°. La remontée du Q.10 entre 55° et 65° est due, nous l'avons vu, à la décomposition endothermique du calcaire.

Dans la nature, le carbone minéralisable des horizons profonds des vertisols reste protégé par la nature argileuse de ces sols et la période de submersion de la saison des pluies.

Les 2 sols hydromorphes étudiés (cf. fig. 14) ne possèdent une certaine teneur de carbone total que dans leur horizon de surface<sup>1</sup> et de par leur nature sableuse se rapprochent des graphiques obtenus avec les sols diors, encore que l'échantillon CCB 310, comme pour les vertisols, voit son dégagement de CO<sub>2</sub> croître au-dessus de 55° avec le démarrage d'une réaction de nature non enzymatique.

La figure 15 réunit quelques horizons organiques de sols vosgiens qui montrent bien la diversité

1. CCB 310 = 0,86 %      CCB 330 = 0,43 %  
 311 = 0,12 %      331 = 0,10 %

et l'incertitude possible des dégagements de  $\text{CO}_2$  au-dessus de  $35^\circ$ . L'échantillon  $V^{63-5}$  (mull de sol à hydromorphie temporaire, limono-argileux, et intensément colonisé par les vers) offre une courbe en cloche, qui à  $55^\circ$  peut selon les expériences soit poursuivre sa descente, soit au contraire remonter brutalement avec le démarrage d'une réaction non enzymatique. Ce même phénomène de reprise du dégagement de  $\text{CO}_2$  s'observe à  $55^\circ$  sur les courbes des échantillons  $V^{63-4}$  (mor de podzol) et  $V^{63-6}$  (moder de sol brun acide). Par contre, pour les courbes des échantillons  $V^{63-7}$  et  $V^{63-9}$  (mor de podzol), une réaction chimique non enzymatique accroît le dégagement de  $\text{CO}_2$  de  $45^\circ$  à  $55^\circ$  pour  $V^{63-7}$  et de  $35^\circ$  à  $55^\circ$  pour  $V^{63-9}$ , après quoi ce dégagement diminue fortement de  $55^\circ$  à  $65^\circ$ .

Le carbone est très abondant dans ces différents horizons humifères ( $V^{63-4} = 11,8\%$ ,  $V^{63-5} = 4,2\%$ ,  $V^{63-6} = 2,2\%$ ,  $V^{63-7} = 10,4\%$ ,  $V^{63-9} = 11,8\%$ ), mais en dehors de l'échantillon  $V^{63-5}$ , ces horizons humifères sont tous de type humus brut à évolution acide, et une très faible fraction seulement du carbone en est facilement minéralisable (cf. fig. 7, p. 28 et « quotients de minéralisation », p. 77). De plus, ces sols sont sableux, leur carbone minéralisable n'est pas du tout protégé et devient rapidement difficilement accessible à la minéralisation, d'où des  $Q_{10}$  d'abord de 2 à 3,6 de  $5^\circ$  à  $15^\circ$ , avec ensuite brutale diminution à 1,1-1,6 à  $15^\circ$ - $25^\circ$  et 1-1,3 à  $25^\circ$ - $35^\circ$ .

En conclusion, pour une humidité donnée, la minéralisation du carbone des échantillons de sol est généralement fonction linéaire de la température jusqu'à  $35^\circ$  ou  $45^\circ$  selon les sols. Cette minéralisation du carbone résulte de réactions catalysées liées à la pédoflore et aux enzymes du sol.

La température tend tout d'abord à accroître la minéralisation du carbone pour ensuite la freiner à partir de  $35^\circ$  ou  $45^\circ$  en perturbant la pédoflore et en inactivant les enzymes.

Le carbone minéralisé en premier est aussi le plus facilement minéralisable ; le  $Q_{10}$  diminue régulièrement avec l'élévation de température, et ce plus ou moins vite selon la nature et l'aptitude à se dégrader et à se minéraliser du carbone qui suit.

Les sols peu organiques et peu tamponnés biologiquement, où le carbone minéralisable n'est pas « protégé » (sols diors et sols ferrugineux lessivés), ont de  $5^\circ$  à  $15^\circ$  un  $Q_{10}$  plus grand que 2. Il en est de même pour les horizons humifères sableux à humus brut acide des podzols et des sols podzoliques, où le carbone minéralisable n'est pas non plus « protégé ». Par contre, dans le sol brun calcaire et les vertisols, où la matière organique fine et la fraction colloïdale sont intimement liées, le  $Q_{10}$  de  $5^\circ$  à  $15^\circ$  est proche de 1,5.

Aux températures élevées, de  $45^\circ$  à  $55^\circ$  selon les sols, diverses réactions catalytiques et endothermiques peuvent brutalement accroître le dégagement de  $\text{CO}_2$ . La décomposition du calcaire dans les divers horizons des vertisols à  $55^\circ$  en est un exemple.

Le dégagement de  $\text{CO}_2$  en fonction de la température donne pour les différents horizons d'un même profil un ensemble de courbes caractéristique du type de sol.

En faisant varier à la fois l'humidité et la température, il est possible d'établir d'intéressants blocs-diagrammes, tel celui de TAMM et KRYZSCH (1963) obtenu avec un sol sablo-limoneux (sandy loam).

## 2. FACTEURS PÉDOLOGIQUES

### 2a. Surface des agrégats ; effet de broyage et structure

ROVIRA et GREACEN (1957) ont observé que la rupture des agrégats du sol accroissait l'activité des microorganismes en libérant des substances organiques difficilement accessibles. GREENWOOD et GODMAN (1964), travaillant avec des agrégats artificiels, ont cherché à établir une équation reliant la taille des agrégats du sol à leur respiration. PARR et NORMAN (1964), travaillant avec des micropertes de verre, ont montré que la dégradation du glucose, mesurée par le dégagement de  $\text{CO}_2$  et effectuée par des populations microbiennes mixtes ou des cultures pures, était étroitement liée à la taille des micropertes de verre, les plus forts dégagements et totaux cumulatifs pouvant pour des cultures différentes correspondre à des micropertes de dimensions différentes. STORZKY (1966), étudiant l'influence

des minéraux argileux sur les microorganismes, a aussi fait ressortir l'importance de la taille des particules et de la surface interne du sol sur son activité bactérienne.

Nous avons cherché à voir quelle pouvait être d'une part l'influence du broyage de l'échantillon sur son dégagement de gaz carbonique et comment d'autre part le carbone minéralisable se répartissait au sein des différentes classes d'agrégats naturels. Deux échantillons de sol ont été choisis pour cela : un échantillon 0-10 cm de sol rouge ferrallitique très argileux du Cameroun (BAC 64-11) et un échantillon 0-20 cm de sol brun calcaire sablo-argileux (B).

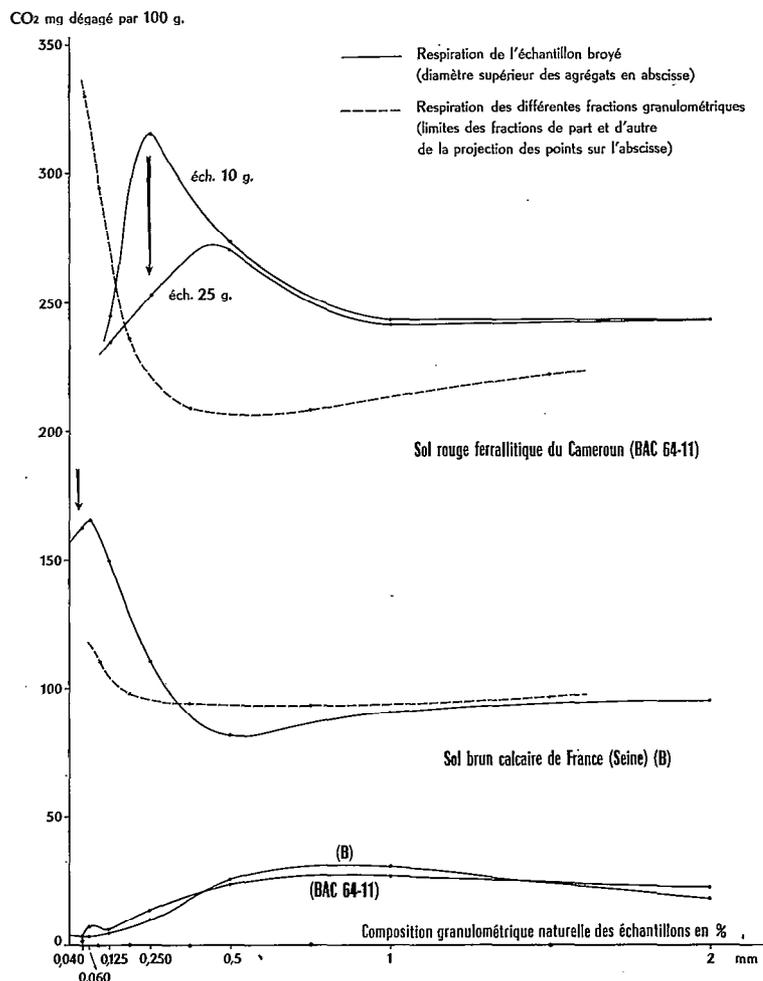


FIG. 16. — Influence du broyage sur la respiration des sols et respiration comparée des différentes classes d'agrégats composant l'échantillon non broyé.

Les courbes de la figure 16 montrent que dans les deux cas, la respiration croît avec le broyage : en dessous de 1mm pour le sol ferrallitique et en dessous de 0,5 mm pour le sol brun calcaire. Toutefois, passée une certaine finesse de broyage de l'échantillon, le dégagement de CO<sub>2</sub> diminue, car le gaz a du mal à diffuser à travers l'échantillon mouillé, dont la structure est alors trop fine. Ceci est confirmé par le dégagement de CO<sub>2</sub> mesuré avec différentes épaisseurs de sol ; ainsi, dans le cas du sol ferrallitique plus ou moins finement broyé, le maximum de dégagement est plus rapidement atteint et s'avère plus faible avec 25 g qu'avec 10 g.

De plus, la porosité du sol brun calcaire étant supérieure à celle du sol ferrallitique, le carbone

facilement minéralisable et protégé n'apparaît dans le sol brun calcaire qu'à partir d'un broyage plus poussé : à partir de 0,5 mm au lieu de 1 mm, comme c'est le cas avec le sol ferrallitique. Pour la même raison, les difficultés de diffusion du  $\text{CO}_2$  à travers l'échantillon se manifestent aussi plus tôt dans le sol ferrallitique que dans le sol brun calcaire, comme le soulignent les flèches noires de la figure 16.

Si maintenant on tamise les échantillons sans les broyer, et qu'on mesure le dégagement de  $\text{CO}_2$  des différentes classes d'agrégats naturels, on voit (courbes en tiretés de la figure 16) que les classes d'agrégats les plus fines sont celles qui renferment le plus de carbone immédiatement minéralisable. Mais, comme d'autre part ces classes d'agrégats sont aussi les moins représentées dans la composition granulométrique naturelle de nos échantillons de sol, on peut considérer qu'en fait dans ces derniers, chaque classe d'agrégats y respire à peu près autant. Il n'en demeure pas moins que le carbone immédiatement minéralisable apparaît dans les sols se localiser principalement au niveau des colloïdes argileux et des limons fins ; ces éléments peuvent d'autant mieux protéger le carbone au sein des agrégats que ces derniers sont moins poreux et plus stables (Is de 0,57 pour l'échantillon BAC 64-11 et Is de 1,5 pour l'échantillon B).

En conclusion, les colloïdes argileux et les limons fins peuvent, plus ou moins selon la structure du sol, sa stabilité et sa porosité, protéger une fraction importante du carbone minéralisable. La rupture mécanique des agrégats peut à l'inverse libérer ce carbone et lui permettre de se minéraliser, pour autant que la compacité du sol broyé ne nuise pas à l'échange normal des gaz.

## 2b. Stabilité structurale

La relation de la stabilité structurale avec le dégagement de  $\text{CO}_2$  demande à être explicitée.

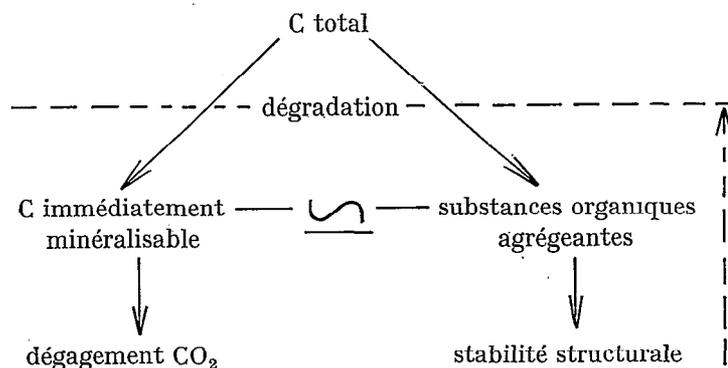
Quand pour une collection de sols de même nature, on porte en ordonnée le dégagement de  $\text{CO}_2$  en laboratoire pour 100 g de terre et en abscisse la stabilité structurale, on trouve généralement une bonne corrélation entre ces deux facteurs, comme le montrent les figures 17 et 18.

De nombreux auteurs ont observé que la stabilité structurale était, entre autres facteurs et au même titre que le dégagement de  $\text{CO}_2$ , étroitement fonction de la teneur en carbone total des sols. Nous verrons aussi en étudiant la minéralisation continue du carbone que la stabilité structurale des sols diminue régulièrement au cours de cette minéralisation (cf. § B). Mais en fait, seules quelques substances organiques bien déterminées peuvent avoir une action sur la structure des sols. COMBEAU et QUANTIN (1964) ont ainsi montré que la fraction humifiée de la matière organique (acides humiques et acides fulviques) n'avait pas d'action sur la structure des sols ferrallitiques<sup>1</sup>. Nous-même, dans un article de synthèse sur les sucres dans le sol et les divers facteurs de sa stabilité (BACHELIER, 1966a), avons souligné l'importance des glucides et plus particulièrement des produits de sécrétion de la microflore dans la formation des jeunes agrégats.

Pareillement, tout le carbone des sols n'est pas immédiatement minéralisable et depuis les débris végétaux ou les cadavres de la faune jusqu'aux substances organiques les plus simples, nombreuses sont les matières organiques qui jalonnent la dégradation, multiples sont les voies de cette dégradation, fréquentes les resynthèses, et plus ou moins importante l'édification temporaire des acides humiques. Seule une très faible fraction du carbone des sols peut se minéraliser dans le temps des mesures. La nature de ce carbone immédiatement minéralisable et le dynamisme de la dégradation des matières organiques seront envisagés dans les chapitres suivants. Il nous apparaît seulement ici nécessaire d'insister sur le fait que, si le dégagement de  $\text{CO}_2$  est généralement en bonne corrélation avec la stabilité structurale des sols, chacun de ces deux facteurs dépend en fait de certaines formes simples de matières organiques, connues comme étant de nature essentiellement glucidique (BACHELIER, 1966a) ; l'importance de ces matières organiques, énergétiques et à pouvoir structurant, est d'autant plus grande dans les sols que ces derniers sont plus organiques.

Le schéma suivant doit par suite être présent à l'esprit quand on parle de corrélations entre le dégagement de  $\text{CO}_2$  et la stabilité structurale.

1. Les acides humiques y ont par contre un rôle important sur la rétention d'eau.



*Premier exemple* : Collection homogène de 8 vertisols du Togo (8 échantillons 0-15 cm et 8 échantillons 15-30 cm).

La figure 17 nous montre qu'il existe une bonne corrélation hautement significative entre le dégagement de CO<sub>2</sub> et le logarithme de la stabilité structurale.

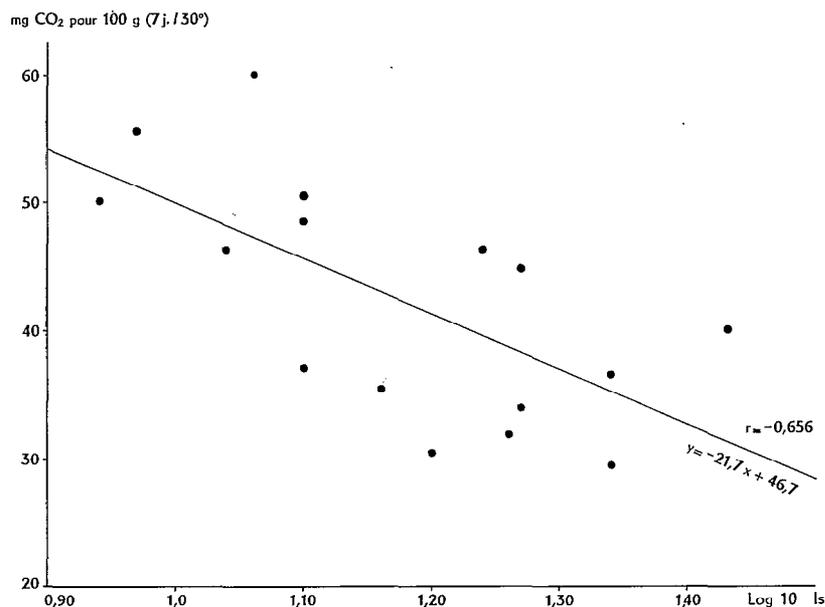


FIG. 17. — Relation entre le dégagement de gaz carbonique et la stabilité structurale dans des vertisols du Togo.

*Deuxième exemple* (BACHELIER, 1963c) : 53 échantillons d'un sol faiblement ferrallitique et modal de la Station agronomique de Bambari (République Centrafricaine). Ces 53 échantillons sont chacun la moyenne de 4 prélèvements effectués par QUANTIN dans l'horizon 0-15 cm du sol et représentent à eux tous 9 parcelles différentes :

- savane non cultivée :  
échantillon S ;
- culture continue de coton depuis 5 ans, sans apport :  
échantillons T ;
- culture continue de coton depuis 5 ans, avec paillis régulier de sissongos :  
échantillons P ;

- culture continue de coton depuis 5 ans, avec apport de fumier :  
échantillons F ;
- culture continue de coton depuis 5 ans, avec apport de fumier et paillis de sissongos :  
échantillons FP ;
- culture continue de coton depuis 5 ans, avec apport d'engrais minéraux (sulfate d'ammonium et phosphate tricalcique) :  
échantillons E ;
- culture continue de coton depuis 5 ans, avec apport d'engrais minéraux et paillis de sissongos :  
échantillons EP ;
- culture continue de coton depuis 5 ans, avec apport d'engrais minéraux et de fumier :  
échantillons EF ;
- culture continue de coton depuis 5 ans, avec apport d'engrais minéraux, de fumier et paillis de sissongos :  
échantillons EFP.

Une corrélation significative existe entre le dégagement de CO<sub>2</sub> et la stabilité structurale (fig. 18), ainsi qu'entre le dégagement de CO<sub>2</sub> et le carbone total (fig. 19)<sup>1</sup>. La nature du carbone influe sur le dégagement de gaz carbonique puisque si l'on exprime le CO<sub>2</sub> dégagé par rapport à 1 g de carbone, on trouve pour les divers échantillons des valeurs qui se répartissent ainsi :

	Dégagement CO <sub>2</sub> par gramme C
Échantillons T et E .....	de 24 à 33,7 mg
Échantillons P, F, EP et EF .....	de 30,8 à 47,7 mg
Échantillons FP et EFP .....	de 39,3 à 63,1 mg
(Échantillons S) .....	(de 47 à 61,8 mg)

Les engrais minéraux (E) n'apparaissent pas dans cet exemple avoir eu d'influence sur la minéralisation du carbone.

Une corrélation satisfaisante existe pour ces mêmes échantillons entre le carbone total et la stabilité structurale (COMBEAU, OLLAT et QUANTIN, 1961). La nature du carbone minéralisable influence moins nettement et certainement différemment la stabilité structurale. Celle-ci est ainsi fortement dégradée par la culture, comme le montre dans la figure 18 l'isolement de la parcelle S (sol en jachère), alors que le carbone organique de cette parcelle a la même capacité de minéralisation que celui des parcelles FP et EFP (cf. tableau ci-dessus).

En conclusion, les matières organiques en fonction des conditions du milieu se dégradent en donnant entre autres corps des substances énergétiques à pouvoir agrégeant qui commandent le dégagement de CO<sub>2</sub> et aussi en grande partie la stabilité structurale, raison pour laquelle le carbone immédiatement minéralisable apparaît dans les sols d'autant plus important que la stabilité structurale y est plus forte (faibles valeurs d'Is).

De plus, comme une même quantité de carbone organique se minéralise d'autant plus facilement dans le sol que celui-ci a une structure plus stable, on voit que la stabilité structurale peut elle-même influencer le dégagement de CO<sub>2</sub> par l'intermédiaire de son action sur la dégradation des substances organiques (ligne en tirets du schéma, p. 43).

Ce n'est là qu'un des multiples rouages du mécanisme infiniment complexe des interactions, qui déterminent l'équilibre et la dynamique des écosystèmes que constituent les sols.

1. Un coefficient de corrélation de Pearson ne peut être calculé valablement pour ces figures, car les populations y sont multimodales (les conditions de validité étant le caractère gaussien de chaque variable). Le coefficient de corrélation des rangs de Kendall (1962), qui est indépendant des fonctions de répartition des variables, a donc été choisi ici.

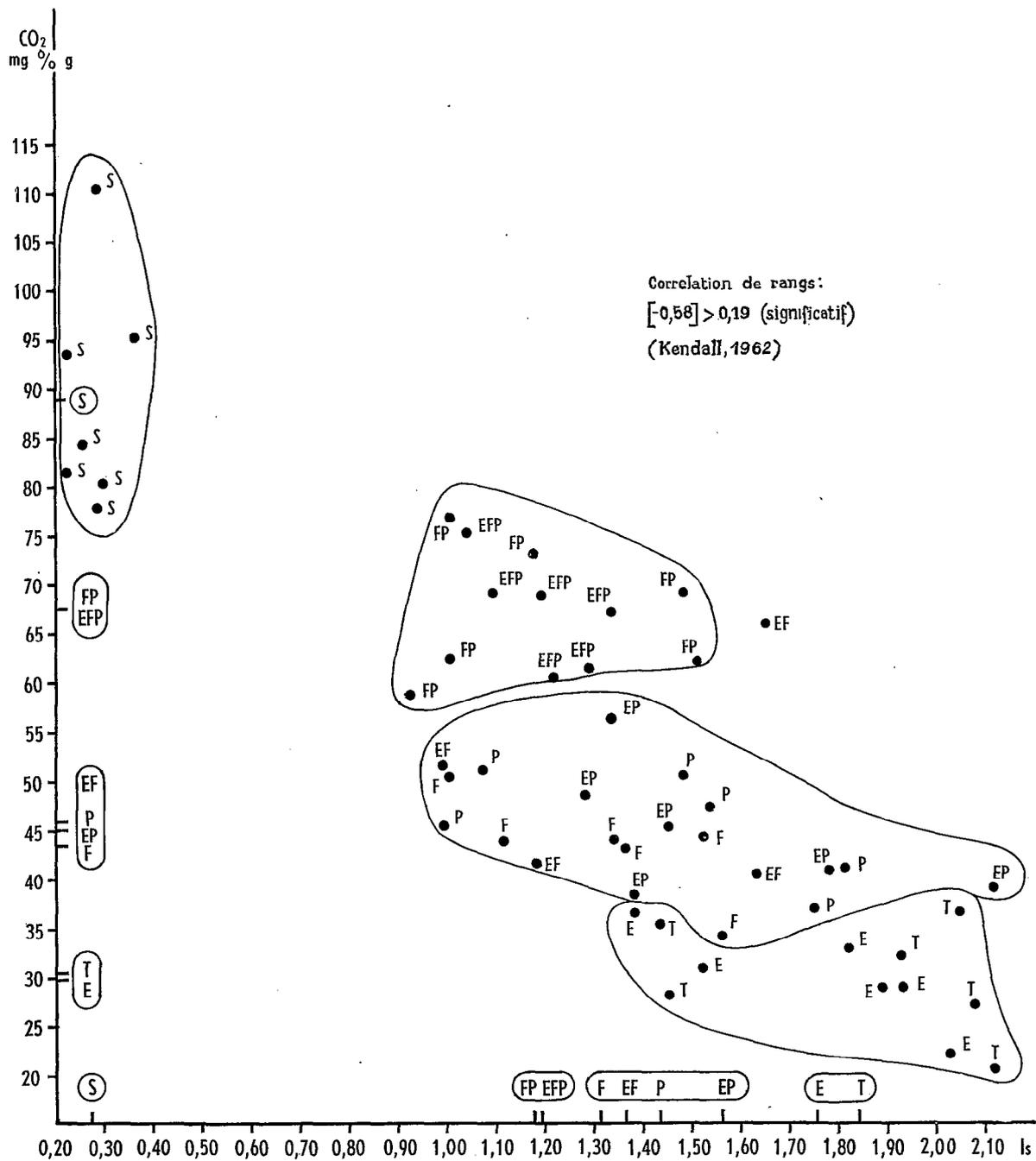


FIG. 18. — Relation entre le dégagement de gaz carbonique et la stabilité structurale (sol faiblement ferrallitique modal différemment cultivé).

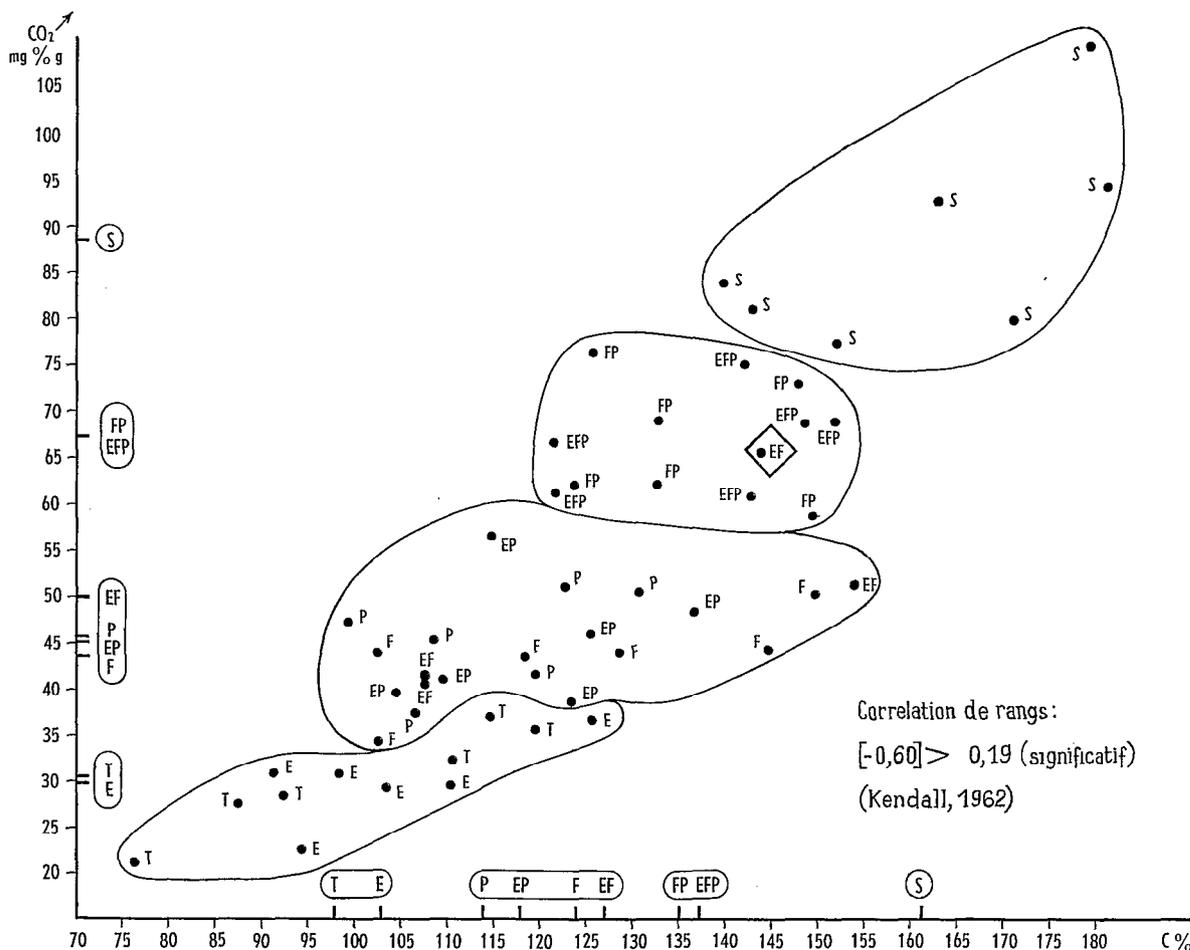


FIG. 19. — Relation entre le dégagement de gaz carbonique et le carbone (sol faiblement ferrallitique modal différemment cultivé).

## 2c. Teneur en carbonates

Les bicarbonates des sols se décomposent en carbonates en libérant du  $\text{CO}_2$ , quand le sol vient à se dessécher ou à être chauffé. Cette décarbonatation peut influencer fortement la production de  $\text{CO}_2$  des sols alcalins lors de leur dessèchement dans la nature (VADYUNINA et KORCHAGINA, 1965).

Dans les mesures de laboratoire sur échantillons préalablement séchés et ensuite réhumidifiés à la rétention, les bicarbonates sont en grande partie disparus ayant été détruits au cours du séchage, et le  $\text{CO}_2$  issu pendant l'incubation de la minéralisation du carbone organique, aurait au contraire d'autant plus tendance à être retenu par le sol que celui-ci est plus riche en carbonates et en éléments alcalins échangeables.

Par contre, au cours des mesures, avec la minéralisation du carbone organique et la reprise de la vie microbienne, se trouvent libérés des acides organiques qui, eux, peuvent favoriser la décarbonatation des sols. Ce processus, qui n'apparaît pas important à l'échelle de la mesure de sept jours, ne doit cependant pas être à négliger dans les expériences de minéralisation du carbone à plus longue échéance.

Dans les terres acides (podzols, sols podzoliques et sols bruns acides) qui ont été chaulées, une très nette décarbonatation abiotique peut être observée ; elle démarre à pH 6,5-7 et son importance

comme sa durée augmentent avec le pH (BECKMANN et SCHARPENSEEL, 1964). Ce n'est d'ailleurs que dans les sols acides que l'on peut observer une augmentation du dégagement de  $\text{CO}_2$  en additionnant au sol du carbonate de calcium en poudre, ainsi que nous le montrent les résultats du tableau 1.

TABLEAU 1. — Décarbonatation abiotique dans les sols acides enrichis en  $\text{CaCO}_3$ .

Sols	pH		$\text{CO}_3\text{Ca}$ (%)	$\text{CO}_2$ mg p. 100 g (7 j. 30°)	
	Eau	KCl			+ $\text{CaCO}_3$
Mor de podzol (V <sup>63</sup> -8) .....	4,40	3,00	0	1 109	> 1 764
Sol faiblement podzologique (F <sup>2</sup> avril 0-5 cm) ...	4,45	3,75	0	433	> 882
Sol ferrallitique rouge (AD 491) .....	5,45	4,85	0	197	> 353
Sol dior (BAD 11) .....	5,85	5,00	0	109	135
Vertisol (BAV 11) .....	7,30	6,35	0,17	49	70
Sol brun calcaire (B) .....	7,65	7,00	29,9	111	111
Rendzine (M 11) .....	7,60	7,25	46,0	380	375

## 2d. Teneur en sels

L'influence possible des sels sur le dégagement de  $\text{CO}_2$  sera examinée ici à l'aide d'une petite collection de sols récoltée dans la partie Ouest du Marais Poitevin, dite « marais desséché », par opposition à la partie Est, dite « marais mouillé »<sup>1</sup>.

Les sols du marais desséché sont des sols formés sur une argile calcaire d'origine marine avec, vers l'intérieur des terres, des apports plus ou moins importants d'origine alluviale et colluviale. Du point de vue granulométrie, ces sols sont remarquablement homogènes comme le montre la figure 20 ; montmorillonite, illite et un peu de kaolinite en constituent la fraction argileuse<sup>2</sup>.

Ce sont des sols d'abord halomorphes et de couleur gris brun clair de la baie de l'Aiguillon à Marans, puis ensuite vers l'intérieur des terres des sols de nature vertisolique de couleur gris vert clair. Les sols halomorphes sont constitués de sols salins tout en bordure de mer (profil 7-1 et échantillons 7-2 et 7-3), puis après une dessalinisation qui s'effectue très rapidement, de solonetz à structure bien prismée (profil 6) et même en certains points de soloths avec horizon d'humus acide, descente de substances humiques et blanchiment de l'horizon sous-jacent (profil 12). Plus généralement, les sols salins en passant aux solonetz se voient fortement colonisés par la faune (vers de terre, larves d'insectes, myriapodes, isopodes et microarthropodes) et évoluent non pas vers des soloths mais vers des sols bruns calcaires hydromorphes de couleur gris foncé, à structure nuciforme puis polyédrique en dessous de 30 cm (profil 3).

Les sols vertisoliques au contraire ont un horizon supérieur gris à structure polyédrique reposant sur un horizon argileux, calcaire, compact et collant (bri), et correspondent dans la classification française aux paravertisols hydromorphes grumosoliques (profil 9).

L'échantillon 101 correspond à un anmoor (horizon humifère) argileux et calcaire, de couleur gris très foncé et de consistance grasse au toucher, à bonne teneur en azote et à macrofaune importante (vers de terre et isopodes), mais à mésofaune moyenne bien qu'assez diversifiée.

La figure 22 montre que pour ces sols, le dégagement de  $\text{CO}_2$  est toujours proportionnel au carbone total, et cela quelle que soit leur teneur en chlorure de sodium.

Ces sols halomorphes présentent toutefois un faible dégagement de  $\text{CO}_2$  car leur teneur en matières organiques demeure toujours faible, soit que les horizons salins correspondent à des horizons

1. Pour ce qui concerne l'aménagement de ce marais, cf. TALUREAU (1964), et pour l'étude pédologique du « marais mouillé », cf. JAMBU et NIRS (1966).

2. Nous n'avons trouvé que de l'illite, et ni montmorillonite ni calcaire dans les deux profils 1 et 2 de Boursotte le Gua, autre marais sis 26 km au sud de Rochefort.

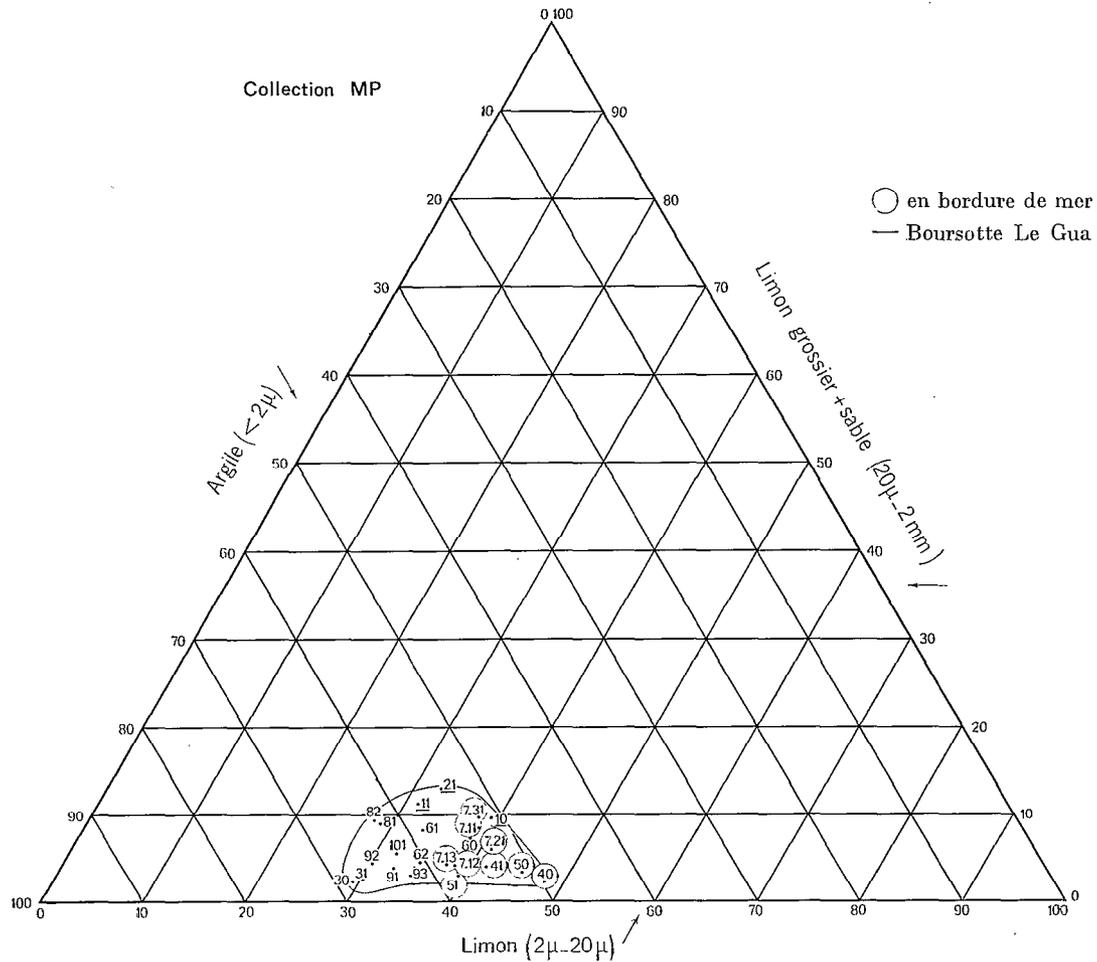


FIG. 20. — Granulométrie de sols du Marais Poitevin.

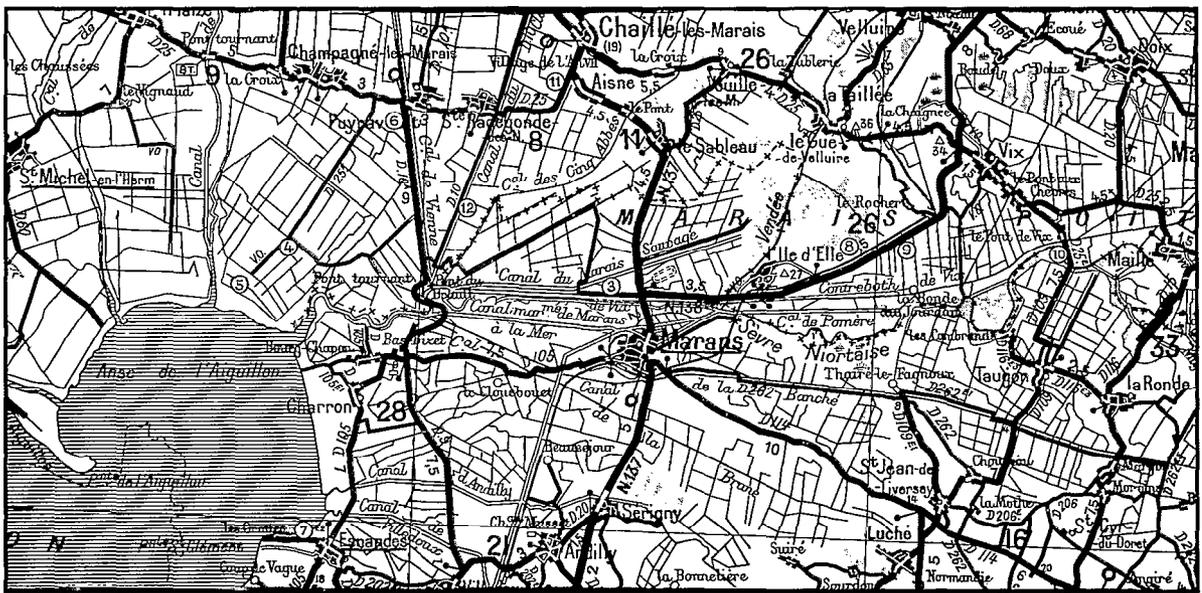


FIG. 21. — Localisation des profils : chiffres encadrés.

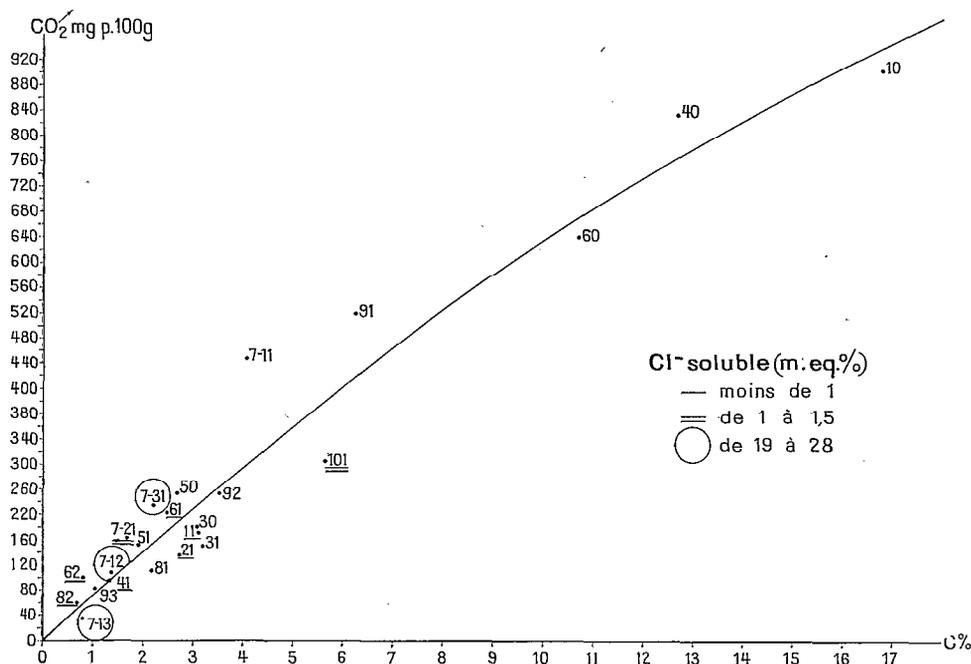


FIG. 22. — Dégagement de gaz carbonique en fonction du carbone total.  
(sols du Marais Poitevin)

TABLEAU 2. — Teneur en calcaire, sel et matières organiques de quelques sols de la partie ouest du marais poitevin.

	CaCO <sub>3</sub>	Na soluble m.éq. %	Cl soluble m.éq. %	Conductivité 25° mmhos/cm	C (%)
7-11 (0-3 cm) .....	13,68	1,60	0	0,24	4,05
7-12 (5-25 cm) .....	11,11	20,98	20,50	2,87	1,38
7-13 (35-45 cm) .....	12,36	27,97	28,00	3,99	0,80
7-21 (0-10 cm) .....	5,58	5,99	1,25	0,72	1,68
7-31 (0-10 cm) .....	6,50	19,88	19,00	2,77	2,20
60 (0-5 cm) .....	0,04	0,80	0	0,15	10,73
61 (5-30 cm) .....	0,14	1,13	0,50	0,12	2,48
62 (35-45 cm) .....	10,42	2,46	0,50	0,24	0,79
30 (0-5 cm) .....	1,10	0,47	0	0,14	3,07
31 (5-14 cm) .....	1,25	0,60	0	0,13	3,21
91 (0-5 cm) .....	2,50	0,20	0	0,19	6,24
92 (5-25 cm) .....	3,96	0,33	0	0,15	3,58
93 (30-45 cm) .....	4,83	0,93	0	0,14	1,04
101 (0-20 cm) .....	5,83	1,86	1,25	0,40	5,64

profonds, naturellement pauvres en matières organiques (échantillons 7-12 et 7-13), soit que ces sols soient encore salins en surface (échantillons 7-21 et 7-31), mais ne possèdent alors comme végétation que de rares salicornes au lieu du tapis graminéen et du matelas de racines qui recouvrent normalement les autres sols ; l'échantillon 101 fait exception, car bien que renfermant 1,25 m.éq. % de chlore soluble et 1,86 m.éq. % de sodium soluble, il n'offre qu'une conductivité de 0,4 mmhos/cm et se trouve supporter une belle prairie. En fait, on a là un anmor, dont nous avons déjà souligné le caractère particulier.

En conclusion, les sels ne semblent diminuer le dégagement de  $\text{CO}_2$  des sols que par leur influence limitante sur la végétation et la teneur en carbone total du sol qui en dépend. La capacité de minéralisation du carbone apparaît dans les sols salins indépendante de la teneur en sel de ces sols, mais si ces derniers viennent à se dessaler et à se recouvrir d'un mulch herbacé de prairie, à posséder une faune plus diversifiée et une microflore plus abondante, à avoir des conditions structurales améliorées et en définitive à avoir un cycle du carbone plus important, leur dégagement en  $\text{CO}_2$  s'en trouve alors normalement accru.

## 2e. Nature des argiles

On sait que les argiles selon leur nature protègent plus ou moins les matières organiques facilement minéralisables (BIRCH et FRIEND, 1956), mais, en considérant le dégagement de  $\text{CO}_2$  de sols, dont la fraction argileuse est de nature différente, il n'apparaît pas que la nature de l'argile puisse pour cela influencer quantitativement la minéralisation du carbone des sols, étant donné qu'à teneur égale en « argile » ou en « argile + limon », le dégagement de  $\text{CO}_2$  par gramme de carbone peut être le même dans des sols à argiles différentes. Un vertisol à montmorillonite peut ainsi avoir, à poids égal de carbone, le même dégagement de  $\text{CO}_2$  qu'un sol ferrallitique à kaolin.

Par contre, si l'on apporte à des sols des argiles de nature différente des leurs, le problème est tout autre, car l'on modifie alors l'équilibre de ces sols, et ce d'autant plus qu'on y apporte des argiles à propriétés colloïdales plus marquées : gonflement, absorption d'eau ou fixation de cations.

Ainsi, dans nos expériences, l'apport de 8 à 20 % de kaolin n'a pratiquement pas modifié le dégagement de  $\text{CO}_2$  d'un mor de podzol (V<sup>64</sup>-22), d'un moder de sol podzologique (F2, 0-5 cm) ou d'un sol brun calcaire (B), alors que le même apport de montmorillonite basique a accru de 43 % le dégagement de  $\text{CO}_2$  du mor de podzol, de 58 % celui du moder de sol podzologique et de 63 % celui d'un sol ferrallitique. Le dégagement de  $\text{CO}_2$  du sol brun calcaire de Bondy qui renferme déjà environ 70 % de montmorillonite<sup>1</sup>, n'a pas été accru.

## 3. FACTEURS EXPÉRIMENTAUX

### 3a. Radiations

Divers auteurs ont déjà étudié l'action des radiations sur les caractéristiques physico-chimiques des sols. STOTZKY et MORTENSEN (1959) ont ainsi irradié des échantillons de tourbe par les rayons gamma d'une source de  $\text{CO}^{60}$  à des doses de 2, 8, 32, 64, 128 et 250 kiloroentgens. Les irradiations ont causé peu d'effet sur le développement des populations bactériennes, le pH, la minéralisation du phosphore et le dégagement de  $\text{CO}_2$ . La croissance des champignons fut par contre fortement freinée et les teneurs en ammonium nettement accrues. Des doses supérieures à 250 kiloroentgens ont été trouvées nécessaires pour stériliser les sols organiques.

VOETS et DEDEKEN (1965) ont montré qu'une irradiation à  $2 \times 10^6$  rads (soit approximativement un peu plus de 1 500 roentgens) stérilisait le sol sans en modifier les diverses activités enzymatiques qui demeuraient les mêmes que dans le sol traité au toluène.

BOYER, COMBEAU, GRAUBY et THOMAS (1966) ont montré que les sols soumis à des irradiations de rayons gamma égales à  $4 \times 10^6$  rads (soit approximativement un peu plus de 3 000 kiloroentgens)

1. Plus environ 25 % d'illite et 5 % de kaolinite.

conservent leurs teneurs en matières organiques et en acides humiques inchangées, alors que leur teneur en acides fulviques est approximativement doublée. Les agrégats diminuent de 50 à 80 % par rapport aux témoins ; la dispersion des sols se trouve augmentée, mais la rétention d'eau à pH 3 reste inchangée. Le trèfle démarre mieux dans la terre irradiée, mais voit sa croissance ensuite freinée.

SKYRING et THOMPSON (1966) ont enfin montré que l'irradiation des sols par les rayons gamma affectait plus l'assimilabilité des matières organiques dans les sols humides que dans les sols séchés.

Nous avons personnellement pu nous procurer une série de sols ayant été soumis à un flux de rayons gamma de  $4 \times 10^6$  rads et à un flux de neutrons de  $10^4/\text{cm}^2/\text{seconde}$ , ainsi que ces mêmes sols n'ayant subi aucun traitement :

échantillon R = rendzine de Montainville

échantillon B = sol brun calcaire de Bondy

échantillon V = vertisol du Togo

échantillon GRI-S = sol faiblement ferrallitique rouge de savane (République Centrafricaine)

échantillon H = sol hydromorphe peu humifère et argileux de Guédé (Vallée du Sénégal).

La non-évolution quantitative des matières organiques totales des sols soumis à l'irradiation, de leur teneur en azote et de leur rapport C/N peut être vérifiée dans le tableau suivant :

TABLEAU 3. — Non évolution des matières organiques totales des sols sous l'effet d'une forte irradiation en pile atomique.

	Avant irradiation			Après irradiation		
	C %	N ‰	C/N	C %	N ‰	C/N
R .....	2,00	1,85	10,8	1,96	1,86	10,5
B (exp. 2) .....	1,76	1,00	17,6	1,74	0,80	21,7
V .....	0,86	0,61	14,3	0,81	0,58	14,0
GRI-S (exp. 1) .....	2,08	1,23	16,9	2,02	1,25	16,1
GRI-S (exp. 2) .....	1,80	0,85	25,3	1,92	0,82	23,5
H .....	0,31	0,33	9,3	1,98	0,91	21,7*
				0,29	0,33	8,8

Ces sols ont toutefois subi des modifications sous l'effet des irradiations et leur pouvoir d'absorption d'oxygène en flacon d'eau s'en est trouvé fortement accru, exception faite pour l'échantillon H qui ne renferme que 0,3 % de carbone total.

TABLEAU 4. — Absorption d'oxygène en flacon d'eau à 20° et en 7 jours par 3 g de divers sols avant et après irradiation (en centièmes de mg par litre d'eau).

	Avant irradiation	Après irradiation	Coefficient de multiplication
R .....	411	815	× 1,98
B (exp. 2) .....	237	417	× 1,76
V .....	120	251	× 2,09
GRI-S (exp. 1) .....	301	470	× 1,56
GRI-S (exp. 2) .....	253	536	× 2,12
H .....	162	165	× 1,02

\* Échantillon irradié à l'état humide et ensuite séché à l'air.

Dans une deuxième expérience, les sols B et GRI-S ont été passés dans la pile atomique de Saclay soit à l'état sec, soit à l'état humide, et dans ce dernier cas après irradiation soit séchés à l'air, soit conservés humides. Le tableau 5 résume les résultats ensuite acquis sur ces divers échantillons.

TABLEAU 5. — Absorption d'oxygène en flacon d'eau, dégagement de  $\text{CO}_2$  en bocal et teneur en carbone soluble de deux échantillons de sols avant et après irradiation.

		Avant irradiation	Coefficient de multiplication	Après irradiation	LÉGENDE	
éch. B	état sec	237	$\times 1,76$	417	$\text{O}_2 \checkmark$	
		141 (= 38,4 C)	$\times 1,92$	271 (= 74 C)	$\text{CO}_2 \uparrow$	
		34	$\times 2,67$	91	C soluble	
éch. B	état humide	75	$\times 4,43$	332	$\text{O}_2 \checkmark$	
				384	$\text{O}_2 \checkmark$	
	état sec			200 (= 54,5 C)	$\text{CO}_2 \uparrow$	
				74	C soluble	
	GRI-S	état sec	253	$\times 2,12$	536	$\text{O}_2 \checkmark$
			89 (= 24,3 C)	$\times 3,34$	297 (= 81 C)	$\text{CO}_2 \uparrow$
26			$\times 3,88$	101	C soluble	
GRI-S	état humide	104	$\times 2,65$	276	$\text{O}_2 \checkmark$	
				321	$\text{O}_2 \checkmark$	
	état sec			210 (= 57,3 C)	$\text{CO}_2 \uparrow$	
				71	C soluble	

LÉGENDE :  $\text{O}_2 \checkmark$  = absorption d'oxygène en flacon d'eau, en centièmes de mg par litre.  
 $\text{CO}_2 \uparrow$  = dégagement de  $\text{CO}_2$  en bocal : en mg par 100 g (valeur correspondante du carbone entre parenthèses).  
 C soluble = carbone soluble : en mg par 100 g.

Plusieurs conclusions ressortent de ces résultats :

- La respiration des sols conservés humides est plus faible que celle des sols séchés puis réhumidifiés, le séchage ayant, comme il sera vu plus loin (cf. § B), la propriété d'accroître dans les sols le carbone immédiatement minéralisable.
- Aussi bien l'absorption d' $\text{O}_2$  que le dégagement de  $\text{CO}_2$  se trouvent fortement accrus par l'irradiation : 1,76 et 1,92 fois plus pour l'échantillon B et 2,12 et 3,34 fois plus pour l'échantillon GRI-S.
- Le carbone soluble se trouve accru dans des proportions 1,39 (éch. B) et 1,16 (éch. GRI-S)

fois plus fortes que le dégagement de  $\text{CO}_2$ . Il représente 88 % (éch. B) et 107 % (éch. GRI-S) du carbone immédiatement minéralisable avant l'irradiation et respectivement 123 % et 124 % après.

Après l'irradiation, le séchage des terres humides n'accroît que de 1,16 fois leur capacité d'absorption d' $\text{O}_2$  en flacon d'eau, alors qu'avant l'irradiation cette capacité d'absorption d' $\text{O}_2$  des terres sèches était égale à 3,16 (éch. B) et 2,43 (éch. GRI-S) fois celle des terres humides. Tout se passe comme si l'irradiation rendait facilement minéralisable le même carbone que la dessiccation.

En conclusion, les fortes irradiations, par rayons gamma ( $4 \times 10^6$  rads) et neutrons ( $10^4/\text{cm}^2/\text{sec}$ ), ne changent pas les teneurs en matières organiques totales des sols ni leur teneur en azote, ni leur rapport C/N, mais elles rendent facilement minéralisable un carbone qui était jusqu'alors protégé, le même apparemment que celui libéré par la dessiccation des sols. Il est intéressant de constater que sur le plan physique cette libération de carbone immédiatement minéralisable coïncide avec une forte diminution des agrégats et une plus grande facilité de dispersion des sols. On a de fortes raisons de penser que ce carbone immédiatement minéralisable est de nature soluble, et comme nous le verrons plus loin, glucidique.

EDWARDS et BREMNER (1967) ont récemment montré que les vibrations soniques pouvaient aussi, comme les radiations et la dessiccation, rompre au sein des microagrégats les liaisons argiles-matières organiques, qui dépendraient de métaux polyvalents.

### 3b. Substances stimulantes

Nous n'avons fait encore qu'aborder cet aspect de la question, qui devrait sur le terrain, pouvoir aider à l'évolution favorable des sols, et notamment peut-être à la reprise de sols podzoliques sous landes. Inversement, la recherche de substances inhibantes de la minéralisation du carbone serait aussi à envisager pour les sols ferrallitiques.

Les raisons pour lesquelles une substance chimique peut s'avérer stimulante de l'activité biologique des sols sont très variés, mais nous pensons que les substances stimulantes les plus intéressantes doivent être celles qui agissent en tant qu'oxydases ou déshydrogénases.

KHRISTEVA et LUK'YANENKO (1962) ont ainsi montré la grande importance des vitamines B<sub>2</sub>, C et PP, ainsi que celle des humates alcalins solubles, en tant qu'accepteurs d'hydrogène susceptibles d'accroître fortement la respiration des plantes.

Nous avons expérimenté sur un mor de podzol (V<sup>64</sup>-22), un moder de sol podzologique (F2, 0-5 cm), un sol rouge ferrallitique (AD 491) et un sol brun calcaire (B).

L'apport à 0,5 ou 1 ‰ de *vitamine B2* n'a pas donné de grands résultats, sauf peut-être pour le sol ferrallitique.

L'apport à 0,5 ou 1 ‰ de *vitamine C* n'a rien donné, mais à concentration 10 fois plus forte a accru de 8 % le dégagement de  $\text{CO}_2$  du sol rouge ferrallitique, de 17 % le dégagement de  $\text{CO}_2$  du sol brun calcaire, de 28 % le dégagement du mor de podzol et de 5 % le dégagement du moder de sol podzologique.

Le *bleu de méthylène* au 1/100 000 ou 2,5 ml de TTC<sup>1</sup> à 1 % humidifiant diverses terres à leur valeur de rétention n'en modifient pas le dégagement de  $\text{CO}_2$ . Ces concentrations de B.M. et de TTC étant celles généralement adoptées dans les mesures de l'activité déshydrogénasique des sols, il est intéressant de voir qu'elles n'en modifient pas l'activité biologique ; ce qui ne veut pas dire pour cela que les mesures de l'activité déshydrogénasique des sols soient exemptes d'autres critiques.

Les *solutions alcalines (soude et potasse)* ont par contre une très forte influence sur le dégagement de  $\text{CO}_2$  des sols acides, beaucoup plus forte d'ailleurs sur le mor et le moder que sur le sol ferrallitique. Leur action est nulle sur le sol brun calcaire.

La figure 23 nous montre l'action de la potasse N et de la soude N sur le dégagement de  $\text{CO}_2$  du moder de sol podzologique (F2, 0-5 cm). Cette action est fortement positive et ne devient négative qu'à partir de pH 10 à 10,2. Le dégagement de  $\text{CO}_2$  se trouve multiplié par 4 ou 5 au maximum de

1. TTC = chlorure de 2,3,5 triphenyltetrazolium.

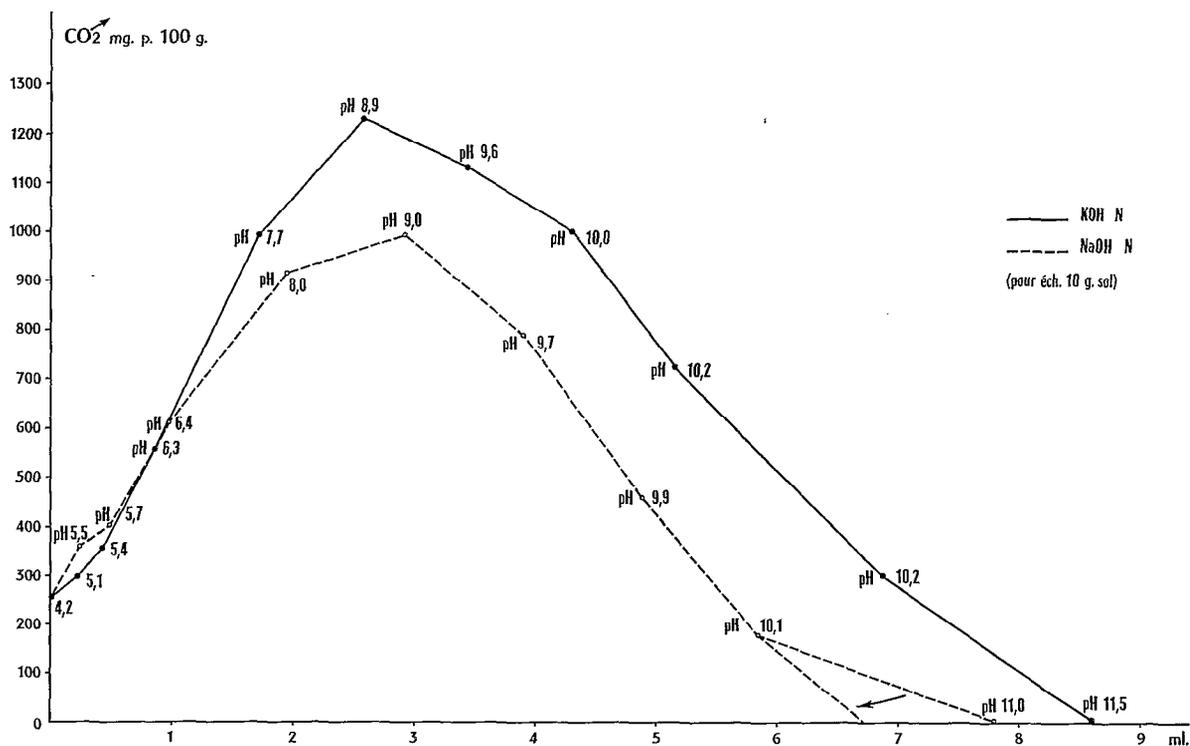


FIG. 23. — Action de la potasse N et de la soude N sur le dégagement de CO<sub>2</sub> d'un moder de sol podzolique (F2, 0-5.)

dégagement qui correspond à pH 9 et l'arrêt de toute activité biologique se manifeste dans cet exemple à pH 11.

Les substances humiques solubilisées par les solutions alcalines augmentent parallèlement à l'accroissement de la minéralisation du carbone jusqu'à pH 9 et demeurent ensuite approximativement constantes.

## B. MINÉRALISATION CONTINUE DU CARBONE. INFLUENCE DU TRAITEMENT DE L'ÉCHANTILLON. EFFET DE SÉCHERESSE

Jusqu'à présent, n'ont été envisagés pour les sols que leurs dégagements de CO<sub>2</sub> en sept jours et sur terre séchée à l'air, tamisée à 2 mm et réhumidifié à la rétention.

Considérons maintenant, d'une part le dégagement continu de CO<sub>2</sub> des sols sur un assez grand nombre de jours, et d'autre part l'influence que peut avoir sur ce dégagement le prétraitement de l'échantillon, et notamment sa dessiccation à l'air ou à l'étuve.

Nos expériences ont été faites avec 5 échantillons de sol différents, à savoir par ordre de teneur en carbone décroissante :

C %	
33,2	V <sup>63</sup> -10 : mor de podzol des Vosges
2,8	DIVO 11-1 : horizon 0-15 cm d'un sol faiblement ferrallitique de Côte d'Ivoire
1,9	B 2 : horizon humifère 0-20 cm d'un sol brun calcaire de France
1,43	P8-2A : horizon 0-15 cm d'un vertisol du Togo
0,49	BAD 11 : horizon 0-2 cm d'un sol dior du Sénégal

— Dans une **première expérience**, 4 de ces échantillons ont été soit maintenus constamment humides pendant tout le temps des mesures, soit à chaque mesure régulièrement séchés 24 heures à l'étuve 70° puis réhumidifiés ensuite à la rétention.

La figure 24 nous montre pour ces sols la silhouette caractéristique des courbes cumulatives de leur dégagement de CO<sub>2</sub> pendant un peu plus de 200 jours.

Un fort dégagement se manifeste dans les 7 premiers jours, puis au cours des 10 semaines suivantes diminue progressivement pour atteindre une valeur plus constante déterminée par la minéralisation régulière du carbone des sols. Ce dégagement régulier du CO<sub>2</sub> est fonction de la teneur en carbone des sols ; il sera d'autant plus important et d'autant plus longtemps constant que les sols seront plus organiques au départ.

Le premier séchage des sols à 70° après 7 jours a accru la teneur en carbone immédiatement minéralisable du sol faiblement ferrallitique, du sol brun calcaire (fig. 25) et du vertisol. Il n'a eu que très peu d'effet sur le sol dior et pas du tout d'effet sur le mor de podzol. Or, ces deux derniers sols ne renferment pratiquement pas d'argile et de limon fin (cf. tableau 6), susceptibles de « protéger » le carbone immédiatement minéralisable ; les séchages répétés ont même eu dans le mor de podzol après 9 semaines un effet négatif sur le dégagement de CO<sub>2</sub><sup>1</sup>.

TABLEAU 6. — *Granulométrie des échantillons de sol étudiés.*

	← 100 →					
	A	L.f.	L.gr.	S.f.	S.gr.	M.O.
V <sup>63</sup> -10 .....		5,5		9,0	18,5	67,0
DIVO 11-1 .....	26,7	9,8	19,1	27,5	11,9	5,0
B 2 .....	16,8	8,2	8,4	17,6	45,6	3,4
P8-2A .....	17,7	6,4	13,7	43,2	16,5	2,5
BAD 11 .....	3,4	1,3	6,7	65,9	21,9	0,8

Compte tenu de la précision des mesures, le carbone minéralisé en 30 semaines dans les divers échantillons correspond approximativement à la diminution du carbone total dosé par la méthode Walkley et Black. La moyenne de ces deux valeurs donne une diminution du carbone qui est respectivement pour les échantillons maintenus constamment humides et les échantillons régulièrement séchés de 7,7 et 4,8 % avec le mor, de 7,3 et 11,7 % avec le sol faiblement ferrallitique, de 10,1 et 12,2 % avec le vertisol et de 21,6 et 20,2 % avec le sol dior. Ces valeurs s'avèrent être du même ordre de grandeur que les pertes en carbone observées dans les régions chaudes et humides, notamment par QUANTIN (1965) dans un sol ferrallitique cultivé sans amendement ; sol qui en un peu plus de 3 ans a perdu 30 % de son carbone, soit environ 9 % par an.

Les teneurs en azote n'ont pratiquement pas changé, mise à part une légère diminution dans le sol dior où l'azote est passé de 0,44 ‰ à 0,37 ‰ après 30 semaines.

Il est intéressant de constater que, conjointement à la minéralisation du carbone, s'est manifestée une dégradation structurale des sols résumée dans le tableau 7 ci-après.

1. Dans une autre expérience avec séchage à 100° (et non plus à 70°), après un mois (et non plus toutes les semaines), nous avons par contre observé par rapport à l'échantillon non desséché une très nette augmentation du carbone soluble et du carbone glucidique dans l'échantillon de sol dior et l'échantillon de mor : respectivement 53 % et 87 % de carbone glucidique libre en plus. Un séchage plus poussé des échantillons a dû permettre une certaine oxydation abiotique des matières organiques, et la reprise d'activité biologique sur un mois a vraisemblablement laissé plus de temps aux bactéries pour rétablir un gel microbien riche en polysaccharides (cf. chap. 3, § B).

$\text{CO}_2$  mg p.100 g (7 j. à 30°)

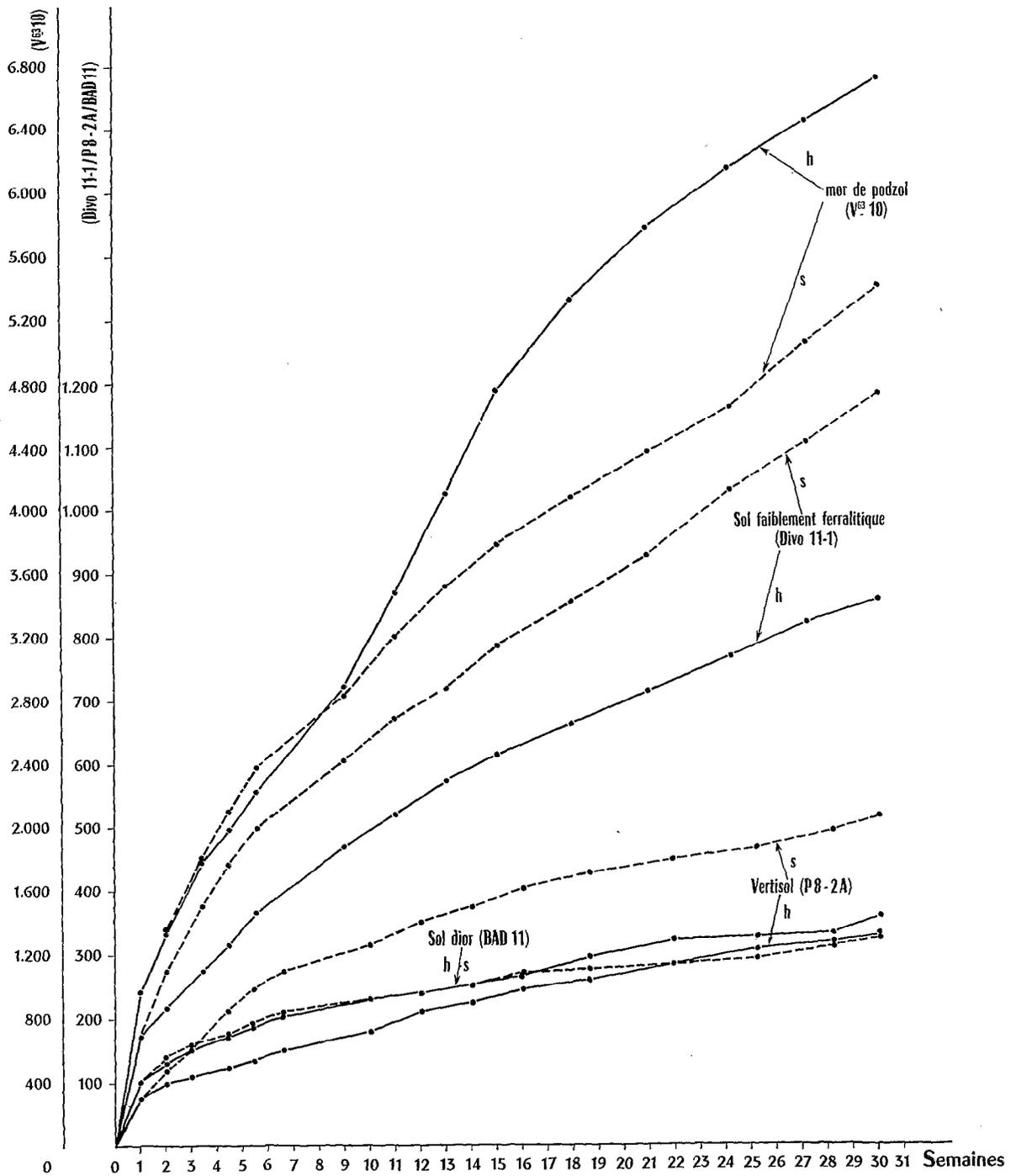


FIG. 24. — Courbe cumulative sur 30 semaines du dégagement de  $\text{CO}_2$  de 4 sols qui ont été maintenus constamment humides (—h) ou séchés 24 heures à 70° après chaque mesure (----s).

TABLEAU 7. — Dégradation structurale de divers échantillons.

	Is		
	Avant	Après 30 semaines	
		Échantillons maintenus humides	Échantillons régulièrement séchés
Sol faiblement ferrallitique (DIVO 11-1) .....	0,49	0,82	0,90
Vertisol (P8-2A) .....	0,94	1,47	2,07
Sol dior (BAD 11) .....	0,27	0,49	0,33

— Une **deuxième expérience** de nature identique a été conduite avec le sol brun calcaire (éch. B2) pendant là aussi 30 semaines, mais d'une part les séchages périodiques des échantillons ont été effectués soit 24 heures à l'air, soit 24 heures à l'étuve, et d'autre part un des deux échantillons maintenus humides a été séché régulièrement à l'étuve à partir de la 19<sup>e</sup> semaine.

La figure 25 présente les diverses courbes cumulatives du dégagement de CO<sub>2</sub> ainsi obtenues.

Cette deuxième expérience montre que le séchage à l'étuve a sur la libération du carbone minéralisable un effet supérieur au séchage à l'air. Elle montre aussi que le carbone minéralisable « protégé » ne se minéralise pas dans le sol placé en incubation 19 semaines à 30°, puisqu'il peut toujours après ce laps de temps être libéré par séchage à l'étuve.

Comme dans la première expérience, on observe ici aussi (cf. tableau 8) une dégradation structurale des sols, liée à la fois à la minéralisation progressive du carbone et au séchage éventuel des échantillons ; séchage qui tend à faire craquer les liens structuraux des agrégats.

TABLEAU 8. — Dégradation structurale de l'éch. B2.

	Is	
	Au départ	Après 30 semaines
Éch. B2 humide .....	0,53	1,24 1,36 (séchage étuve après 19 semaines)
Éch. B2 séché à l'air .....	1,02	1,57
Éch. B2 séché à l'étuve .....	1,14	1,61

Là encore, la somme du CO<sub>2</sub> dégagé au cours des 30 semaines correspond approximativement aux pertes en carbone total des échantillons et représente environ 9,7 % de ce carbone pour l'échantillon séché à l'air et 15,2 % pour l'échantillon séché à l'étuve.

La perte en azote est d'environ 10 % : 14 % pour l'échantillon séché à l'air et 8,5 % pour l'échantillon séché à l'étuve.

— Dans une **troisième expérience**, un horizon 0-20 cm d'un sol brun calcaire (éch. B2) a été prélevé aux champs et conservé, soit humide et en bocal aéré à 5°, à 20° ou à 30°, soit en boîte de carton après séchage naturel à l'air ou séchage à l'étuve. La mesure du carbone minéralisable (en 7 jours et à 30°) a été faite sur ces échantillons à intervalles réguliers.

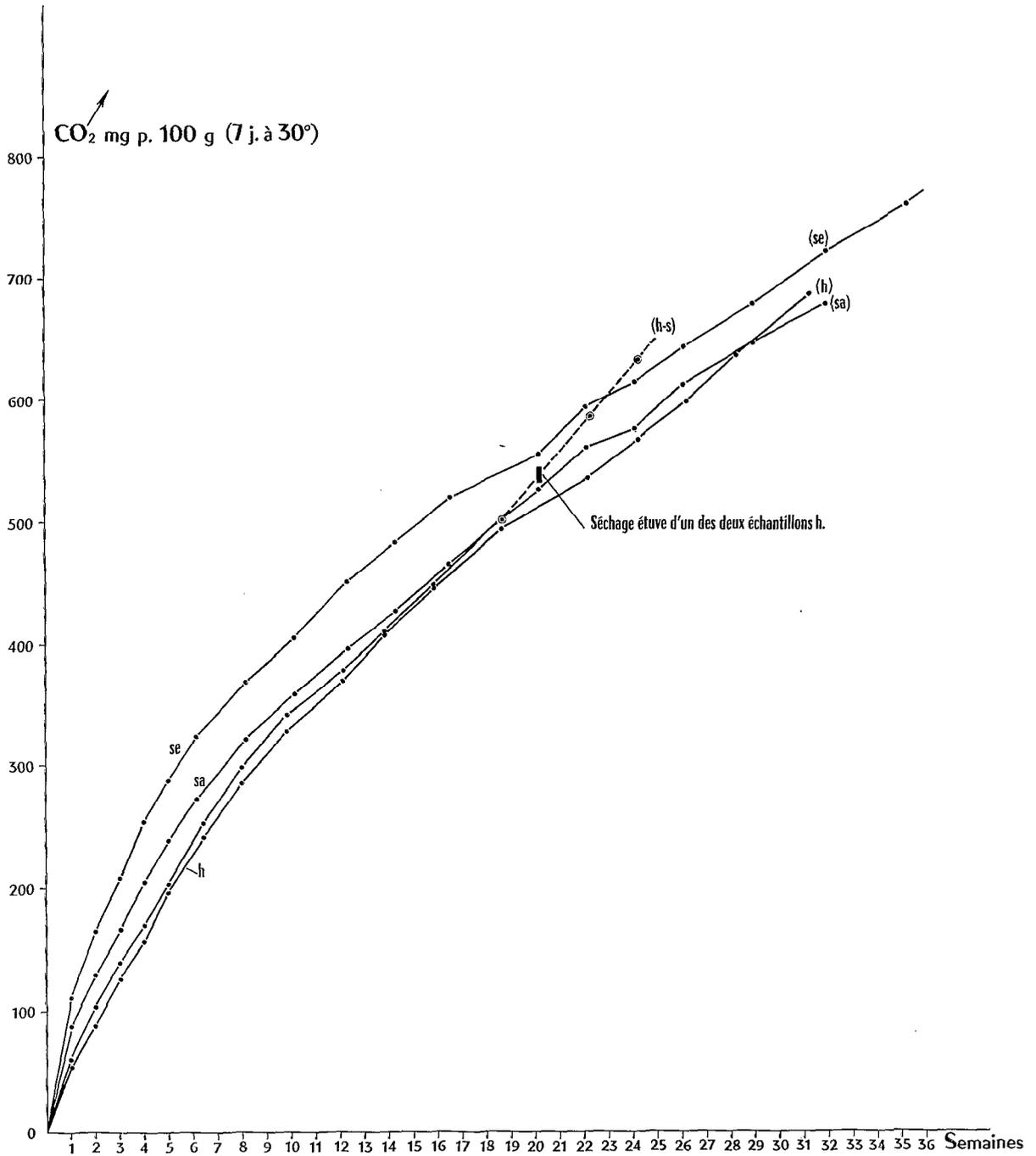


FIG. 25. — Courbe cumulative sur 30 semaines du dégagement de CO<sub>2</sub> d'un sol brun calcaire (B<sub>2</sub>) maintenu constamment humide (h), ou séché 24 heures à l'air (sa) ou à l'étuve 70° (se) après chaque mesure.

La figure 26 montre l'évolution de la teneur en carbone immédiatement minéralisable de ces divers échantillons.

Le carbone immédiatement minéralisable demeure approximativement constant dans la terre séchée à l'étuve et conservée 400 jours au laboratoire en boîte de carton. Ce même carbone dans la terre séchée à l'air tend à augmenter régulièrement, ce qui avait déjà été observé par BIRCH en 1959, tout

se passant comme si le séchage à l'air pouvait avec le temps avoir la même action que le séchage à l'étuve. Le carbone immédiatement minéralisable diminue régulièrement et lentement dans la terre humide conservée à 5°, mais plus rapidement dans les terres humides conservées à 20° et à 30°. Dans ces deux derniers cas, on atteint après 200 jours un long palier au cours duquel le carbone qui se minéralise est remplacé en quantité égale par du carbone immédiatement minéralisable issu de la dégradation régulière des matières organiques ; le stock supplémentaire de carbone immédiatement minéralisable et directement accessible dans les conditions de l'expérience étant alors épuisé.

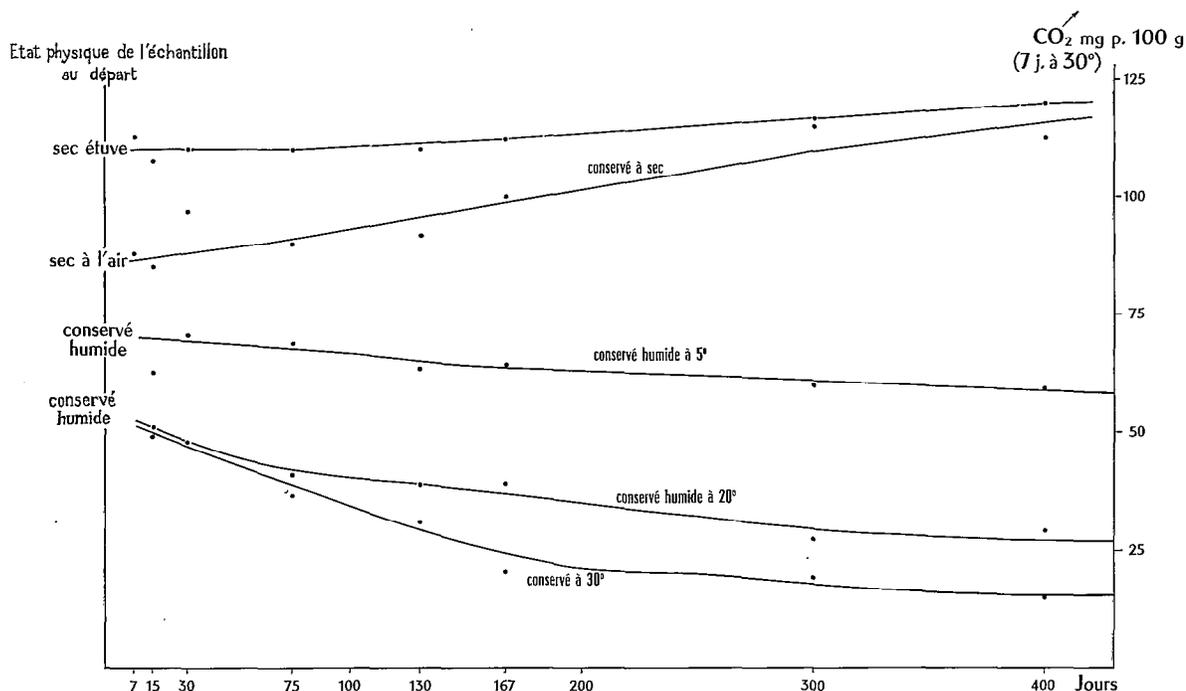


FIG. 26. — Évolution de la teneur en carbone immédiatement minéralisable d'un sol brun calcaire (éch. B<sub>2</sub>) différemment conservé.

Une diminution de la stabilité structurale des échantillons a été encore observée dans cette expérience : diminution plus importante à 30° qu'à 20° et à 20° qu'à 5°. La stabilité des échantillons conservés à sec a aussi légèrement diminué.

Les pertes en carbone en 300 jours ont été d'environ 12 % pour l'échantillon conservé humide à 30° ; l'indice de stabilité structurale de cet échantillon est passé dans le même temps de 0,53 à 1,53.

Ainsi, en conclusion, dans les sols maintenus humides à une température de 30°, après une rapide minéralisation la première semaine d'un carbone facilement accessible (et dit pour cela « immédiatement minéralisable »), la minéralisation du carbone diminue régulièrement au cours des semaines qui suivent pour, plus ou moins rapidement selon les sols, atteindre un palier au cours duquel le carbone qui se minéralise est remplacé en quantité égale par du carbone immédiatement minéralisable issu de la dégradation régulière des matières organiques.

La dessiccation des sols argileux libère le carbone immédiatement minéralisable qui est « protégé » par les argiles et, d'après ZVYAGINTSEV (1966), détermine une désorption des microbes. Cette libération de carbone facilement minéralisable est d'autant plus importante que la dessiccation est plus poussée. Ce qu'on a pu voir de l'effet du broyage des sols sur le carbone minéralisable (cf. § A-2a) confirme cette hypothèse. SOULIDES et ALLISON (1961), SCHAEFER (1964) ont montré qu'une alternance de gels et d'incubations pouvait aussi avoir une action positive sur le dégagement de  $CO_2$  des échantillons

organiques suffisamment argileux, les périodes de gels tendant à faire éclater les agrégats et à modifier les colloïdes argilo-organiques en libérant des acides aminés et des sucres (IVARSON et GUPTA, 1967). Il ne semble pas que le carbone immédiatement minéralisable apporté par la dessiccation aux faibles températures soit issu d'une oxydation favorisée des substances organiques en voie de dégradation, puisque la dessiccation à température inférieure à 70° n'a pas d'effet sur la minéralisation du carbone des sols organiques non argileux.

BIRCH et FRIEND (1956) ont montré que vis-à-vis des matières organiques facilement minéralisables, la montmorillonite possédait un pouvoir protecteur supérieur à celui de la kaolinite, et surtout que les matières organiques facilement minéralisables protégées par les argiles pouvaient expérimentalement présenter des échanges avec de la gélatine et vraisemblablement dans la nature avec la matière organique fraîche en voie de décomposition.

Le carbone qui se minéralise en un an dans les sols maintenus constamment humides à 30° peut être évalué à environ 13 % du carbone total pour le mor et le sol faiblement ferrallitique, 15 % pour le sol brun calcaire, 17 % pour le vertisol et 37 % pour le sol dior. Les pertes dans la nature doivent être plus faibles étant donné les périodes de froid et de sécheresse qui freinent plus ou moins selon les sols l'activité biologique en cours d'année.

Les pertes en azote sont beaucoup plus irrégulières mais dépendent aussi des types de sol.

Conjointement à la minéralisation du carbone se manifeste dans les sols une très nette dégradation de la stabilité structurale ; cette dégradation est d'autant plus importante que davantage de carbone est minéralisé.

### C. CONCLUSIONS GÉNÉRALES DU CHAPITRE

Nous ne voulons pas reprendre ici les conclusions partielles de chacun des paragraphes de ce chapitre, mais simplement dégager ce que nous pensons qu'elles nous apportent d'essentiel.

L'étude de l'influence de l'humidité (§ A-1a) n'a fait que confirmer la courbe en cloche du dégagement de CO<sub>2</sub> des sols réhumidifiés : démarrage à pF 5, montée jusqu'à pF 2,5-2,2, palier jusqu'à pF 1, puis diminution plus ou moins rapide selon les types de sols avec les boues collantes et les boues liquides.

L'étude de l'influence de la température et des variations conjointes du Q.10 (§ A-1b) a montré une graduation très continue et très délicate dans l'aptitude à se minéraliser du carbone des sols, l'importance de la « protection » des matières organiques facilement minéralisables dans les sols calcaires, et le fait que le dégagement de CO<sub>2</sub> en fonction de la température donne avec les différents horizons d'un même profil un ensemble de courbes caractéristiques du type de sol.

L'étude de l'influence de la surface des agrégats (§ A-2a) a montré la localisation de ces matières organiques facilement minéralisables dans la fraction la plus fine des sols et leur libération possible par destruction mécanique de la structure, pour autant que la compacité du sol broyé ne nuise pas alors à l'échange normal des gaz.

L'étude de l'influence de la stabilité structurale (§ A-2b) a montré l'analogie devant exister entre les matières organiques facilement minéralisables et les substances agrégatives responsables de la stabilité structurale du sol. Minéralisation du carbone et stabilité structurale s'influencent mutuellement au sein de l'équilibre biodynamique des sols.

L'étude de l'influence des carbonates (§ A-2c) a montré que si la décarbonatation abiotique pouvait exister dans la nature, elle ne jouait pratiquement pas dans les mesures du dégagement de CO<sub>2</sub> en laboratoire (mesures faites en 7 jours à 30° sur échantillons séchés à l'air et réhumidifiés). Un apport de carbonate de calcium en poudre n'accroît d'ailleurs le dégagement de CO<sub>2</sub> que dans les sols acides.

L'étude de l'influence des sels (§ A-2d) a montré que ceux-ci n'ont pas d'action sur la capacité de minéralisation du carbone des sols et n'en diminuent le dégagement de CO<sub>2</sub> que par leur influence limitante sur la végétation et la teneur en carbone total.

L'étude de la nature des argiles a montré que, si ces dernières assurent dans les sols une plus

ou moins grande protection des matières organiques minéralisables (BIRCH et FRIEND, 1956), elles ne paraissent pas pour cela modifier quantitativement la minéralisation du carbone des sols. Par contre, l'apport à des sols, qui en sont dépourvus, d'argiles de type montmorillonite catalyse généralement la minéralisation du carbone de ces sols.

L'étude de l'influence des radiations gamma (§ A-3a) a montré que les fortes irradiations de  $4 \times 10^6$  rads ne modifiaient pas les teneurs en matières organiques totales, ni les teneurs en azote des sols (et donc leur rapport C/N), mais libéraient par contre un carbone immédiatement minéralisable jusqu'alors lié aux argiles au sein des microagrégats, le même apparemment que celui libéré par la dessiccation ou les vibrations soniques. Sur le plan physique, une forte diminution des agrégats et une plus grande facilité de dispersion des sols accompagne cette libération du carbone immédiatement minéralisable.

La recherche encore qu'esquissée de substances stimulantes de la minéralisation du carbone, car acceptrices d'hydrogène, nous a montré la non-toxicité du bleu de métylène au 1/100 000 et du TTC à 1 %, ainsi que l'inefficacité des vitamines B2 et C aux faibles doses, mais nous a fait voir par contre la forte action positive des alcalins sur les sols acides jusqu'à pH 9 et 10.

L'étude de la minéralisation continue du carbone et de l'effet de dessiccation (§ B) a montré que les échantillons séchés à l'air et réhumidifiés présentaient d'abord dans la première semaine un dégagement de CO<sub>2</sub> important puis voyaient ce dégagement ensuite régulièrement diminuer jusqu'à un palier déterminé par la dégradation régulière des matières organiques du sol. Cette dernière étude a surtout montré que la dessiccation des sols argileux libère d'autant plus de carbone immédiatement minéralisable et protégé par les argiles que la dessiccation est plus poussée, ce que ENWEZOR vient aussi de montrer récemment (ENWEZOR, 1967). Ce carbone protégé, une fois libéré par la dessiccation, rend une deuxième dessiccation identique sans action si la reprise d'activité biologique n'a pas été suffisamment longue pour permettre au sol de reconstituer ses liaisons argilo-organiques.

Le gel tue la faune, mais ne modifie généralement pas la minéralisation du carbone. Seuls des gels répétés peuvent avoir une action identique à la dessiccation. Les sols dépourvus de colloïdes argileux (sols sableux ou mor de podzol) ne peuvent « protéger » leur carbone facilement minéralisable.

Cette étude a confirmé le rapport étroit existant dans les sols entre la stabilité structurale et les matières organiques facilement minéralisables.

En laboratoire à 30° et en un an, 13 % du carbone total d'un mor et d'un sol faiblement ferrallitique se sont trouvés minéralisés, 15 % pour un sol brun calcaire, 17 % pour un vertisol et 37 % pour un sol dior. Les pertes dans la nature doivent être inférieures à ces valeurs, étant donné les périodes de froid ou de sécheresse auxquelles sont plus ou moins soumis ces sols.

# Nature du carbone immédiatement minéralisable et dynamique de la minéralisation du carbone

## A. QUOTIENT RESPIRATOIRE ET ÉVOLUTION DU QUOTIENT RESPIRATOIRE DES SOLS MIS EN INCUBATION AUTRE RAPPORT DE MÊME NATURE

Le *quotient respiratoire* (ou  $Q.R. = \frac{\text{Vol. CO}_2 \text{ dégagé}}{\text{Vol. O}_2 \text{ absorbé}}$ ) exprime la nature de la matière organique qui est minéralisée, et plus précisément son degré d'oxydation.

Ainsi, dans une étude sur le potentiel d'activité biologique de sols ferrallitiques différemment cultivés (BACHELIER, 1963c), on a trouvé que le Q.R. de ces sols dépendait du traitement cultural auquel ils avaient été soumis. Ce Q.R. était de 0,50 à 0,53 pour les parcelles cultivées sans apport ou avec apport d'engrais minéraux (sulfate d'ammonium et phosphate tricalcique), compris entre 0,63 et 0,75 pour les parcelles cultivées avec apport d'engrais purement organique (fumier, paille ou fumier + paille), compris entre 0,92 et 0,95 pour les parcelles cultivées avec apport d'engrais à la fois minéraux et organiques, et enfin égal à 1,12 pour les sols non cultivés de savane. À titre de comparaison, indiquons que le sol brun calcaire de Bondy (éch. B) a un Q.R. voisin de 1, et rappelons que BUNT et ROVIRA (1955) ont montré qu'un sol à Q.R. de 1 pouvait avoir un Q.R. inférieur à 0,4 après stérilisation à la chaleur.

Dans l'exemple ci-dessus envisagé, les sols présentant les plus faibles quotients respiratoires possèdent peu de matières organiques, ont une activité biologique réduite et offrent une dégradation des matières organiques assez lente. Les sols cultivés renferment en moyenne 0,98 % de carbone, les sols à apport minéral 1,03 %, et leurs quotients de minéralisation (ou Q.M.) sont peu élevés et respectivement en moyenne de 0,84 et 0,79.

Sachant que le quotient respiratoire pour un organisme consommant de la cellulose est voisin de 1, alors qu'il est voisin de 0,8 pour de nombreux protides et voisin de 0,7 pour de nombreux lipides, il semblerait que les sols cultivés sans apport ou avec apport minéral brûleraient surtout des substances organiques peu cellulosiques et peu ligneuses, du genre plasma microbien, acides fulviques, microflore ou cadavres, ce qui expliquerait leur très nette dégradation, étant donné l'importance de certaines de ces substances dans la qualité physique des sols (BACHELIER, 1966a).

Inversement, les sols plus organiques (tels les sols de savane renfermant en moyenne 1,61 % de carbone) ont tendance à posséder une activité biologique plus importante et présentent une dégradation plus active de leur matière organique (Q.M. de 1,48 pour les sols de savane). Dans ces sols, la

matière organique immédiatement minéralisable est de nature plus oxydée et réclame moins d'oxygène pour sa minéralisation, d'où un quotient respiratoire de valeur plus élevée.

Dans le cas des sols ayant reçu des apports organiques de fumier, de paille, ou de fumier plus paille, l'apport conjoint d'engrais minéraux (sulfate d'ammonium et phosphate tricalcique) n'a pratiquement pas accru la minéralisation des matières organiques<sup>1</sup>, mais en a permis une oxydation plus poussée, ce que traduit l'élévation du Q.R. dans les parcelles à apport organo-minéral. Seuls dans cet exemple, les sols cultivés ayant reçu à la fois une fertilisation minérale et organique avaient, avec un Q.R. voisin de 1, retrouvé un métabolisme proche des sols demeurés sous savane herbacée.

Avec les techniques exposées dans le premier chapitre, nous avons recherché quelle pouvait être l'évolution du quotient respiratoire au cours des 2 premières semaines de respiration dans des sols préalablement séchés à l'air et ensuite réhumidifiés à leur valeur de rétention. Cette expérience a été réalisée avec deux sols très différents, à savoir un échantillon 0-20 cm de sol brun calcaire (éch. B) et un échantillon 0-15 cm de sol rouge faiblement ferrallitique (DIVO 11-1). Dans chaque cas, l'expérience a été conduite en présence et en absence de potasse fixatrice (cf. Techniques utilisées, chap. 1, § B-2).

Les figures 27 et 28 montrent l'évolution des quotients respiratoires.

Nous voyons sur ces figures qu'au cours de la première semaine, le Q.R. diminue régulièrement pour remonter ensuite progressivement, ce qui signifie que les substances organiques minéralisées les premières sont aussi les plus oxydées, le degré d'oxydation des substances organiques minéralisables diminuant ensuite régulièrement. La remontée du Q.R. s'explique par la reprise de la chaîne de dégradation des matières organiques du sol et le nouvel apport de substances organiques suffisamment oxydées et immédiatement minéralisables. BUNT et ROVIRA (1955) ont souligné l'importance qu'avaient, avant la reprise de la vie bactérienne, les enzymes oxydants des microorganismes morts dans la respiration des sols séchés à l'air et réhumidifiés, et RUNKLES, SCOTT et NAKAYAMA (1958) ont montré que les sols séchés à l'air pouvaient absorber 5 à 8 fois plus d'oxygène que l'eau du sol ne pouvait en dissoudre à la saturation, d'où pendant les périodes de sécheresse une facile oxydation des matières organiques minéralisables liées aux argiles, et à la réhumidification des sols une forte minéralisation des matières organiques les plus oxydées.

En présence et en absence de potasse fixatrice, le Q.R. du sol rouge faiblement ferrallitique (DIVO 11-1) est à peu près identique (un peu plus faible cependant en absence de potasse), mais pour le sol brun calcaire (éch. B2), on a une forte différence. En absence de potasse fixatrice (et donc en présence de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère du bocal de mesure), le Q.R. du sol brun calcaire est inférieur à 0,65-0,60, alors qu'il apparaît voisin de 1 en présence de potasse fixatrice et donc en atmosphère libre de CO<sub>2</sub>. La raison en est que, le sol étant calcaire, le CO<sub>2</sub>, dès que sa concentration augmente dans l'atmosphère, doit tendre à se fixer sous forme de bicarbonates.

On peut encore observer que le Q.R. du sol ferrallitique varie dans notre expérience autour de 0,70, alors que celui du sol brun calcaire se situe aux environs de 1 en présence de potasse fixatrice. La matière organique du sol ferrallitique est moins importante et de nature très différente de celle du sol brun calcaire — les acides fulviques y dominent notamment par rapport aux acides humiques (BACHELIER, 1963a) (THOMANN, 1964) (DUCHAUFOR et JACQUIN, 1966) — aussi peut-on penser que le carbone immédiatement minéralisable des sols ferrallitiques est inclu au sein de substances organiques moins oxydées que celles présentes dans le sol brun calcaire.

#### 1. Valeur des quotients de minéralisation :

		+ apport minéral
+ paille .....	1,09	1,04
+ fumier .....	0,96	1,06
+ paille + fumier .....	1,36	1,34

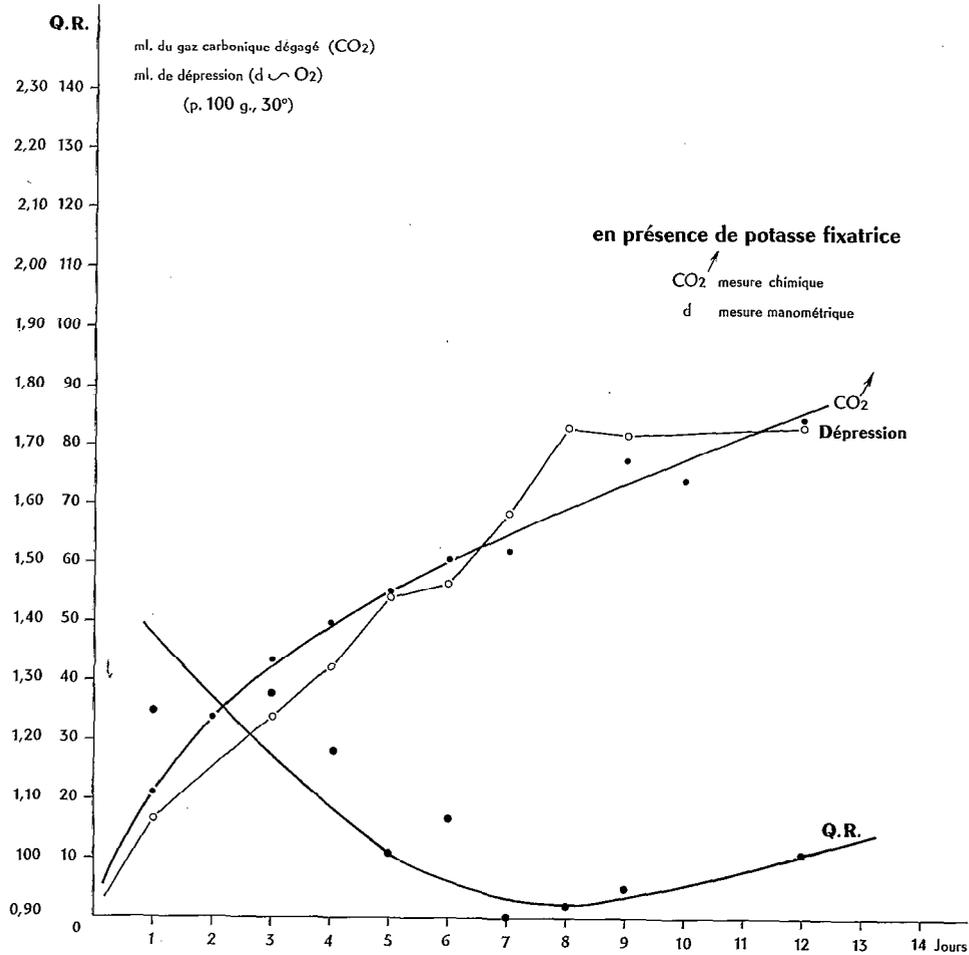
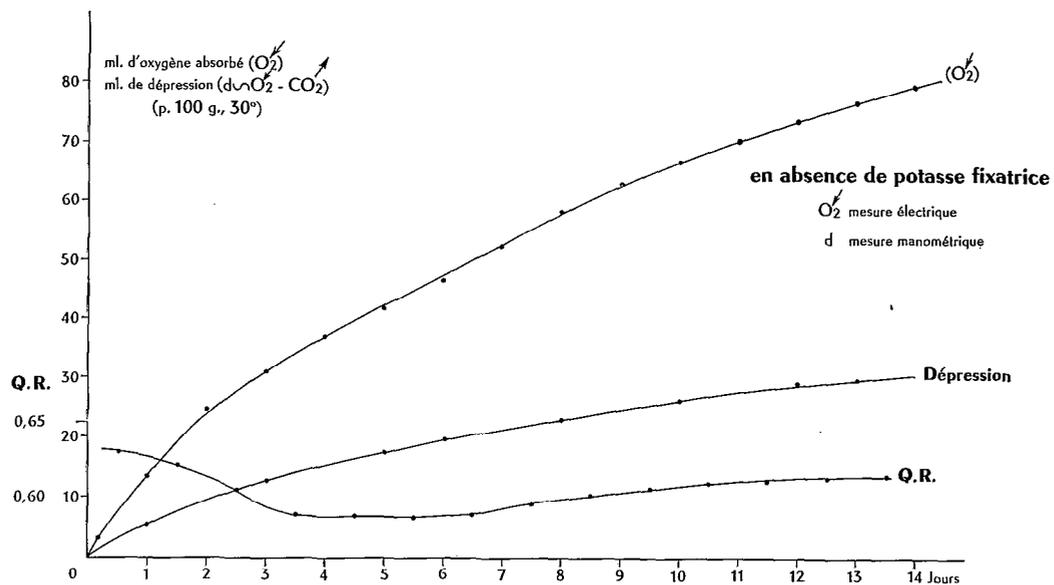


FIG. 27. — Évolution du quotient respiratoire d'un sol brun calcaire (B).

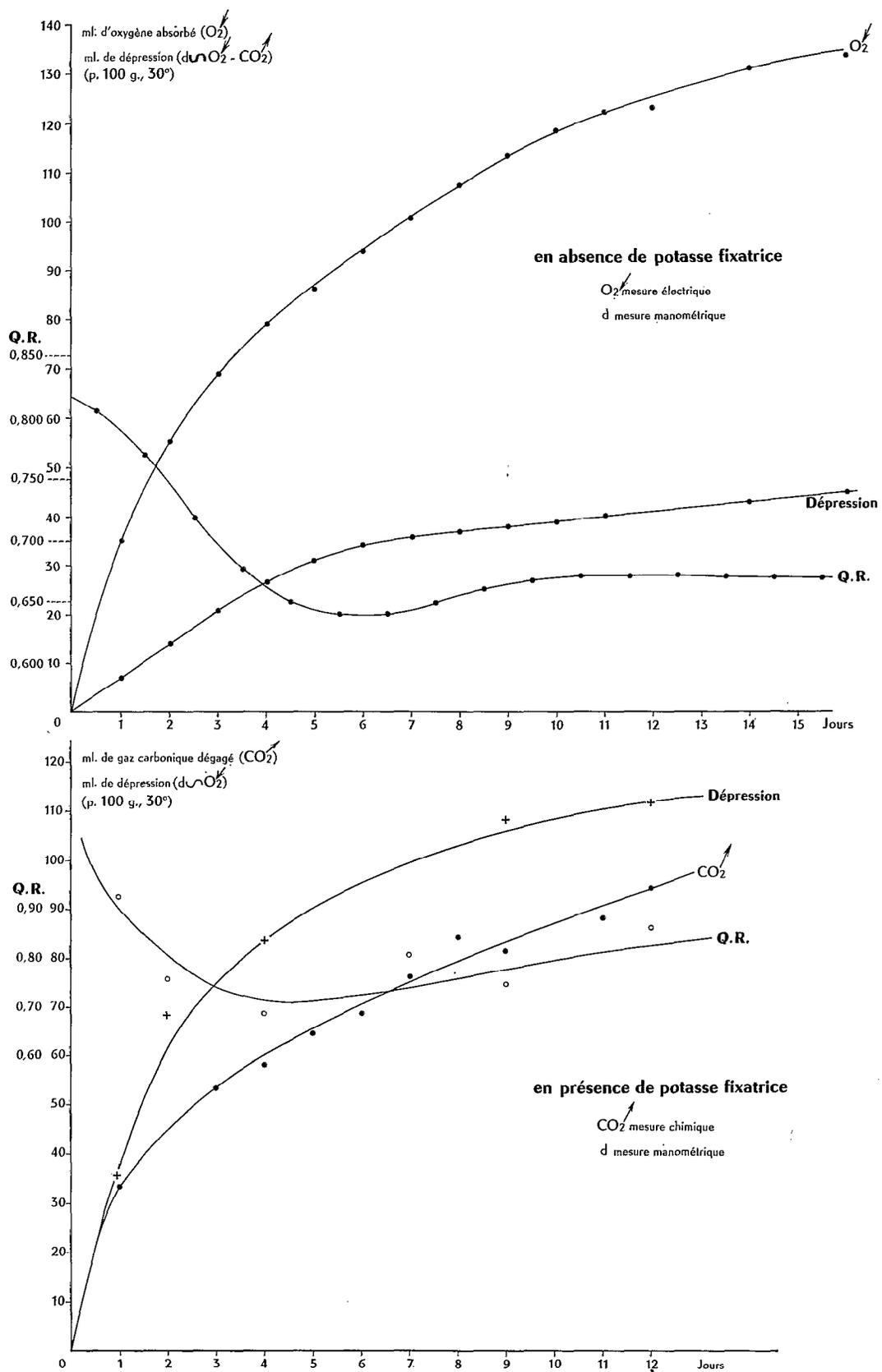


FIG. 28. — Évolution du quotient respiratoire d'un sol rouge ferrallitique (DIVO II-I).

Le rapport  $\frac{\text{O}_2 \text{ dégagé en bocal}}{\text{CO}_2 \text{ absorbé en flacon d'eau}}$  peut être aussi intéressant à considérer, bien que les deux facteurs de ce rapport ne correspondent pas, comme c'est le cas pour le Q.R., à une seule et même mesure de respiration, mais à deux mesures totalement différentes : l'une étant faite dans un bocal d'air à 30° et l'autre dans un flacon d'eau à 20°. Étant donné que l'accroissement du dégagement de CO<sub>2</sub> avec la température varie selon les sols (cf. chap. 2, § A-1b), il serait nécessaire pour se rapprocher du Q.R. de mesurer le dégagement de CO<sub>2</sub> en bocal à la même température que l'absorption d'O<sub>2</sub> en flacon d'eau, c'est-à-dire à 20°, et de calculer le rapport de ces deux valeurs en les exprimant chacune en volume de gaz ou en millimolécules-grammes.

Ayant peu jusqu'ici utilisé ce rapport, nous n'en donnerons qu'un seul exemple d'utilisation avec divers horizons organiques de sols vosgiens :

	$\frac{\text{CO}_2 \text{ bocal } 30^\circ}{\text{O}_2 \text{ flacon d'eau } 20^\circ}$
Mor de sol podzolique (V <sup>65</sup> -6) .....	1,88
Mull calcique de sol brun calcimorphe (V <sup>65</sup> -5) .....	1,76
Mor de sol podzolique sur conglomérats (V <sup>65</sup> -7) .....	1,48
Mull-moder de sol brun acide (V <sup>65</sup> -2) .....	1,41
Mull-moder de sol brun acide (V <sup>65</sup> -3) .....	1,25
Mull de sol brun faiblement lessivé (V <sup>65</sup> -1) .....	1,24
Mull-moder de sol brun acide rouge (V <sup>65</sup> -4) .....	1,22

Ces résultats montrent une plus forte oxydation de la matière organique immédiatement minéralisable dans les mor et le mull calcique que dans les moder, mull-moder et mull de sol brun acide. La sécheresse relative des sols calcaires et des mor peut expliquer cette plus forte oxydation de leur matière organique.

Rappelons que dans le chapitre 1 (§ B-3), on avait déjà noté que dans les profils de sol, les variations de ce rapport (déduites du décalage, sur les axes de coordonnées, des corrélations linéaires entre l'O<sub>2</sub> absorbé et le CO<sub>2</sub> dégagé) traduisaient le degré de plus ou moins forte oxydation des matières organiques immédiatement minéralisables.

Ainsi, en conclusion, la mesure du quotient respiratoire des sols (délicate et nécessitant de nombreuses répétitions) ou le calcul du rapport « CO<sub>2</sub> dégagé en bocal à 30° sur O<sub>2</sub> absorbé en flacon d'eau à 20° » (facile mais critiquable) peuvent permettre de juger du degré d'oxydation de la matière organique immédiatement minéralisable dans les sols.

Cette oxydation plus ou moins poussée des matières organiques immédiatement minéralisables dépend de leur nature, et donc à la fois de l'apport organique au sol, de sa dégradation et du sol lui-même ; notamment de son activité biologique et de son régime hydrique, la sécheresse pouvant favoriser l'oxydation abiotique des matières organiques.

L'étude de l'évolution du Q.R. dans un sol brun calcaire et un sol ferrallitique préalablement séchés à l'air a montré que la matière organique qui se minéralise à 30° en milieu humide correspond d'abord à une matière organique très oxydée, puis de moins en moins oxydée tout au long des sept premiers jours de mesure. Une reprise progressive de la dégradation des matières organiques du sol fait ensuite remonter le Q.R. jusqu'à un palier au cours duquel la minéralisation du carbone est alors compensée par l'apport de carbone immédiatement minéralisable, issu de la dégradation régulière des matières organiques du sol.

La matière organique immédiatement minéralisable des mor et des mull calciques verrait son oxydation favorisée par la sécheresse relative et saisonnière de ces sols.

## B. CARBONE SOLUBLE ET GLUCIDES LIBRES

### 1. IMPORTANCE DES GLUCIDES LIBRES EN TANT QUE SOURCE ÉNERGÉTIQUE DANS LE SOL

Plus que les glucides extraits par hydrolyse acide de la matière organique des sols, ce sont les glucides des extraits alcooliques ou aqueux qui intéressent les pédologues. Ces sucres correspondent en effet aux « sucres libres » des sols et constituent des substances énergétiques pour la vie microbienne tout en s'affirmant d'actifs agents de la structure<sup>1</sup>. Les extraits aqueux des sols renferment aussi à côté des sucres libres de nombreux acides organiques de bas poids moléculaire (KAURICHEV, IVANOVA et NOZDRUNOVA, 1963) et, principalement dans les sols acides, une part plus ou moins importante d'acides fulviques.

L'expérience nous a montré que le dégagement de gaz carbonique des sols est étroitement lié à leur teneur en « sucres libres ». Un extrait aqueux de sol, concentré par lyophilisation et utilisé pour réhumidifier un autre échantillon de sol, accroît le carbone minéralisable de ce dernier d'une valeur proportionnelle au carbone glucidique présent dans l'extrait. Cette augmentation du carbone minéralisable est proportionnelle, mais non égale, au carbone glucidique apporté, car l'équilibre dynamique du sol étant modifié par un apport énergétique, son métabolisme propre tend en contrepartie à diminuer. Ainsi, 100 g d'un échantillon de sol brun calcaire, qui dégage en laboratoire (en 7 jours et à 30°) 102 mg de CO<sub>2</sub>, en dégage 122 mg (soit 5,4 mg de carbone en plus), s'il est réhumidifié par un extrait aqueux de ce même sol renfermant 20,5 mg de carbone réducteur et 9,6 mg de carbone glucidique.

La figure 29 montre la diminution conjointe du carbone minéralisable<sup>2</sup>, du carbone soluble et du carbone des glucides libres dans un sol brun calcaire (éch. B) et un sol rouge ferrallitique (Yapo 11) placés en incubation 7 jours à 30°.

Les fortes valeurs du carbone soluble observables dans l'échantillon de sol ferrallitique sont dues à la dominance des acides fulviques existant dans ce type de sol ; une fraction importante des acides fulviques est en effet directement soluble à l'eau chaude.

De plus, alors que dans le sol brun calcaire après la 3<sup>e</sup> semaine le carbone glucidique soluble correspond approximativement au carbone qui se minéralise en CO<sub>2</sub> en 7 jours à 30°, dans le sol faiblement ferrallitique et sablo-argileux, dès le 3<sup>e</sup> jour, le carbone glucidique soluble devient supérieur au carbone qui se minéralise en 7 jours à 30° ; ceci souligne la tendance à l'accumulation dans les sols ferrallitiques de substances organiques simples à bas poids moléculaire et explique les faibles valeurs du coefficient de minéralisation de ces sols (cf. tableau 9 et § C de ce chapitre).

À côté de leur rôle d'aliments énergétiques de la microflore, les glucides peuvent aussi avoir dans le sol une action spécifique sur une fonction bactérienne définie et participer ainsi directement au déterminisme de l'équilibre dynamique des sols.

SASSON et DASTE (1963) ont ainsi montré que dans les sols arides du Maroc, les *Azotobacter* offraient en été une période de dormance dont ils étaient tirés par les premières pluies et l'apport de substances énergétiques issues des matières organiques en décomposition. SASSON (1965) n'a pas trouvé de relation entre les *Azotobacter* et la microflore cellulolytique, mais ROUQUEROL (1965) a noté que ni la cellulose, ni les hémicelluloses, ni les substances humiques ne peuvent être directement attaquées par les *Azotobacter*, qui utilisent comme substances énergétiques des corps beaucoup moins complexes, et principalement des glucides simples (hexoses et diosides). Dans les sols de rizière étudiés par cet

1. Cf. ROBERT (1964) et BACHELIER (1966a) pour bibliographie plus complète sur les sucres dans les sols.

2. Sur cette figure 29, les courbes de dégagement de CO<sub>2</sub> en 7 jours à 30° ont été décalées d'une semaine à gauche, afin de pouvoir comparer ce dégagement avec le carbone soluble et le carbone des glucides libres susceptibles de se minéraliser dans les 7 jours de la mesure.

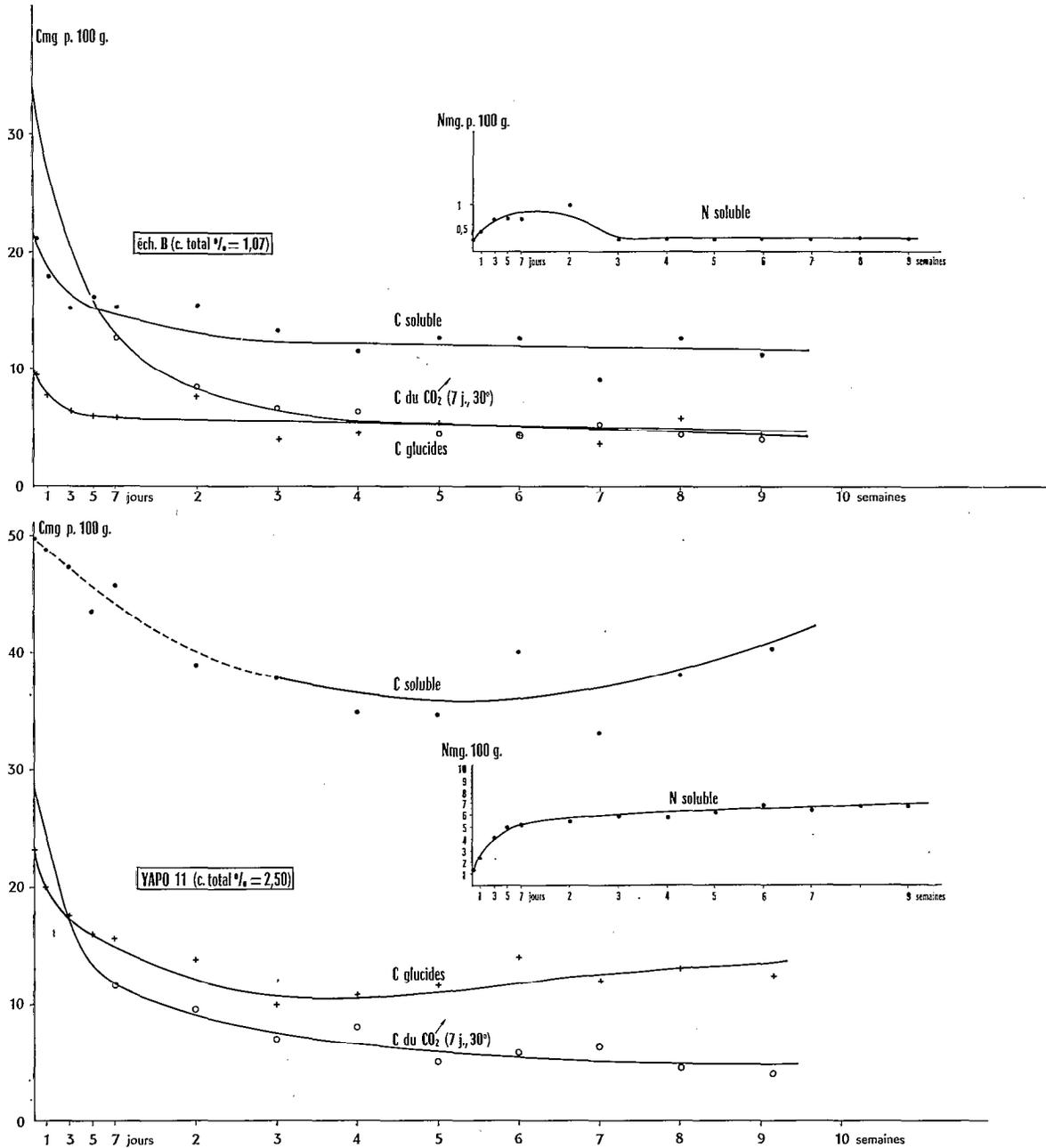


FIG. 29. — Évolution conjointe du C minéralisable, du C soluble, du C glucidique et de l'N soluble dans un sol brun calcaire (éch. B) et un sol ferrallitique (Yapo 11).

auteur, la fixation d'azote, qui varie au cours de l'année, s'accroîtrait en fonction de l'apport des substances énergétiques que constituent les glucides libres du sol.

GIBSON (1965) a aussi mis en évidence les besoins en glucides des bactéries symbiotiques fixatrices d'azote ; besoins plus particulièrement importants au cours de la formation des nodosités sur les racines de légumineuses.

La décomposition des glucides par les microorganismes du sol produit divers acides organiques qui, bien que n'ayant en milieu aérobie qu'une existence très limitée, participent cependant activement

au métabolisme des sols et en influencent fortement la fertilité. Certains de ces acides, et notamment l'acide citrique, peuvent ainsi libérer le phosphore des phosphates de calcium, d'aluminium ou de fer insolubles (QUASTEL, 1965).

Les glucides, même à très faible concentration, peuvent encore dans le sol participer à d'importantes fonctions physiologiques et par là favoriser la croissance de certaines plantes (BROWN, ROBINSON et JOHNSON, 1950).

## 2. ACTION DES GLUCIDES SUR LA STRUCTURE DES SOLS (BACHELIER, 1966a)

Après avoir observé dans le chapitre précédent un rapport étroit entre le carbone facilement minéralisable et la stabilité structurale des sols (cf. chap. 2, § A-2b et § B), et après avoir vu que ces substances organiques facilement minéralisables étaient essentiellement constituées par des sucres libres solubles, il apparaît intéressant d'examiner brièvement ici comment peut se traduire l'action des sucres sur la structure des sols.

La formation des agrégats dans le sol est au départ d'ordre physico-chimique et dépend notamment de la granulométrie, de la nature des argiles, de la saturation du complexe colloïdal, ou encore du fer libre pour les sols ferrallitiques, mais le faciès de ces agrégats, leur disposition structurale et surtout leur stabilité dépendent en grande partie de la vie du sol, de sa teneur en glucides et en acides uroniques (WATSON et STOJANOVIC, 1965) (SAINI et MACLEAN, 1966) ainsi que des polysaccharides issus des gommages et mucus bactériens<sup>1</sup> (SHRIKHANDE, 1933, 1936) (HENIN, 1944) (CHESTERS, ATTOE et ALLEN, 1957). Les mucus des *Azotobacter* et des *Rhizobium* sont notamment très efficaces (RENNIE, TRUOG et ALLEN, 1954) (GUPTA et SEN, 1962) (CLAPP, DAVIS et VAUGAMAN, 1962) (DAVIS et HEALD, 1964) de même ceux des *Cytophaga* et des *Cellulomonas* (MOLINA, 1967). Les agrégats stabilisés par de telles matières organiques ne se reforment généralement pas après désintégration mécanique, car ces agents de liaison ne sont actifs que sous la forme soluble (HARRIS, CHESTERS et ALLEN, 1966).

Personnellement, mélangeant intimement le mucus de colonies d'*Azotobacter* à un sol rouge ferrallitique placé ensuite en incubation à 30° pendant une semaine, nous avons pu constater une augmentation significative des agrégats (tant après prétraitement à l'alcool qu'après prétraitement au benzène) et une augmentation nette de la stabilité structurale (Is passant de 2,54 à 1,92).

Il est connu que les racines, et plus particulièrement le dense chevelu de racines des graminées, favorise aussi la structuration des sols (GREENLAND, LINDSTROM et QUIRK, 1961) (GADGIL, 1963), non seulement par l'action mécanique et enrobante des racines et des radicelles, mais surtout par les produits résultant du métabolisme de la microflore des rhizosphères. WERLEY, DUFF, BACON et autres (1965) ont ainsi montré que diverses bactéries demeurant à la surface des racines de ray-grass étaient susceptibles de produire un abondant matériel muqueux renfermant des fructosanes.

Il est à noter que l'amélioration de la structure par les racines s'accompagne obligatoirement d'une amélioration de la structure par la faune, et vice versa, car si la faune dépend du milieu, elle contribue aussi et simultanément à son déterminisme. Par son activité, elle améliore les conditions physico-chimiques du sol et, par sa fragmentation et sa prédigestion des débris végétaux, elle y favorise une vie microbienne plus intense, au bénéfice des qualités structurales des sols et en fin de compte des plantes (BACHELIER, 1963 b ; VAN DER DRIFT, 1965).

Les mycéliums des champignons peuvent consolider la structure des sols, soit directement par la résistance mécanique de leurs filaments, soit indirectement par l'intermédiaire des bactéries mycophages sécrétrices de gommages. Ils semblent plus particulièrement efficaces dans la stabilisation de la structure des sols sableux (BOND et HARRIS, 1964).

Les molécules des substances agrégatives sont surtout, comme les polysaccharides et les polyuronides, de type linéaire, et renferment de nombreux groupements hydroxyles OH susceptibles de s'unir à l'H des particules argileuses, d'où cette « protection » des substances glucidiques facilement minéralisables dans les sols argileux. Les acides humiques, colloïdes de structure moléculaire plus sphérique, s'avèrent moins agrégatifs (FIELDER, 1957). Les substances humiques, bien que demeurant des facteurs essentiels du bon équilibre des sols, ne sont plus en effet actuellement considérées comme responsables premiers de la structure. MARTIN (1963), THOMANN (1963), COMBEAU et QUANTIN (1964) ont ainsi observé que la stabilité structurale de sols ferrallitiques et de vertisols d'Afrique apparaissait plus liée aux matières organiques non humifiées qu'aux substances humiques. Cependant, si dans les podzols les substances humiques s'avèrent même des agents d'altération de la structure, dans les chernozems et les autres sols calcaires, ces substances (alors de nature plus complexe, renfermant des glucides et énergiquement flocculées par le calcium) y déterminent par contre une structure très stable. Dans la plupart des sols, l'action possible des substances humiques sur la structure dépend en grande partie de leur teneur en hydrates de carbone.

1. Les gommages microbiennes sont habituellement dosées par la technique de Forsyth, qui consiste à flocculer par l'acétone les gommages présentes dans la fraction des acides fulviques (RENNIE, TRUOG et ALLEN, 1954) (CHESTERS, ATTOE et ALLEN, 1957). Les essais que nous avons pu faire de cette technique ne nous ont pas pleinement satisfait.

Les expériences de MEHTA, STREULI, MULLER et autres (1960) ou de GREENLAND, LINDSTROM et QUIRK (1962) indiquent une évolution dans les facteurs de la stabilité structurale des agrégats au cours du temps. Basées sur l'oxydation des polysaccharides du sol par un périodate suivie ou non d'une hydrolyse acide, ces expériences ont montré que si les polysaccharides étaient bien en grande partie responsables de la stabilité des jeunes agrégats (sols cultivés et sols sous prairies récentes), d'autres matériaux, comme les acides humiques et les substances de type humine ou même dérivées de lignine, maintenaient et même renforçaient les vieux agrégats (sols sous anciennes prairies) ; cela, pour autant que le sol demeurant suffisamment organique, le cycle humique y soit maintenu constant, et surtout en présence de  $\text{CaCO}_3$  libre à l'action floculante énergique (sols bruns calcaires, rendzines). MONNIER (1965), étudiant l'action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols, a confirmé cette action successive des corps microbiens, des substances préhumiques et de l'humus stable, au cours de la dégradation des débris végétaux dans les sols.

### 3. SUBSTANCES HUMIQUES ET SUCRES LIBRES DE DIVERS SOLS

GUPTA et SOWDEN (1963) dans un extrait à l'éthanol 80 % (éaporé sous vide à 40°, repris par l'eau, centrifugé et chromatographié) ont trouvé que dans un podzol les divers sucres constituaient 0,025 % de la matière organique, le glucose représentant 41 % des sucres extraits. Cette teneur en sucres libres nous paraît faible et doit être due à la méthode même d'extraction et de dosage.

ALVSAKER et MICHELSEN (1957), dans des extraits à l'eau froide d'un horizon F d'un sol sous forêt de pins, ont trouvé que les divers sucres ainsi extraits représentaient 0,4 % de la matière organique sèche, dont 0,22 % pour le seul glucose.

Personnellement, compte tenu des résultats obtenus en étudiant divers modes d'extraction à l'eau, nous avons choisi de faire nos extractions de substances réductrices et de sucres libres à l'eau distillée à 70° pendant 3 heures (cf. techniques utilisées, chap. 1).

Le tableau 9 rassemble à la page suivante quelques résultats obtenus sur divers sols d'Outre-Mer et de France.

Plusieurs observations générales peuvent être dégagées de ce tableau :

— Le carbone des glucides solubles à l'eau distillée chaude constitue en moyenne de 0,6 à 2 % du carbone total des sols ferrugineux, du vertisol et du sol hydromorphe à pseudogley du Sénégal, ainsi que des divers horizons organiques des sols de France (à l'exception des échantillons d'anmoor (V<sup>63</sup>-3) et d'hydromor (V<sup>63</sup>-22)). Par contre dans les sols ferrallitiques, il en constitue moins de 0,6 %. Les sols ferrallitiques sablo-argileux peuvent cependant faire exception, tel l'horizon organique Y 11 (sol faiblement ferrallitique sur schistes à arkose) : 0,9 %, et la partie supérieure du profil AD 9 (sol ferrallitique sur arène granitique) : 1,2 et 1 %.

— Le carbone des glucides solubles à l'eau distillée chaude est toujours inférieur au carbone des acides fulviques.

— Le carbone des acides fulviques est lui-même généralement inférieur au carbone des acides humiques, à trois exceptions près : 1° celle des sols ferrallitiques évolués<sup>1</sup>, où il est bien connu que les acides fulviques dominent généralement les acides humiques (BACHELIER, 1963a ; THOMANN, 1964 ; DUCHAUFOR et JACQUIN, 1966), 2° celle de certains horizons organiques de sols acides, tels les échantillons V<sup>65</sup>-1, V<sup>65</sup>-3 et V<sup>65</sup>-7 à pH eau de 5,1, 5,9 et 3,9 et enfin 3° celle du sol intensément travaillé par les vers de terre, où se manifestent les substances organiques très dégradées présentes dans les excréta de ces animaux (pH eau = 6,5).

— Le carbone des glucides solubles à l'eau distillée chaude constitue généralement plus de la moitié du carbone des matières organiques solubilisées dans les mêmes conditions et dosées par manganimétrie. Il n'en constitue, toutefois, que 40 à 55 % dans les divers horizons organiques des sols acides de France et seulement 30 à 50 % dans les sols ferrallitiques sur roches schisteuses de Côte d'Ivoire. Dans les sols salés, le carbone soluble ne peut être dosé par manganimétrie par suite de la présence d'éléments minéraux réducteurs. Dans les sols non salés du Marais Poitevin, le carbone glucidique constitue environ 56 % du carbone soluble.

1. Dans les sols ferrallitiques bruns ou brun-rouge sur basalte récent ou sub-récent et encore peu évolués (BACHELIER, 1957), les acides humiques prédominent encore sur les acides fulviques ; il en est de même pour le sol ferrallitique sur arène granitique (AD 9) et l'horizon très organique (DIVO 11-1) du sol faiblement ferrallitique de Côte d'Ivoire.

TABLEAU 9. — Substances humiques et glucides libres de divers sols.

	C total (W.B) (%)	En % du C total					C du CO <sub>2</sub> en 7 jours à 30° (= Q.M.)
		Soluble pyro Na M/10		Soluble eau 70°, 3 h ½			
		C acides humiques	C acides fulviques	C réducteur	C glucides		
<b>SOLS DU SÉNÉGAL</b>							
Vertisol							
(argilo-sableux) BAV 21 ( 0- 10 cm)...	0,62	25,64	4,19	1,45	1,02	2,39	
22 ( 30- 40 cm)...	0,80	41,12	4,25	1,01	0,56	1,65	
23 ( 90-100 cm)...	0,21			1,51	0,79	5,39	
24 (120-130 cm)...	0,16			1,31	1,25	5,38	
25 (150-160 cm)...	0,15			1,10	1,33	6,59	
Sol ferrugineux tropical peu lessivé							
(sableux) BAD 11 ( 0- 2 cm).....	0,49	8,57	8,37	3,52	2,43	6,04	
(= Sol dior) 12 ( 2-10 cm).....	0,26	13,46	9,61	3,11	1,92	2,82	
13 (10-10 cm).....	0,15	22,67	14,67	1,60	1,28	3,70	
14 (40-50 cm).....	0,14	38,57	16,43	1,07	0,83	2,56	
Sol ferrugineux tropical lessivé							
(sableux) CD 90 ( 0-10 cm).....	0,48	15,41	5,42	2,00	1,11	2,08	
(sablo-argileux) 91 (20-30 cm).....	0,30			1,40	1,03	2,73	
(argilo-sableux) 92 ( 50 cm).....	0,22			1,29	0,61	1,00	
Sol hydromorphe à pseudogley							
(sableux) CCB 310 ( 0- 5 cm).....	0,86	9,07	7,21	2,57	1,47	2,35	
311 (30-50 cm).....	0,12	29,00	17,00	1,50	1,67	2,55	
<b>SOLS DE COTE D'IVOIRE</b>							
Sols faiblement ferrallitiques							
(sablo-argileux) YAPO 11 ( 0- 5 cm).....	2,50	10,08	13,52	1,89	0,93	1,14	
12 (10-40 cm).....	0,83	5,54	27,59	0,92	0,36	1,03	
(argilo-limoneux) DIVO 11-1 ( 0-15 cm).....	28,00	5,50	40,0	1,03	0,38	1,23	
(argileux) 11-2 (40-60 cm).....	3,80	2,63	35,00	0,71	0,22	1,27	
<b>SOLS DU CAMEROUN</b>							
Sols ferrallitiques bruns sur basalte							
(argilo-limoneux) AD 501 ( 0- 3 cm).....	6,69	10,22	5,56	0,78	0,44	1,31	
502 ( 3-10 cm).....	5,94	11,78	5,89	0,68	0,38	1,06	
503 (10-20 cm).....	3,94	10,96	8,76	0,61	0,34	1,03	
AD 61 ( 0- 5 cm).....	4,40	8,32	6,91	0,71	0,51	0,97	
62 ( 5-15 cm).....	3,50	9,60	9,34	0,51	0,42	0,91	
63 (15-25 cm).....	2,92	9,04	8,94	0,48	0,34	0,85	
64 ( 42 cm).....	1,69	4,61	12,07	0,21	0,17	0,78	
65 ( 60 cm).....	1,08	2,04	15,28	0,17	0,11	0,98	
66 ( 94 cm).....	0,99	1,21	15,15	0,09	0,08	1,02	
Sols ferrallitiques brun-rouge sur basalte sub-récent							
(argileux) AD 11( 0- 5 cm)....	4,52	8,85	6,41	0,68	0,45	1,06	
12 ( 5- 10 cm)....	4,12	8,15	6,84	0,56	0,40	0,85	
13 (28- 38 cm)....	2,08	8,65	9,95	0,19	0,16	0,72	
14 (55- 65 cm)....	1,42			0,17	0,12	0,71	
15 (98-122 cm)....	0,73	2,05	10,68	0,29	0,16	1,43	
16 ( 188 cm)....	0,43	3,26	10,70	0,14	0,19	2,61	
AD 381 ( 0- 3 cm)....	4,61	6,31	6,51	0,81	0,47	1,72	
382 ( 3- 10 cm)....	3,18	9,15	9,81	0,58	0,40	1,12	
383 (20- 40 cm)....	2,46	11,71	13,17	0,27	0,14	0,54	
384 ( 100 cm)....	0,90	2,55	15,22	0,33	0,13	0,84	
385 ( 200 cm)....	0,51	2,35	8,43	0,26	0,16	1,68	

	C total (W.B) (%)	En % du C total				C du CO <sub>2</sub> en 7 jours à 30° (= Q.M.)
		Soluble pyro Na M/10		Soluble eau 70°, 3 h ½		
		C acides humiques	C acides fulviques	C réducteur	C glucides	
Sol ferrallitique rouge sur basalte ancien (argileux) AD 491 ( 0- 3 cm).....	3,46	5,23	8,32	1,06	0,67	1,47
492 ( 3-10 cm).....	2,35	6,72	11,23	0,91	0,54	1,29
493 (10-20 cm).....	1,87	3,85	8,66	0,67	0,41	1,16
494 (20-40 cm).....	1,69			0,46	0,29	0,89
495 ( 80 cm).....	0,93			0,35	0,18	0,77
Sol ferrallitique rouge sur basalte ancien rajeuni par l'érosion						
(argileux) AD 411 ( 0- 3 cm).....	1,64	2,26	8,41	1,13	0,67	1,73
412 ( 3-10 cm).....	1,11	1,98	11,53	0,78	0,45	1,41
413 (10-20 cm).....	0,54	1,85	10,74	0,39	0,31	1,14
414 (40-50 cm).....	0,40			0,34	0,21	1,35
415 ( 80 cm).....	0,35			0,43	0,24	1,55
Sol ferrallitique sur arène granitique (sablo-argileux) AD 91 ( 0- 3 cm).....	1,93	4,35	9,01	2,06	1,21	2,35
92 ( 3-10 cm).....	1,79	3,63	10,56	1,88	1,01	2,36
93 (10-20 cm).....	1,50	2,00	9,80	1,19	0,67	1,56
94 (20-40 cm).....	1,21	2,07	12,39	1,39	0,83	1,58
95 ( 80 cm).....	0,50	3,80	14,20	0,36	0,17	1,13
<b>SOLS DE FRANCE</b>						
Rendzine (sablo-limoneux) M 11 (3-12 cm).....	3,67	6,71	7,15	2,37	1,23	2,82
Sol brun calcaire (sablo-argileux) éch. B (0-27 cm).....	1,07	8,32	7,66	1,92	0,90	2,75
Mull calcique de sol brun calcimorphe (argilo-limoneux) V <sup>65</sup> -5 (0-20 cm).....	4,92	4,08	4,76	1,77	0,81	2,69
Mull de sol brun faiblement lessivé (limono-argileux) V <sup>65</sup> -1 (5-15 cm).....	3,12	4,36	10,48	2,74	1,32	3,09
Mull-moder de sols bruns acides sur grès						
V <sup>65</sup> -2 (2-7 cm).....	5,96	7,65	7,75	3,17	1,45	1,45
V <sup>65</sup> -3 (2-7 cm).....	4,63	4,34	7,19	2,02	1,00	2,71
(limono-sableux) V <sup>65</sup> -4 (2-7 cm).....	3,30	14,72	5,73	3,27	1,53	2,19
Moder de sol podzologique sur grès V <sup>63</sup> -6 (2-7 cm).....	2,16	13,89	5,09	3,89	2,08	1,87
Mor de sols podzologiques (V <sup>65</sup> ) et de podzols (V <sup>63</sup> ) sur grès						
V <sup>65</sup> -6 (2-7 cm).....	12,15			2,30	1,15	1,30
V <sup>65</sup> -7 (2-7 cm).....	39,81	1,78	2,83	1,67	0,70	0,34
V <sup>63</sup> -7 (2-7 cm).....	10,41	4,46	3,41	2,42	1,34	0,94
V <sup>63</sup> -9 (2-7 cm).....	11,84	10,91	8,31	4,06	2,11	1,11
Anmoor de gley humique sous prairie V <sup>63</sup> -3 (5-20 cm).....	148,50	12,73	5,93	0,44	0,14	0,66
Hydromor de gley humique sous sphaignes V <sup>63</sup> -22 (10-35 cm)....	220,30	10,76	2,89	1,20	0,51	0,59
Sol à hydromorphie temporaire intensément colo- nisé par les vers de terre (limono-argileux) V <sup>63</sup> -5 (0-10 cm).....	4,22	6,33	11,97	4,26	3,47	2,35

— Le carbone des glucides solubles à l'eau distillée chaude correspond, tout au moins dans les horizons supérieurs, à environ la moitié du carbone minéralisable en 7 jours à 30°, mais dans le vertisol (BAV 2), la rendzine (M 11), le sol brun calcaire (éch. B) et le mull calcique (V<sup>65</sup>-5), il correspond à moins de la moitié de ce carbone minéralisable, alors que dans les mor et moder de podzols et sols podzoliques, il est au contraire supérieur à ce carbone minéralisable.

Ces divers résultats soulignent l'importance qu'ont les sucres libres dans le métabolisme des sols, mais cette connaissance quantitative des composés organiques solubles et des sucres libres permet surtout une analyse de la dynamique de la minéralisation du carbone des sols, quand on considère les dégagements de CO<sub>2</sub> des sols en fonction de leurs teneurs en carbone total, carbone soluble et carbone glucidique.

Les résultats du tableau 9 seront repris en fonction des divers types de sol après la représentation graphique de leurs différents quotients de minéralisation.

## C. QUOTIENTS DE MINÉRALISATION DU CARBONE TOTAL, DU CARBONE SOLUBLE ET DU CARBONE DES GLUCIDES LIBRES

### I. REPRÉSENTATION GRAPHIQUE DES QUOTIENTS DE MINÉRALISATION

A partir du Carbone du CO<sub>2</sub> dégagé (7 jours, 30°)  
 du Carbone glucidique libre (orcinol ou anthrone)  
 du Carbone soluble  
 du Carbone total (Walkley et Black),

il est possible de calculer les quotients de minéralisation suivants :

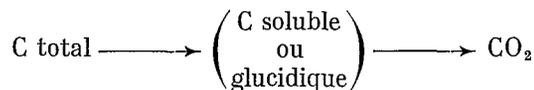
$$\frac{\text{C du CO}_2}{\text{C total}} \times 100 = \text{Q.M. (quotient de minéralisation usuel, cf. chap. 1, § D)}$$

$$\frac{\text{C du CO}_2}{\text{C soluble}} \times 100 = \text{q.m.1}$$

$$\frac{\text{C du CO}_2}{\text{C glucidique}} \times 100 = \text{q.m.2}$$

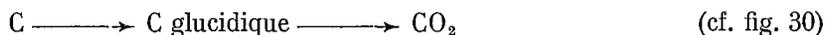
$$\text{et } \frac{\text{q.m.1}}{\text{q.m.2}} = \frac{\text{C glucidique}}{\text{C soluble}}$$

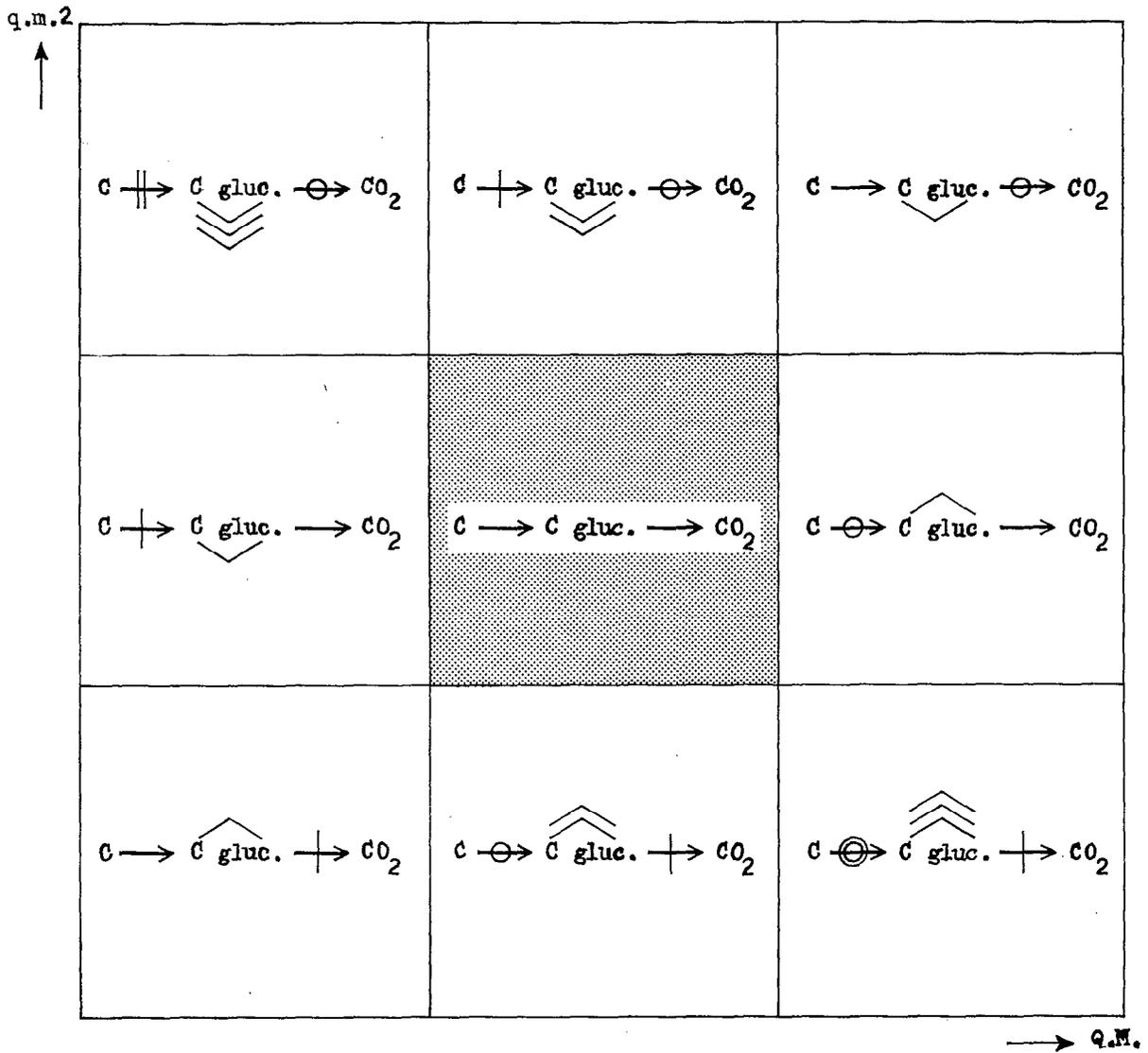
La représentation graphique du q.m.1 et du q.m.2 en fonction du Q.M. permet de comparer entre eux les dynamiques de minéralisation du carbone des sols ramené ici au schéma simple :



Il est à noter que le choix d'autres intermédiaires valables permettrait d'envisager d'autres schémas de minéralisation du carbone.

Considérons (fig. 30) la représentation graphique du q.m.2 en fonction du Q.M., et par une division en 3 de l'axe des abscisses et des ordonnées, définissons ainsi sur ce graphique 9 cases, dont la case centrale qui correspond aux valeurs moyennes, sera par suite arbitrairement considérée comme correspondant à une dynamique de minéralisation normale du carbone, soit :





SYMBOLES UTILISES :

- accélération :  $\ominus \rightarrow$  ,  $\oplus \rightarrow$
- ralentissement :  $\dashv \rightarrow$  ,  $\parallel \rightarrow$
- accumulation :  $\text{C gluc.}$  ,  $\text{C gluc.}$  ,  $\text{C gluc.}$
- raréfaction :  $\text{C gluc.}$  ,  $\text{C gluc.}$  ,  $\text{C gluc.}$

Fig. 30. — Représentation graphique des quotients de minéralisation donnant un schéma de la dynamique de la minéralisation du carbone dans les sols.

La dynamique de minéralisation du carbone des 8 autres cases peut alors se définir logiquement par rapport à la dynamique jugée normale de la case centrale.

Dans les 3 cases supérieures, les valeurs du q.m.2  $\left( = \frac{C \text{ du } CO_2}{C \text{ glucidique}} \times 100 \right)$  étant plus fortes, on a plus de  $CO_2$  pour une même quantité de C glucidique, ou moins de C glucidique pour une même quantité de  $CO_2$ , et donc en fin de compte une accélération de l'évolution C glucidique  $\longrightarrow CO_2$ , accélération que nous représenterons par le symbole  $\ominus \longrightarrow$ , soit : C gluc.  $\ominus \longrightarrow CO_2$ .

Inversement, dans les 3 cases inférieures de notre quadrillage, on notera un ralentissement de l'évolution C glucidique  $\longrightarrow CO_2$ , ralentissement que nous représenterons par le symbole  $\dashv \longrightarrow$  soit C gluc.  $\dashv \longrightarrow CO_2$ .

Considérons maintenant pour un même q.m.2, les variations du Q.M.  $\left( \frac{C \text{ du } CO_2}{C \text{ total}} \times 100 \right)$ ; compte tenu des accélérations et des ralentissements déjà notés, on peut aussi indiquer des ralentissements ou des accélérations pour les diverses évolutions C total  $\longrightarrow$  C glucidique.

Pour une évolution normale C glucidique  $\longrightarrow CO_2$  correspondant aux 3 cases médianes horizontales, les évolutions C total  $\longrightarrow$  C glucidique seront respectivement représentées pour des valeurs de Q.M. croissantes, et avec le symbolisme choisi, par les schémas suivants :



Pour les évolutions accélérées C glucidique  $\ominus \longrightarrow CO_2$  correspondant aux 3 cases supérieures, les évolutions C total  $\longrightarrow$  C glucidique seront respectivement représentées pour des valeurs de Q.M. croissantes, et avec le même symbolisme, par les schémas suivants :



Pour les évolutions freinées C glucidique  $\dashv \longrightarrow CO_2$  correspondant aux 3 cases inférieures, les évolutions C total  $\longrightarrow$  C glucidique seront respectivement représentées pour des valeurs de Q.M. croissantes, et toujours avec le même symbolisme, par les schémas suivants :



De la dynamique de ces différentes évolutions du carbone, ressort une tendance plus ou moins grande à la raréfaction ou à l'accumulation du carbone glucidique, ce que sur la figure 30 nous symboliserons ainsi :

	faible	moyenne	forte
raréfaction	C gluc. 	C gluc. 	C gluc. 
accumulation	C gluc. 	C gluc. 	C gluc. 

Il est nécessaire de réaliser ces graphiques de quotients de minéralisation en échelles logarithmiques, afin de limiter l'étalement des profils pédologiques ainsi étudiés.

Grâce à l'emploi d'échelles logarithmiques, il est aussi à constater que l'abaissement d'un point du graphique q.m.2/Q.M. sur le graphique q.m.1/Q.M. est d'autant plus grand que le carbone glucidique libre représente dans le sol étudié une plus petite fraction du carbone soluble :

$$\begin{aligned} \log q.m.2 - \log q.m.1 &= \log \frac{q.m.2}{q.m.1} \\ &= \log \frac{C \text{ soluble}}{C \text{ glucidique}} \end{aligned}$$

## 2. ANALYSE DE RÉSULTATS. DYNAMIQUE DE LA MINÉRALISATION DU CARBONE DE DIVERS SOLS EN LABORATOIRE

Les figures qui suivent rassemblent les quotients de minéralisation de différents sols. Les figures 31, 33, 35 (q.m.2/Q.M.) font appel au carbone glucidique libre de ces divers sols, les figures 32, 34, 36 (q.m.1/Q.M.) à leur carbone soluble. La figure 37 réservée à une collection de sols du Marais Poitevin (chap. 2, § D) concerne à la fois ces deux formes de carbone (q.m.2/Q.M. et q.m.1/Q.M.). Cette dernière figure n'est donnée ici qu'à titre d'exemple de représentation graphique simultanée des 3 coefficients de minéralisation choisis. La plupart de ces sols du Marais Poitevin ont d'ailleurs une minéralisation potentielle normale de leur carbone.

Compte tenu des données du tableau 9 et d'après les figures 31 et 32 :

La matière organique des *sols calcaires de France* ici étudiés (rendzine M 11, sol brun calcaire B, mull calcique V<sup>65-5</sup>) apparaît facilement minéralisable. Le carbone glucidique libre y représente moins de la moitié du carbone minéralisable en 7 jours à 30°. Les acides humiques comme les acides fulviques y représentent environ 10 à 15 % du carbone total.

La matière organique du *vertisol* (BAV 2) apparaît de même facilement minéralisable, et plus particulièrement le carbone glucidique ou le carbone soluble demeurant dans la profondeur du sol. Toutefois, les glucides libres, tout en diminuant régulièrement avec la profondeur, constituent une part de plus en plus importante du carbone total. La raison en est que dans les horizons profonds des vertisols, la matière organique facilement minéralisable ne peut guère évoluer en saison des pluies, par suite des conditions de compacité et d'anaérobiose du milieu, mais se minéralise par contre très facilement en saison sèche après fissuration du sol. Le quotient de minéralisation est ici de 5,4 à 125 cm et les sucres libres, tout en représentant moins de 25 % du carbone minéralisé sous forme de CO<sub>2</sub> en 7 jours à 30°, constituent cependant 1,25 % du carbone total. Le carbone glucidique, protégé par la compacité du sol et les argiles de type montmorillonite (SØRENSEN, 1965) constitue donc une fraction importante du carbone total, alors que le dynamisme de ce sol voudrait qu'il en fût tout autrement. Un phénomène analogue, et pour des raisons identiques, se manifeste, nous le verrons, à un degré moindre, dans les horizons profonds des sols ferrallitiques argileux bruns et brun-rouge de l'Adamaoua (Cameroun).

Dans ce vertisol, les acides humiques stabilisés par le calcium et les argiles constituent le 1/4 du carbone total dans les 10 premiers centimètres et les 4/10 dans les horizons sous-jacents. Les acides fulviques, contrairement à ceux des sols calcaires de France, ne représentent dans le vertisol qu'une faible fraction des substances humiques totales.

La matière organique *des mor et des moder de podzol et de sols podzoliques* présente un faible pouvoir de minéralisation (Q.M. de 1,9 pour le moder acide V<sup>63-6</sup> et de 0,3 à 1,5 pour les divers mor de podzol). La minéralisation du carbone glucidique, à la différence, nous le verrons, de ce qui se passe dans les sols ferrallitiques, s'y trouve fortement freinée. Les matières organiques de ces sols, tout en subissant une lente humification acide, libèrent normalement des sucres, mais ceux-ci pour diverses raisons encore discutées (pH trop acide ou enzymes de la respiration défaillantes) voient leur minéralisation ralentie. Le carbone glucidique dans ces sols tend en effet à se maintenir à un taux relativement élevé et généralement supérieur au carbone minéralisé en 7 jours à 30°. Cette stagnation des matières

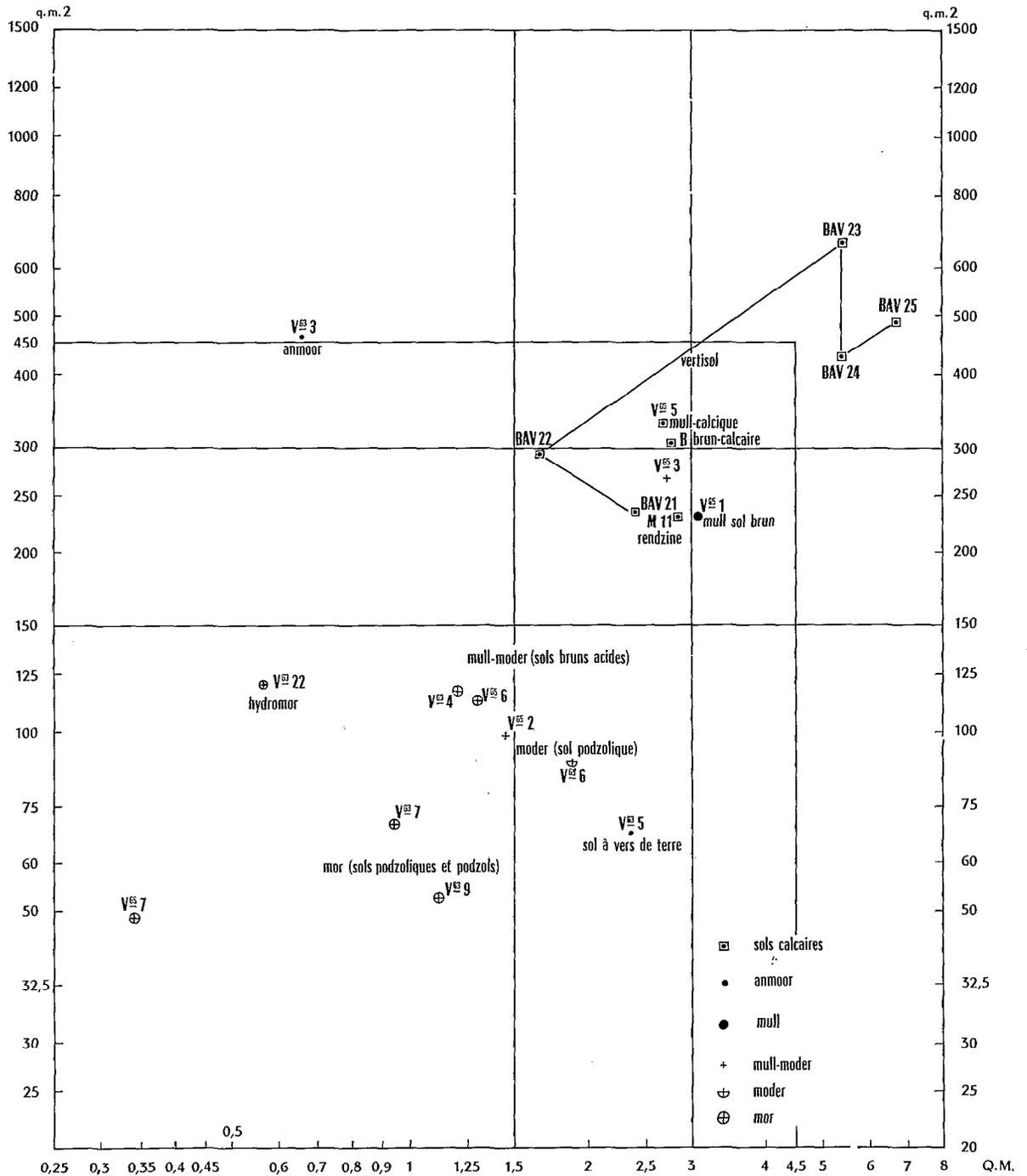


FIG. 31. — Quotients de minéralisation du C total (Q.M.) et du C glucidique (q.m.2).

organiques facilement minéralisables en favorise l'oxydation abiotique en période de sécheresse, comme nous l'a montré dans d'autres travaux l'évolution de leur quotient respiratoire.

Dans les mor et moder de podzol et sols podzologiques, la teneur absolue en carbone total est habituellement forte, sans que pour cela les teneurs en acides humiques et acides fulviques y soient proportionnellement supérieures à celles des autres sols à minéralisation normale. Les acides fulviques,

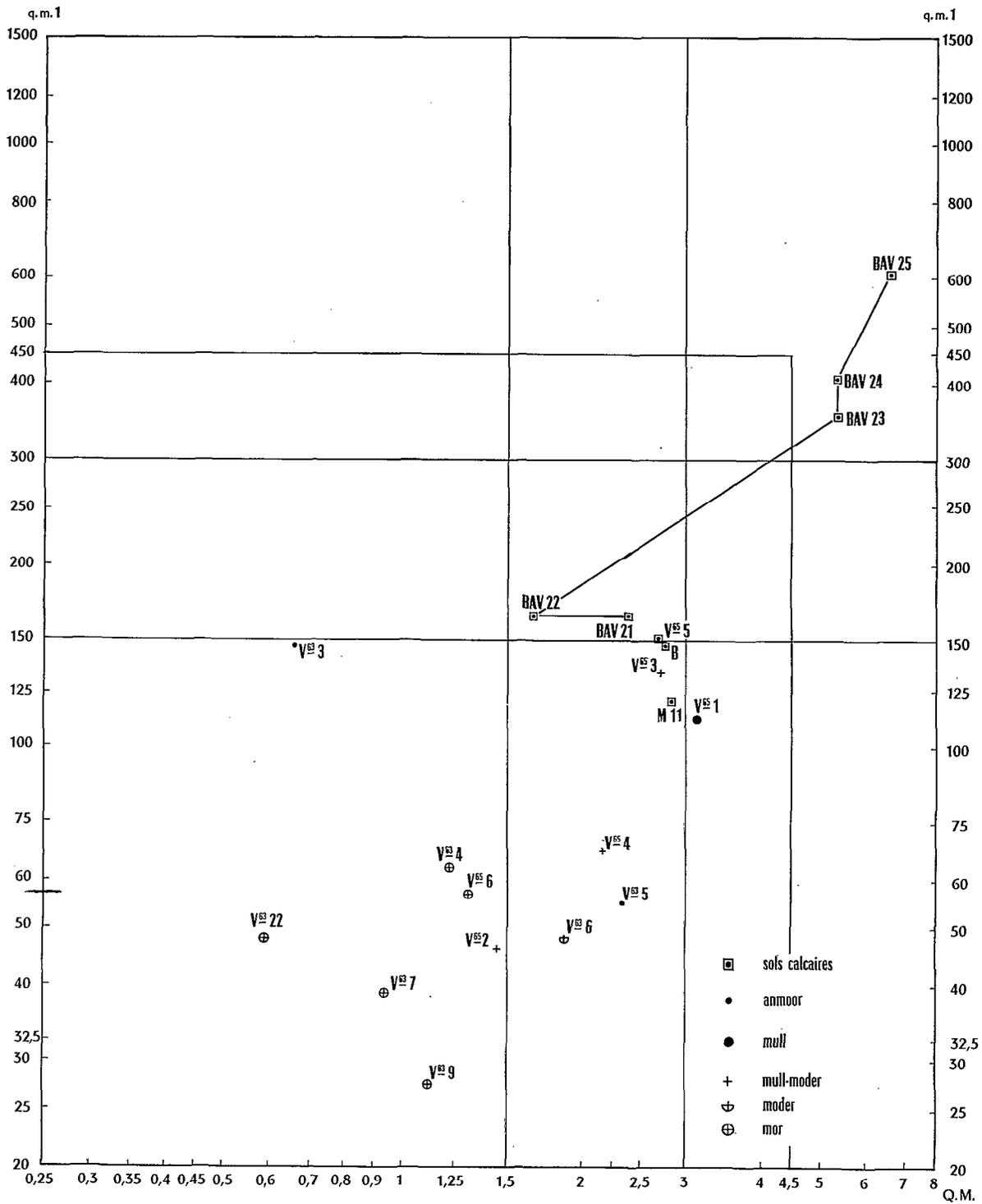


FIG. 32. — Quotients de minéralisation du C total (Q.M.) et du C soluble (q.m.1).

comme dans les sols ferrallitiques, peuvent parfois y dominer sur les acides humiques (échantillons V<sup>65</sup>-1, V<sup>65</sup>-3 et V<sup>65</sup>-7, à pH eau respectivement de 5,1, 5,9 et 3,9). La présence dans ces sols d'acides fulviques facilement solubles fait que le carbone glucidique, qui habituellement constitue plus de la moitié du

carbone soluble, n'en constitue ici en dépit de sa tendance à l'accumulation que 40 à 55 % ; nous retrouverons plus loin cet état de choses dans un sol ferrallitique sur arène granitique.

Les matières organiques de l'*anmoor* (V<sup>63</sup>-3) et de l'*hydromor* (V<sup>63</sup>-22), ici étudiés, sont toutes deux très peu minéralisables, comme le montrent leurs très faibles valeurs de Q.M. ; mais, alors que le carbone glucidique de l'*anmoor*, livré à une vie biologique active, se minéralise facilement et ne représente qu'une très faible fraction du carbone soluble, le carbone glucidique de l'*hydromor* voit au contraire sa minéralisation fortement ralentie.

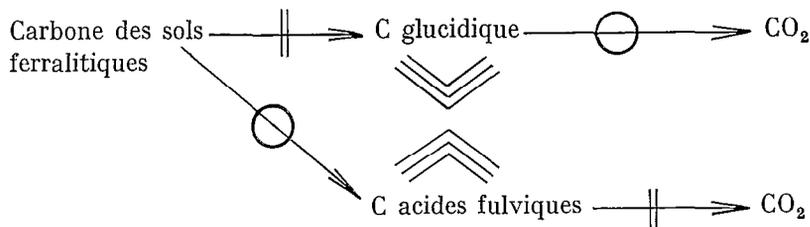
Dans le sol à *hydromorphie temporaire de nature limono-argileuse et intensément* colonisé par les vers de terre (V<sup>63</sup>-5), la litière feuillue de ce sol, par suite de l'*hydromorphie* temporaire, aurait du mal à disparaître et un gley devrait rapidement apparaître, si les vers ne participaient pas activement à l'aération du sol et à la décomposition de ses débris végétaux. Même alors, les substances organiques dilacérées et prédigérées dans les excréta des vers s'humifient difficilement en milieu humide (pH eau = 6,5). Les substances préhumiques demeurent dans la fraction des acides fulviques, fraction qui est deux fois plus importante que celle des acides humiques et constitue 12 % du carbone total. Les glucides libérés par le travail de digestion des vers sont très importants (3,5 % du carbone total) et donnent à ce sol un fort quotient de minéralisation de 2,4. Cependant, la respiration en reste freinée par l'*hydromorphie* et une vie microbienne réduite, aussi les sucres libres tendent-ils à s'accumuler et constituent-ils 150 % du carbone minéralisé sous forme de CO<sub>2</sub> en 7 jours à 30°. Alors que dans l'*anmoor*, la faune fournit aux bactéries un carbone glucidique inférieur à leurs possibilités de minéralisation, dans ce dernier sol, les vers de terre libèrent à certaines saisons plus de carbone glucidique que les bactéries ne peuvent en minéraliser dans l'immédiat.

Compte tenu des données du tableau 9, et d'après les figures 33 et 34 :

La matière organique des sols ferrallitiques, comme celle des mor et des moder de podzol et sols podzoliques, a tendance à se minéraliser lentement, surtout dans les horizons profonds, mais le carbone glucidique et le carbone soluble, à la différence de ce qui se passe dans les mor et les moder, s'y minéralisent au contraire très rapidement et n'y représentent qu'un faible pourcentage du carbone total. Nous avons là une différence fondamentale entre la dynamique de la minéralisation du carbone des mor et moder de régions tempérées et celle des sols ferrallitiques de régions équatoriales.

De plus, dans les divers sols ferrallitiques évolués, alors que les acides fulviques dépassent les acides humiques (BACHELIER, 1963 ; THOMANN, 1964 ; DUCHAUFOR et JACQUIN, 1966) et représentent en moyenne 10 % du carbone total, les glucides libres y représentent moins de 0,6 % de ce carbone total et le quotient de minéralisation (Q.M.) y demeure en dessous de 1,5 à 1,7, ce qui montre que les acides fulviques de ces sols sont relativement stables, car en grande partie complexés par le fer et l'aluminium. Même dans les sols ferrallitiques peu évolués, où les acides humiques dominent, les glucides solubles demeurent peu importants par rapport aux acides fulviques.

Cette dynamique, avec notre symbolisme graphique, peut se résumer ainsi :



L'étude des variations saisonnières de la minéralisation du carbone dans les sols nous montrera que ce sont des éléments de cette « fraction acides fulviques », qui, en début de saison des pluies et consécutivement à la reprise d'une activité biologique plus intense, doivent compenser pour la stabilité structurale la diminution du carbone soluble immédiatement minéralisable.

Le carbone soluble est un peu plus abondant dans les sols faiblement ferrallitiques sur roches schisteuses de Côte d'Ivoire (Y 1 et D 11), où ce carbone se trouve alors enrichi d'acides fulviques solubles à l'eau chaude ; mais, il est à noter que le carbone glucidique de ces sols y demeure faible

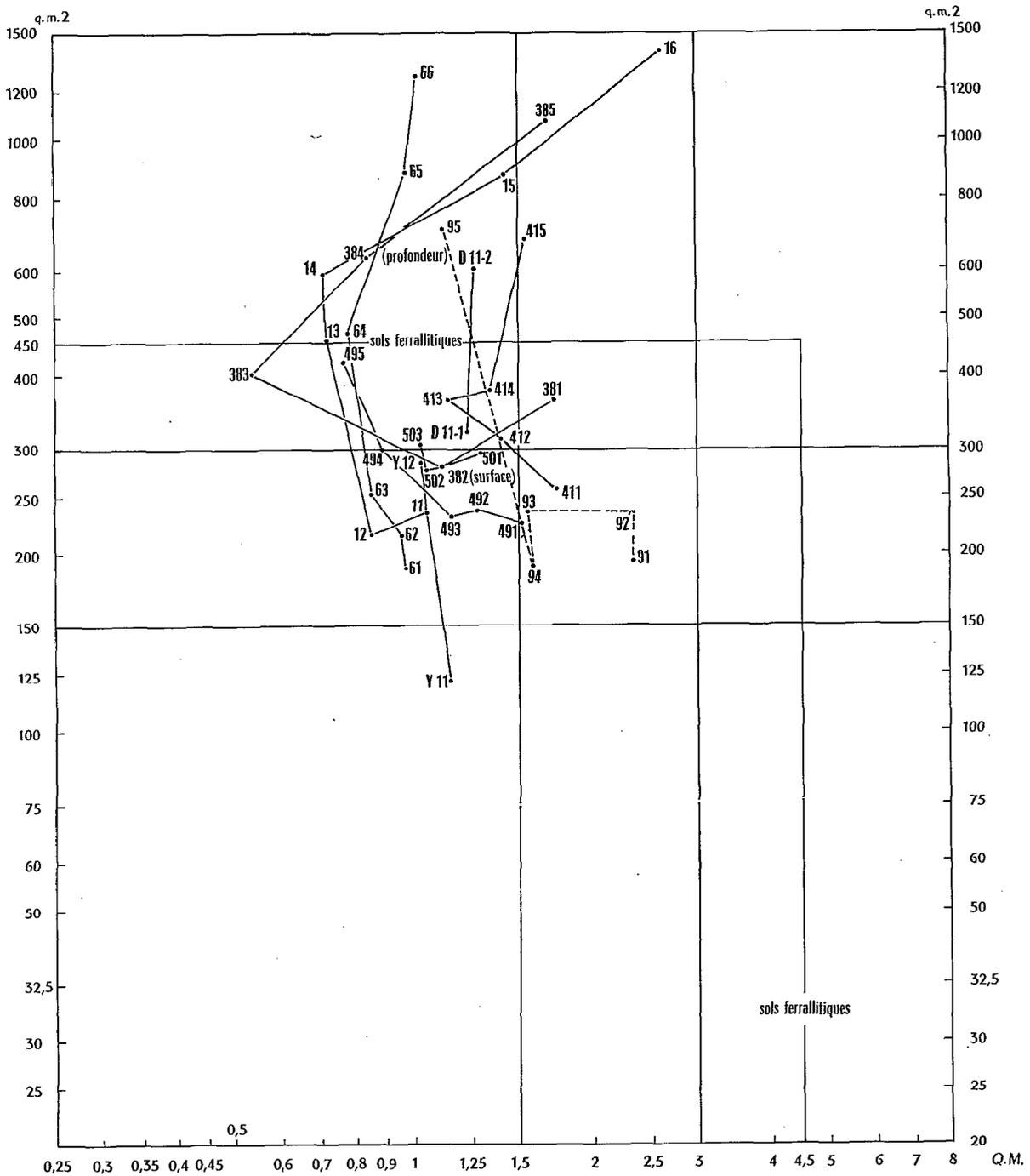


FIG. 33. — Quotients de minéralisation du C total (Q.M.) et du C glucidique (q.m.2).

(fort q.m.2) et n'y constitue que 30 à 50 % du carbone soluble, alors qu'il en constitue généralement plus de la moitié dans les autres sols. Le fort abaissement des points du graphique q.m.2/Q.M. sur le graphique q.m.1/Q.M. traduit cet état de choses, que nous avons déjà observé, à un degré moindre et avec des pourcentages de carbone glucidique et de carbone soluble plus élevés, dans les mor et moder des sols acides de France.

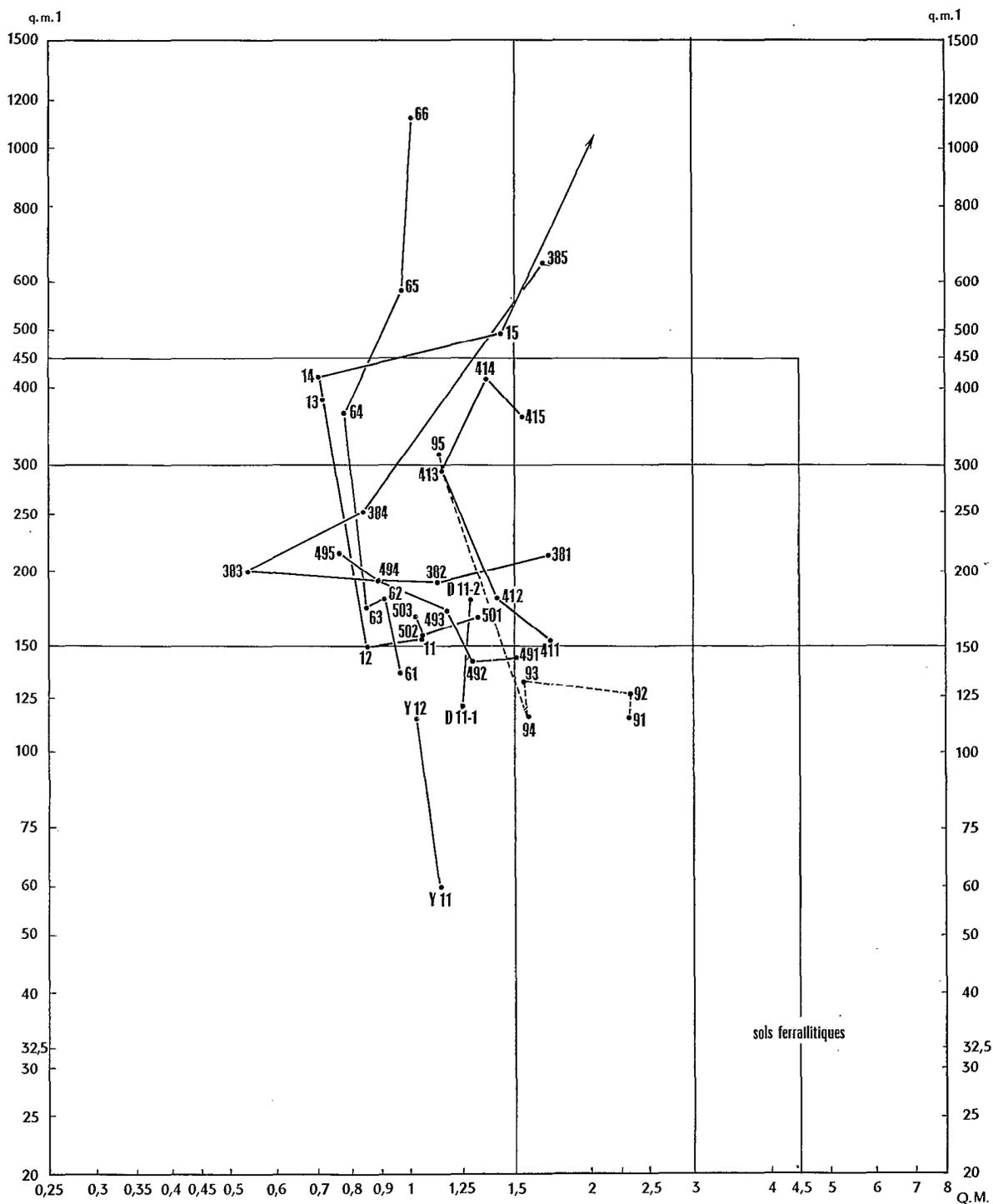


FIG. 34. — Quotients de minéralisation du C total (Q.M.) et du C soluble (q.m.1).

Enfin, le profil de sol ferrallitique sablo-argileux sur arène granitique (AD 9) est représenté par un tireté sur les figures 33 et 34. Ce sol est beaucoup moins argileux et plus aéré que les autres sols ferrallitiques, aussi sa matière organique est-elle plus facilement minéralisable et son carbone

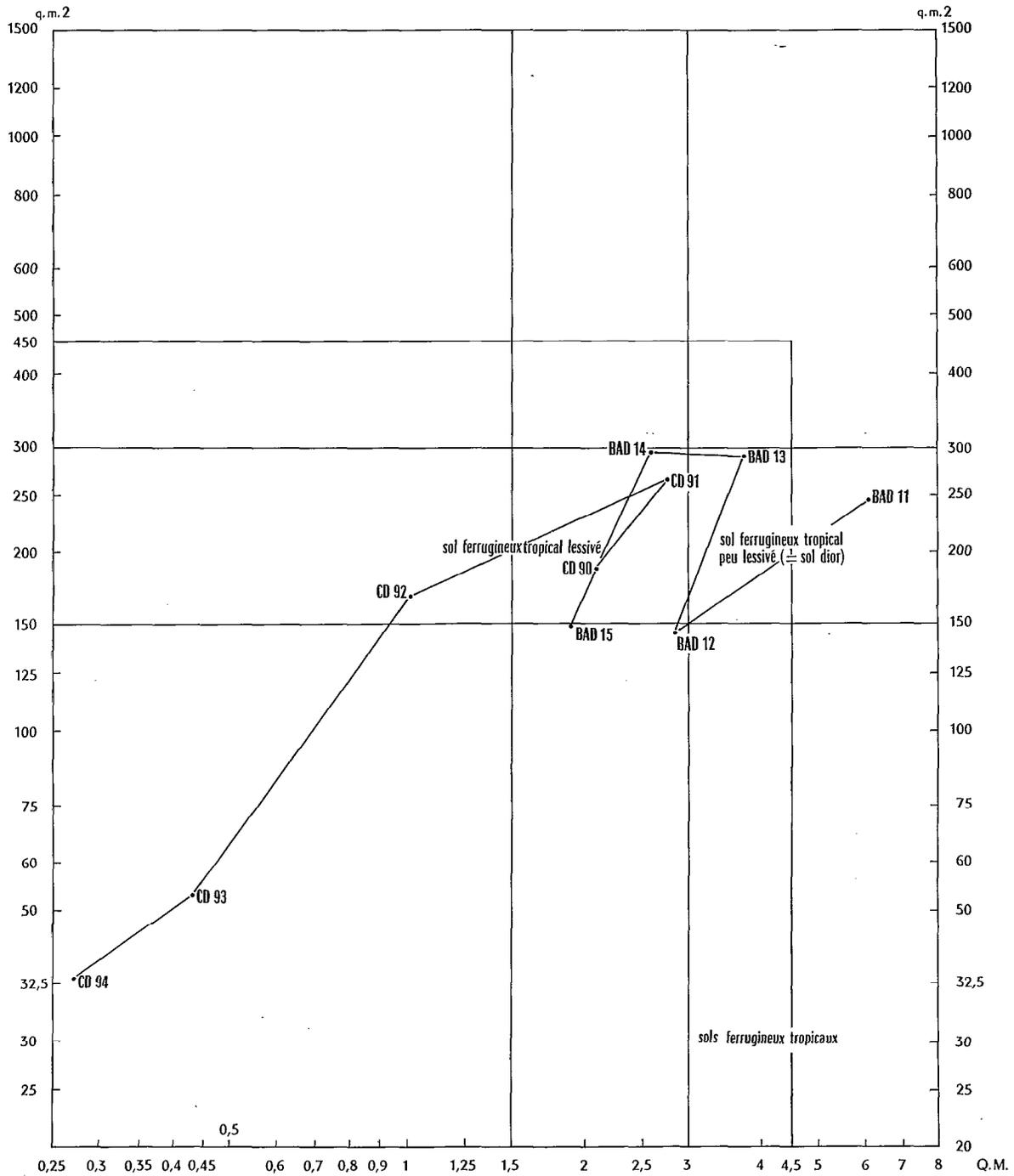


Fig. 35. — Quotients de minéralisation du C total (Q.M.) et du C glucidique (q. m.2).

glucidique un peu plus stable en surface. Analogue dans son horizon supérieur au sol ferrugineux lessivé (CD 9) (cf. fig. 35 et 36), ce sol s'en distingue du fait qu'il rejoint dans son profil les autres sols ferrallitiques avec une dynamique C  $\parallel \Rightarrow$  C glucidique  $\circ \Rightarrow$  CO<sub>2</sub>, alors que le sol ferrugineux

tropical lessivé évolue en profondeur vers une dynamique C  $\hat{\equiv} \Rightarrow$  C glucidique  $\hat{\perp} \Rightarrow$  CO<sub>2</sub>.

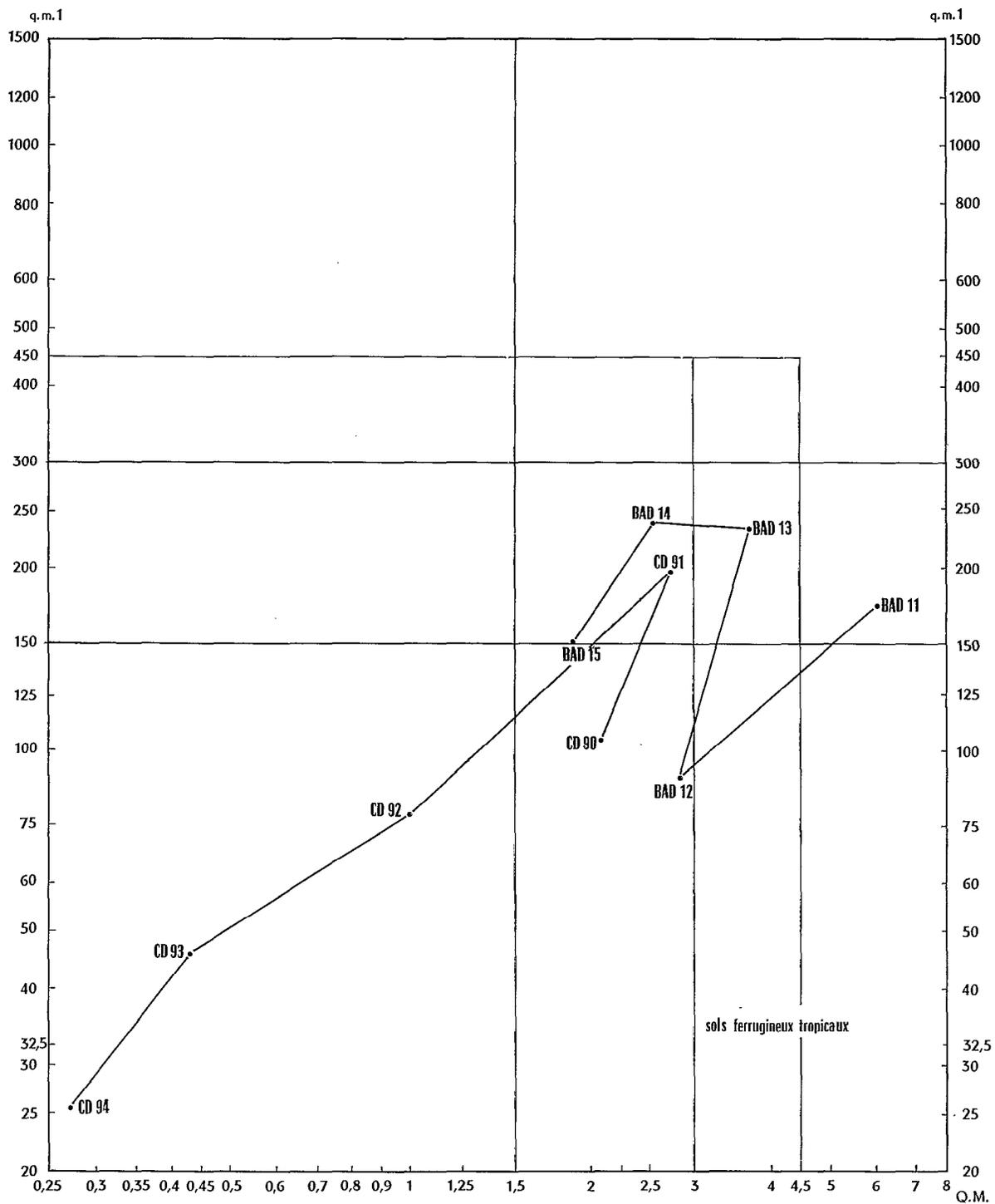


FIG. 36. — Quotients de minéralisation du C total (Q.M.) et du C soluble (q.m.1).

La très nette dominance des acides fulviques sur les acides humiques souligne encore le caractère ferrallitique de ce sol.

Dans les figures 35 et 36 :

Nous avons réuni deux sols ferrugineux tropicaux de Casamance : un sol ferrugineux tropical

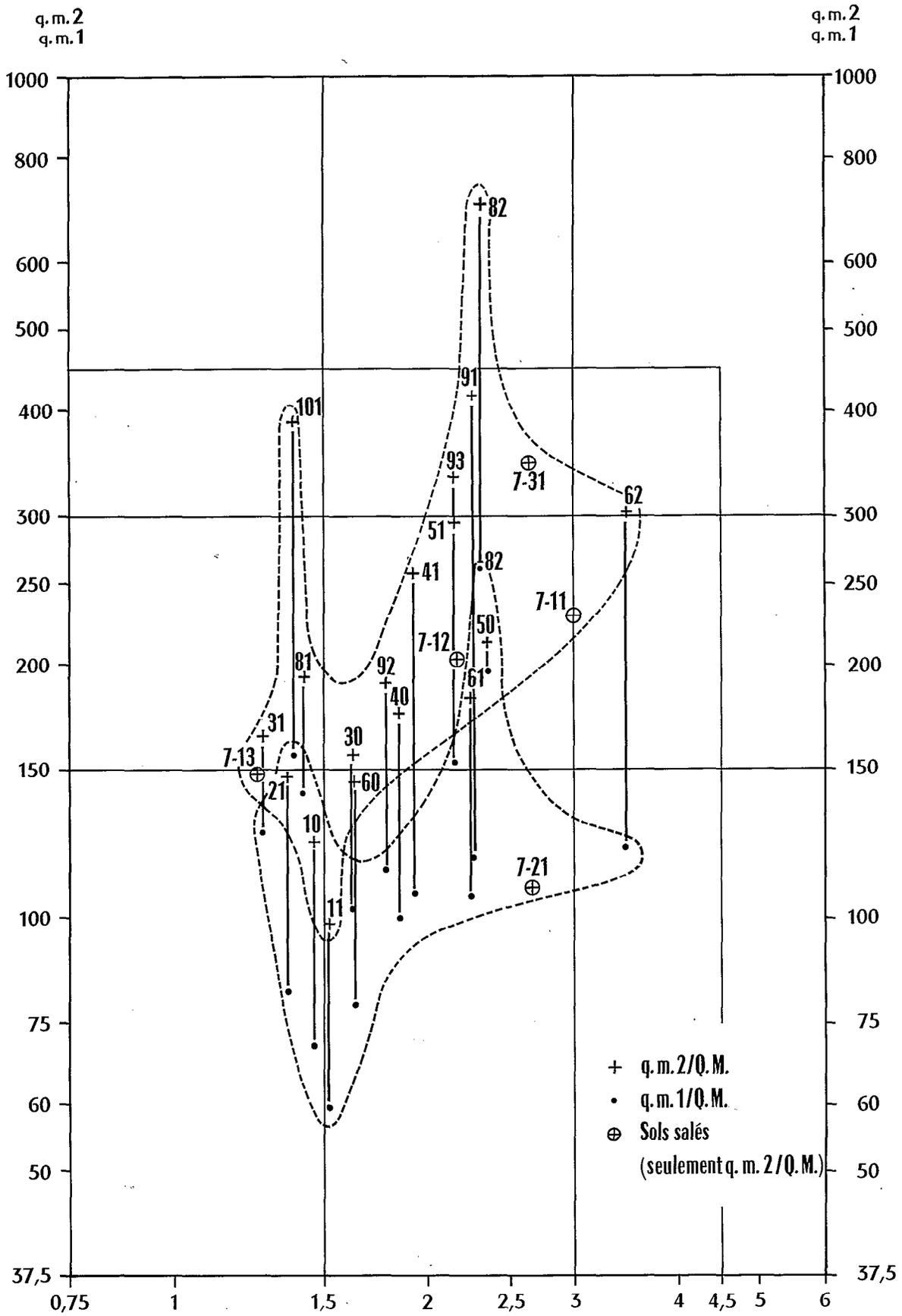


FIG. 37. — Quotients de minéralisation du C total (Q.M.), du C soluble (q.m.1) et du C glucidique (q.m.2) de sols du Marais Poitevin.

peu lessivé et très sableux (= sol dior) (BAD 1) et un sol ferrugineux tropical lessivé (CD 9), dont nous venons de comparer la dynamique de la minéralisation du carbone à celle d'un sol ferrallitique sablo-argileux sur arène granitique.

Dans le *sol dior* très sableux (BAD 1), alors que la matière organique apparaît de plus en plus humifiée en profondeur, les glucides libres en saison sèche sont proportionnellement plus abondants en surface, où ils s'accumulent, attendant une humidité suffisante pour se minéraliser ; le quotient de minéralisation très élevé à la surface de ce sol (Q.M. de 6 dans les deux premiers centimètres) indique une minéralisation potentielle du carbone intense mais temporaire, avec accumulation possible de carbone glucidique.

### 3. REMARQUES SUR L'INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Il est à observer que les divers quotients de minéralisation ont été mesurés sur des terres séchées régulièrement à l'air, à l'abri du soleil et conservées ensuite en laboratoire dans des boîtes en carton et dans des conditions identiques d'humidité atmosphérique. NEVO et HAGIN (1966) ont montré que les changements apparaissant dans les échantillons de sol durant leur stockage à l'air sec étaient indépendants des microorganismes et principalement dus à une modification de la structure physique de la fraction organique ; modifications que nous avons nous-même étudiées au chapitre 2, et plus particulièrement dans le paragraphe B intitulé « Effet du prétraitement de l'échantillon ».

L'activité des sols dans la semaine suivant leur réhumidification est toujours très nettement supérieure à celle manifestée ensuite par ces mêmes sols, une fois la chaîne de dégradation de leurs matières organiques normalement rétablie (cf. chap. 2, § B et fig. 38).

Le séchage à l'air des échantillons de sol revient en fait à stopper assez rapidement, mais avec suffisamment de douceur, cette chaîne de dégradation des matières organiques ; les produits intermédiaires ou terminaux, tels les glucides libres, sont dans les sols séchés fonction du dynamisme de la dégradation des matières organiques des sols avant leur séchage.

Il nous est apparu possible de comparer entre eux les dynamiques de la minéralisation du carbone des sols à partir d'échantillons convenablement séchés, mais il ne faut pas oublier que :

1. Les valeurs des diverses matières organiques intermédiaires, ainsi que les différents quotients de minéralisation qui en découlent, s'ils offrent la possibilité d'interpréter la dynamique des différents sols, ne correspondent cependant pas aux valeurs qu'on pourrait trouver dans ces sols « en fonctionnement continu », encore faudrait-il définir pour chaque sol à quel moment celui-ci, soumis aux variations microclimatiques, pourrait dans la nature être considéré comme en « fonctionnement continu ».

2. Ces diverses valeurs des éléments de la dynamique organique des sols ne tiennent pas compte non plus de leurs variations saisonnières. Ainsi, un mor de podzol peut avoir en laboratoire le même quotient de minéralisation qu'un sol ferrallitique, mais alors que le sol ferrallitique sera soumis toute l'année à un microclimat chaud et humide constant, le podzol verra la minéralisation de sa matière organique ralentie ou même stoppée par le froid de l'hiver et la sécheresse de l'été, d'où à la longue dans le podzol une accumulation superficielle de matière organique ; celle-ci avec le temps devient de plus en plus difficilement minéralisable car de plus en plus riche en tanins et acides organiques (citrique et vanillique notamment) (BRUCKERT et JACQUIN, 1966).

La matière organique des podzols peut par contre présenter dans ses substances humiques d'intéressantes analogies avec celle des sols ferrallitiques (DUCHAUFOR et JACQUIN, 1966).

La comparaison, en fonction des variations saisonnières, des mesures de laboratoire avec les mesures de terrain, fera l'objet du chapitre suivant.

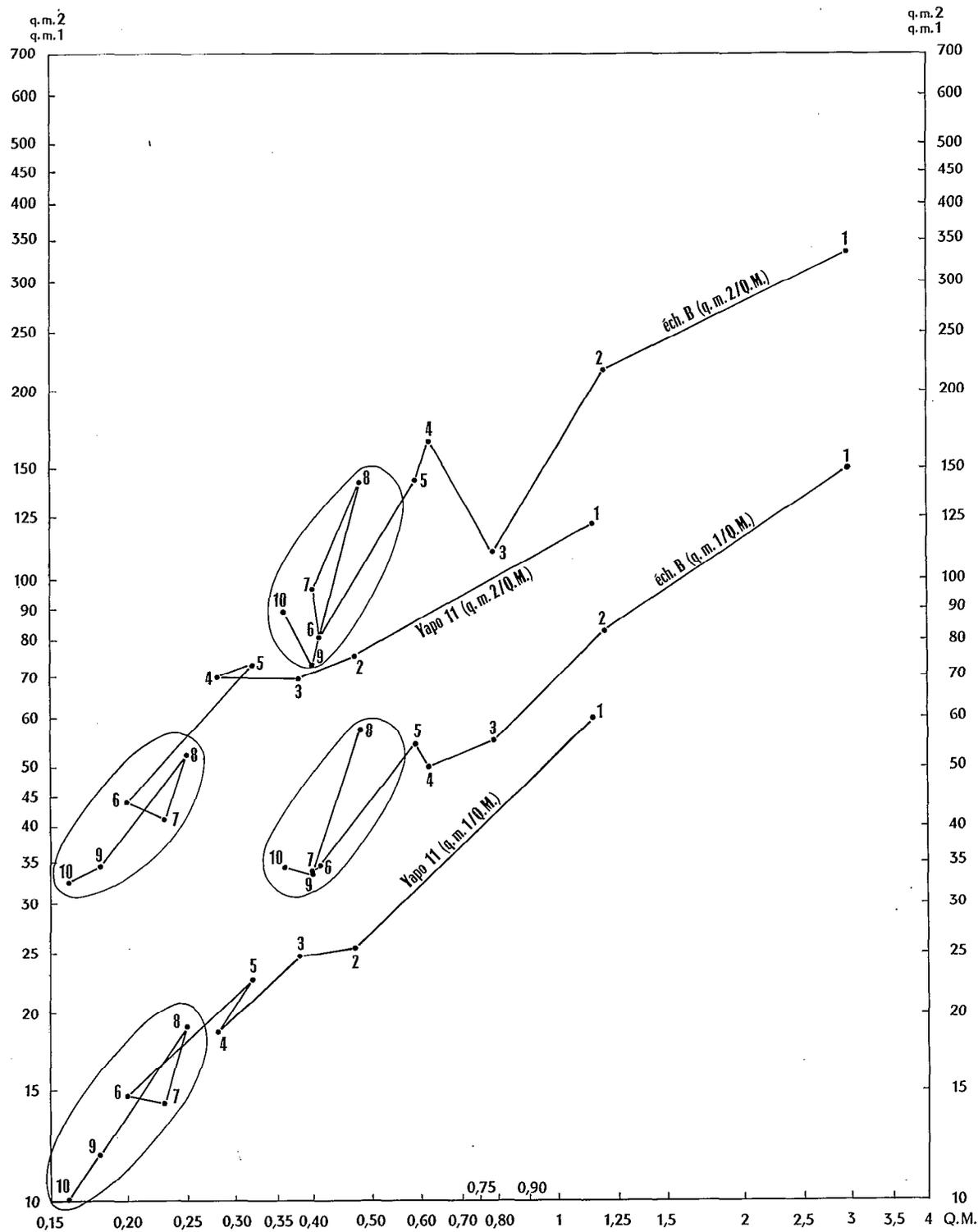


FIG. 38. — Évolution des quotients de minéralisation d'un sol brun calcaire (éch. B) et d'un sol ferrallitique (Yapo 11) placés en incubation à 30° pendant 9 semaines.

### D. AZOTE SOLUBLE, RAPPORT AVEC LE CARBONE SOLUBLE

Étant donné l'importance souvent limitante du manque d'azote dans les processus de dégradation des matières organiques, et notamment les « faims d'azote » qui accompagnent dans de nombreux sols les apports de fumure organique, il est intéressant de rechercher les valeurs de l'azote soluble ammoniacal et nitrique dans les sols étudiés, afin de comparer les rapports  $\frac{\text{carbone soluble}}{\text{azote soluble}}$  avec les habituels rapports C/N des sols<sup>1</sup>.

Nous savons (DUCHAUFOR, 1960) que la nitrification devient très faible au-dessus d'une valeur C/N supérieure à 25 ou s'arrête au stade ammoniacal dans les sols en anaérobiose ou les sols acides, tels les mor ou les sols ferrallitiques sous forêt (DOMMERGUES, 1952 ; NYE et GREENLAND, 1960). L'oxydation de l'ammoniac en nitrites et nitrates débute vers pH 5,5 à 6 pour atteindre son maximum à pH 7, après quoi la minéralisation de l'azote tend à être compensée par des pertes d'azote gazeux ou une forte humification.

Ceci explique qu'avec des sols maintenus humides un mois en incubation à 30°, la dessiccation à l'étuve 100° ait dans nos expériences diminué de 16 % l'azote soluble d'un échantillon de mor (V<sup>63</sup>-10 : pH 3,7, C/N = 26), et de 9 % l'azote soluble d'un sol faiblement ferrallitique (DIVO 11-1 : pH 6,5, C/N = 10,8), alors que cette même dessiccation à 100° a accru l'azote soluble de 20 % dans un sol brun calcaire (éch. B : pH 8), de 24,4 % dans un sol dior (BAD 11 : pH 6) et de 57 % dans un vertisol (P8-2A : pH 6,5). Alors que dans le mor et dans le sol ferrallitique, l'azote ammoniacal est parti au cours de la dessiccation à 100°, dans les autres sols, le craquelage structural et l'oxydation abiotique des matières organiques ont libéré des composés azotés solubles.

Au cours de l'incubation prolongée à 30° d'un sol brun calcaire (éch. B) et d'un sol faiblement ferrallitique (Yapo 11) (cf. fig. 29, chap. 3, § B-1), il a aussi été observé une importante ammonification donnant une augmentation régulière de l'azote soluble dans le sol ferrallitique, alors que dans le sol brun calcaire, la très faible libération d'azote soluble de la première semaine a été rapidement effacée dans les semaines suivantes par la remobilisation de l'azote.

Si sur les graphiques précédents exprimant les quotients de minéralisation des différents sols (fig. 31 à 36), on porte en surcharge les rapports C/N de ces sols, grosso modo les valeurs C/N les plus élevées (matières organiques peu évoluées) correspondent, ce qui est logique, aux plus faibles quotients de minéralisation et les valeurs les plus faibles (matières organiques évoluées) aux quotients de minéralisation les plus élevés, mais les limites ainsi établies entre les différents C/N sont très sinueuses, étant donné la trop grande variation de nature des matières organiques à travers les différents sols.

Plus intéressants, nous apparaissent les rapports  $\frac{\text{C soluble}}{\text{N soluble}}$ , qui correspondent non plus à des matières organiques en voie de dégradation, mais à des éléments plus évolués et plus immédiatement utilisables par les diverses bactéries, plantes et animaux du sol.

Les éléments solubles, carbone et azote, augmentent avec la force d'extraction employée, le palier d'extraction étant plus rapidement atteint pour l'azote soluble que pour le carbone soluble. Ainsi pour différentes extractions à l'eau distillée effectuées sur un échantillon de sol brun calcaire, à C/N de 9,46, les valeurs suivantes ont été trouvées :

1. Alors que le rapport C/N des éléments totaux, compte tenu de la diversité des matières organiques et des teneurs en azote libre, indique essentiellement le degré moyen d'évolution des matières organiques, le rapport C soluble/N dépend non seulement de la nature des matières organiques solubles, mais aussi des teneurs en carbone glucidique et en azote libre présents dans les sols.

Mode d'extraction	C soluble mg. p. 100 g	N soluble mg. p. 100g	$\frac{C \text{ soluble}}{N \text{ soluble}}$
Une nuit au frigidaire .....	8,20	0,86	9,53
Une nuit au laboratoire .....	7,97	0,69	11,45
Bain-marie de 1 heure à 70° .....	13,30	0,91	14,61
Bain-marie de 3 heures à 70° .....	19,9	1,14	17,46
1 ébullition de 10 minutes .....	23,2	1,14	20,35
2 ébullitions séparées de 10 minutes .....	28,2	1,03	27,38

Avec l'extraction des éléments solubles à l'eau distillée en 3 heures à 70°, le rapport du carbone soluble à l'azote soluble s'avère généralement égal ou supérieur aux C/N des sols.

Si nous nous reportons à la figure 39 exprimant pour un certain nombre de sols les rapports  $\frac{C \text{ soluble}}{N \text{ soluble}}$  en fonction des rapports C/N des éléments totaux, nous voyons que les rapports  $\frac{C \text{ soluble}}{N \text{ soluble}}$  sont particulièrement faibles pour le sol ferrugineux tropical lessivé CD, le sol dior BAD 1 et le vertisol BAV 2, ce qui signifie que les matières organiques solubles dans ces sols sont très évoluées et que l'azote libre y est proportionnellement abondant ; données qui concordent avec la forte capacité potentielle de minéralisation que nous avons précédemment notée pour ces sols.

Au contraire, dans les sols calcaires de nos régions tempérées (sol brun calcaire B et rendzine M 11), le rapport  $\frac{C \text{ soluble}}{N \text{ soluble}}$  est élevé, mais l'azote minéral, bien que rare, n'y empêche pas une minéralisation active du carbone.

Concernant les horizons humifères des sols à humus acide, les rapports  $\frac{C \text{ soluble}}{N \text{ soluble}}$  s'avèrent plus élevés, mais à C/N égal les mor offrent des rapports  $\frac{C \text{ soluble}}{N \text{ soluble}}$  plus faibles que ceux des mull-modér et des mull de sol brun, et possèdent donc proportionnellement plus d'azote libre pour la minéralisation éventuelle de leur carbone soluble. Sachant que les mor ont une minéralisation du carbone moins active que les mull-modér et les mull, on peut en conclure que l'azote n'est pas le facteur limitant de la minéralisation du carbone glucidique qui, ainsi que nous l'avons vu plus haut, tend à s'accumuler dans les mor.

Le fort rapport  $\frac{C \text{ soluble}}{N \text{ soluble}}$  de l'échantillon d'anmoor confirme les observations de SCHAEFER (1965) montrant que dans ce type de sol le taux d'azote minéral est le facteur limitant de sa respiration.

Dans les sols faiblement ferrallitiques de Côte d'Ivoire (Y 11 et D 11-1), les rapports  $\frac{C \text{ soluble}}{N \text{ soluble}}$  sont élevés et supérieurs à ceux des sols du Marais Poitevin, l'azote minéral y étant plus rare, mais c'est surtout dans les sols ferrallitiques sur roches volcaniques de l'Adamaoua (Cameroun) que l'azote soluble est très déficient et interdit tout calcul des rapports. Dans ces sols, l'azote est peut-être un facteur limitant responsable de leurs relativement faibles quotients de minéralisation, bien qu'à Q.M. égal, le carbone glucidique y soit cependant moins abondant que dans les mor.

En conclusion, cette brève incursion dans le domaine de l'azote des sols, pour si limitée qu'elle soit, prouve cependant que le séchage rapide à l'air des échantillons de sol dans les conditions de température et d'humidité ambiantes n'en diminue pas la teneur en azote minéral mais en favorise au contraire une nette production dans la semaine qui suit la réhumidification des échantillons et leur mise en incubation à 30°, conclusion que confirment les travaux de SEIFERT et MRAZKOVA (1966). Ce n'est qu'en desséchant les échantillons à l'étuve à forte température qu'on peut, dans certains sols, observer un départ d'azote ammoniacal. Il ne semble pas que le séchage à l'air des échantillons de sol puisse, dans les mesures de dégagement de CO<sub>2</sub> après réhumidification, rendre l'azote facteur limitant de ce dégagement s'il

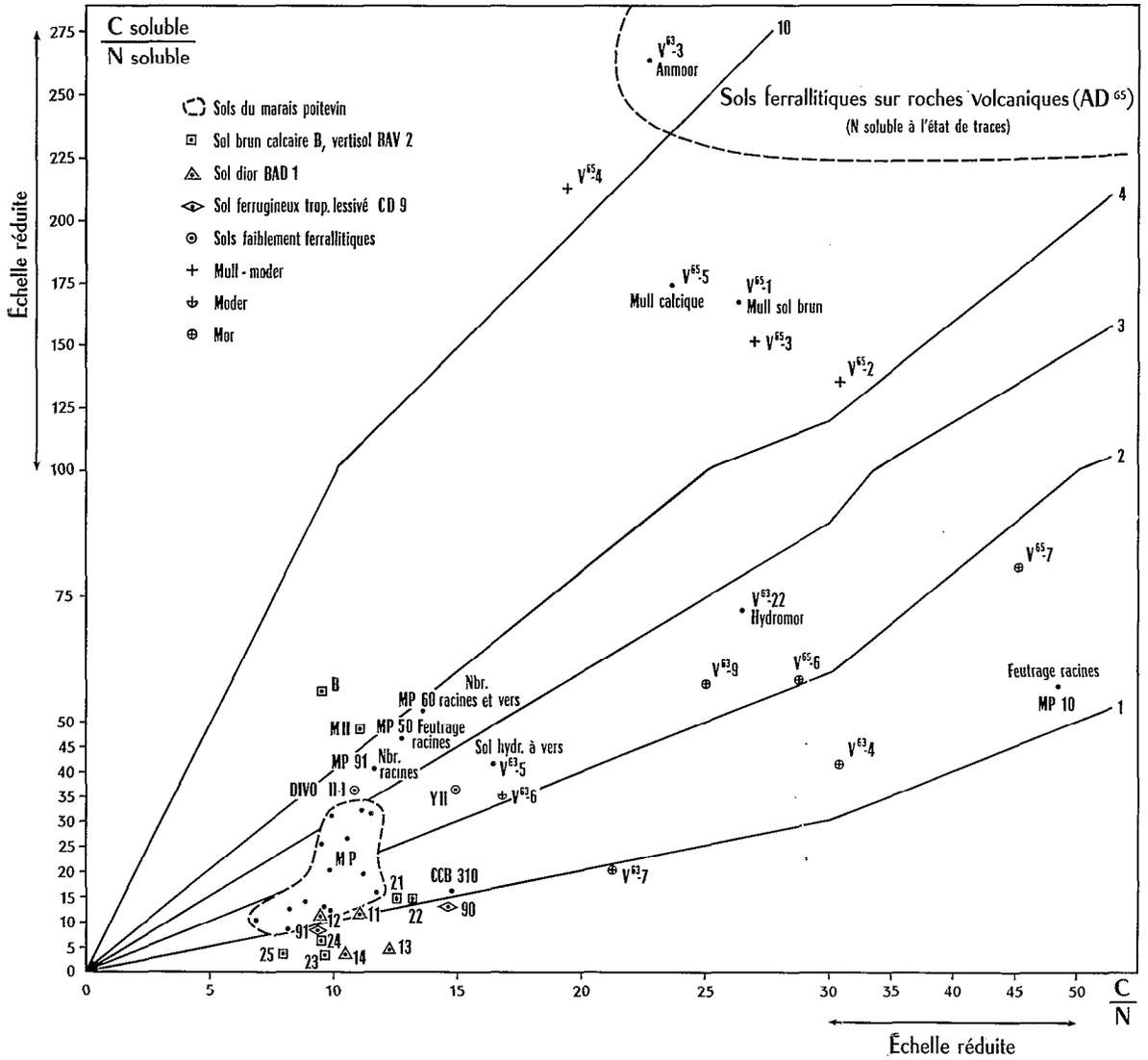


FIG. 39. — Rapport  $\frac{C \text{ soluble}}{N \text{ soluble}}$  et  $\frac{C}{N}$  de différents sols.

ne l'était auparavant. ROBINSON (1957) avait d'ailleurs déjà montré que si la nitrification s'arrête dans les sols en dessous du point de flétrissement, l'ammonification peut par contre s'y poursuivre, l'azote ammoniacal tendant alors à s'y accumuler.

Il est encore bon de rappeler que ce n'est pas parce qu'un sol a un fort pouvoir nitrifiant qu'il n'est pas susceptible de présenter des carences en azote. Ainsi en est-il pour la plupart des sols calcaires, qui, possédant un fort pouvoir nitrifiant, ne renferment cependant que très peu d'azote soluble. Le sol brun calcaire B mis en incubation à 30° voit après quelques semaines son azote minéral soluble réduit à presque rien, alors que le sol faiblement ferrallitique Y 11 possède au contraire une teneur en azote minéral soluble régulièrement croissante. A valeur égale de matières organiques totales, le sol faiblement ferrallitique sec à l'air renferme 2,3 fois plus d'azote soluble que le sol brun calcaire et 11,6 fois plus après 10 semaines d'incubation à 30° (cf. fig. 29, chap. 3, § B-1).

Les rapports  $\frac{C \text{ soluble}}{N \text{ soluble}}$  mesurés sur les échantillons séchés à l'air peuvent fournir un intéressant

complément d'information aux données précédemment acquises avec les quotients de minéralisation du carbone. L'azote ne paraît dans nos divers sols pouvoir être facteur limitant de la minéralisation du carbone que dans l'anmoor et les sols ferrallitiques sur roches volcaniques de l'Adamaoua (Cameroun).

## E. ACIDES HUMIQUES ET ACIDES FULVIQUES

### 1. NATURE ET DYNAMIQUE

La dégradation des sucres, des celluloses, des hémicelluloses et des protéines conduit, d'une part à du gaz carbonique et à de l'eau, et d'autre part à des éléments minéraux et à des composés azotés simples qui sont lessivés par les eaux de pluie, absorbés par les plantes ou retenus par les sols. A côté de cette dégradation directe des débris végétaux, existe conjointement une voie détournée passant par les substances humiques.

Celles-ci se composent essentiellement d'acides fulviques et d'acides humiques solubles dans la soude ou le pyrophosphate de sodium M/10.

Les acides fulviques, non précipitables par  $H_2SO_4$ , sont composés de produits de métabolisme incolores et de bas poids moléculaire, de glucides simples, de glucides phénoliques, d'acides tanniques, d'acides uroniques et polyuroniques et de diverses substances plus ou moins colorées.

Les acides humiques, précipitables par  $H_2SO_4$ , sont composés d'acides humiques bruns (fractions H 1), d'acides humiques gris liés au calcium (fraction H 2), d'acides humiques liés au fer et à l'aluminium (fraction H 3), de complexes humo-ligneux, présents dans les mor et solubles dans le bromure d'acétyl, et beaucoup plus rarement d'acides hymatomélaniques brun-rouge et solubles dans l'alcool.

Les acides humiques proviennent soit d'une resynthèse biologique à partir de certains produits de dégradation des matières organiques, soit par une voie plus abiotique des lignines<sup>1</sup>.

La nature et l'importance des diverses substances humiques dépendent essentiellement de l'apport organique fourni par les débris végétaux, de la vie du sol et de ses diverses caractéristiques ; tous facteurs sous la dépendance directe et indirecte du climat. A chaque équilibre pédobiodynamique peut en principe correspondre une matière organique de composition particulière.

Exception faite pour les tourbières, les matières humiques dans les sols sont annuellement détruites en quantités approximativement égales à celles qui sont synthétisées, puisqu'il n'y a pas accumulation de matières humiques dans les sols, mais simplement temps mort plus ou moins long entre leur synthèse et leur dégradation ; dégradation qui conduit tout naturellement à du gaz carbonique, à de l'eau et à divers produits solubles.

Étant donné les variations climatiques du sol, il est logique de penser qu'humification et déshumification ne varient pas simultanément au cours de l'année et ne s'égalisent qu'en fin de cycle annuel. L'intensité du circuit humique, c'est-à-dire, comme en électricité, la quantité de substances humiques

1. La resynthèse biologique des acides humiques s'effectue essentiellement dans les débris végétaux en voie de décomposition et correspond à la formation d'un plasma bactérien et à sa transformation en acides préhumiques de couleur brune qui, par hétéropolycondensation, donnent ensuite des acides humiques beaucoup plus stables. D'après les différents travaux sur la chimie de l'humus, l'humification correspond à la fixation en chaînes latérales (en milieu basique et par voie bactérienne) de protéines et d'acides aminés sur des noyaux quinoniques dérivant des composés aromatiques sous l'influence des oxydases végétales et animales. L'azote ammoniacal rend le milieu basique et peut lui-même se fixer en forme hétérocyclique. Les acides humiques formés peuvent réagir avec les cations échangeables ou les sesquioxides hydratés de fer et d'alumine pour donner des composés organo-minéraux. Ces derniers à leur tour peuvent s'agréger avec des argiles et des acides humiques simples pour donner des colloïdes organo-minéraux énergiquement floculables par le calcium.

Une grande partie des acides humiques du sol dérive aussi de la lignine qui, à l'air et en milieu humide, tend à donner des acides tanniques évoluant rapidement en glucides phénoliques. Ces glucides en milieu basique peuvent s'oxyder et se polymériser en donnant des noyaux aromatiques qui, en fixant secondairement des éléments azotés, donnent des acides humiques ou des complexes humoligneux généralement très stables et susceptibles d'évoluer en humine. Les organismes de la faune du sol en isolant dans leurs excréments la lignine et en l'abandonnant ainsi à l'air dans un milieu humide et basique favorisent cette voie de formation des acides humiques ; voie beaucoup plus chimique que la précédente.

qui passent en un temps donné, dépend de la nature même des sols. Il est généralement admis qu'une forte activité biologique, liée à un important apport organique, accroît et accélère le circuit humique des sols.

Le carbone immédiatement minéralisable (c'est-à-dire minéralisable en 7 jours à 30°) s'avère dans les sols séchés à l'air essentiellement de nature glucidique, facilement soluble à l'eau, et rentre dans la composition des acides fulviques, aussi l'étude de la minéralisation générale du carbone organique doit-elle tenir compte de la dynamique des substances humiques, et notamment de l'influence du climat dans les processus d'humification et de déshumification.

## 2. CIRCUIT HUMIQUE DANS UN SOL BRUN CALCAIRE TEMPÉRÉ ET UN SOL FERRALLITIQUE ÉQUATORIAL (BACHELIER, 1961 et 1963a)

L'évolution de solutions humiques ou de terreau, différemment conservés ou imbibant à température variable un sol brun calcaire tempéré et un sol ferrallitique équatorial, nous a permis de vérifier que :

- la déshumification est essentiellement d'origine microbienne ;
- les flores humifiantes et déshumifiantes n'ont pas la même activité dans les sols ferrallitiques équatoriaux et les sols bruns tempérés ;
- la flore destructrice des acides humiques est très active à 27° dans le sol ferrallitique, alors qu'en dessous de 20°, son activité y est pratiquement nulle. Les résultats sont plus variables pour le sol brun calcaire ;
- la flore déshumifiante du sol brun calcaire détruit aussi fortement les acides humiques que les acides fulviques, alors que celle du sol ferrallitique laisse s'accumuler les acides fulviques jusqu'à un certain degré, soit que ces acides résultent de la destruction même des acides humiques, soit que dans ces sols leur synthèse soit plus importante.

L'examen d'herbes appliquées à la surface des sols nous a aussi permis d'étudier directement la formation des corps bruns au sein des herbes. Les premiers stades de leur décomposition ont été pratiquement les mêmes sur les deux sols, à savoir d'abord un léger brunissement passager des noyaux dans les cellules du parenchyme, l'altération des chloroplastes, un éventuel développement d'algues vertes, le brunissement de certaines cellules contiguës aux faisceaux ligneux (brunissement plus fréquent dans les herbes appliquées sur le sol brun calcaire), la colonisation des herbes par les bactéries et les champignons (cette dernière prédominant dans les herbes appliquées sur le sol ferrallitique), puis dans les deux cas la colonisation des herbes par les protozoaires et les nématodes. Mais secondairement, alors que dans les herbes appliquées sur le sol brun calcaire nous avons pu observer une synthèse généralisée des acides préhumiques par les bactéries, dans les herbes appliquées sur le sol ferrallitique, nous n'avons pu observer cette synthèse qu'en quelques points très localisés. De plus, à poids égal de feuilles, l'extrait au pyrophosphate de sodium des herbes appliquées sur le sol brun calcaire s'est révélé deux fois plus coloré et trois fois plus riche en substances humiques totales que l'extrait des herbes appliquées sur le sol ferrallitique.

## 3. INFLUENCE DU CLIMAT SUR LE CIRCUIT HUMIQUE

L'évolution d'un mélange humide de sciure de bois blanc et de luzerne placé à des températures différentes nous a montré que la matière organique tend à disparaître d'autant plus rapidement que la température est plus élevée, mais la production des acides humiques et des acides fulviques, pour une même quantité de matières organiques disparue, diminue avec l'élévation de température, soit qu'il se synthétise moins de substances humiques, soit que la déshumification en détruit davantage, soit vraisemblablement les deux à la fois.

De plus, avec le temps les acides humiques maintenus dans des conditions de chaleur et d'humidité constantes tendent à diminuer, alors que les acides fulviques tendent au contraire à augmenter ;

observation qui va dans le même sens que celle faite dans l'expérience précédente sur l'activité de la flore déshumifiante dans un sol brun calcaire et un sol ferrallitique.

L'influence en laboratoire d'un régime de dessiccations périodiques n'a fait que freiner la disparition des matières organiques et en diminuer l'humification, conclusion à laquelle est aussi parvenu plus récemment VAN SCHREVEN (1967) en expérimentant avec un sol calcaire limono-sableux. Dans d'autres conditions d'expérience, KAUFFMANN et BOQUEL (1960) en étaient arrivés à des conclusions différentes. Sur le terrain, donc dans des conditions plus froides et avec une humidité très variable, la disparition des matières organiques a été plus lente qu'en laboratoire, mais l'humification a été par contre beaucoup plus rapide et plus importante, pour autant que le milieu demeurât cependant toujours bien aérobie, toute anaérobiose entraînant en effet une rapide destruction des substances humiques.

#### 4. INFLUENCE DE LA RICHESSE MINÉRALE ET DU pH SUR LE CIRCUIT HUMIQUE

« Pour un même apport de débris végétaux et pour un même climat, les substances humiques d'un sol sont d'autant plus abondantes que le sol est plus riche en bases, et donc de pH moins acide. L'activité biologique y est plus forte, les synthèses humiques plus importantes et le calcium y floccule énergiquement les colloïdes organo-minéraux en leur assurant une plus grande stabilité. »

« Réciproquement, l'équilibre humique plus élevé du sol tend à en élever la capacité de fixation des bases (T), et comme le sol est bien pourvu en réserves minérales, dès que par le jeu de l'altération des silicates les bases sont libérées, elles tendent à se fixer sur le complexe colloïdal qu'elles saturent ; le pH est alors élevé et nous savons qu'un pH neutre ou basique favorise la synthèse des acides humiques. On retrouve là le concept d'équilibre dynamique qui est essentiel en Pédologie : l'équilibre d'un sol n'est que la résultante dynamique d'une multiplicité de facteurs interdépendants que l'on peut grouper en diverses fonctions physiologiques ou sous-équilibres dynamiques. »

Cette corrélation, existant dans les sols de nature identique entre leur richesse en bases échangeables et leur teneur en acides humiques, a été vérifiée dans les sols volcaniques de l'Ouest-Cameroun (LAPLANTE et BACHELIER, 1954) (BACHELIER, 1963a), dans les sols ferrallitiques de la plaine bananière camerounaise (BACHELIER, CURIS et MARTIN, 1956), et nous pouvons encore aujourd'hui la vérifier dans nos sols de l'Adamaoua. Dans le tableau 9 (chap. 3, § B-3), il a été vu en effet que la matière organique apparaît d'autant plus riche en acides humiques et pauvre en acides fulviques que le sol ferrallitique est moins évolué. Si l'on exprime (cf. tableau 10) les teneurs en substances humiques de ces sols non plus par rapport à 1 g de carbone mais par rapport à un même poids de terre, et qu'on compare ces teneurs aux bases échangeables et aux pH de ces mêmes sols, on obtient le tableau très parlant suivant :

TABLEAU 10. — Substances humiques, bases échangeables et pH de divers sols ferrallitiques sur basalte de l'Adamaoua (Cameroun). (Éch. 0-3 et 0-5 cm).

	Carbone des acides humiques (‰)	Carbone des acides fulviques (‰)	S m.éq. %	pH
Sol brun sur basalte récent AD 501 .....	6,84	3,72	30,0	6,8
Sol brun-rouge sur basalte sub-récent AD 11 .....	4,00	2,90	11,2	5,6
AD 381 .....	2,91	3,00	11,7	5,7
Sol rouge sur basalte ancien AD 491 .....	1,81	2,88	6,7	5,2
AD 441 .....	0,37	1,38	5,1	5,2

En conclusion, le circuit humique des sols, avec la diversité et l'importance des substances qui le caractérisent, constitue une fonction physiologique importante des équilibres pédo-biodynamiques. L'expérience nous a montré que ce circuit humique dépend aussi bien du climat auquel ce sol est soumis que de la végétation qui le recouvre, de ses propriétés physico-chimiques et de l'activité biologique qui s'y manifeste.

Si les substances humiques sont caractéristiques des différents sols, elles n'en constituent cependant dans la dégradation des matières organiques qu'une voie secondaire. Leur rôle sur la structure des sols a été discuté et minimisé, tout au moins dans les premiers stades de la structuration (cf. chap. 3, § B-2), mais elles doivent être considérées comme essentielles à la bonne rétention d'eau des sols et surtout à leur tamponnage chimique, tant par leur capacité de fixation des bases que par la réserve carbonée et azotée qu'elles constituent dans les sols. Certains de leurs composés de type fulvique, par leurs propriétés complexantes, peuvent aider à la migration de divers éléments, dont notamment le fer.

## F. FAUNE, MICROFLORE ET MINÉRALISATION DU CARBONE

Il est habituel de considérer que plus un sol possède une faune abondante, plus sa minéralisation du carbone s'en trouve favorisée. La faune, en effet (BACHELIER, 1963b), fragmente généralement toute la litière des sols et chaque débris végétal passe ordinairement par plusieurs tubes digestifs avant d'être livré à l'action des bactéries. Constituant par elle-même un fort potentiel enzymatique, la faune, avec ses chaînes alimentaires, assure pour les bactéries et les champignons une prédégradation importante des débris végétaux et contribue à accroître le carbone facilement minéralisable des sols.

Cette prédégradation de l'apport énergétique par la faune rejoint l'action catalytique plus générale que cette dernière a sur le métabolisme des sols. Elle y entretient l'état juvénile des populations bactériennes (action des protozoaires sur les azotobactéries), elle y contribue à la dissémination des bactéries et des spores, elle peut y casser des équilibres dus aux antibiotiques et, en conclusion, y déterminer des foyers à haut degré nutritif, tout en y évitant les engorgements énergétiques.

Cette action biochimique de la faune sur la dégradation des débris végétaux, liée à son action mécanique et à ses transports de terre, contribue à améliorer les caractéristiques physiques et physico-chimiques du milieu : porosité, structure, rétention d'eau, et même nature et saturation du complexe absorbant ; toutes caractéristiques dont dépend pour le sol un bon équilibre air-eau, éventuellement une meilleure résistance à l'érosion, et en fin de compte une fertilité accrue.

Il résulte de tout ceci qu'à une faune abondante et diversifiée correspond habituellement une microflore importante et active, et une rapide minéralisation du carbone organique.

KURCHEVA (1964) dans des parcelles expérimentales a ainsi montré, en chassant les animaux par du naphthalène, que l'activité biologique des sols due aux seules bactéries et champignons était considérablement plus faible ; les litières disparaissaient alors 5 fois plus lentement et l'humification s'en trouvait fortement freinée.

Comme l'idée en a déjà été suggérée à la fin du § C 2, en traitant de la dynamique de la minéralisation du carbone dans un anmoor et un sol à hydromorphie temporaire, faune et microflore ne vont pas toujours obligatoirement ensemble. De même qu'au sein de la faune, l'importance relative des grands groupements fauniques dépend essentiellement de leurs facteurs limitants et non des interrelations entre organismes qui ne font qu'organiser le peuplement des sols, de même il est des sols où la faune peut être abondante et la microflore très pauvre.

La microflore, en libérant beaucoup plus d'énergie que la faune (MACFAYDEN, 1961), demeure en effet le rouage essentiel des équilibres biopédologiques. Cette prépondérance de la microflore dans la dégradation énergétique au sein des sols explique que souvent les biomasses animales s'avèrent les plus fortes dans les sols où l'apport énergétique est le plus faible. CHERNOV (1965) l'a ainsi constaté dans des sols de toundra où les terres nues possédaient une biomasse d'invertébrés plus importante que les sols de dépression recouverts de mousses.

Ce fait peut aussi facilement se vérifier dans nombre de sols salés : MORDKOVICH et VOLKOVINTSER (1965) ont trouvé dans les sols salins bordant les lacs de la République de Tuva (URSS) une faune abondante et variée. BERNARD (1964) a observé au Sahara que sur 30 sols étudiés, c'était les 11 sols salins qui possédaient la faune d'insectes épi- et hémiedaphiques la plus importante, faune en moyenne 57 fois plus importante que dans les autres sols. Nous-même dans les sols salins (ou encore que très superficiellement dessalés) du Marais Poitevin<sup>1</sup> avons observé une mésofaune abondante bien que peu diversifiée, alors que les essais de comptage bactériens y montrent une microflore très limitée.

L'apport énergétique dans les sols salins est souvent limité à quelques salicornes, les algues vertes y étant de peu d'importance. Une faune importante, mais peu diversifiée, car limitée à quelques espèces de microarthropodes et de larves d'insectes, utilise pour elle une part importante de cet apport énergétique et rend le carbone organique facilement minéralisable ; ce dernier n'est cependant qu'assez lentement minéralisé par la microflore, pour laquelle les conditions physico-chimiques du milieu limitent considérablement le développement et la diversification.

Dans le tableau 11, la comparaison du sol MP 3 (sol argileux gris sous pâturage et à bonne porosité sur 30 cm) avec le sol MP 7-11 (sol argileux gris-brun, calcaire et salin, mais en voie de dessalinisation superficielle) illustre ce type d'équilibre, dont l'étude de la dynamique énergétique annuelle demande à être approfondie.

TABLEAU 11. — Faune, Microflore et Minéralisation du carbone dans deux sols du Marais Poitevin.

	m.éq. %		Faune		Densité bactérienne (millions cm <sup>3</sup> )	Q.M.	C (W.B) (%)	Apport énergétique
	Na	Cl	Microarthropodes p. 100 cm <sup>3</sup>	Autre faune				
MP 30 ..... (0-5 cm)	0,5	0	151*	campagnols vers de terre insectes et larves	3 540	1,62	3,1	fort
MP 31 ..... (5-14 cm)	0,6	0	14	myriapodes isopodes		1,27	3,2	
MP 7-11 ... (0-3 cm)	1,6	0	497*	larves	< 200	3,00	4,0	faible
MP 7-12 ... (5-25 cm)	21,0	20,5	14			2,17	1,4	
MP 7-13 ... (25-50 cm)	28,0	28,0	0			1,25	0,8	

\*  $\frac{\text{acariens}}{\text{collemboles}} = 1,7$  dans MP 30 et 0,6 dans MP 7-11

## G. CONCLUSIONS GÉNÉRALES DU CHAPITRE

L'étude du quotient respiratoire et de son évolution (§ A) a montré que les matières organiques qui se minéralisent facilement dans les sols pouvaient être plus ou moins oxydées. Ce degré d'oxydation dépend, non seulement de la nature de l'apport organique, mais aussi et surtout de son mode de dégradation en fonction du type de sol et de son régime hydrique ; une sécheresse saisonnière semble ainsi

1. Sols étudiés au chap. 2, § A 2d.

pouvoir favoriser dans certains sols, tels les mor et les sols calcaires, une oxydation abiotique des matières organiques. Dans les mesures de laboratoire, les matières organiques les plus oxydées sont les premières à se minéraliser, puis viennent ensuite des matières organiques de moins en moins oxydées, jusqu'à ce que la remise en marche de l'activité biologique du sol, après une semaine ou plus, ne refournisse une matière organique facilement minéralisable, car à nouveau plus oxydée.

L'expérience a montré que les glucides libres solubles constituent dans les sols la source énergétique essentielle correspondant au carbone facilement minéralisable, tel qu'il est évalué dans les mesures de laboratoire par le dégagement de  $\text{CO}_2$  en 7 jours à  $30^\circ$  (§ B-1). Les glucides libres ont aussi dans les sols une forte influence sur de nombreuses fonctions bactériennes, dont la fixation d'azote par les *Azotobacter* et les *Rhizobium*. Ils peuvent aider par les acides organiques de leur dégradation à la libération de certains éléments minéraux, comme le phosphore, et peuvent encore participer à d'importantes fonctions physiologiques en favorisant la croissance de nombreuses plantes. Les glucides libres se trouvent donc dans les sols aussi bien à la base des processus d'anabolisme qu'à la fin des processus de catabolisme.

La mise en évidence de l'action positive des glucides sur la structure des sols permet de mieux comprendre les rapports étroits précédemment observés entre les matières organiques facilement minéralisables et les substances agrégatives responsables de la stabilité structurale des sols (cf. chap. 2, § A-2b et § B).

L'examen des teneurs en glucides libres de divers sols, comparées à leurs teneurs en carbone total et en substances humiques (§ B-3) fait ressortir l'importance qu'ont les glucides libres dans le métabolisme des sols. Constituant selon les sols de 0,5 à 2% du carbone total, les glucides libres correspondent, tout au moins dans les horizons supérieurs, à environ la moitié du carbone minéralisé en laboratoire en 7 jours à  $30^\circ$ . Cette recherche quantitative des glucides libres totaux permet surtout une analyse de la dynamique de la minéralisation du carbone des sols, en considérant en laboratoire le dégagement de  $\text{CO}_2$  de ces sols par rapport à leurs teneurs en carbone total, en carbone soluble et en carbone glucidique (§ C, 1 et 2).

Des diverses conclusions que nous avons pu ainsi dégager (cf. § C-2 : Dynamique de la minéralisation du carbone de divers sols en laboratoire), il nous semble plus particulièrement intéressant de retenir les points suivants :

— Dans les sols calcaires de France, la matière organique dont nous avons vu l'oxydation abiotique possible en saison sèche est facilement minéralisable, alors que dans les vertisols d'Afrique, bien qu'aussi facilement minéralisable, cette matière organique voit cependant son évolution ralentie par la texture argileuse et la compacité des sols, qui jouent un rôle protecteur vis à vis du carbone glucidique. Les acides humiques constituent une part beaucoup plus importante du carbone total dans les vertisols étudiés que dans les sols calcaires de France ; les acides fulviques y sont au contraire moins abondants.

— Dans les sols ferrallitiques argileux, la matière organique se minéralise lentement, surtout dans les horizons profonds, mais cette minéralisation demeure constante toute l'année grâce à un climat chaud et humide, d'où dans ces sols, en fin de compte, une très efficace disparition des litières. Le carbone glucidique s'y minéralise très rapidement et n'est que très faiblement représenté au sein du carbone total. Les acides fulviques, généralement en quantité supérieure aux acides humiques, s'avèrent par contre relativement stables, protégés qu'ils sont par le fer et l'aluminium. Les sols ferrallitiques à texture sablo-argileuse possèdent une matière organique plus facilement minéralisable et un carbone glucidique un peu plus stable en surface.

— Le sol ferrugineux tropical lessivé, contrairement aux sols ferrallitiques, présente dans son profil une évolution freinée du carbone glucidique, qui tend à s'y accumuler en profondeur. Comme les sols du Marais Poitevin, le sol ferrugineux tropical lessivé présente en surface une minéralisation potentielle normale de son carbone.

— Le sol dior (sol ferrugineux tropical, sableux et non lessivé) présente en surface une forte accumulation de glucides libres appelés à se minéraliser rapidement aux premières pluies.

— La matière organique des mor et des moder de podzols et de sols podzoliques offre un pouvoir

de minéralisation souvent analogue à celui de la matière organique des sols ferrallitiques, mais cette minéralisation est soumise dans la nature à des variations saisonnières défavorables (cf. § C-3) et, par suite du froid et des périodes de sécheresse, la matière organique tend à s'y accumuler. Cette stagnation des matières organiques en favorise l'oxydation abiotique en période de sécheresse, mais y favorise aussi l'accumulation des tanins et des acides organiques qui les rendent ensuite plus difficilement minéralisables. L'humification s'effectue normalement dans ces sols, mais contrairement à ce qui se passe dans les sols ferrallitiques, la minéralisation du carbone glucidique s'y trouve fortement freinée, aussi, les glucides libres tendant à s'y accumuler, le carbone glucidique y est-il généralement supérieur au carbone minéralisé en 7 jours à 30°.

L'azote (cf. § D) ne semble pas être cause de cette minéralisation contrariée du carbone glucidique. Par contre, un pH trop acide ou des enzymes de la respiration défailants paraissent des hypothèses fort plausibles (ALEXANDER, 1965). KHRISTEVA et LUK'YANENKO (1962) ont ainsi rappelé le rôle fondamental des accepteurs d'hydrogène et des activateurs d'oxygène dans la décomposition des glucides les plus simples. L'activité désydrégénasique est toujours très faible dans les sols podzoliques (BAUZON, BACHELIER, ROULLER, 1967). Des carences en vitamines peuvent contrarier la synthèse des enzymes de la respiration et l'azote devenir toxique dans les sols à bagage enzymatique insuffisant. Nous même avons vu plus haut (chap. 2, A-3b) l'action stimulante énergique des solutions alcalines sur la minéralisation du carbone de ces sols acides.

— La matière organique de l'anmoor comme celle de l'hydromor est très peu minéralisable, mais alors que le carbone glucidique de l'anmoor, lié à une vie biologique active, se minéralise très facilement, le carbone glucidique de l'hydromor est au contraire très stable.

— Dans les sols à hydromorphie temporaire limono-argileux, les vers de terre peuvent aider à l'aération du milieu et empêcher la formation des gley, mais les substances organiques dilacérées et pré-digérées présentes dans leurs excreta sont difficilement reprises par une microflore peu importante et à activité réduite, aussi les acides fulviques et les glucides libres demeurent-ils abondants dans ces sols.

Une brève incursion dans le domaine de l'azote des sols (§ D) a montré que le séchage à l'air des sols n'en diminue pas les teneurs en azote. Ce dernier élément est sous forme soluble assez abondant dans le sol ferrugineux tropical lessivé, le sol dior et le vertisol. Il est satisfaisant dans les sols du Marais Poitevin et les sols faiblement ferrallitiques de Côte d'Ivoire. Il est plus rare, mais non déficient, dans le sol brun calcaire et la rendzine de nos régions tempérées. Il est généralement mieux représenté dans les mor que dans les mull-moder et les mull. Il est enfin facteur limitant de la minéralisation du carbone dans l'anmoor, et vraisemblablement aussi dans les sols ferrallitiques sur roches volcaniques de l'Adamaoua.

Des études antérieures sur la dynamique du circuit humique dans les sols (§ E) nous ont montré que ce circuit pouvait être considéré comme une voie détournée et secondaire de la minéralisation du carbone. La nature et l'importance des diverses substances humiques dépendent étroitement du climat, de la nature du sol, de sa microflore et de la végétation, aussi les substances humiques sont-elles caractéristiques des divers équilibres pédobiodynamiques.

Les expériences de laboratoire montrent que l'évolution des substances humiques dans les sols dépend à la fois de la microflore et du climat. La microflore des sols ferrallitiques favorise les acides fulviques aux dépens des acides humiques. Le climat chaud et humide constant favorise la déshumification aux dépens de l'humification.

Une richesse en bases et un pH proche de la neutralité, ou même très légèrement basique, influent favorablement l'humification des sols.

Enfin dernier point (§ F), la microflore, élément essentiel de la dégradation des apports énergétiques au sol, n'est pas obligatoirement proportionnelle à la faune, comme le montre dans certains sols à apport énergétique faible, tels les sols salins, une faible population bactérienne liée à une population importante mais très peu diversifiée de microarthropodes.

# Variations saisonnières du carbone immédiatement minéralisable et dégagement in situ du CO<sub>2</sub>

De l'influence possible des facteurs climatiques et de l'effet de sécheresse sur la minéralisation du carbone des sols, il ressort que les variations saisonnières peuvent accélérer ou freiner dans les divers sols la dynamique naturelle de cette minéralisation.

Trois études nous ont montré l'importance et la diversité possible des variations saisonnières de cette dynamique. La première a été réalisée sur un sol brun calcaire de la Région parisienne (BACHELIER, 1964), la deuxième sur des sols ferrallitiques de la Station agricole de Grimari (République Centrafricaine) et la troisième sur un sol podzolique à hydromorphie temporaire de la forêt de Sénart (Région parisienne).

## *A. OBSERVATIONS SUR LES VARIATIONS SAISONNIÈRES DE LA DYNAMIQUE DE LA MINÉRALISATION DU CARBONE DANS UN SOL BRUN CALCAIRE*

### 1. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Le sol étudié est un sol de type brun calcaire non lessivé, formé sur matériaux d'apport limono-sableux, et situé sous pommiers dans la banlieue parisienne.

Son profil se présente ainsi :

- de 0 à 27 cm, horizon humifère gris foncé, sableux à sablo-argileux (17,2 % d'argile et 7,1 % de limon), à structure grumeleuse et à pH de 7,95,
- de 27 à 72 cm, horizon limono-sableux, brun-jaune, à structure polyédrique et à pH de 7,8,
- de 72 à 150 cm, horizon argileux, gris-jaune pâle, compact et durci, et à pH de 8,3.

#### **Parcelle n° 1 (1960)**

Chaque mois de l'année, ont été régulièrement prélevés à l'aide de cylindres en cuivre de 100 ml des échantillons de sol aux profondeurs 0-5 cm, 5-10 cm et 10-20 cm.

Les résultats de cette première parcelle nous ont incité à établir une seconde parcelle sur des bases différentes.

**Parcelle n° 2** (1961, 1962 et début 1963)

Afin d'éviter l'hétérogénéité de l'échantillonnage et les trop nombreux prélèvements qu'elle oblige à faire, nous avons pour cette seconde parcelle prélevé une forte quantité de l'horizon 0-27 cm d'un sol voisin de celui de la parcelle n° 1 ; cet échantillon a été tamisé à 2 mm et ensuite soigneusement homogénéisé. Il renfermait 17,5 % d'argile et 7,5 % de limon. Il contenait 5,6 % de  $\text{CaCO}_3$ . Son pH était de 8. Sa teneur en carbone était de 1,1 % et sa teneur en azote de 0,12 %, d'où un rapport C/N de 0,91.

Avec cet échantillon ainsi préparé, nous avons rempli 24 cylindres en plastique préalablement disposés dans le sol, et un bon arrosage a ensuite assuré le tassement de la terre.

Les cylindres étaient en plastique (lucoflex) et se composaient de deux demi-cylindres maintenus solidaires par une bande de scotch. Ils mesuraient 24 cm de haut et 10,5 cm de diamètre. 20 cm seulement de ces cylindres étaient enfouis en terre. Les 4 cm qui dépassaient du sol renfermaient une litière composée de 5 g de feuilles de pommier, 3 g de feuilles de platane et 2 g de paille, le tout coupé en petits morceaux.

Un filet en nylon et à larges mailles recouvrait chaque cylindre et les cylindres étaient groupés par cinq sous des cages grillagées (cf. fig. 40).

Chaque mois, un des 24 cylindres ainsi préparés a été déterré et découpé en trois horizons (0-5 cm, 5-10 cm et 10-20 cm) qui ont été séparément étudiés.

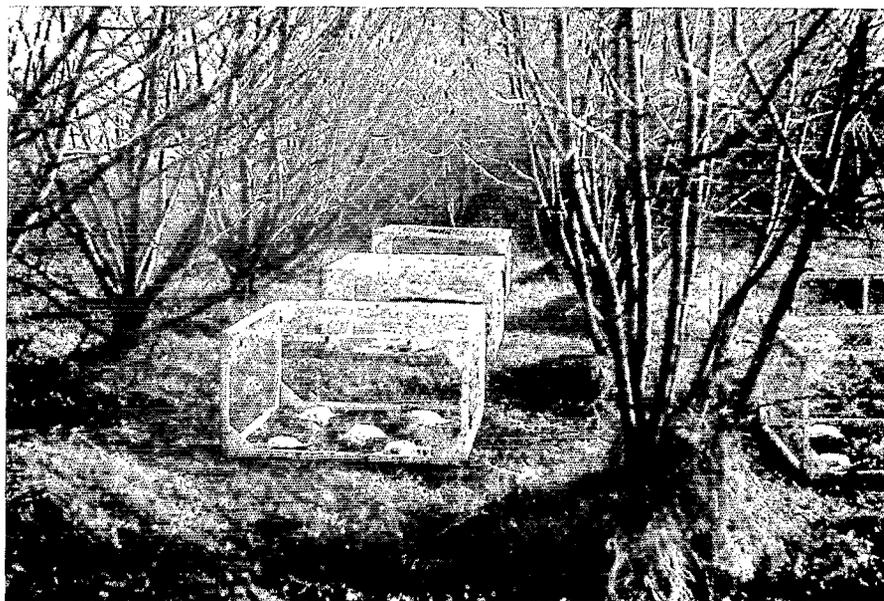


FIG. 40. — Dispositif expérimental de la parcelle d'étude du sol brun calcaire (B).

## 2. RÉSULTATS<sup>1</sup>

Les mesures mensuelles faites sur ce sol brun calcaire de 1961 à 1963 ont montré que le carbone total, l'azote total et les matières humiques n'y variaient que très faiblement au cours de l'année, alors que, comme l'indiquent les figures 42, 43, 44 et 45, l'humidité, la stabilité structurale, les substances réductrices solubles à l'eau chaude et le potentiel d'activité biologique (mesuré à la fois par dégagement de gaz carbonique et absorption d'oxygène en flacon d'eau) y présentaient des variations cycliques bien régulières. Les divers groupements fauniques y manifestaient des variations cycliques très instables et variables selon les groupes.

1. Pour plus de détails, cf. BACHELIER (1964).

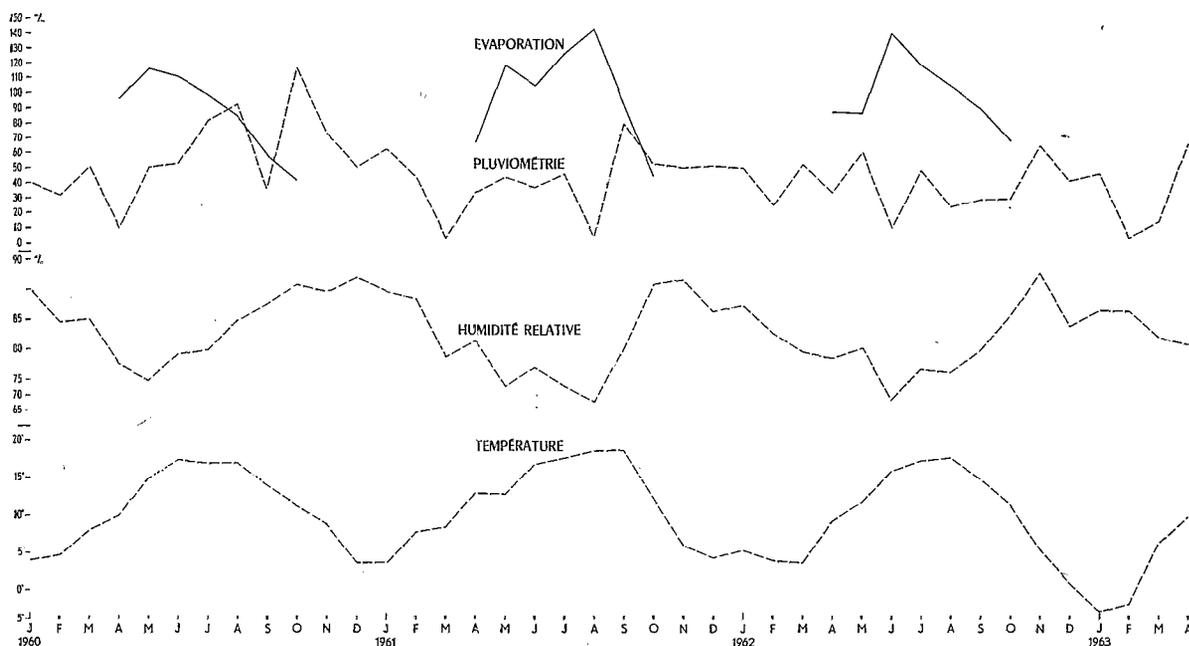


FIG. 41. — Relevés climatiques du Bourget (Service météorologique).

Plusieurs constatations sont à faire :

— L'humidité du sol (cf. fig. 42) varie très régulièrement au cours de l'année, alors que la pluviométrie du lieu, comme le montre la figure 41, est extrêmement irrégulière. Ce qui compte n'est pas l'eau qui tombe, mais l'eau qui reste, or en été « la pluie ne mouille pas la terre », car l'évaporation demeure supérieure à la pluviométrie. Compte tenu du léger couvert boisé et de la rétention d'eau du sol étudié, une forte pluie d'été de 10 mm ne peut mouiller que les 3 à 4 cm supérieurs du sol et, l'évaporation étant alors à son maxima, le sol redevient très rapidement sec. En hiver au contraire, les différentes pluies s'additionnent. L'humidité de ce sol suit donc plus la température et l'humidité relative de l'air que la pluviométrie.

— Une grande similitude existe entre les variations saisonnières des composés organiques

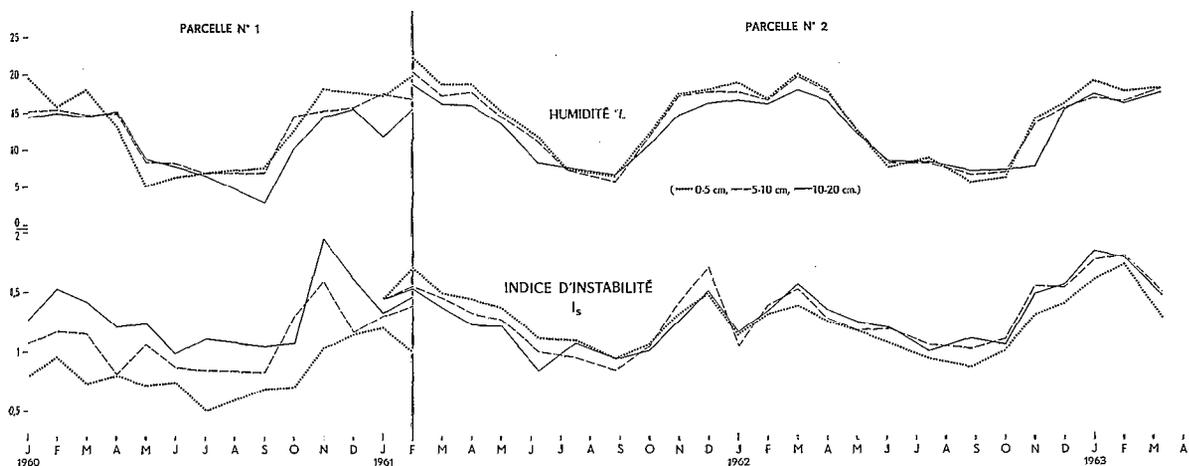


FIG. 42. — Humidité et stabilité du sol.

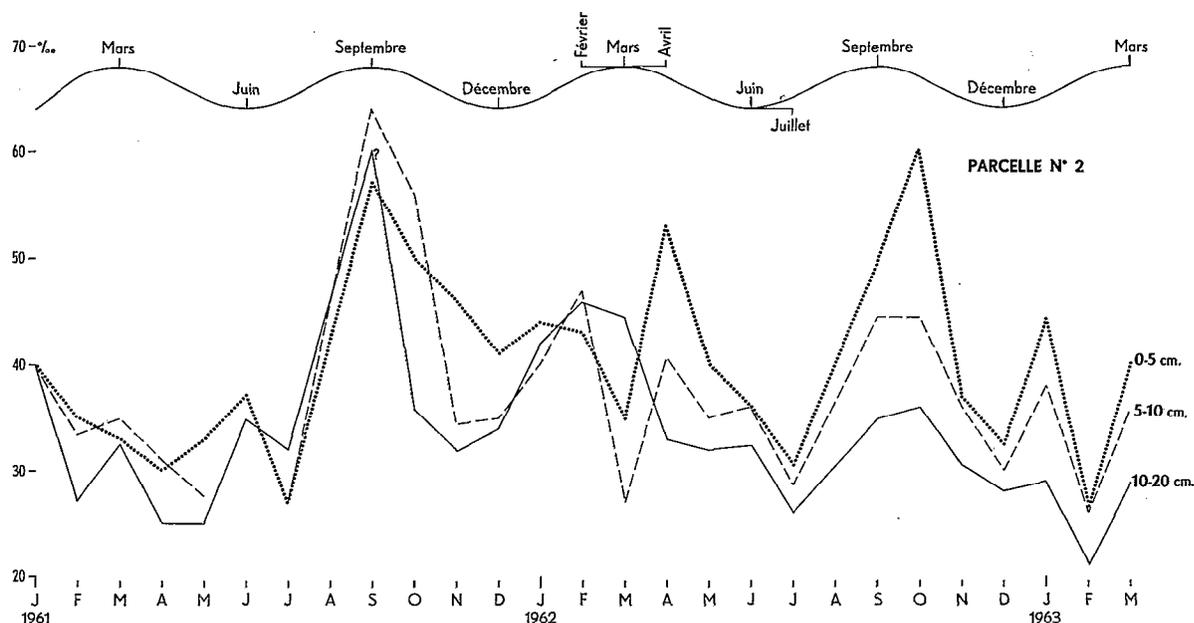


FIG. 43. — Composés organiques solubles à l'eau chaude.

solubles (cf. fig. 43) et le potentiel d'activité biologique des échantillons séchés à l'air, que ce potentiel soit estimé par le dégagement de  $\text{CO}_2$  en laboratoire (fig. 44) ou l'absorption d' $\text{O}_2$  en flacon d'eau (fig. 45).

— Les échantillons séchés à l'air renferment un maximum de carbone immédiatement minéralisable en septembre et un deuxième maximum moins net aux environs de mars, un minimum en juin et un minimum en décembre. Ces variations dans les teneurs des sols en carbone immédiatement minéralisable peuvent facilement présenter des anomalies positives ou négatives.

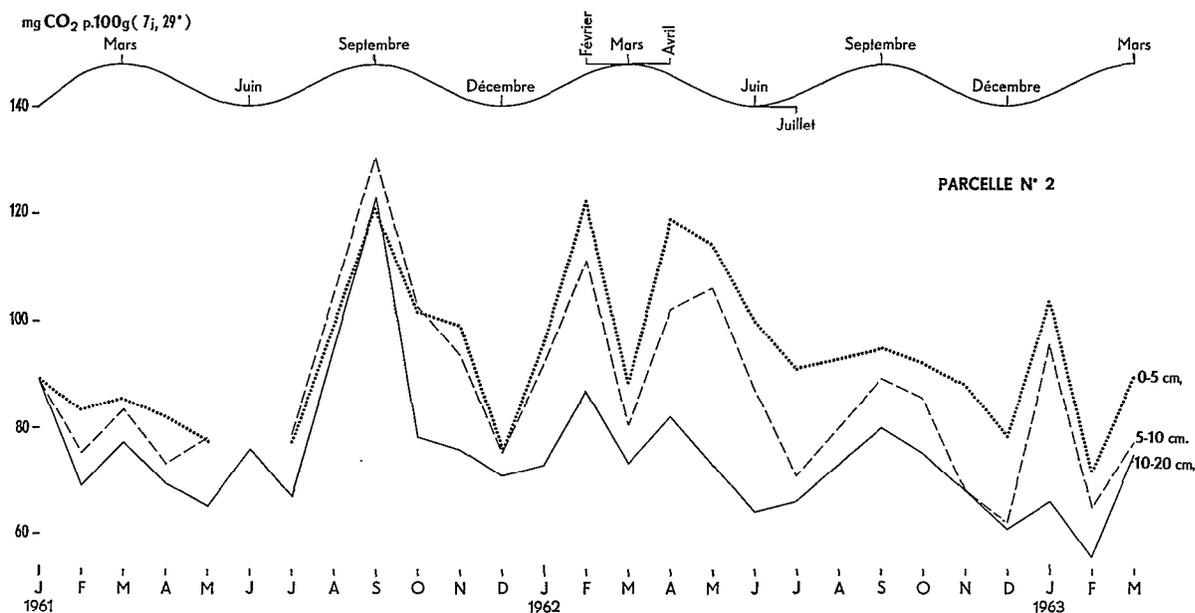


FIG. 44. — Potentiel d'activité biologique du sol (dégagement de gaz carbonique).

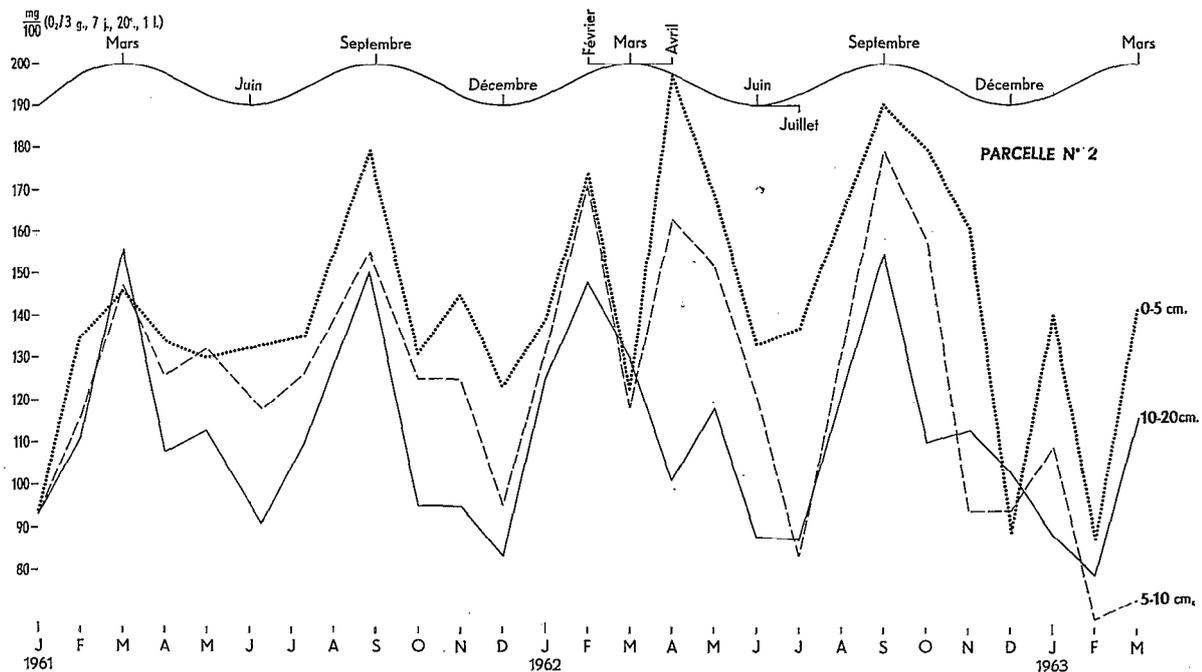


FIG. 45. — Potentiel d'activité biologique du sol (absorption d'oxygène en flacon d'eau).

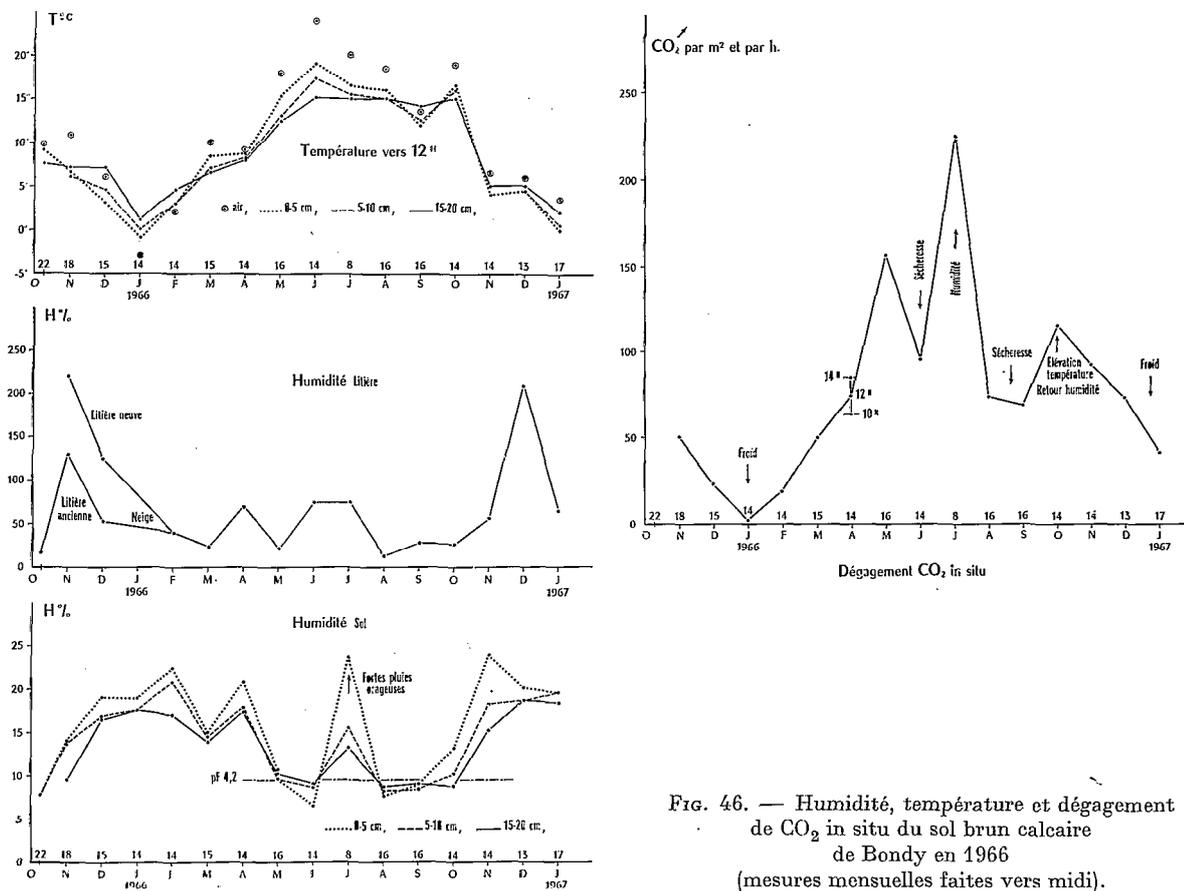


FIG. 46. — Humidité, température et dégagement de CO<sub>2</sub> in situ du sol brun calcaire de Bondy en 1966 (mesures mensuelles faites vers midi).

Si l'on considère maintenant le dégagement in situ de  $\text{CO}_2$  de ce sol mesuré de novembre 1966 à janvier 1967, il apparaît (cf. fig. 46) que ce dégagement suit approximativement la température, mais que l'été l'humidité peut en devenir facteur limitant, comme le montrent sur la figure 46 les mois de juin, août et septembre. Aussi, les fortes pluies qui peuvent survenir en été, telles celles du mois de juillet 1966, déterminent-elles dans ce sol de brutales minéralisations du carbone ; minéralisations d'autant plus fortes que le sol a subi au préalable une dessiccation plus poussée, mais d'autant plus limitées dans le temps que les pluies ont été peu importantes et que l'évaporation a permis un ressuyage rapide du sol.

Dans les échantillons du sol brun calcaire séché à l'air, le potentiel d'activité biologique mesuré par le dégagement de  $\text{CO}_2$  ou l'absorption d' $\text{O}_2$  est fonction du carbone immédiatement minéralisable, et apparaît d'autant plus important que ce sol se trouvait en période de plus faible activité biologique au moment de son prélèvement.

De nombreux facteurs secondaires viennent cependant plus ou moins corriger cette première constatation, notamment les effets de dessiccation du sol qui tendent à libérer du carbone facilement minéralisable, et aussi le fait qu'une chaleur humide et constante, si elle permet, comme dans le cas des sols ferrallitiques argileux, une plus grande destruction des matières organiques, en freine néanmoins la vitesse de minéralisation et en diminue les teneurs en glucides libres, l'équilibre du sol réagissant normalement en sens inverse de la force qui lui est appliquée. Cette action de la chaleur humide et constante peut expliquer l'épuisement du carbone facilement minéralisable souvent observé en fin de période de forte activité biologique.

Les variations saisonnières de la dynamique du carbone minéralisable du sol brun calcaire peuvent ainsi se résumer :

TABLEAU 12. — Variations saisonnières de l'humidité, de la température, du dégagement du  $\text{CO}_2$  et du carbone immédiatement minéralisable dans un sol brun calcaire.

	Humidité	Température	$\text{CO}_2$	Carbone immédiatement minéralisable
Août-septembre .....	<i>très faible</i> + effet sécheresse	élevée	moyen	fort
Anomalie .....	pluies orageuses	élevée	brutale augmentation temporaire	baisse importante
Décembre .....	forte	fraîche	moyen à faible	faible* (très variable)
Janvier-février .....	forte	froide	faible à nulle	accumulation possible
Mars .....	forte	fraîche	faible	fort** (très variable)
Anomalie .....	forte	adoucissements	brutale augmentation	baisse importante
Juin .....	faible	élevée	plus ou moins fort	faible

\* Un épuisement du carbone facilement minéralisable en fin de période de forte activité biologique se manifeste vraisemblablement ici.

\*\* L'incorporation au sol de la litière par la faune y apporte au printemps des substances organiques solubles facilement minéralisables.

Le schéma de la figure 47 résume les relations qui nous paraissent déterminer les variations cycliques régulières observées dans le sol brun calcaire étudié.

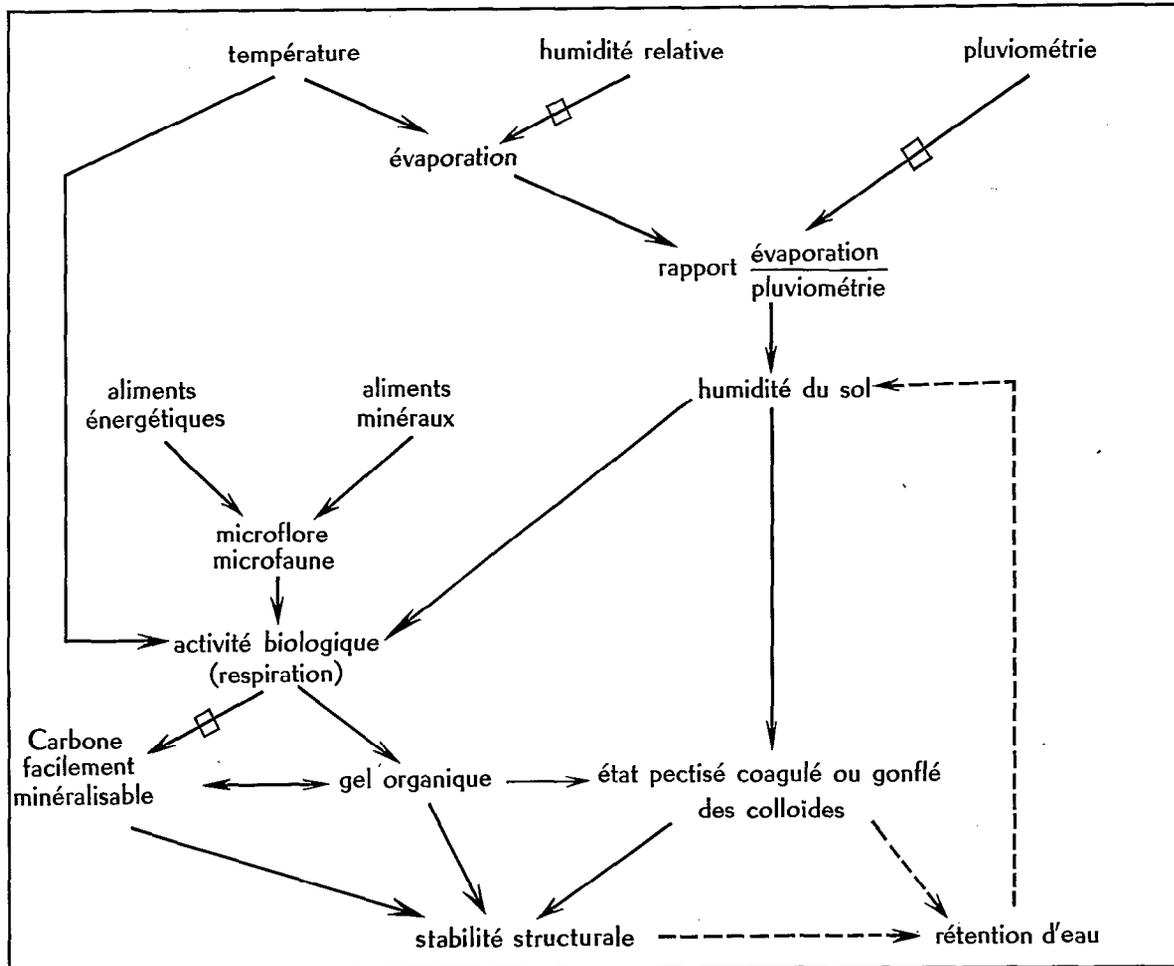
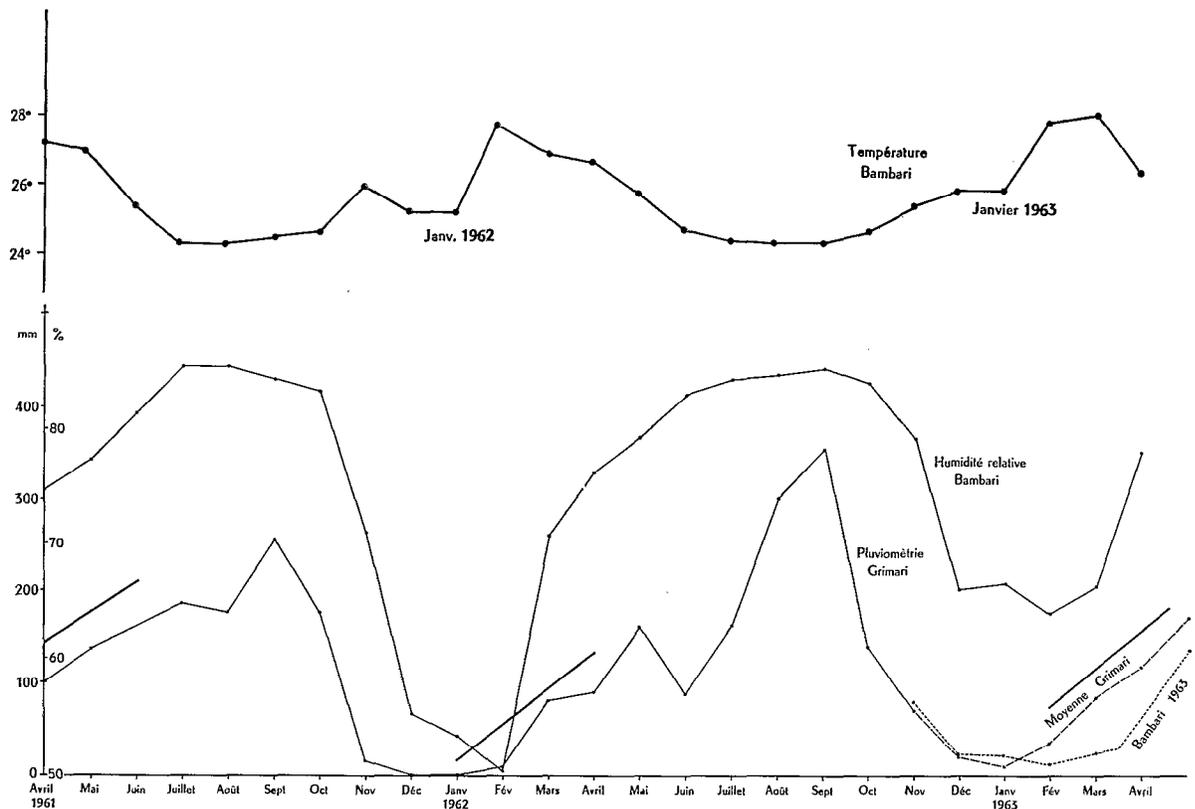


Fig. 47. — Déterminisme des variations cycliques régulières de certaines caractéristiques dans un sol de type brun calcaire (◻ ⇒ variation inverse)

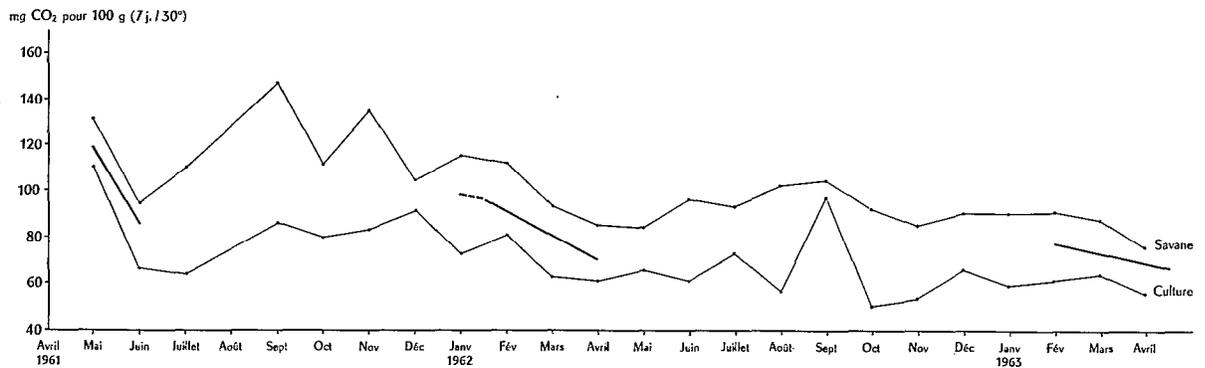
Si la stabilité structurale dépend en grande partie, comme il a été vu dans les chapitres précédents, du carbone facilement minéralisable et des gels organiques présents dans le sol, ses variations saisonnières paraissent par contre étroitement liées à l'humidité du sol et à l'état pectisé, coagulé ou gonflé du gel organique.

### B. OBSERVATIONS SUR LES VARIATIONS SAISONNIÈRES DE LA DYNAMIQUE DE LA MINÉRALISATION DU CARBONE DANS UN SOL FERRALLITIQUE

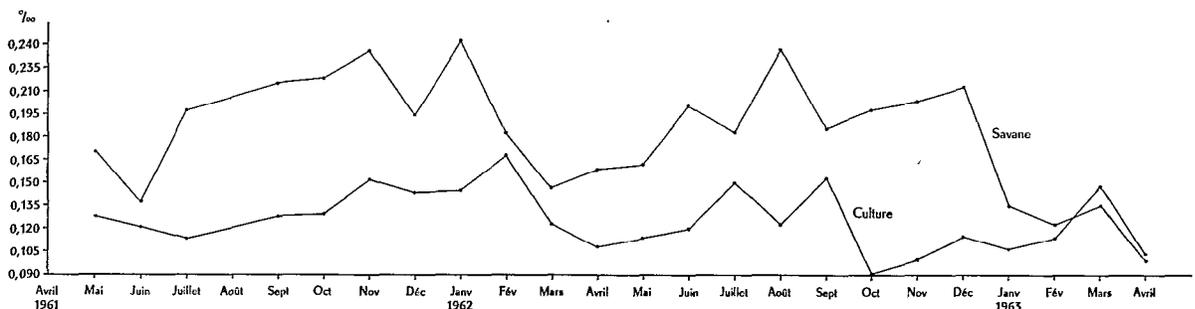
Une étude plus limitée a été faite sur les sols ferrallitiques de la Station expérimentale de Grimari (République Centrafricaine), sols maintenus sous savane ou cultivés, et dont les variations saisonnières de la stabilité structurale ont été suivies par COMBEAU et QUANTIN (1963). La figure 48 nous montre les variations saisonnières du climat, du carbone minéralisable et du carbone soluble.



**Température, humidité relative et pluviométrie (moy. 6 h, 12 h, 18 h)**



**Dégagement de gaz carbonique en laboratoire**



**C minéralisable soluble dans l'eau à 70°**

FIG. 48. — Variations saisonnières du climat à Grimari et du carbone immédiatement minéralisable et soluble présent dans les sols ferrallitiques de cette localité sous savane ou culture (mesures faites sur échantillons séchés à l'air).

Le climat est à Grimari de type équatorial avec une saison des pluies et une saison sèche relative de 3 mois du 15 novembre au 15 février. L'humidité relative y suit pratiquement la pluviométrie et la température y demeure élevée toute l'année, passant de 24°,4 en saison sèche à 28° au maximum de la saison des pluies. La pluviométrie, à un mois près, conditionne directement l'humidité du sol, car l'évaporation diminue très rapidement dès le mois de mars, premier mois de la saison des pluies.

Les variations saisonnières observables dans le dégagement de CO<sub>2</sub> en laboratoire sont moins affirmées que dans le sol précédé. De plus, alors que pour l'étude du sol brun calcaire on était parti d'un sol préalablement homogénéisé, ici les prélèvements mensuels ont été effectués dans un sol naturel, obligatoirement plus ou moins hétérogène.

Néanmoins, on peut encore observer dans ce nouvel exemple que les variations du carbone soluble et du carbone minéralisable en 7 jours à 30° sont inverses des variations de température, et donc a priori de l'activité biologique des sols en place. En fait, les variations de température ne sont que de 4° entre la saison sèche et la saison des pluies et ne doivent avoir qu'un effet très limité sur l'activité biologique des sols. L'équilibre de cette activité biologique serait relativement constant s'il n'était déplacé pendant les mois de février, mars et avril, qui correspondent au début de la saison des pluies. Venant après une période de sécheresse plus ou moins marquée selon les années, cette élévation d'humidité, qu'accompagne une élévation de température de 2 à 3°, détermine dans le sol une reprise d'activité de la vie biologique et une diminution du stock de carbone facilement minéralisable. La microflore tend alors à consommer plus de carbone facilement minéralisable que son activité sur la dégradation des matières organiques ne peut en libérer.

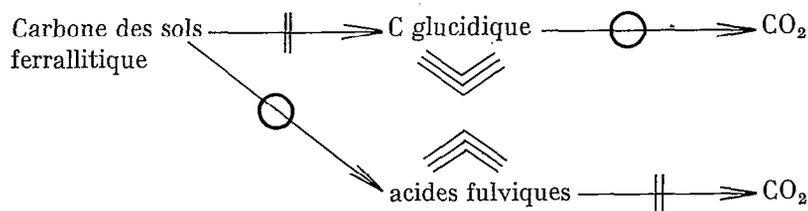
Dans les mois qui suivent, l'activité biologique retrouve progressivement son équilibre avec un sol qui demeure fortement humide et une température qui diminue progressivement de 4°. Le stock de carbone facilement minéralisable se reconstitue alors lentement pour ne recommencer à diminuer qu'en saison sèche, si à cette saison l'humidité du sol demeure suffisante pour que l'activité biologique puisse répondre aux élévations temporaires de température ; celle-ci en décembre et janvier est plus fraîche le matin (17 à 18° vers 6 h) mais plus élevée à partir de midi (32 à 33° à midi).

BONFILS (1963) au Sénégal a aussi observé dans un sol dior et un sol deck une nette diminution des matières organiques et des matières humiques totales en début de saison des pluies.

DOMMERMUES (1962) a par ailleurs noté dans différents sols du Sénégal et en fin de saison sèche une remontée du carbone minéralisable précédant la diminution de début de saison des pluies. Cette remontée, liée à un climat plus sec, ne peut s'observer à Grimari, où en fin de saison sèche l'humidité du sol demeure encore beaucoup trop élevée pour arrêter l'activité des micro-organismes et permettre par dessiccation une libération abiotique de carbone facilement minéralisable.

Il est enfin intéressant de constater que dans les sols de Grimari sous culture, jachère ou savane, COMBEAU et QUANTIN (1963) ont aussi observé un décalage entre les variations de la stabilité structurale et les variations de la pluviométrie, la stabilité structurale continuant à croître dans les 3 à 4 premiers mois de la saison des pluies, alors que dans le sol brun calcaire elle suit fidèlement l'humidité du sol. On peut penser que la reprise active de la vie biologique du début de saison des pluies libère ici des composés organiques de nature non humique ayant une action favorable sur la stabilité structurale.

Dans les sols ferrallitiques, la dégradation des matières organiques produit peu de carbone glucidique proprement dit, mais par contre beaucoup de substances organiques solubles à bas poids moléculaire et rentrant dans la catégorie des acides fulviques (cf. chap. 3, § B-3, C-2 et E). Rappelons aussi le schéma précédemment envisagé pour les sols ferrallitiques argileux (chap. 3, § C) :



Ce seraient des éléments de cette fraction acides fulviques qui, en début de saison des pluies et consécutivement à la reprise d'une activité biologique plus forte, compenseraient pour la stabilité structurale la diminution du carbone immédiatement minéralisable et soluble.

Ces composés organiques souvent liés au fer et à l'alumine ne seraient pas par eux-mêmes facilement minéralisables dans l'immédiat et ne pourraient que plus tard, en pleine saison des pluies, contrebalancer la mobilisation du carbone immédiatement minéralisable.

### C. OBSERVATIONS SUR LES VARIATIONS SAISONNIÈRES DE LA DYNAMIQUE DE LA MINÉRALISATION DU CARBONE DANS UN SOL PODZOLIQUE A PSEUDOGLEY

Ce sol a été étudié dans une récente publication (BAUZON, BACHELIER et ROUILLER, 1967). Nous n'en reprendrons ici que la description du profil et l'essentiel de son interprétation, avant d'en examiner dans les 20 cm supérieurs les variations climatiques, le dégagement saisonnier in situ de CO<sub>2</sub> et les variations conjointes du carbone immédiatement minéralisable.

#### I. ÉTUDE PÉDOLOGIQUE DU PROFIL

##### *Description*

Sol faiblement podzolique à pseudogley et à hydromorphie temporaire proche de la surface.

Sol situé dans la zone de reboisement de la forêt de Sénart à Brunoy (Essonne) et formé sur un plateau recouvert de limons remaniant un cailloutis pliocène. Topographie plane avec nombreuses petites mares tout aux alentours. Végétation de chênes et de châtaigniers avec aira et bruyères en sous-bois.

Aoo	Litière à décomposition lente, épaisse de 1 à 2 cm.
Ao/A1 (0-4,5 cm)	Horizon humifère très organique et brun-gris foncé, de type <i>moder</i> et à feutrage serré de racines. Texture limoneuse. Structure particulière avec aspect grenu à l'état humide. Consistance meuble à sec. Forte porosité (14 % de gravier et cailloux).
A2 (4,5-5 cm)	Apparition locale d'un léger blanchiment à la base de l'horizon humifère.
B1 (5-25 cm)	Horizon limoneux de couleur brun-jaune clair de 5 à 15 cm, puis brun-jaune clair à jaune pâle de 15 à 25 cm. Structure polyédrique, fragile à sec et meuble à l'état humide. Horizon collant à l'état trempé. Porosité faible et fine. Racines horizontales tendant à s'arrêter à 20-25 cm (13 à 20 % de graviers et cailloux).
B2 (25-30 cm)	Même matériau renfermant de nombreux morceaux de meulière gréseuse, à orientation générale horizontale (23 % de graviers et cailloux).
g1 (30-60 cm)	Pseudogley gris clair, à texture limoneuse et à 20 à 30 % de taches rouge-jaune limono-argileuses. Niveau d'eau dans cet horizon de novembre à mai (diminution progressive à 9 % des graviers et cailloux).
g2 (60-150 cm)	Pseudogley à plus de 50 % de taches rouge-jaune. Texture argileuse, très plastique à l'état trempé. Horizon peu poreux et faiblement calcaire à partir de 120 cm. Cet horizon reste humide en été, même avec une nappe descendant en-dessous de 2 mètres, comme c'est ici le cas (de 7 à 2 % de graviers avec un banc à 28 % entre 70 à 80 cm).

### Interprétation

Ce sol, très nettement limoneux dans les 50 cm supérieurs, devient progressivement plus argileux de 50 à 90 cm, sa teneur en sable demeurant par ailleurs constante. A partir de 90 cm, il évolue vers un matériel argilo-sableux constitué par 50 % de sable, 40 % d'argile et seulement 10 % de limons.

La fraction argileuse de ce sol est constituée de 20 à 30 cm par de la vermiculite et de l'illite ouverte, de 40 à 50 cm par de l'illite ouverte et de la vermiculite, de 60 à 70 cm essentiellement par de l'illite, et en dessous de 80 à 90 cm par une nette dominance de montmorillonite. La nature des graviers se modifie aussi à travers le profil.

On peut penser que ce sol a subi un certain lessivage de sa fraction argileuse sur 50 cm et passe à une roche-mère plus sableuse à partir de 90 cm ; la carte géologique indique d'ailleurs en ce lieu un affleurement des sables de Fontainebleau.

La stabilité structurale de ce sol, testée selon l'indice de Hénin, est très élevée dans la couche superficielle 0-5 cm riche en matières organiques ( $I_s = 0,10$  à  $0,20$ ), mais elle diminue rapidement avec la profondeur :  $0,20$  à  $0,30$  entre 5 et 10 cm,  $0,40$  à  $0,60$  entre 15 et 20 cm. Cette stabilité subit une évolution saisonnière sensible, en particulier en profondeur, le minimum de stabilité des horizons 10-20 cm se situant de décembre à mai, le maximum de juin à août. En profondeur, la stabilité structurale est très mauvaise, ce qui explique la stagnation des eaux de pluie et l'engorgement consécutif des horizons superficiels.

La capacité d'échange de bases (T) de ce sol est très faible et son complexe absorbant n'est saturé  $\left(\frac{S}{T}\right)$  qu'à 15 % dans les 10 premiers centimètres, 10 % entre 10 et 15 cm et seulement 5 % entre 15 et 20 cm. Les bases échangeables y sont très rares : 1,7 milliéquivalent pour 100 g (dont 1,1 m.éq. de calcium) entre 5 et 10 cm, et 0,3 milliéquivalent pour 100 g entre 15 et 20 cm. Seul l'horizon humifère de type moder et à feutrage de racines renferme 4 milliéquivalents pour 100 g de bases, dont 3 milliéquivalents de calcium absorbé par les arbres dans la profondeur du sol et ramené en surface avec la litière annuelle.

Cette très faible saturation du complexe absorbant explique le pH nettement acide de la partie supérieure de ce sol, dont une des particularités insolites est la neutralisation régulière du pH en profondeur et le passage à un pH basique vers 110 cm avec apparition de calcaire ; calcaire que l'on peut observer dans la fraction gravillonnaire de cet horizon sous forme de minuscules poupées craquelées.

La matière organique voit son évolution contrariée par le régime d'hydromorphie temporaire du sol, d'où un rapport  $\frac{C}{N}$  de 25 en surface. Chaque année, l'horizon supérieur de ce sol se trouve engorgé

de décembre à mai et la nappe disparaît l'été en profondeur en entraînant avec elle les divers éléments chimiques solubilisés. L'eau est à plus de 2 mètres en septembre. Il ne semble pas qu'on ait affaire à la fin de l'automne à une remontée de nappe, mais plutôt à la création superficielle d'une nouvelle nappe perchée qui disparaîtra lentement à son tour en profondeur l'année suivante en lessivant le sol.

Cet appauvrissement des limons et l'engorgement de décembre à mai de la partie supérieure du sol y détermine une évolution acide des matières organiques. Les substances humiques entraînées en profondeur contribuent, étant donné la forte compacité du milieu à l'état humide, à y accélérer les processus de réduction conduisant à la création du pseudogley. L'apparition, liée à l'évolution de ce sol, d'une végétation acidophile de sous-bois doit encore en accélérer l'évolution naturelle et aider à l'affirmation de l'horizon humifère de type moder.

## 2. RÉSULTATS

Les figures 49, 50 et 51 présentent les résultats obtenus sur ce sol.

La figure 49 en montre les variations régulières de température et d'humidité avec l'inversion saisonnière classique de la température dans le profil et le décalage plus rarement signalé de l'humidité

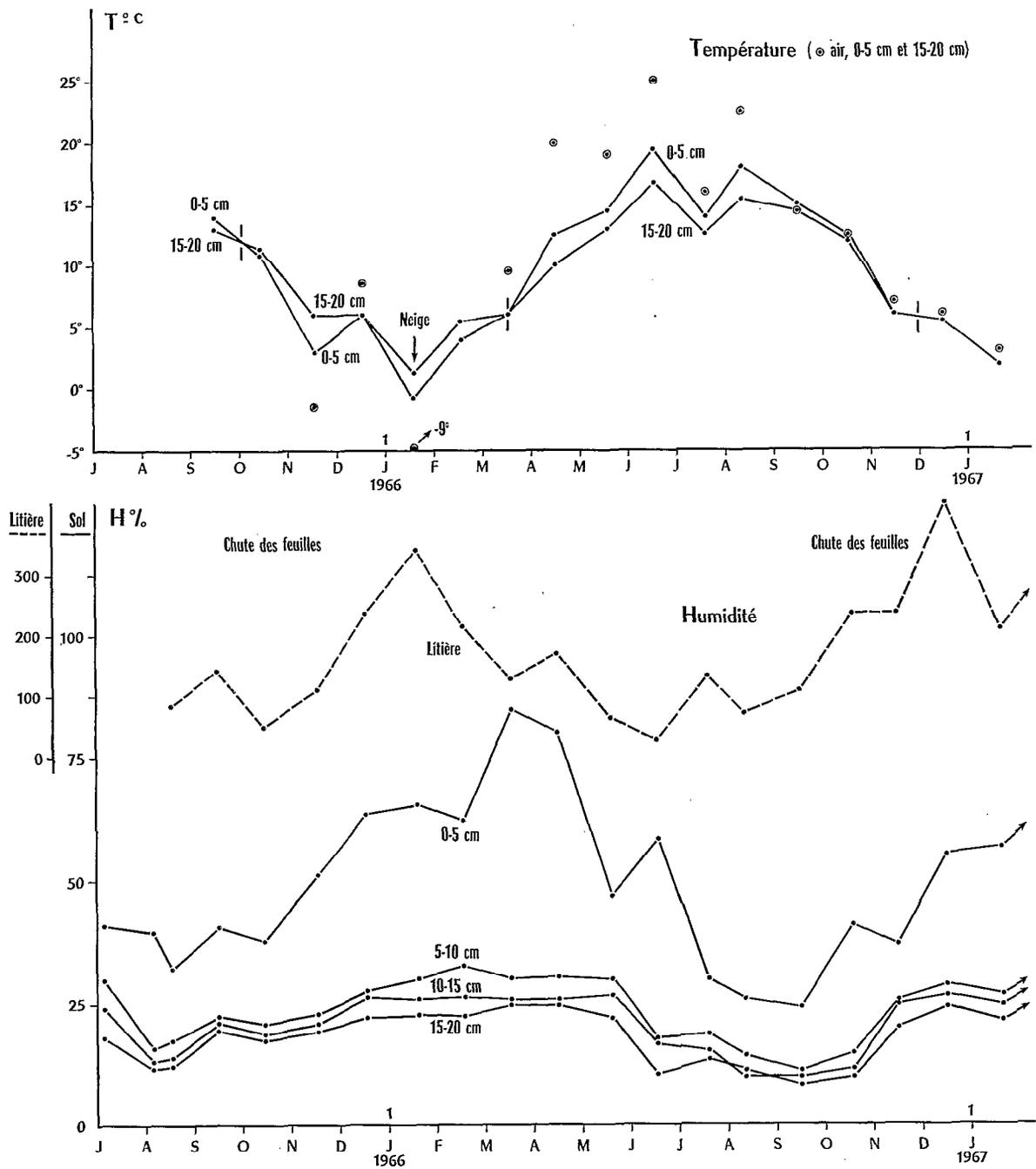


FIG. 49. — Température et humidité du sol podzolique à pseudogley de Brunoy.

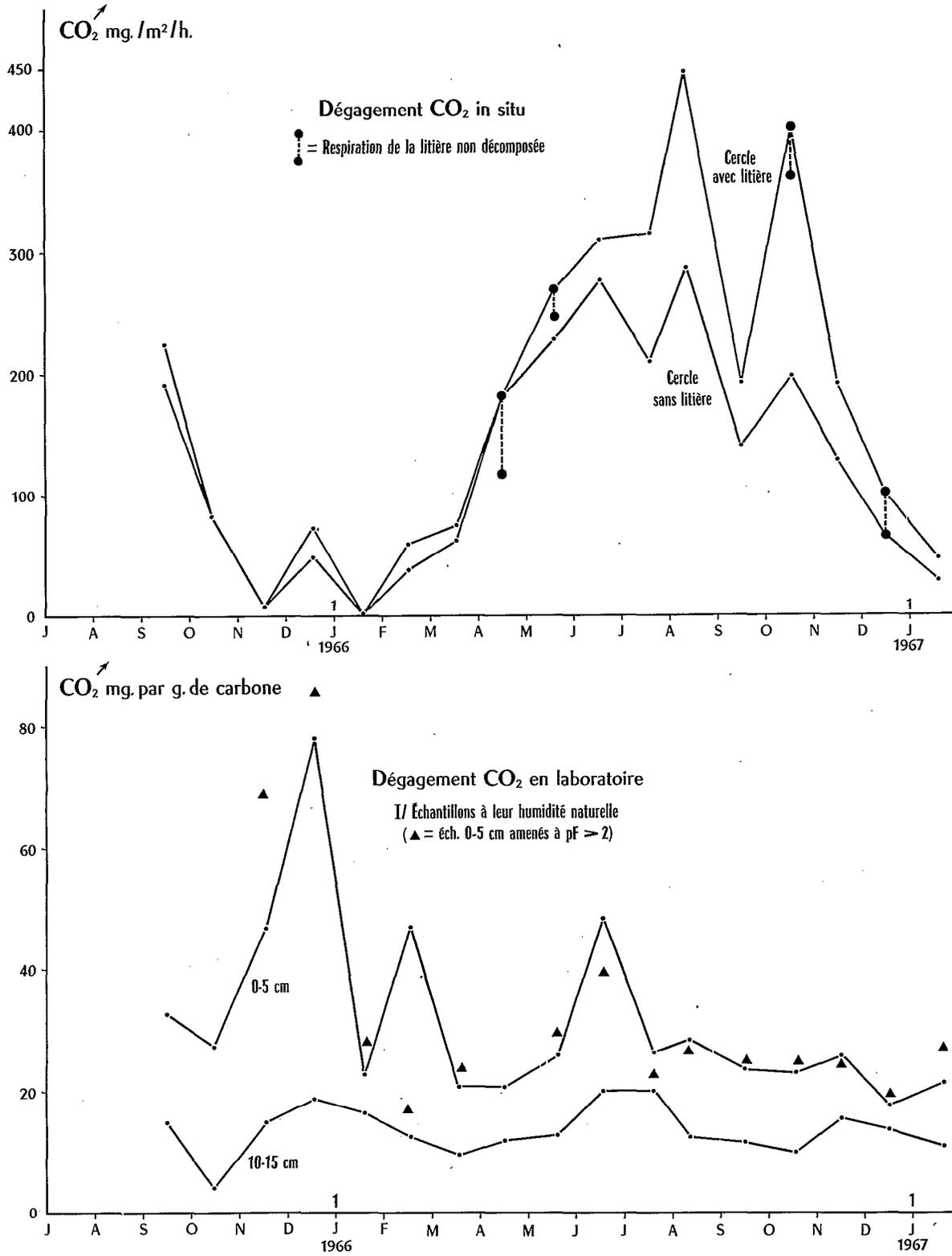


FIG. 50. — Dégagement de CO<sub>2</sub> in situ et mesure à l'humidité naturelle du dégagement de CO<sub>2</sub> d'échantillons fraîchement prélevés (sol podzolique à pseudogley de Brunoy).

de la litière avec l'humidité du sol. Facilement influencée par les variations de température et d'humidité de l'atmosphère, la litière s'humidifie et se dessèche plus rapidement que le sol, aussi atteint-elle son maximum et son minimum d'humidité 2 à 3 mois avant les 10 premiers cm du sol, ce qui importe notamment pour les variations saisonnières de la faune.

Il est surtout intéressant de noter que l'humidité de ce sol demeure toute l'année au-dessus de pF 2,5, à l'exception des mois d'août et septembre, où elle reste cependant toujours au-dessus de pF 4,2, valeur du point de flétrissement<sup>1</sup>.

La figure 50 montre que le dégagement de CO<sub>2</sub> in situ suit fidèlement les variations de température et ne paraît pas, comme pour le sol brun calcaire de Bondy (cf. fig. 46), être aussi facilement freiné par les périodes de sécheresse. Seule ici la sécheresse assez forte du mois de septembre 1966 a pu diminuer le dégagement de CO<sub>2</sub>. Cette différence avec le sol brun calcaire de Bondy s'explique par le fait que dans le sol de la forêt de Sénart, l'humidité ne descend jamais l'été en dessous de pF 4,2.

Pour ce qui est des mesures du carbone minéralisable en laboratoire, il est nécessaire d'exprimer les dégagements de CO<sub>2</sub> par rapport à 1 g de carbone, étant donné la grande variation des teneurs en matières organiques dans les divers prélèvements mensuels 0-5 et 5-10 cm. Bien que ces prélèvements mensuels aient été effectués à moins de 50 cm les uns des autres, le carbone y varie de 5,5 % à 17 % dans l'horizon 0-5 cm et de 2,1 à 4,8 % dans l'horizon 5-10 cm. Par contre, il ne varie plus que de 1,6 à 2,2 % dans l'horizon 10-15 cm.

La mesure immédiate dès le retour au laboratoire du carbone minéralisable des échantillons, conservés à leur humidité naturelle dans des sacs en plastique, montre une variation assez irrégulière du dégagement de CO<sub>2</sub> dans l'horizon 0-5 cm, mais par contre une variation beaucoup plus régulière dans l'horizon 10-15 cm (cf. fig. 44). Les variations quantitatives, et vraisemblablement aussi qualitatives, du carbone total dans l'horizon de surface expliquent l'irrégularité des variations du carbone facilement minéralisable. Pour plus de clarté, les courbes des horizons 5-10 cm et 15-20 cm n'ont pas été reportées sur le graphique de la figure 50 ; la courbe de l'horizon 5-10 cm est intermédiaire entre les deux courbes données et la courbe 15-20 cm manque d'amplitude dans ses variations.

Les petits triangles noirs correspondent aux différentes valeurs de dégagement de CO<sub>2</sub> des échantillons de l'horizon 0-15 cm après addition d'eau. D'une manière générale, l'addition d'eau n'a pas accru le dégagement de CO<sub>2</sub> des échantillons à leur humidité naturelle, ce qui confirme bien que dans ce sol l'humidité ne peut être qu'exceptionnellement facteur limitant de la respiration.

En hiver, à une faible activité biologique correspond une élévation du carbone immédiatement minéralisable.

Au printemps, avec la reprise d'activité biologique, le carbone immédiatement minéralisable diminue jusqu'en avril, après quoi la température continuant à croître, l'activité biologique du sol libère jusqu'en juillet plus de carbone facilement minéralisable qu'elle n'en consomme. L'observation faite précédemment (chap. 3, § C) de la tendance à l'accumulation du carbone glucidique dans les sols de type podzolique va dans le sens de cette explication. Toutefois, d'août à octobre, la température atteignant son maximum, l'activité biologique du sol est alors très active, car généralement pas freinée par le manque d'humidité, et elle utilise à nouveau plus de carbone immédiatement minéralisable qu'elle n'en libère.

D'octobre à janvier, l'abaissement de la température diminue l'activité biologique du sol et y détermine une accumulation de carbone immédiatement minéralisable.

Il est intéressant de constater que ces variations saisonnières du carbone facilement minérali-

1. Humidités à pF 4,2, mesurées sur échantillons non séchés :

Profondeur	Saison sèche	Saison humide
0- 5 cm .....	14 %	34 %
5-10 cm .....	8	12
10-20 cm .....	7	9

sable dans le sol podzolique présentent quelques très nettes différences avec celles précédemment observées dans le sol brun calcaire.

A la fin de l'hiver, la reprise d'activité biologique détermine une baisse du carbone immédiatement minéralisable dans le sol podzolique, alors que dans le sol brun calcaire mieux tamponné et recevant éventuellement des produits glucidiques issus du lessivage de la litière de pommiers, des accumulations temporaires sont au contraire possibles.

Au printemps, d'avril à fin juin, le carbone immédiatement minéralisable, conjointement au développement de l'activité biologique diminue régulièrement dans le sol brun calcaire, alors qu'il croît régulièrement dans le sol podzolique, où le carbone minéralisable consommé apparaît alors inférieur à celui libéré, tout au moins jusqu'en juillet. Une tendance à une minéralisation plus facile du carbone glucidique dans le sol brun calcaire que dans le sol podzolique fournit une explication plausible de cette différence d'évolution.

Dans la deuxième moitié de l'été, l'humidité du sol qui descend en dessous de pF 4,2 dans le sol brun calcaire s'y avère facteur limitant de l'activité biologique. Celle-ci ne peut alors suivre l'élévation de température, comme elle le fait dans le sol podzolique, où l'humidité demeure, même en été, toujours au-dessus de pF 4,2.

A la fin de l'automne, en novembre-décembre, conjointement à la baisse de température et au ralentissement de l'activité biologique, le carbone immédiatement minéralisable remonte dans le sol podzolique, alors qu'il continue à diminuer dans le sol brun calcaire, où la baisse d'activité biologique est plus longue à se manifester.

La comparaison au cours de l'année du carbone immédiatement minéralisable existant dans les échantillons de terrain pris à leur humidité naturelle avec celui présent dans ces mêmes échantillons après 3 mois de séchage à l'air montre (cf. fig. 51) un certain parallélisme des variations saisonnières

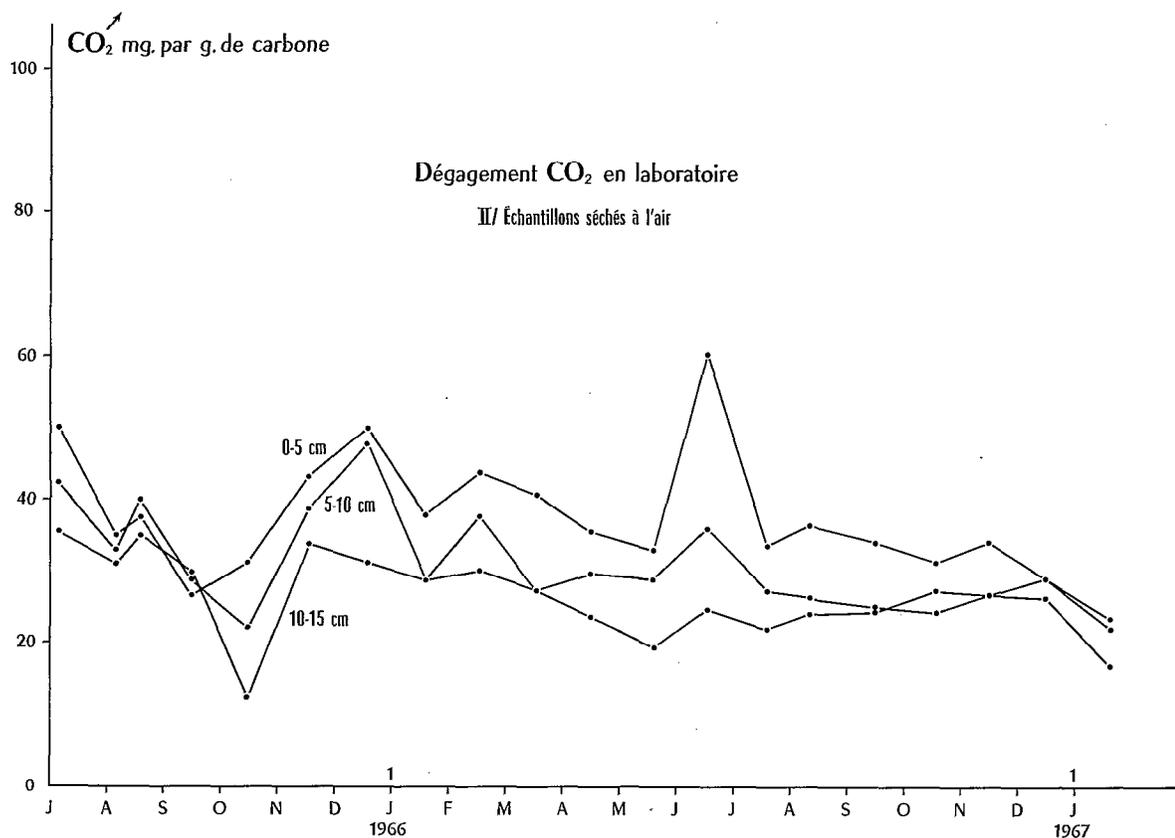


FIG. 51. — Dégagement de CO<sub>2</sub> en laboratoire sur échantillons séchés à l'air et vieux de 3 mois (sol podzolique à pseudogley de Brunoy).

de ce carbone dans les deux types d'échantillons et une augmentation générale de ses teneurs dans les sols séchés à l'air, à la seule exception toutefois des pointes de respiration de décembre et février dans l'horizon 0-5 cm.

La remontée de printemps du carbone immédiatement minéralisable paraît aussi se manifester un mois plus tard dans les échantillons séchés à l'air. Un séchage moins rapide des terres ou une certaine humidité dans l'atmosphère du laboratoire au printemps sont peut-être cause de cette différence.

#### D. MINÉRALISATION ANNUELLE DU CARBONE

Dans un sol en équilibre dont la teneur en carbone demeure constante, il se minéralise chaque année approximativement autant de carbone que les débris végétaux en apportent, tant par leurs parties aériennes que souterraines.

En se basant sur une teneur de 50 % de carbone dans les débris végétaux séchés à l'étuve, et en considérant que les racines mortes, leur desquamation ou leurs exsudats constituent annuellement 25 % de la litière, on peut retenir en première approximation les valeurs d'apport suivantes<sup>1</sup> :

TABLEAU 13. — *Apports annuels de matières organiques aux sols.*

	En tonnes par hectare et par an	
	Matières organiques sèches	Carbone
<i>SOLS DE RÉGIONS TROPICALES HUMIDES</i>		
Forêt hétérogène ..... (LAUDELOUT et MEYER, 1954.)	15,5	7,7
Parasoleraie ..... (LAUDELOUT et MEYER, 1954.)	18,6	9,3
Forêt tropicale ..... (NYE et GREENLAND, 1960.)	14,0	7,0
Savane humide à andropogonées :		
sans brûlis ..... (NYE, 1961.)	9,0	4,5
avec brûlis ..... (NYE, 1961.)	3,0	1,5
Savane humide au Ghana :		
1 500 mm de pluie ..... (NYE, 1958.)	5,9	3,0
Savane sub-humide de Rhodésie du Sud :		
875 mm de pluie ..... (WEINMANN, 1948.)	1,7	0,8
<i>SOLS DE RÉGIONS TEMPÉRÉES HUMIDES</i>		
Forêts de feuillus ou de résineux ..... (Divers auteurs)*	5,0	2,5

\* D'après « L'Écologie, Science moderne de synthèse », vol. 2. *Écosystèmes et Biosphère*, Ministère de l'Éducation Nationale et de la Culture, Bruxelles.

1. Les valeurs des auteurs basées sur le seul apport des litières ont été ici accrues de 25 % pour tenir compte des apports souterrains. GREENLAND et NYE (1959) les estiment cependant plus élevés : à 50 % dans les forêts en équilibre et à 33 % dans les savanes d'Afrique.

	En tonnes par hectare et par an	
	Matières organiques sèches	Carbone
<i>SOLS DE RÉGIONS TEMPÉRÉES HUMIDES</i> (Suite)		
Forêts de résineux en Russie ..... (PERINA et VINTROVA, 1958.)	4,5	2,2
Forêt de Sénart (Brunoy, France) ..... + 25 % pour les sous-bois ..... (BACHELIER.)	3,4 à 5,2 (1965) (1966) 4,2 à 6,5	1,7 à 2,6 (1965) (1966) 2,1 à 3,3
Prairies* parties aériennes ..... + 50 % racines ..... (TROUGHTON, 1957.) (Divers auteurs.)	4 à 10 6 à 15	2 à 5 3 à 7,5

\* Nous ne donnons là qu'un simple ordre d'idée, une productivité très faible se manifestant dans les prairies alpines et une productivité de 15 à 20 t/ha/an pouvant facilement être atteinte avec certaines espèces, en sol fertile et sous climat favorable.

En comparaison avec ces données, on trouve pour la minéralisation du carbone les valeurs suivantes :

TABEAU 14. — *Minéralisation annuelle du carbone dans les sols.*

	En tonnes par hectare et par an	
	CO <sub>2</sub>	Carbone
Forêt dans l'État de New York ..... (WOODWELL et DYKEMAN, 1966.)	34,0	9,27
Sol à fertilisation organique .....	32,0	8,7
Sols agricoles épuisés ..... (LUNDEGARDH, 1927.)	3,0	0,8
Sol brun dégradé sableux (loamy sand) ..... (semestre hivernal ..... semestre estival : ..... (KRZYSCH, 1965 et TAMM et KRZYSCH, 1965.)	20,0 2,0 18,0	5,4
Sol brun calcaire de Bondy .....	8,3	2,3
Sol podzolique de Brunoy ..... (BACHELIER.)	10,3	2,8

KOEPF (1954) et KRZYSCH (1965) ont montré à l'aide d'installations d'enregistrement automatique de la respiration du sol (TAMM, KRZYSCH et FUNKE, 1965) que celle-ci peut varier pendant le semestre d'été de 50 à 150 % selon les sols au cours de la journée, plus de CO<sub>2</sub> étant libéré durant le jour (période de rayonnement interne) que durant la nuit (période de rayonnement externe). La plus grande quantité de CO<sub>2</sub> est libérée par le sol au moment où il y a une demande considérable de CO<sub>2</sub> par la photosynthèse, tandis que la nuit, quand le CO<sub>2</sub> libéré par la respiration des plantes est largement diffusé dans l'atmosphère, s'observe une réduction marquée de la respiration du sol.

Les variations journalières deviennent très faibles dans le semestre hivernal.

Les valeurs très approchées que nous donnons ici pour les sols de Brunoy et de Bondy tiennent compte, pour le sol de Brunoy, d'une diminution de 50 % des valeurs de respiration mesurées à midi pendant les mois de mai à octobre, et pour le sol de Bondy, d'une diminution de 25 ou 50 % de la respiration selon l'heure de la mesure et pour les mêmes mois d'été.

Toujours d'après KRZYSCH (1965), si on considère une utilisation à 100 % par l'assimilation de la plante du CO<sub>2</sub> libéré par le sol durant la période de rayonnement interne, 50 % des glucides d'une culture de betterave fourragère peuvent être attribués à l'utilisation directe du CO<sub>2</sub> s'élevant du sol. Si on considère la quantité totale de CO<sub>2</sub> libérée par la respiration du sol pendant la période de végétation, elle peut alors plus ou moins couvrir les besoins d'une culture moyenne de betteraves. Une jolie expérience de LUNDEGARDH en 1927 avait consisté à entourer les pieds de betteraves d'un anneau de fumier isolé du sol par une couche d'asphalte. L'augmentation grâce au fumier de 14,5 % de la teneur en CO<sub>2</sub> au niveau des feuilles, avait permis un accroissement de production de 16 % des betteraves. Il est d'ailleurs maintenant de pratique courante dans les cultures en serre d'enrichir plus ou moins empiriquement à certaines périodes de la vie des plantes l'atmosphère des serres par du gaz carbonique. Ce problème de l'enrichissement artificiel de l'atmosphère en CO<sub>2</sub> ne peut être dissocié de celui de l'atmosphère du sol et de la croissance des plantes.

### E. L'ATMOSPHÈRE DU SOL (BACHELIER, 1968)

L'atmosphère du sol est intimement liée à la minéralisation du carbone et dépend essentiellement :

- des matières organiques minéralisables présentes dans le sol ;
- de l'activité bactérienne et, à un degré moindre, de la respiration des racines et de la rhizosphère entourant ces racines ;
- des possibilités de diffusion des gaz, et donc indirectement de la porosité et de l'humidité du sol ;
- de l'atmosphère à la surface du sol.

Tous ces facteurs varient selon les saisons et contribuent à faire de chaque type de sol un sujet d'étude particulier.

Sous cette simplicité relative de la question se cache en fait un problème assez complexe, car il faut considérer dans le sol deux atmosphères : une atmosphère libre remplissant les pores du sol et une atmosphère dissoute dans les films d'eau recouvrant les agrégats et qui intéresse directement les racines. La dissolution et la diffusion des gaz au sein des films d'eau dépendent de leurs caractéristiques physico-chimiques.

Divers éléments du dynamisme des sols, telles la nitrification ou l'assimilabilité de certains éléments (comme le potassium et le magnésium), sont par ailleurs en rapport étroit avec l'atmosphère du sol.

Plusieurs auteurs ont enfin montré assez récemment que dans l'atmosphère du sol existaient pour le gaz carbonique des possibilités de fixation biologique et d'absorption par les racines, ainsi que dans les sols hydromorphes des possibilités pour l'oxygène d'être apporté par ces mêmes racines.

Ayant eu l'occasion de traiter de ces divers problèmes relatifs à l'atmosphère du sol dans une récente publication (BACHELIER, 1968b), nous nous permettons d'y renvoyer le lecteur pour plus de détails et les références bibliographiques.

Nous donnerons cependant ici les différentes teneurs mensuelles en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère libre du sol brun calcaire de Bondy, dont le profil et l'étude saisonnière de la minéralisation du carbone ont été étudiés au paragraphe A de ce chapitre.

Les résultats de nos mesures sont résumés dans la figure 52. Il peut y être observé que dans l'atmosphère de l'horizon organique humifère (0-25 cm) de ce sol existent deux maxima : un de prin-

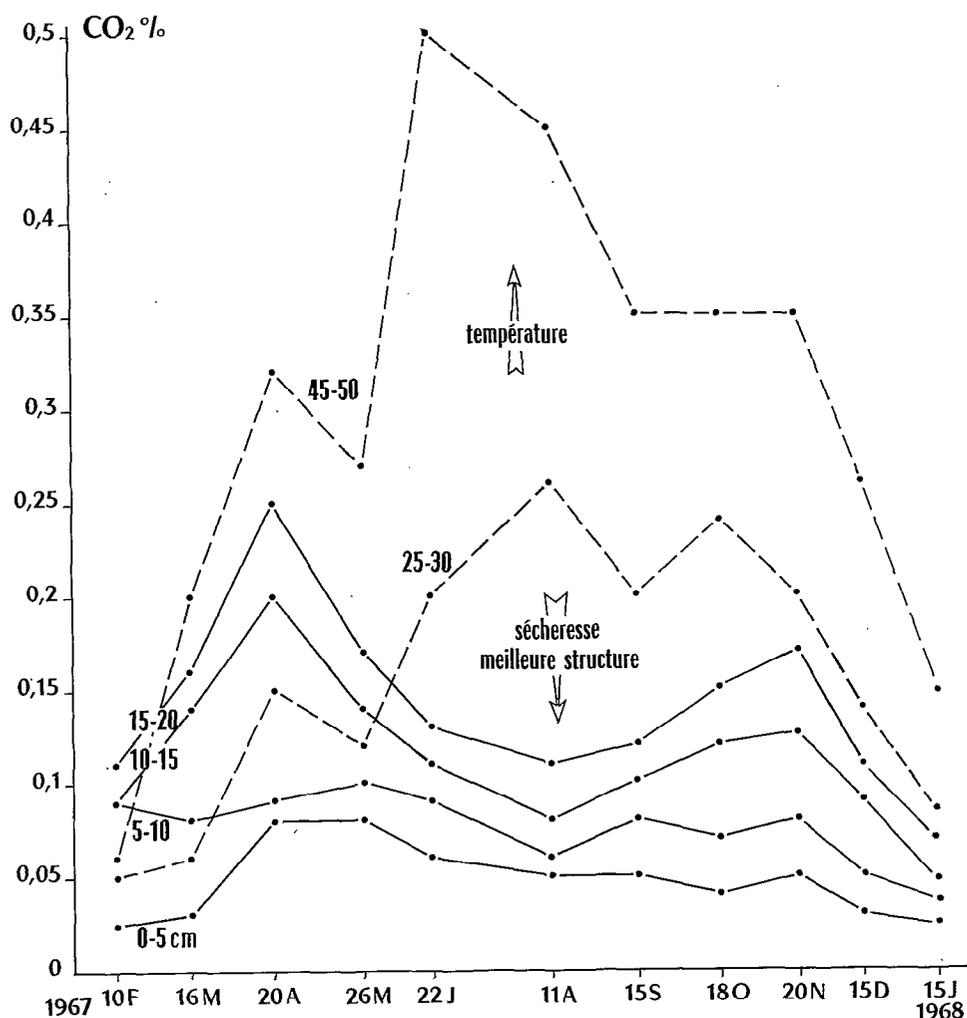


FIG. 52. — Atmosphère du sol brun calcaire de Bondy, teneur en CO<sub>2</sub>.

temps et un plus faible d'automne. Le minima d'hiver correspond à un ralentissement de l'activité biologique lié à la température. Le minima d'été peut en partie correspondre, comme nous l'avons vu, à un ralentissement possible mais temporaire de l'activité biologique lié à la sécheresse (cf. fig. 46), mais il dépend surtout en fait d'une meilleure diffusion des gaz, résultant d'une meilleure structure du sol (cf. fig. 42). Ce qui fait que paradoxalement les teneurs en gaz carbonique dans l'atmosphère libre de l'horizon supérieur de ce sol varient en sens inverse de son dégagement de CO<sub>2</sub>.

Au contraire, dans l'horizon sous-jacent (27-72 cm), limono-sableux, à structure polyédrique et à porosité plus faible, la teneur en CO<sub>2</sub> du sol suit alors la température, car l'effet de sécheresse se marque moins en profondeur et la diffusion des gaz s'y effectue plus difficilement par suite d'une plus grande compacité du matériel.

## F. CONCLUSIONS GÉNÉRALES DU CHAPITRE

De l'examen des variations saisonnières de l'activité biologique globale et du carbone immédiatement minéralisable de nos trois sols, et bien que certaines de nos hypothèses demandent encore à être confirmées par d'autres études, il peut cependant être considéré comme acquis certains points importants :

1. Le dégagement de  $\text{CO}_2$  du sol est fonction de la température pour autant que l'humidité n'en soit pas facteur limitant en saison sèche. Elle l'est dans le sol brun calcaire mais elle ne l'est généralement pas dans le sol podzolique et le sol ferrallitique, que nous avons étudiés.

2. La teneur en carbone immédiatement minéralisable des sols est au cours de l'année, et compte tenu des effets de sécheresse, généralement inversement proportionnelle à leur activité biologique. Toutefois, dans les sols où le carbone glucidique tend à s'accumuler, comme c'est le cas dans les sols acides de type podzolique (cf. chap. 3, § C), il est des périodes, tel le printemps, où une activité biologique moyenne paraît pouvoir libérer plus de carbone immédiatement minéralisable qu'elle n'en consomme.

L'incorporation au sol de la litière par la faune peut aussi y apporter au printemps des substances organiques facilement minéralisables, ainsi que nous l'avons constaté en mars dans le sol brun calcaire sous pommiers. Il serait aussi vraisemblablement nécessaire de tenir compte des apports glucidiques faits au sol par les eaux de lessivage des litières et des frondaisons (CARLISLE, 1965).

3. Chacun des trois sols étudiés présente des variations saisonnières de leur dynamique du carbone minéralisable, qui leur sont propres.

4. La teneur en carbone immédiatement minéralisable des sols peut varier du simple au double au cours de l'année.

5. Le séchage à l'air des sols accroît leur teneur en carbone immédiatement minéralisable, comme cela a déjà été vu au chapitre 2, § D.

6. La stabilité structurale, dont il a déjà été vu précédemment la dépendance vis-à-vis du carbone facilement minéralisable et des gels organiques, apparaît dans ses variations saisonnières étroitement liée à l'humidité du sol, celle-ci agissant directement sur l'état physique des colloïdes (cf. fig. 47).

7. La reprise active de la vie biologique en début de saison des pluies libère dans les sols ferrallitiques des composés organiques de nature plus fulvique que glucidique et ayant une action favorable sur la stabilité structurale.

Plusieurs conséquences d'ordre méthodologique seront tirées de ces diverses conclusions au chapitre suivant (chap. 5, § B-2).

De l'examen du bilan entre l'apport et la minéralisation annuelle du carbone dans les sols, il ressort que dans les sols en équilibre, le  $\text{CO}_2$  dégagé correspond approximativement chaque année aux apports de carbone. Le dégagement de  $\text{CO}_2$  du sol brun calcaire de Bondy sous pommiers peut être estimé à 2,3 t de carbone par hectare et par an, et celui du sol podzolique de la forêt de Sénart à 2,8 t de carbone par hectare et par an.

L'étude des variations de teneur en  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère du sol brun calcaire de Bondy a montré que, par suite des variations microclimatiques et structurales saisonnières qui se manifestent dans ce sol, la teneur en  $\text{CO}_2$  de son atmosphère pouvait dans l'horizon supérieur y varier en sens inverse de son dégagement de  $\text{CO}_2$ .

L'examen des problèmes relatifs à l'atmosphère des sols a fait l'objet d'une autre publication (BACHELIER, 1968).

# Conclusions et exemples d'applications

## *A. INTÉRÊT DE L'ÉTUDE DE LA MINÉRALISATION DU CARBONE DANS LES SOLS*

Les équilibres biodynamiques que constituent les sols sont d'autant mieux compris et peuvent d'autant plus judicieusement être utilisés qu'on en connaît mieux les constituants, les fonctions physiologiques, les variations saisonnières et la dynamique évolutive. « On ne peut vaincre la nature qu'en lui obéissant », disait Bacon. Il n'est cependant pas possible de tout étudier dans un sol ; il y a, comme dans tout équilibre naturel, une hiérarchie des facteurs établie d'après l'importance de ces derniers au sein des interactions. Aussi, est-on amené en Pédologie à se pencher de préférence sur les facteurs qui permettent d'acquérir rapidement une assez vaste connaissance. Importance dynamique des facteurs et rentabilité des techniques en fonction des moyens sont toujours à considérer dans l'étude des milieux naturels.

Nous pensons que la minéralisation du carbone, fonction physiologique essentielle des sols, obéit à ces quelques considérations. Par la multiplicité des facteurs qui la déterminent, cette fonction reflète en effet l'activité biologique globale des sols et son étude statique ou dynamique, même conduite avec les techniques simples qui ont été les nôtres, a pu nous permettre d'aborder sous un angle nouveau la dégradation des matières organiques en fonction des différents sols, d'approcher ainsi plus ou moins directement les formes les plus évoluées de ces matières organiques, sucres et gels microbiens, et d'en envisager les rapports avec certaines caractéristiques physiques essentielles comme la stabilité structurale des agrégats.

D'une meilleure connaissance de la nature du carbone minéralisable et des divers facteurs susceptibles d'influencer sa minéralisation peuvent être aussi tirées certaines conclusions d'ordre méthodologique et envisagées quelques applications pratiques.

## *B. PRINCIPAUX RÉSULTATS ACQUIS*

### 1. SUR LE PLAN SCIENTIFIQUE

Des diverses conclusions acquises sur le sujet au cours des chapitres précédents (chap. 2, § C, chap. 3, § G et chap. 4, § F), nous pensons utile de retenir plus particulièrement ici les points essentiels suivants :

La **minéralisation du carbone** est directement liée à la température, et l'humidité au-dessous de la rétention aux champs (pF 2,2 à 2,5) devient facilement facteur limitant de cette minéralisation.

La mesure du dégagement de  $\text{CO}_2$  en laboratoire, en fonction de la température et compte tenu des différentes valeurs du Q.10, donne avec les divers horizons d'un même profil un ensemble de courbes caractéristique du type de sol étudié. Le carbone des sols offre une graduation régulière de son aptitude à se minéraliser.

La décarbonatation abiotique dans les sols, si elle peut exister dans la nature (sécheresse et échauffement) ne peut cependant pas jouer dans les mesures hebdomadaires du dégagement de  $\text{CO}_2$  en laboratoire.

Les sels ne paraissent diminuer le dégagement de  $\text{CO}_2$  des sols que par l'influence limitante qu'ils ont sur la végétation et consécutivement le carbone total des sols. Une forte population peu diversifiée de microarthropodes coexiste souvent dans les sols salins à côté de très faibles populations bactériennes.

Le carbone facilement ou immédiatement minéralisable (c'est-à-dire se minéralisant en laboratoire en 7 jours à  $30^\circ$ ) se localise dans la fraction la plus fine du sol et se trouve, notamment dans les sols calcaires, énergiquement protégé par les argiles. L'étude de l'influence des radiations gamma montre d'ailleurs que les fortes irradiations de  $4 \times 10^6$  rads libèrent du carbone facilement minéralisable, conjointement à une diminution et à une plus grande facilité de dispersion des agrégats, et cela sans que les matières organiques totales du sol ou leurs rapports C/N n'en soient modifiés. La dessiccation des sols a de même pour effet de libérer du carbone facilement minéralisable ; effet d'autant plus prononcé que le sol est plus argileux et la dessiccation plus poussée. Une première sécheresse en rend une seconde sans effet, si le carbone facilement minéralisable, qui a été entre-temps libéré par la reprise d'activité biologique, n'a pas eu le temps de se lier aux colloïdes minéraux du sol. SCHAEFER (1964) a montré que des gels répétés pouvaient avoir sur les mull une action identique à la dessiccation. BIRCH et FRIEND (1956) ont fait ressortir les possibilités d'échange du carbone facilement minéralisable protégé par les argiles.

L'apport de montmorillonite dans les sols qui en sont dépourvus ou l'apport de solutions alcalines dans les sols acides stimulent la minéralisation du carbone de ces sols.

Concernant la **nature du carbone facilement ou immédiatement minéralisable**, l'étude du quotient respiratoire et de son évolution dans le temps montrent que ce carbone est inclu au sein de molécules organiques, dont le degré d'oxydation dépend non seulement de la nature de l'apport organique, mais aussi et surtout de son mode de dégradation en fonction du type de sol et notamment de son régime hydrique. La sécheresse saisonnière permet ainsi dans les mor et les sols calcaires une oxydation poussée des substances organiques facilement minéralisables.

L'expérience a montré que les sucres libres solubles, qui sont aussi bien à la base des processus d'anabolisme que de catabolisme, forment l'essentiel de la réserve de carbone facilement minéralisable des sols et ont d'après la littérature une action favorable sur le métabolisme de ces sols : fixation d'azote, mobilisation d'éléments minéraux tel le phosphore, croissance des plantes, etc...

Les glucides libres constituent selon les sols de 0,5 à 2 % du carbone total et, tout au moins dans les horizons supérieurs, environ la moitié du carbone minéralisé en laboratoire en 7 jours et à  $30^\circ$  sur échantillons séchés à l'air.

Le carbone facilement minéralisable est en première approximation d'autant plus abondant dans les sols que ceux-ci sont plus organiques et plus riches en carbone total, mais le quotient de minéralisation du carbone ( $Q.M. = \frac{C \text{ du } \text{CO}_2}{C \text{ total}} \times 100$ ) varie selon les types de sols et les horizons. En considérant simplement le dégagement en laboratoire du  $\text{CO}_2$  des sols par rapport à leurs teneurs en carbone total, en carbone soluble et en carbone glucidique, on peut acquérir une représentation statique de leur dynamique de minéralisation du carbone ; représentation pour laquelle nous avons proposé un mode simple de figuration graphique (cf. chap. 3, § C-1).

Étudiant ainsi la **dynamique de la minéralisation du carbone dans divers sols de nature très différente** (chap. 3, § C-2 et conclusions § G), nous avons pu mettre en évidence les processus pédologiques essentiels suivants :

— dans les sols calcaires, on a observé une facile minéralisation des matières organiques avec leur oxydation abiotique possible en saison sèche, et pour les vertisols d'Afrique argileux et compacts une protection efficace de leur carbone glucidique.

— dans les sols ferrallitiques des régions équatoriales, on a constaté une minéralisation lente mais continue au cours de l'année des matières organiques, une rapide minéralisation du carbone glucidique, une forte production d'acides fulviques stables (car protégés par le fer et l'alumine) et une faible synthèse d'acides humiques.

— dans un sol ferrugineux tropical lessivé, il a été noté une évolution freinée du carbone glucidique, qui tend à s'accumuler en profondeur, mais une minéralisation potentielle normale du carbone de surface.

— dans le sol ferrugineux tropical sableux et non lessivé (sol dior) se manifeste en saison sèche une accumulation superficielle typique de glucides libres facilement minéralisables.

— dans les mor et moder de podzol et sols podzoliques, il a été trouvé un pouvoir de minéralisation du carbone aussi élevé que dans les sols ferrallitiques, mais par contre fortement freiné pendant les périodes de froid et de sécheresse, d'où dans ces sols des accumulations de matières organiques avec possibilité d'oxydations abiotiques en été. La minéralisation du carbone glucidique, à la différence de ce qui se passe dans les sols ferrallitiques, est dans ces horizons humifères fortement freinée ; l'azote n'en semble pas responsable, mais peut-être les enzymes de la respiration ou indirectement le pH, l'activité déshydrogénasique étant toujours très faible dans les podzols et sols podzoliques.

— dans un anmoor et un hydromor, on a confirmé la très faible minéralisation des matières organiques de ces sols, mais alors que le carbone glucidique s'avère très facilement minéralisable dans l'anmoor, il apparaît au contraire de nature très stable dans l'hydromor.

— dans un sol à hydromorphie temporaire fortement colonisé par les vers de terre, on a retrouvé l'influence de ces animaux, d'une part sur l'aérobiose du sol maintenue suffisante pour éviter la formation d'un gley, et d'autre part sur la dégradation du matériel végétal qui conduit alors à une nette dominance des acides fulviques sur les acides humiques et à de très fortes teneurs en glucides libres.

La recherche de l'azote dans les solutions aqueuses d'extraction du carbone soluble montre que cet élément sous sa forme soluble varie d'importance selon la nature des sols, mais pour les sols étudiés ne pourrait être facteur limitant de la minéralisation du carbone que dans l'anmoor et peut-être aussi les sols ferrallitiques sur roches volcaniques. La dessiccation des sols, si elle peut dans certains sols acides causer une perte d'azote ammoniacal, favorise toujours par contre la solubilisation de l'azote à la réhumidification. Les rapports  $\frac{C \text{ soluble}}{N \text{ soluble}}$  aident à interpréter les données acquises sur le carbone minéralisable.

Un rappel de travail antérieur nous a amené à considérer le circuit humique des sols comme une voie détournée et secondaire de la minéralisation du carbone. La nature et l'importance des substances humiques dépendent des équilibres pédobiodynamiques et donc des facteurs qui les déterminent : climat, nature du sol, microflore et végétation. Un climat constamment chaud et humide favorise la déshumification aux dépens de l'humification. Une certaine richesse minérale des sols liée à un pH proche de la neutralité favorise au contraire l'humification.

Dans la nature, le **dégagement de CO<sub>2</sub> des sols** est fonction de la température, pour autant que l'humidité n'en soit pas facteur limitant en période sèche.

La teneur en carbone facilement ou immédiatement minéralisable varie au cours de l'année dans un même sol, généralement en fonction inverse de son activité biologique et compte tenu des effets de sécheresse, de l'évolution de son carbone glucidique (freinée dans les podzols et les sols podzoliques) et des éventuels apports énergétiques fournis par les eaux de lessivage des litières et des frondaisons. La teneur des sols en carbone immédiatement minéralisable peut varier du simple au double au cours de l'année.

Nous avons estimé d'après nos mesures que le dégagement d'un sol brun calcaire sous pommiers (Bondy) devait être d'environ 2,3 t de carbone par hectare et par an et le dégagement d'un sol podzologique sous forêt (Brunoy) d'environ 2,8 t de carbone par hectare et par an ; valeurs qui concordent

avec les données de la littérature et sont approximativement du même ordre de grandeur que les apports annuels de carbone à ces sols.

**L'atmosphère du sol**, qui est étroitement liée à la minéralisation du carbone s'avère une question intéressante mais complexe, dont nous n'avons fait encore qu'aborder l'étude. L'expérience nous a montré que dans les sols la teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère libre des horizons organiques pouvait varier en sens inverse du dégagement de CO<sub>2</sub> de ces horizons, pour autant que la variation saisonnière de la structure y freine en hiver, et y accélère en été, la diffusion des gaz.

Le carbone facilement minéralisable, bien plus que les substances humiques, contribue à déterminer **la stabilité structurale des sols**. La nature essentiellement glucidique de ce carbone (sucres libres et gels microbiens) en explique le pouvoir agrégatif. L'étude des variations saisonnières suggère que ce pouvoir agrégatif du carbone facilement minéralisable est étroitement lié à l'humidité du sol qui commande l'état physique des colloïdes et des gels microbiens. Des composés de nature fulvique, non facilement minéralisables dans l'immédiat, auraient aussi une action sur la stabilité structurale des sols ferrallitiques en début de saison des pluies.

## 2. SUR LE PLAN MÉTHODOLOGIQUE

De nos conclusions sur le carbone facilement minéralisable et de l'examen des variations saisonnières de ce carbone sont à tirer quelques remarques d'ordre pratique pour l'évaluation du potentiel d'activité biologique des sols par mesure de leur carbone immédiatement minéralisable ou toute autre mesure d'ordre respiratoire.

Il apparaît en effet nécessaire de ne comparer entre eux que des échantillons prélevés à la même saison et séchés d'une manière identique, c'est-à-dire à l'abri du soleil, en faible épaisseur, et éventuellement en pays humide sous le vent modéré d'un ventilateur.

TABLEAU 15. — Sols de Bambari. Moyenne d.

S (m.éq. % g)	pH eau	Is	Rétention d'eau (en %)	CO <sub>2</sub> (mg % g)	CO <sub>2</sub> ml (0°, 76 cm) % g.	O <sub>2</sub> Manométrie ml (0°, 76 cm) % g.
E 3,0	E 5,00	T 1,84	E 23,61	E 29,85	15,20	EP 24,76
T 3,0	T 5,15	E 1,76	EF 23,66	T 30,21	15,38	EF 26,80
P 3,7	EF 5,22	EP 1,56	T 24,25	F 43,33	22,06	E 28,62
EF 3,9	EP 5,52	P 1,44	EP 24,37	EP 44,86	22,84	F 29,22
F 4,4	F 5,58	EF 1,36	EFP 24,63	P 45,49	23,16	T 30,87
EP 4,4	EFP 5,70	F 1,31	F 25,25	EF 49,77	25,34	EFP 36,42
EFP 5,0	P 5,81	EFP 1,19	P 25,83	FP 66,93	34,08	P 36,54
S 5,1	S 5,96	FP 1,18	S 26,04	EFP 66,93	34,08	S 40,14
FP 5,3	FP 6,09	S 0,27	FP 26,22	S 88,54	45,08	FP 54,30
Sol brun calcaire de Bondy						
Plus de 40	8,3	1,45	23,1	97,26	49,52	50,04

Il est bon après séchage des échantillons de conserver ces derniers dans une pièce fraîche, à hygrométrie peu élevée, et non exposée à des variations intempestives de température et d'humidité.

Il est enfin si possible préférable d'effectuer les mesures sur échantillons séchés, après un même laps de temps d'environ deux à trois mois

### C. EXEMPLES D'APPLICATIONS PRATIQUES

Les mesures de respiration et la recherche des substances énergétiques facilement minéralisables aident à mieux comprendre la dynamique du carbone des sols. Elles permettent d'estimer l'influence qu'ont sur leur activité biologique globale les divers facteurs externes et notamment les diverses pratiques agricoles, les fumures et les engrais minéraux (KRZYSCH, 1964) (TAMM et KRZYSCH, 1964 et 1966), ou encore les pesticides. Inversement, par apport sélectif, ces mesures peuvent aussi aider à la recherche des éléments minéraux déficients.

Deux exemples d'application pratique sont ici donnés.

#### 1. INFLUENCE DES PRATIQUES AGRICOLES. SANTÉ ET PRODUCTIVITÉ DU SOL

Nous reprendrons ici une étude faite sur 53 échantillons d'un sol faiblement ferrallitique modal de la station agricole de Bambari (République Centrafricaine) (BACHELIER, 1963c); étude dont nous avons déjà utilisé une partie des résultats au chapitre 2 (§ A-2b) avec la stabilité structurale et au chapitre 3 (§ A) avec le quotient respiratoire.

*résultats d'analyse par traitement cultural.*

Q.R.	O <sub>2</sub> flacon d'eau mg 100 par l	C (%)	Q.M.	Rendements coton		
				1959-60	Kg/ha 1960-61	1961-62
T 0,50	T 76	T 0,98	E 0,79	T 1 440	T 1 350	T 1 081
E 0,53	E 76	E 1,03	T 0,84	P 1 810	P 1 360	P 1 445
P 0,63	P 95	P 1,14	F 0,96	E 1 930	EP 1 759	E 1 573
FP 0,63	EP 96	EP 1,18	EP 1,04	EP 2 066	E 1 779	F 1 874
F 0,75	F 99	F 1,24	EF 1,06	FP 2 128	FP 1 804	EP 1 973
EP 0,92	EF 102	EF 1,27	P 1,09	F 2 146	EF 1 907	EF 1 983
EFP 0,94	FP 112	FP 1,35	EFP 1,34	EFP 2 179	F 1 976	FP 2 041
EF 0,95	EFP 114	EFP 1,73	FP 1,36		EFP 1 979	EFP 2 309
S 1,12	S 161	S 1,61	S 1,48			
0,99	148	1,07	2,48			

Rappelons que les 53 échantillons en cause constituent chacun la moyenne de 4 prélèvements effectués par QUANTIN dans l'horizon 0-15 cm et représentent à eux tous 9 parcelles différentes, à savoir :

- la savane non cultivée, échantillons S ;
- la culture continue de coton depuis 5 ans, sans apport, échantillons T ;
- la culture continue de coton depuis 5 ans, avec paillis régulier de sissongos, échantillons P ;
- la culture continue de coton depuis 5 ans, avec apport de fumier, échantillons F ;
- la culture continue de coton depuis 5 ans, avec apport de fumier et paillis de sissongos, échantillons FP ;
- la culture continue de coton depuis 5 ans, avec apport d'engrais minéraux (sulfate d'ammonium et phosphate tricalcique), échantillons E ;
- la culture continue de coton depuis 5 ans, avec apport d'engrais minéraux et paillis de sissongos, échantillons EP ;
- la culture continue de coton depuis 5 ans, avec apport d'engrais minéraux et de fumier, échantillons EF ;
- la culture continue de coton depuis 5 ans, avec apport d'engrais minéraux, de fumier et paillis de sissongos, échantillons EFP.

Si l'on se reporte aux figures 18 et 19 (chap. 2, § A-2b) et au tableau 15 donnant ici la moyenne des résultats d'analyse par traitement, on peut voir que la dégradation du sol apparaît la plus faible dans les sols de savane non cultivés (éch. S) et la plus forte dans les sols de culture continue sans apport (éch. T) ou avec apport d'engrais exclusivement minéraux (éch. E).

Les apports de paille (éch. P), de fumier (éch. F) ou d'engrais + paille (éch. EP) et d'engrais + fumier (éch. EF) n'ont pas pu compenser la diminution d'activité biologique que les sols ont subie du fait de la culture. Ceci, d'après les valeurs du carbone, de la somme des bases échangeables, du pH, de la stabilité structurale, de la rétention d'eau et de la respiration (gaz carbonique dégagé en bocal et oxygène absorbé en flacon d'eau).

Seuls les apports de fumier + paille (éch. FP) et mieux les apports d'engrais + fumier + paille (éch. EFP) ont limité au maximum cette diminution de la vie dans les sols, sans pouvoir cependant la maintenir au niveau de la savane non cultivée (éch. S).

La vie dans ces sols venant à diminuer, leur équilibre biodynamique tend à se simplifier, et cette simplification se traduit par une diminution des matières organiques, une acidification du sol, une moins bonne saturation en bases, une structure plus fragile et une rétention d'eau moins importante. Tous ces facteurs sont plus ou moins étroitement reliés entre eux et influent sur les rendements, mais dans l'immédiat l'activité biologique des sols des différentes parcelles demeure sans relation avec les rendements, ainsi que nous le montrent les diverses droites de la figure 53, et ce n'est qu'en considérant l'ensemble des parcelles qu'on peut entrevoir une corrélation encore très imprécise entre ces deux éléments.

COMBEAU, OLLAT et QUANTIN (1961) ont précédemment trouvé que les rendements en coton apparaissaient dans ces sols liés aux taux de matières organiques, à la somme des bases échangeables, à l'indice d'instabilité structurale et au pH. Les échantillons de 1961 ont confirmé ces relations, mais d'une manière beaucoup plus large et même assez incertaine en ce qui concerne la stabilité structurale et surtout le pH.

Les engrais minéraux ( $\text{NH}_4\text{SO}_4$  et  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ) par rapport au sol cultivé sans apport (éch. T) se sont avérés bénéfiques pour les rendements en coton, alors qu'ils sont restés sans effet sur l'activité

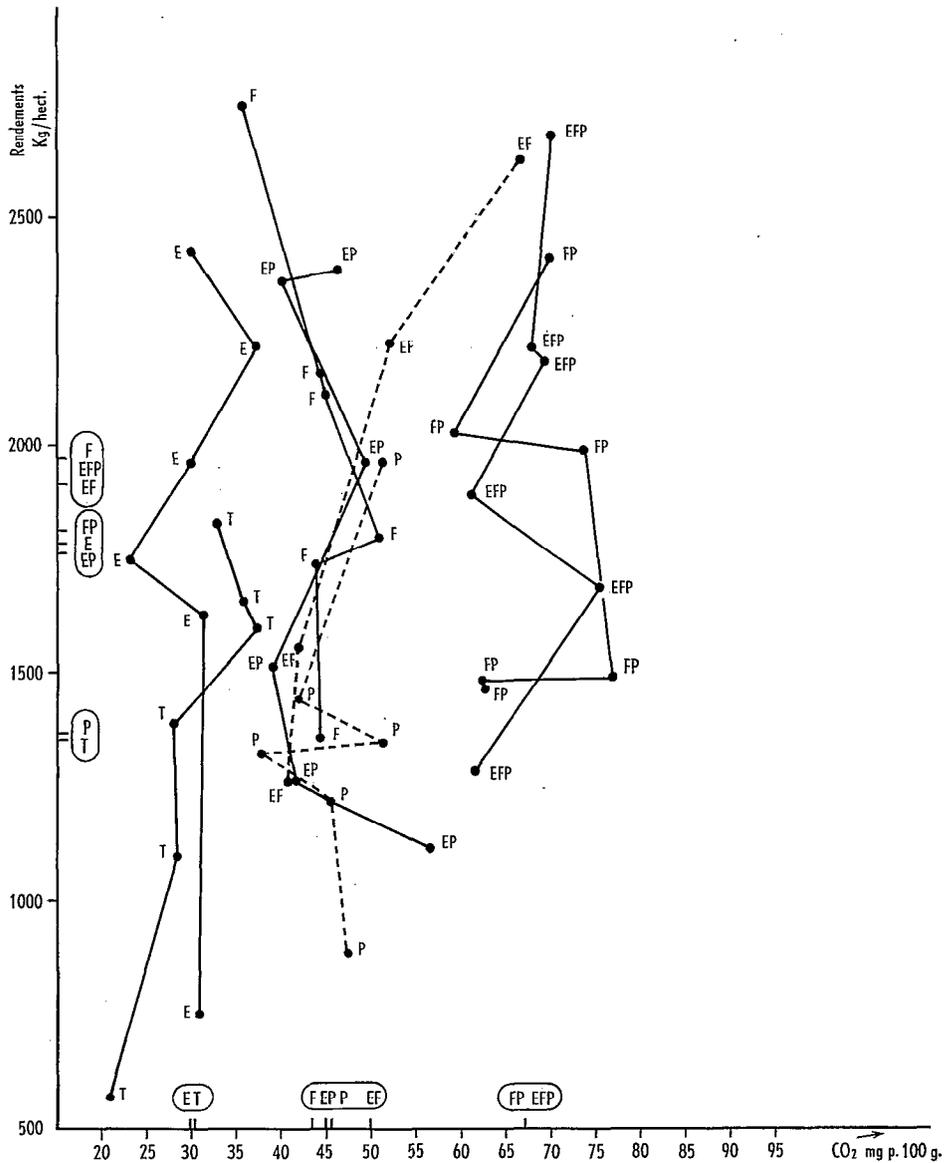


FIG. 53. — Absence de relation entre les rendements en coton et le dégagement de gaz carbonique.

biologique des sols. Le fumier lui-même n'a pas maintenu l'activité biologique des sols, comme aurait pu le faire supposer son action favorable sur les rendements.

Inversement, alors que son action sur les rendements n'a pas été prépondérante, l'apport du fumier + paille a été (avec l'apport engrais minéral + fumier + paille) celui qui a conservé le plus de l'activité biologique naturelle du sol (éch. S) sans toutefois pouvoir la maintenir intacte.

Seul l'apport engrais minéral + fumier + paille (éch. EFP) a été le plus efficace à la fois sur les rendements et le maintien de l'activité biologique.

L'activité biologique d'un sol est en relation avec ses caractéristiques physico-chimiques et celles-ci, à leur tour, contribuent à en déterminer la productivité. Si donc certains apports accroissent les rendements sans maintenir l'activité biologique des sols, on peut prévoir qu'à plus ou moins longue échéance, ces rendements vont baisser. Seuls se maintiennent ou progressent les rendements des sols dont les pratiques agricoles savent conserver la complexité des équilibres biodynamiques, et cela

d'autant plus qu'on a affaire à des cultures exigeant des sols organiques ou des équilibres complexes.

Confirmant ceci, la courbe des rendements en coton pour chaque parcelle (cf. fig. 54) nous montre pour l'année 1961-62 (donc pour l'année suivant celle dont nous venons d'étudier les prélèvements) une baisse continue des rendements dans les parcelles T, E et F, un redressement des rendements dans les parcelles P, EP, EF et FP, et un dépassement des rendements de 1959-60 dans les parcelles EFP.

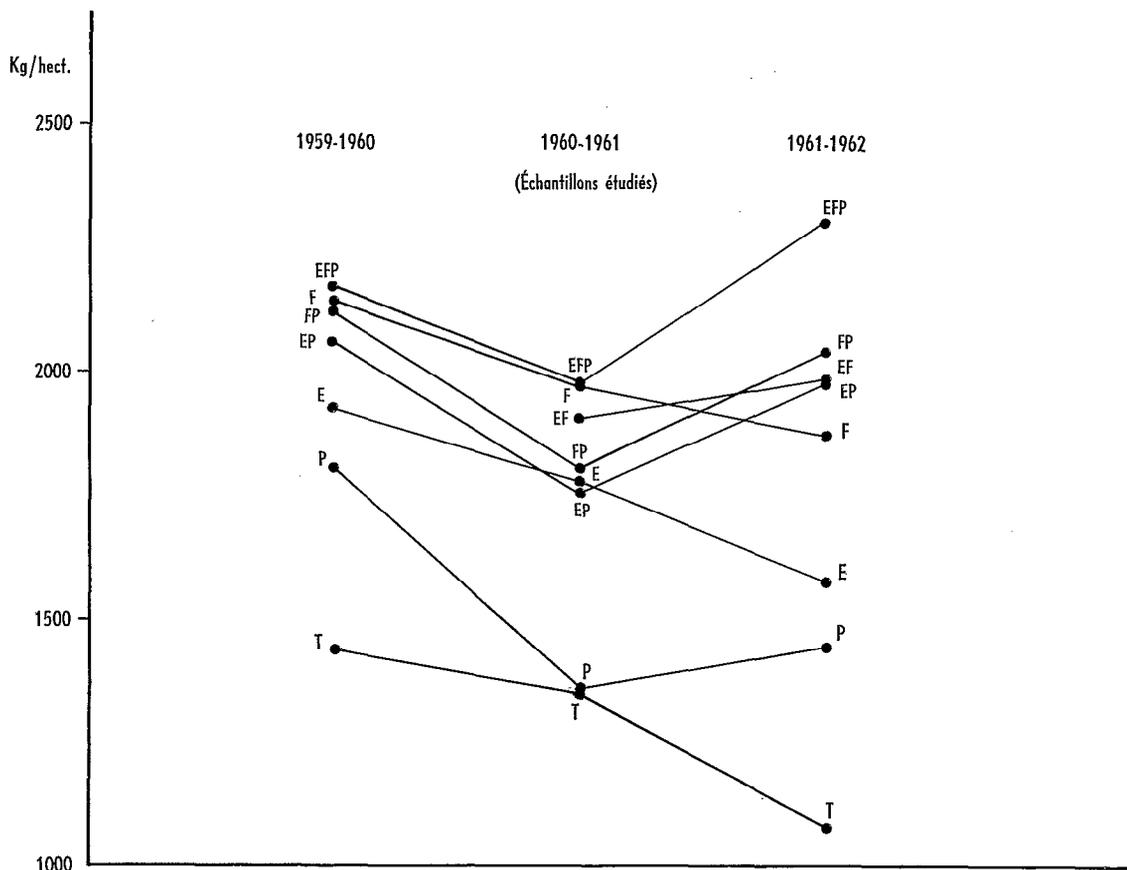


FIG. 54. — Évolution de la moyenne des rendements en coton pour chaque parcelle.

Trop souvent encore, on a tendance à minimiser l'importance des matières organiques et le rôle de la vie dans les sols, en pensant que seul importe pour les plantes de trouver dans les sols un ensemble approprié d'éléments, de l'eau et... « un milieu physique satisfaisant ». Certes, il est des plantes qui se satisfont de milieux très simples et peuvent même être cultivées en culture hydroponique, mais la grande majorité des plantes exige des équilibres pédobiodynamiques complexes (BOULLARD et MOREAU, 1962) ; équilibres dont les diverses caractéristiques ne peuvent se maintenir que si le sol reste « vivant ». La fertilisation minérale doit pour cela être étroitement liée à la fertilisation organique.

## 2. RECHERCHE DES CARENCES MINÉRALES

La mesure de l'absorption d'oxygène en flacon d'eau, telle que nous l'avons exposée au chapitre 1 (§ B-3), nous apparaît plus particulièrement indiquée pour la recherche des carences minérales dans les sols, étant donné ce que nous savons du rôle des éléments minéraux présents dans l'eau sur l'activité des microorganismes.

Nous avons ainsi choisi la terre de l'horizon supérieur d'un sol brun calcaire de France (éch. B) et la terre d'un horizon 5-10 cm d'un sol ferrallitique rouge du Cameroun. Ces deux terres avaient toutes deux été séchées à l'air ; leurs teneurs en acides humiques totaux étaient analogues (5 %), mais les sommes de leurs bases échangeables très différentes (21,5 m.éq. p. 100 g, dont 19,5 de calcium, pour l'échantillon de sol brun calcaire et 2 m.éq. p. 100 g pour l'échantillon de sol ferrallitique).

L'absorption d'oxygène en flacon d'eau a été mesurée sur ces deux échantillons avec trois eaux différentes :

- une eau de canalisation possédant un pH de 7,5 et une résistivité de 2 000 microohms.
- une eau distillée possédant un pH de 5,2 et une résistivité de 60 000 microohms.
- une eau déminéralisée possédant un pH de 5,1 et une résistivité de 300 000 microohms.

Les absorptions d'oxygène pour 3 g de terre au litre, en 7 jours, à 20 °C et avec des eaux de qualité différente (moyenne de 3 mesures exprimée en centièmes de mg) ont été les suivantes :

	Eau de canalisation	Eau distillée	Eau déminéralisée	Eau distillée + 10 ml Wino + 0,2 g CO <sub>3</sub> Ca
Sol brun calcaire .....	222	188	258	184
Sol ferrallitique du Cameroun .....	233	119	176	301

Alors qu'avec l'eau de canalisation, le sol ferrallitique manifeste une activité microbienne égale ou peut-être même un peu supérieure à celle qui se développe dans le sol brun calcaire (ce qui semble a priori anormal), avec l'eau distillée ou l'eau déminéralisée, les résultats sont inversés et le sol ferrallitique apparaît respectivement au moins 1,6 et 1,5 fois moins vivant que le sol brun calcaire.

Le pH des eaux ne semble pas être la cause de cette inversion des valeurs, car les mesures ayant été refaites en ramenant à pH 7 par la soude N/10 les eaux distillées et déminéralisées, les résultats n'en ont pas été modifiés pour cela.

La différence des résultats obtenus avec l'eau de canalisation et l'eau distillée ne peut s'expliquer que par la présence des sels minéraux en solution dans la première de ces eaux. Contrairement à la terre du sol brun calcaire, la terre du sol ferrallitique est très pauvre en bases échangeables (notamment en calcium) et, dans les mesures faites avec l'eau distillée ou déminéralisée, cette déficience en éléments minéraux utilisables doit être un facteur limitant pour le développement des bactéries, celles-ci rencontrant peut-être aussi dans le milieu une pression osmotique trop faible.

D'ailleurs, si les mesures sont refaites en ajoutant aux flacons d'eau distillée 10 ml du milieu de Winogradsky et 0,2 g de carbonate de calcium, on voit que l'absorption d'oxygène ne varie pas pour le sol brun calcaire, mais s'élève aussitôt énormément pour le sol ferrallitique pauvre en bases échangeables.

« Ce ne sont ni les espèces microbiennes, ni leur importance quantitative, mais les possibilités qui leur sont offertes pour se développer qui déterminent en fin de compte l'importance de l'absorption d'oxygène dans les flacons. » Ces possibilités dépendent essentiellement de la richesse de l'échantillon de sol en éléments nutritifs, tant minéraux qu'énergétiques. Si donc un sol est déficient en un ou plusieurs éléments, le développement de la microflore réagira à l'apport de ce ou ces éléments dans l'eau de mesure, et ce d'autant plus que le sol sera plus organique et moins riche en éléments minéraux assimilables. STOTZKY et NORMAN (1961) ont fait ressortir le rôle limitant que pouvaient facilement avoir l'azote, le phosphore et le soufre sur l'activité bactérienne des sols.

Dans un travail assez ancien (BACHELIER, 1960) et portant sur des échantillons 0-10 cm de sols ferrugineux lessivés et sableux de Casamance (Station de la C.G.O.T. à Séfa), il a pu être observé que l'absorption d'oxygène allait pour ces sols dans le même sens que les matières humiques totales, mais

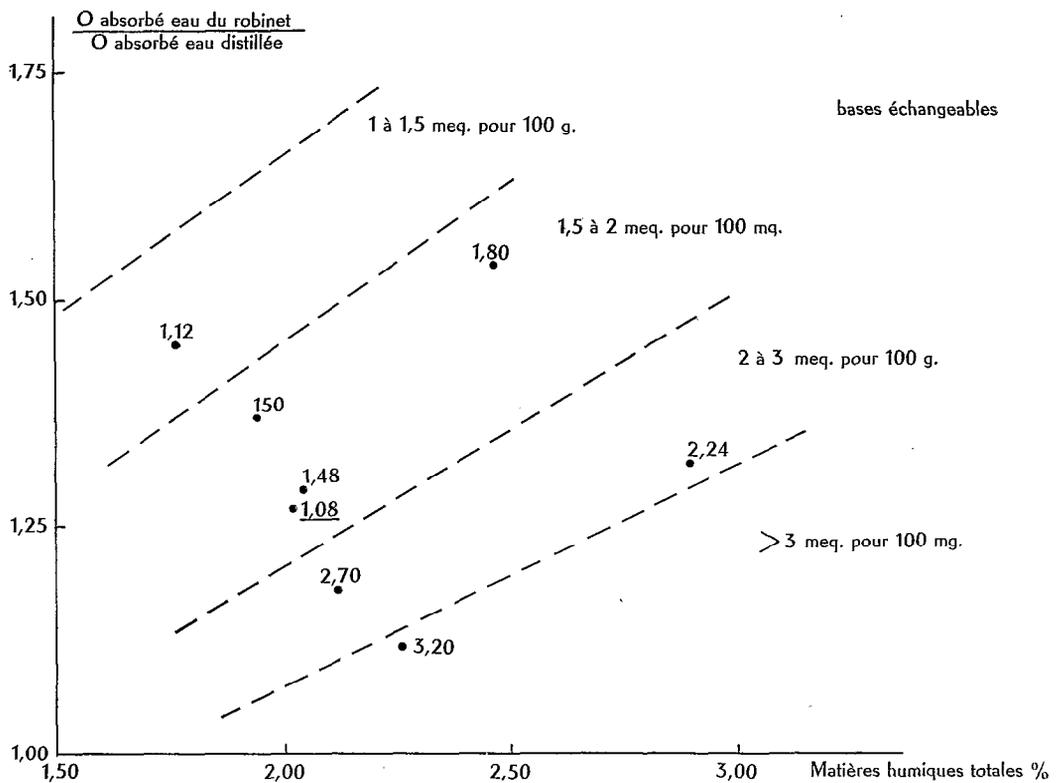


FIG. 55. — Relation entre l'absorption d'oxygène, les matières humiques et les bases échangeables dans des sols de Casamance.

était d'autant plus freinée que leurs teneurs en bases échangeables étaient plus faibles, ainsi que le montrait la différence entre les résultats obtenus avec l'eau de canalisation et ceux obtenus avec l'eau distillée.

En portant sur un graphique en abscisses le rapport « oxygène absorbé avec l'eau de canalisation sur oxygène absorbé avec l'eau distillée » et en ordonnées les matières humiques totales, il peut être en effet observé (cf. fig. 55) que les points obtenus pour ces sols, à une exception près, se superposent obliquement selon leur richesse en bases échangeables.

## Bibliographie

- ALEXANDER (M.), 1965. — Biodegradation : Problems of molecular recalcitrance and microbial fallibility. *Adv. in appl. Microbiol.*, 7, 35-80.
- ALVSAKER (E.) et MICHELSEN (K.), 1957. — Carbo-hydrates in a cold water extract of a pine forest soil. *Acta Chem. Scand.*, II, 3, 1794-1795.
- AUBERT (G.), 1965. — Classification des sols. Tableau des classes, sous-classes, groupes et sous-groupes de sols utilisés par la Section de Pédologie de l'ORSTOM *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, III, 3, 269-288.
- BACHELIER (G.), CURIS (M.) et MARTIN (D.), 1956. — *Étude pédologique de la plaine bananière dans l'Ouest Cameroun. Carte au 1/20 000.* I.R.CAM, Yaoundé, 30 p. multigr.
- BACHELIER (G.), 1957. — Étude pédologique de la zone du volcanisme récent au sud-est de Naoundéré (Cameroun). *Agron. trop.*, 5, 551-575.
- BACHELIER (G.), 1960. — Détermination biologique du pouvoir nutritif d'un sol par développement conditionné des microorganismes et dosage de l'oxygène qu'ils absorbent. *Agron. trop.*, 5, 525-542.
- BACHELIER (G.), 1961. — *Sur l'évolution des matières organiques dans les sols.* ORSTOM-C.S.T. (Paris), 54 p. multigr.
- BACHELIER (G.), 1963a. — Influence du climat sur les processus pédobiologiques de l'humification et de la déshumification. *Pedobiologia*, 2, 2, 153-163.
- BACHELIER (G.), 1963b. — La vie animale dans les sols. *Init. Doc. Tech. ORSTOM*, n° 3, 279 p.
- BACHELIER (G.), 1963c. — Sur le potentiel d'activité biologique de sols ferrallitiques différemment cultivés. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, I, 4, 51-62.
- BACHELIER (G.), 1964. — Observations sur la dynamique d'un sol de type brun calcaire. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, II, 1, 13-28.
- BACHELIER (G.), 1966a. — Les sucres dans le sol et leur dosage global. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, IV, 1, 9-22.
- BACHELIER (G.), 1966b. — Dosage en série du carbone minéralisable (Notice technique). *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, IV, 2, 99-101.
- BACHELIER (G.), 1966c. — Mesure in situ de dégagement de gaz carbonique des sols à l'aide de l'ampoule de Koepf (Notice technique). *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, IV, 2, 93-97.
- BACHELIER (G.) et GAVINELLI (R.), 1966d. — Dosage global des glucides du sol par les méthodes à l'anthrone et à l'orcinoïl (Notice technique). *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, IV, 3, 97-103.
- BACHELIER (G.), 1968. — Problèmes relatifs à l'atmosphère du sol et utilisation possible d'un détecteur de gaz pour la mesure de sa teneur en gaz carbonique. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, VI, 1, 95-104.
- BAUZON (D.), BACHELIER (G.) et ROULLIER (J.), 1967. — Caractéristiques pédologiques et microbiologiques des sols de la station R.C.P. 40 de la forêt de Sénart et du parc de Brunoy. *Rev. Écol. Biol. Sol.*, IV, 4, 533-551.
- BECKMANN (H.) et SCHARPENSEEL (H. W.), 1964. — Kohlensäureentbindung in sterilisierten Böden. *Z. Pfl.-Ernähr. Düng., Bodenkunde*, 105, 2, 102-112.
- BERNARD (Fr.), 1964. — Densité de la Faune au Sahara. Premiers résultats de la méthode des carrés. *Trav. Inst. Rech. Sahariennes*, 23, 1/2, 45-60.
- BERNIER (B.), 1960. — Observations sur le métabolisme respiratoire de quelques humus forestiers. *Contribution*, n° 5, Fond de Rech. For. de l'Univ. Laval, Québec, Canada, 44 p.

- BIRCH (H. F.) et FRIEND (M. T.), 1956. — Humus decomposition in East African soils. *Nature*, Londres, 178, 4531, 500-501.
- BIRCH (H. F.), 1959. — Further observations on humus decomposition and nitrification. *Plant and Soil*, XI, 3, 262-286.
- BOND (R. D.) et HARRIS (J. R.), 1964. — The influence of the microflora on physical properties of soil. 1. Effects associated with filamentous algae and fungi. *Austr. J. Soil Res.*, 2, 111-122.
- BONFILS (P.), 1963. — Évolution de la matière organique dans deux sols du Sénégal. *Agron. trop.*, XVIII, 12, 1254-1279.
- BOULLARD (B.) et MOREAU (R.), 1962. — *Sol, Microflore et Végétation*. Masson éd., Paris, 172 p.
- BOYER (J.), COMBEAU (A.), GRAUBY (A.) et THOMAS (A. M.), 1966. — Évolution des sols sous l'effet d'une irradiation gamma. Commissariat à l'Énergie atomique, *Bull. Inf. sci. techn.*, Dunod éd., Paris, 106, 39-56.
- BRINK (R. H.), DUBACH (Jr. P.) et LYNCH (D. L.), 1960. — Measurement of carbohydrates in soil hydrolyzates with anthrone. *Soil Sci.*, 89, 3, 157-166.
- BROWN (R.), ROBINSON (E.) et JOHNSON (A. W.), 1950. — The effects of D-xyloketase and certain root exudates in extension growth. *Proc. Roy. Soc. (Londres)*, 136, 577-591.
- BRUCKERT (S.) et JACQUIN (F.), 1966. — Relation entre l'évolution des acides hydrosolubles de deux litières forestières et les processus pédogénétiques. *Bull. Écol. Nat. Sup. Agron.*, Nancy, VIII, 11, 95-112.
- BUNT (J. S.) et ROVIRA (A. D.), 1955. — The effect of temperature and heat treatment on soil metabolism. *J. Soil Sci.*, 6, 1, 129-136.
- CARLISLE (A.), 1965. — Carbohydrates in the precipitation beneath a sessile oak *Quercus petraea* (Mattushka) Liebl. canopy. *Plant and Soil*, XXII, 3, 399-400.
- CHEKNOV (Yu. I.), 1965. — Quelques caractéristiques de la population animale de toundras types (en russe). *Zool. Zh.*, 1965, 44, 507-512.
- CHESTERS (G.), ATTOE (O. J.) et ALLEN (O. N.), 1957. — Soil aggregation in relation to various soil constituents. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 21, 3, 272-277.
- CLAPP (C. E.), DAVIS (R. J.) et VAUGAMAN (S. H.), 1962. — The effect of rhizobial polysaccharides on aggregate stability. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 26, 5, 466-469.
- COMBEAU (A.), OLLAT (C.) et QUANTIN (P.), 1961. — Observations sur certaines caractéristiques des sols ferrallitiques. *Fertilité*, juill.-août 1961, 27-40.
- COMBEAU (A.) et QUANTIN (P.), 1963. — Observations sur les variations dans le temps de la stabilité structurale des sols en région tropicale. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, I, 3, 17-26.
- COMBEAU (A.) et QUANTIN (P.), 1964. — Observations sur les relations entre stabilité structurale et matière organique dans quelques sols d'Afrique Centrale. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, II, 1, 3-11.
- CORNFIELD (A. H.), 1961. — A simple technique for determining mineralization of carbon during incubation of soils treated with organic materials. *Plant and Soil*, XIV, 1, 90-93.
- DAVIS (R. J.) et HEALD (W. R.), 1964. — Formation of clay mineral-rhizobial polysaccharide gels and their measurement by torque viscosimetry. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 28, 2, 203-205.
- DELECOUR (F.), 1965. — Détermination des activités biologiques par la méthode Koeff. Standardisation et essai de la technique de dosage de CO<sub>2</sub>. *Note technique du Centre d'Écologie forestière*, Gembloux (Belgique), p. 4.
- DOMMERGUES (Y.), 1960. — La notion de coefficient de minéralisation du carbone dans les sols. Un exemple d'utilisation des techniques biologiques dans la caractérisation des types pédologiques. *Agron. trop.*, 1, 54-60.
- DOMMERGUES (Y.), 1962. — *Contribution à l'étude de la dynamique microbienne des sols en zone semi-aride et en zone tropicale sèche*. Thèse (Fac. Sci., Paris), 23 mai 1962.
- DREYWOOD (R.), 1946. — *Ind. Eng. Chem.* (Anal. ed.), 18, 499.
- DROBNIKOVA (V.) et DROBNIK (J.), 1965. — Soil respiration. *Zbl. Bakt. Par. Inf. u. Hygiene*, 2, 119, 714-729.
- DUCHAUFOUR (Ph.), 1960. — *Précis de Pédologie*. Masson éd., Paris, 438 p.
- DUCHAUFOUR (Ph.) et JACQUIN (F.), 1966. — Nouvelles recherches sur l'extraction et le fractionnement des composés humiques. *Bull. École Nat. Sup. Agron.*, Nancy, 8, 1, 3-24.
- DUCHÉ (J.), 1958. — Sur une nouvelle méthode d'évaluation de l'humus en rapport avec la fertilité des sols. *C.R. Acad. Agric.*, Paris, 44, 667-669.
- EDWARDS (A. P.) et BREMNER (J. M.), 1967. — Microagregates in soils. *J. Soil Sci.*, 18, 64-73.
- ELKAN (G. H.) et MOORE (W. E. C.), 1960. — The effects of temperature, moisture and initial levels of organic matter upon differential microbial counts, CO<sub>2</sub> activity and organic matter decomposition in soil. *J. Elisha Mitchell Sci. Soc.*, 76, 1, 134-140.
- ENWEZOR (W. O.), 1967. — Soil drying and organic matter decomposition. *Plant and Soil*, XXVI, 2, 269-276.

- FIELDER (H. J.), 1957. — Die Beeinflussung physikalischer Bodeneigenschaften durch anorganische und natürliche Bodenstruktur-Verbesserungsmittel. *Wiss. Z. Friedrich-Schiller Univ. math.-naturwiss. Reihe*, 6, 3-4, 187-198.
- GADGIL (P. D.), 1963. — Soil sections of grassland. In : *Soil Organisms*, North Holland Publ. Comp. éd., Amsterdam, 327-332.
- GIBSON (A. H.), 1965. — The carbohydrate requirements for symbiotic nitrogen fixation : a « whole-plant » growth analysis approach. *Aust. J. biol. Sci.*, 19, 499-515.
- GILSON (W. E.), 1963. — Differential respirometer of simplified and improved design. *Science*, N.Y., 141, 3580, 531-532.
- GRAVELAND (D. N.) et LYNCH (D. L.), 1961. — Distribution of uronides and polysaccharides in the profiles of a soil catena. *Soil Sci.*, 91, 3, 162-165.
- GREENLAND (D. J.) et NYE (P. H.), 1959. — Increases in the carbon and nitrogen contents of tropical soils under natural fallows. *J. Soil Sci.*, 10, 2, 284-299.
- GREENLAND (D. J.), LINDSTROM (G. R.) et QUIRK (J. P.), 1961. — Role of polysaccharides in stabilization of natural soil aggregates. *Nature*, Londres, 191, 1283-1284.
- GREENLAND (D. J.), LINDSTROM (G. R.) et QUIRK (J. P.), 1962. — Organic materials which stabilize natural soil aggregates. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 26, 366-371.
- GREENWOOD (D. J.), 1961. — The effect of oxygen concentration on the decomposition of organic materials in soil. *Plant and Soil*, XIV, 4, 360-376.
- GREENWOOD (D. J.) et GOODMAN (D.), 1964. — Effect of shape on oxygen diffusion and aerobic respiration in soil aggregates. *J. Sci. Food. Agric.*, 15, 781-788.
- GUPTA (K. G.) et SEN (A.), 1962. — Aggregation of soil due to growth of *Rhizobium sp.* from some common cultivated legumes. *Soil Sci.*, 94, 5, 345-348.
- GUPTA (U. C.) et SOWDEN (F. J.), 1963. — Occurrence of free sugars in soil organic matter. *Soil Sci.*, 96, 3, 217-218.
- HANOVER (P.), 1964. — Méthodes d'analyses utilisées au Laboratoire des glucides. C.S.T.-Bondy, Publication ORSTOM, Paris.
- HARRIS (R. F.), CHESTERS (G.) et ALLEN (O. N.), 1966. — Dynamics of soil aggregation. *Adv. in Agron.*, 18, 107-169.
- HENIN (S.), 1944. — Influence des phénomènes microbiens sur la formation d'une structure stable. *C.R. Acad. Agric.*, Paris, 14, 373-375.
- HILGER (F.), 1963. — Activité respiratoire de sols équatoriaux. Application de la méthode respirométrique in situ. *Bull. Inst. Agron., Stat. Rech. Gembloux*, XXXI, 2, 154-182.
- HUMFELD (H.), 1930. — A method for measuring carbon dioxide evolution from soil. *Soil Sci.*, 30, 1-11.
- HUTTER (W.), 1966. — Action des compressions sur la structure d'un sol. *Ann. agron.*, 17, 1, 37-52.
- IVARSON (K. C.) et GUPTA (U. C.), 1967. — Effet of freezing on the free sugars in soil. *Can. J. Soil Sci.*, 47, 74-75.
- JAMBU (P.) et NIJS (R.), 1966. — Contribution à l'étude des sols de la partie orientale du Marais Poitevin (Marais mouillé). *Norvois*, Poitiers, 52, 565-593.
- KAUFFMANN (J.) et BOQUEL (G.), 1960. — Influence du thermo et de l'hygroperiodisme sur la formation de l'humus. *C.R. Ac. Sci.*, Paris, 250, 7, 1314-1316.
- KAURICHEV (I. S.), IVANOVA (T. N.) et NOZDRUNOVA (Ye. M.), 1963. — Low-molecular organic acid content of water-soluble organic matter in soils. *Soviet Soil Sci.*, 3, 223-229.
- KEHREN (L.), 1953-1954. — Un appareil pour la mesure en continu de l'absorption d'oxygène. *Revista da Faculdade de Medicina Veterinaria*, 1953-1954, 5, 1, 117-126.
- KENDALL (M. G.), 1962. — *Rank correlation methods*, 3rd edition, London, Griffin, VI, 196 p.
- KHRISTEVA (L. A.) et LUK'YANENKO (N. V.), 1962. — Role of physiologically active substances in the soil-humic acids, bitumens and vitamins B, C, PP, A and D in the life of plants and their replenishment. *Soviet Soil Sci.*, 10, 1137-1141.
- KOEPF (H.), 1952. — Laufende Messung der Bodenatmung im Freiland. *Landw. Forsch.*, 4, 3, 186-194.
- KOEPF (H.), 1953. — Die Verwendung des Ultrarotabsorptionsschreibers (URAS) für die kontinuierliche Registrierung der Bodenatmung im Freiland. *Landw. Forsch.*, 5, 1, 54-62.
- KOEPF (H.), 1954. — Untersuchungen über die biologische Aktivität des Bodens. Teil 1 : Atmungskurven des Bodens und Fermentaktivität unter dem Einfluss von Düngung und Pflanzenwachstum. *Z. Acker- u. Pflanzenbau*, 98, 3, 289-312.
- KRZYSCZ (G.), 1964. — Zur Beeinflussung der Bodenatmung durch langjährige Düngungs- und Bodenbearbeitungsmassnahmen. *Z. Acker- u. Pflanzenbau*, 120, 4, 339-368.

- KRZYSCH (G.), 1965. — Zur Dynamik der Bodenatmung während der Vegetationszeit. *Z. Acker- u. Pflanzenbau*, 122, 2, 108-140.
- KURCHEVA (G. F.), 1964. — Wirbellose Tiere als Faktor der Zersetzung von Waldstreu. *Pedobiologia*, 4, 1/2, 8-30.
- LAPLANTE (A.) et BACHELIER (G.), 1954. — Les principaux sols formés sur roches volcaniques au Cameroun ; observations sur leur fertilité et leur exploitation agricole. *2<sup>e</sup> Congr. Interafr. Sols*, Léopoldville, août 1954, 441-451.
- LAUDELOUT (H.) et MEYER (J.), 1954. — Les cycles d'éléments minéraux et de matière organique en forêt équatoriale congolaise. *5<sup>e</sup> Congr. Int. Sci. Sol*, Léopoldville, 1954, 2, 267-271.
- LEES (H.), 1949. — A simple apparatus for measuring the oxygen uptake of soils. *Plant and Soil*, II, 1, 123-128.
- LUNDEGARDH (H.), 1927. — Carbon dioxide evolution of soil and crop growth. *Soil Sci.*, 23, 417-453.
- MACFADYEN (A.), 1961. — Metabolism of soil invertebrates in relation to soil fertility. *Ann. appl. Biol.*, 49, 215-248.
- MARTIN (G.), 1963. — Dégénération de la structure des sols sous culture mécanisée dans la vallée du Niari. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, I, 2, 8-14.
- MEHTA (N. C.), STREULI (H.) et MULLER (M.) et autres, 1960. — Role of polysaccharides in soil aggregation. *J. Sci. Food Agric.*, 11, 40-47.
- MOLINA (J. S.), 1967. — Colloid production in the aerobic decomposition of cellulose and their action upon the water stability of soil aggregates. *Biol. Sol (Bull. Ass. Int. Sci. Sol)*, 7, 38-41.
- MONNIER (G.), 1956. — *Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols*. Thèse (Fac. des Sci., Paris).
- MORDKOVICH (V. G.) et VOLKOVINTSER (V. V.), 1965. — Population animale riveraine des lacs salés du sud des Républiques de Khakassiya et de Touva (en russe). *Zool. Zh.*, 44, 1747-1760.
- MORRIS (D. L.), 1948. — Quantitative determination of carbohydrates with Dreywood's Anthrone Reagent. *Science*, N.Y., 107, 254-255.
- MOUREAUX (C.), 1959. — Observations microbiologiques sur quelques sols de la région de Morondava. *Mém. IRSM*, IX, D, 201-227.
- NELSON (N.), 1944. — A photometric adaptation of the Somogyi method for the determination of glucose. *J. biol. Chem.*, 153, 375-380.
- NEVO (Z.) et HAGIN (J.), 1966. — Changes occurring in soil samples during air-dry storage. *Soil Sci.*, 102, 3, 157-160.
- NYE (P. H.), 1958. — The relative importance of fallows and soils in storing plant nutrients in Ghana. *J.W. Afr. Sci. Ass.*, 4, 31-49.
- NYE (P. H.) et GREENLAND (D. J.), 1960. — The soil under shifting cultivation. *Techn. Commun.*, n° 51. Commonwealth Bureau of soils, Harpenden, 156 p.
- NYE (P. H.), 1961. — Organic matter and nutrient cycles under moist tropical forest. *Plant and Soil*, XIII, 4, 333-346.
- PARR (J. F.) et NORMAN (A. G.), 1964. — Growth and activity of soil microorganisms in glass micro-beads : 1. Carbon dioxide evolution. *Soil Sci.*, 97, 6, 361-366.
- PERINA (V.) et VINTROVA (A.), 1958. — Influence de la litière sur les horizons humifères des bois de pins sur sables pléistocènes (en russe). *Sborn. cs. Akad. Zemel. Ved. (Lesn)*, 4, 673-688 (*Soils and Fert.*, 1959, XXII, 6).
- POCHON (J.) et BARJAC (H. de), 1958. — *Traité de microbiologie des sols*. Dunod éd., Paris.
- QUANTIN (P.), 1965. — Les sols de la République Centrafricaine. *Mém. ORSTOM*, n° 16, Paris, 113 p.
- QUASTEL (J. II.), 1965. — Soil metabolism. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 16, 217-240.
- RENNIE (D. A.), TRUOG (E.) et ALLEN (O. N.), 1954. — Soil aggregation as influenced by microbial gums, level of fertility and kind of crop. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 18, 4, 399-403.
- ROBERT (M.), 1964. — Étude biologique des sols au cours de l'épreuve d'incubation. II. Glucides libres. *Ann. Inst. Pasteur*, 106, 5, 801-806.
- ROBINSON (J. B. D.), 1957. — The critical relationship between soil moisture content in the region of wilting point and the mineralization of natural soil nitrogen. *J. agric. Sci.*, XLIX, 100-105.
- ROSS (D. J.), 1964. — Effects of low-temperature storage on the oxygen uptake of soil. *Nature*, Londres, 204, 4957, 503-504.
- ROUQUEROL (T.), 1965. — Recherche des glucides libres dans le sol. *Biol. Sol (Bull. de l'Ass. Int. Sci. du Sol)*, 4, 18-20.
- ROVIRA (A. D.) et GREACEN (E. L.), 1957. — The effect of aggregate disruption on the activity of microorganisms in the soil. *Austr. J. agric. Res.*, 8, 6, 659-673.
- RUNKLES (J. R.), SCOTT (A. D.) et NAKAYAMA (F. S.), 1958. — Oxygen sorption by moist soils and vermiculite. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 22, 1, 15-18.
- SAINI (G. R.) et MACLEAN (A. A.), 1966. — Absorption-flocculation reactions of soil polysaccharides with kaolinite. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 30, 6, 697-699.

- SASSON (A.) et DASTE (Ph.), 1963. — Observations nouvelles concernant l'écologie de l'*Azotobacter* dans certains sols arides du Maroc. *C.R. Acad. Sci.*, Paris, gr. 10, 257, 3516-3518.
- SASSON (A.), 1965. — Observations nouvelles sur les relations entre l'*Azotobacter* et la microflore cellulolytique dans le sol. *Rev. Écol. Biol. Sol*, 2, 4, 511-518.
- SCHAEFER (R.), 1964. — Observations sur l'effet de la température d'incubation, en particulier d'un gel répété, sur l'activité de nitrification et sur le dégagement de CO<sub>2</sub> dans des mull calciques d'une chaîne de sols hydromorphes. *Ann. Inst. Pasteur*, 107, 534-549.
- SCHAEFER (R.), 1965. — Aspects du cycle de l'azote dans un mull et un anmoor calciques. *Ann. Inst. Pasteur*, Suppl. au n° 3, 301-315.
- SEIFERT (J.), 1965. — Ecology of soil microbes. *Acta Univ. Carolinae, Biologica*, 3, 245-272.
- SEIFERT (J.) et MRAZKOVA (Z.), 1966. — Effet du séchage du sol sur le nombre de bactéries et la nitrification (en tchèque). *Ust. ved., Inf. MZLH rostl. Vyroba*, 11, 29-34 (*Soils and Fert.*, 1966, 29, 3).
- SHRIKHANDE (J. G.), 1933, 1936. — The production of mucus during the decomposition of plant materials. § 1 et 2 : *The Biochem. J.*, 1933, 27, 1551-1562 et 1563-1574 ; § 3 : *The Biochem. J.*, 1936, 30, 1789-1794.
- SKYRING (G. W.) et THOMPSON (J. P.), 1966. — The availability of organic matter in dried and undried soil, estimated by an anaerobic respiration technique. *Plant and Soil*, XXIV, 2, 289-298.
- SØRENSEN (H.), 1965. — Fixation of metabolic products in the soil during decomposition of carbohydrates. *Nature*, Londres, 208, 5005, 97-98.
- SOULIDES (D. A.) et ALLISON (F. E.), 1961. — Effect of drying and freezing soils on carbon dioxide production, available mineral nutrients, aggregation and bacterial population. *Soil Sci.*, 91, 291-298.
- STOTZKY (G.) et MORTENSEN (J. L.), 1959. — Effect of gamma radiation on growth and metabolism of microorganisms in an organic soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 23, 2, 125-127.
- STOTZKY (G.) et NORMAN (A. G.), 1961. — Factors limiting microbial activities in soil. 1. The level of substrate, nitrogen and phosphorus. 2. The effect of sulfur. *Arch. Mikrobiol.*, 40, 341-369 et 370-382.
- STOTZKY (G.), 1965. — Microbial respiration. In methods of soil analysis, 2<sup>e</sup> partie : Chemical and microbiological properties. *Agronomy*, n° 9, Amer. Soc. Agron., C. A. Black éd., Madison, Wisconsin, 1550-1572.
- STOTZKY (G.), 1966. — Influence of clay minerals on microorganisms. III. Effect of particle size, cation exchange capacity, and surface area on bacteria. *Canad. J. Microbiol.*, 12, 6, 1235-1246.
- SWABY (R. J.) et PASSEY (B. I.), 1953. — A simple macrorespirometer for studies in soil microbiology. *Austr. J. agric. Res.*, 4, 3, 334-339.
- TALUREAU (M.), 1964. — L'aménagement des marais de l'Ouest. *Les grands aménagements régionaux*, n° 4, 38-65 et n° 5, 42-87.
- TAMM (E.), et KRZYSCH (G.), 1963. — Der Einfluss der Bodentemperatur und der Bodenfeuchte auf die CO<sub>2</sub>-Produktion eines lehmigen Sandbodens. *Z. Acker- u. Pflanzenbau*, 117, 4, 359-378.
- TAMM (E.) et KRZYSCH (G.), 1964. — Veränderungen der chemischen und biologischen Bodeneigenschaften im Profil eines lehmigen Sandbodens durch langjährig differenzierte Bodenbearbeitungs- und Düngungsmassnahmen. *Z. Acker- u. Pflanzenbau*, 120, 3, 197-231 et 121, 1, 1-28.
- TAMM (E.) et KRZYSCH (G.), 1965. — Zur Dynamik der Bodenatmung und des CO<sub>2</sub> — Gehaltes der bodennahen Luftschicht während der Vegetationsruhe. *Z. Acker- u. Pflanzenbau*, 122, 3, 209-224.
- TAMM (E.), KRZYSCH (G.) et FUNKE (H.), 1965. — Aufbau und Messtechnik der Pflanzenwetterstation in Berlin-Dahlem. *Z. Acker- u. Pflanzenbau*, 122, 4, 334-358.
- TAMM (E.) et KRZYSCH (G.), 1966. — Zur Intensität des Abbaues organischer Düngerstoffe im Winterhalbjahr. *Z. Acker- u. Pflanzenbau*, 124, 2, 101-111.
- THOMANN (Ch.), 1963. — Quelques observations sur l'extraction de l'humus dans les sols ; méthode au pyrophosphate de sodium. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, I, 3, 43-72.
- THOMANN (Ch.), 1964. — Les différentes fractions humiques de quelques sols tropicaux de l'Ouest africain. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, II, 3, 43-79.
- TIAN (A.) et ROCHE (J.), 1950. — *Chimie* (Collection du P.C.B.). Masson éd., Paris.
- TILLMANS (J.) et PHILIPPI (K.), 1929. — Über den Gehalt der wichtigsten Proteine der Nahrungsmittel und Kohlehydrat und über ein kolorimetrisches Verfahren zur quantitativen Bestimmung von stickstoffreiem Zucker in Eiweiss. *Biochem. Z.*, 215, 36-60.
- TROUGHTON (A.), 1957. — The underground organs of herbage grasses. *Comm. Bur. Past. Field Crops, Bull.* n° 44, 163 p.
- VADYUNINA (A. F.) et KORCHAGINA (Z. A.), 1965. — Carbon dioxide production by semidesert soils. *Soviet Soil Sci.*, (suppl. Doklady), 13, 1574-1579.

- VAN DER DRIFT (J.), 1965. — The effects of animal activity in the litter layer. *Experimental Pedology*. Proc. 11th Easter School agr. Sci., Univ. Nottingham, 1964, 227-235.
- VAN SCHREVEN (D. A.), 1967. — The effect of intermittent drying and wetting of a calcareous soil on carbon and nitrogen mineralization. *Plant and Soil*, XXVI, 1, 14-32.
- VOETS (J. P.) et DEDEKEN (M.), 1965. — Effet d'une irradiation à haute fréquence et d'une irradiation gamma sur la microflore et les enzymes du sol (en flamand). *Meded. Landb-Hogesch.*, OpzoekStns Gent, 30, 2037-2049.
- WALLIS (G. W.) et WILDE (S. A.), 1964. — Rapid method for the determination of carbon dioxide evolved from soils. *Biol. Sol* (Ass. Int. Sci. Sol), 1, p. 17.
- WATSON (J. H.) et STOJANOVIC (B. J.), 1965. — Synthesis and bonding of soil aggregates as affected by microflora and its metabolic products. *Soil Sci.*, 100, 57-62.
- WEBLEY (D. M.), DUFF (R. B.) et BACON (J. S. D.) et autres, 1965. — A study of polysaccharide producing organisms occurring in the root region of certain pasture grasses. *J. Soil Sci.*, 16, 149-157.
- WEINMANN (H.), 1948. — Seasonal growth and changes in chemical composition of the herbage on Marandellas sand veld. *Rhod. agric. J.*, 45, 119-131.
- WIERINGA (K. T.) et MOGOT KERKHOF (M. F.), 1957. — An apparatus for the determination of the respiration process in soil samples. *Plant and Soil*, VIII, 4, 395-396.
- WOLF (J. M.), BROWN (A. H.) et GODDARD (D. R.), 1952. — An improved electrical conductivity method for accurately following changes in the respiratory quotient of a single biological sample. *Plant Physiol.*, 27, 1, 70-80.
- WOODWELL (G. M.) et DYKEMAN (W. R.), 1966. — Respiration of a forest measured by carbon dioxide accumulation during temperature inversions. *Science*, N.Y., 154, 3752, 1031-1034.
- YAMANE (I.), 1961. — Manometric micro-analysis of gaz mixtures evolved from paddy soil, using the Van Slyke apparatus. 2. Collection and analysis of gas mixtures from soil, and a rapid method. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 7, 2, 72-78.
- YURKEVICH (I. D.), SMOLYAK (L. P.) et GARIN (B. E.), 1966. — Content of oxygen in the soil water and of carbon dioxide in the soil air of forest bogs. *Soviet Soil Sci.*, 2, 159-173.
- ZVYAGINTSEV (D. G.), 1966. — Influence of the degree of wetting on the number of microorganisms developping in the soil. *Soviet Soil Sci.* (suppl. Doklady), 13, 1569-1574.

## **Annexes**

# ANNEXE 1

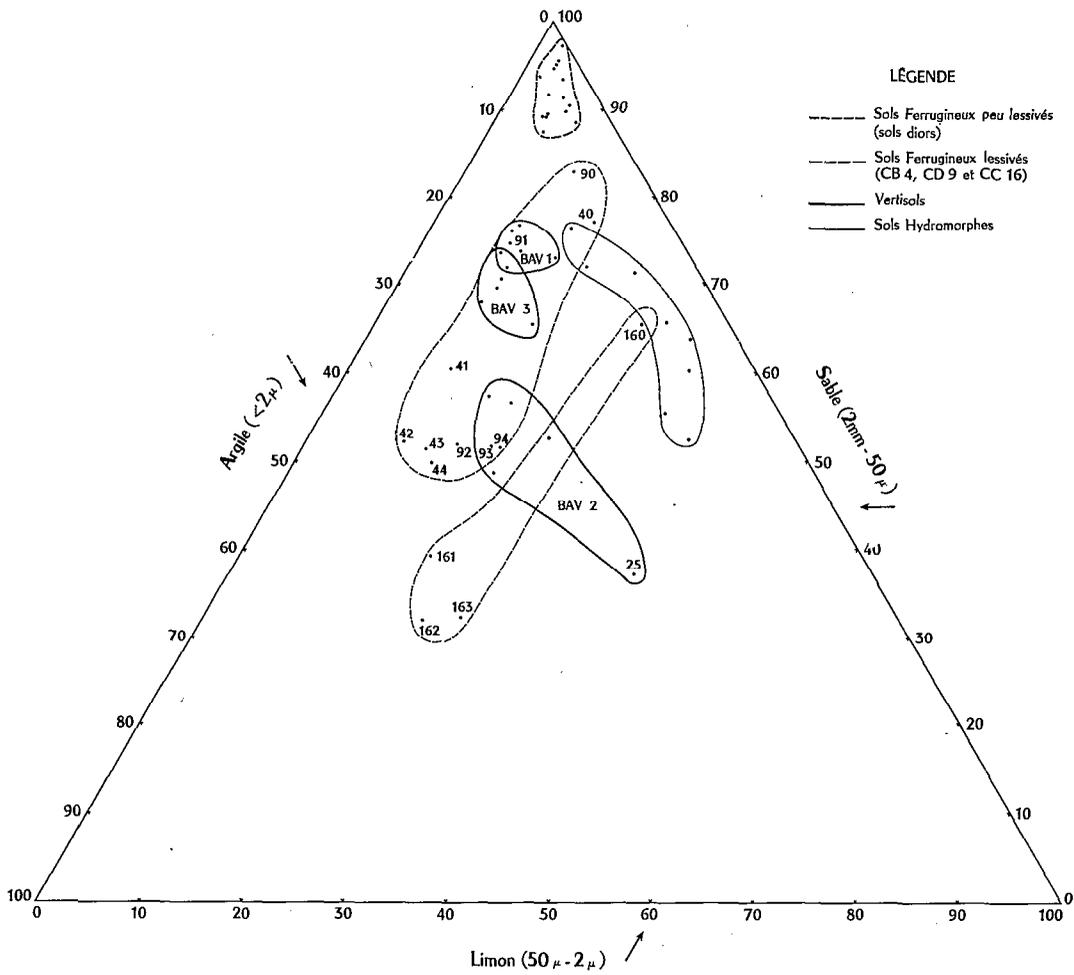


FIG. 56. — Granulométrie de sols du Sénégal (collection HD).

## ANNEXE 2

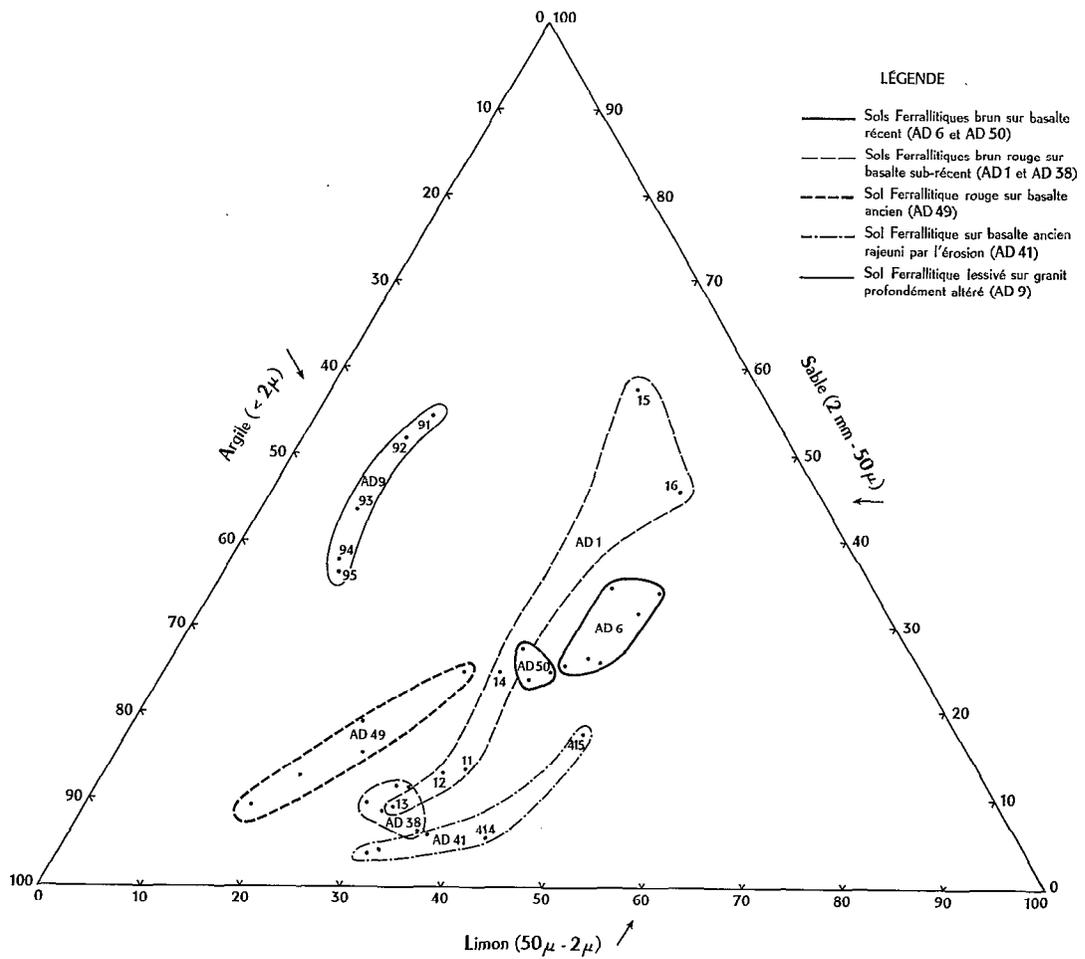


FIG. 57. — Granulométrie de sols de l'Adamaoua (Cameroun) (collection AD 65).

### ANNEXE 3

TABLEAU 16. — Bases échangeables du sol brun calcaire de Bondy et de divers sols du Sénégal.

Sol brun calcaire de Bondy.

m.éq. % g							CaCO <sub>3</sub>
Ca	Mg	K	Na	S	T	S/T	
19,53	1,69	0,28	0,06	21,56	19,5	110	5,64

Sols du Sénégal.

	Bases éch. (m.éq. % g)							CaCO <sub>3</sub>
	Ca	Mg	K	Na	S	T	S/T	
<b>Sol dior :</b>								
BAD 11.....	0,87	0,53	0,07	0,02	1,49	3,51	43	
12.....	0,47	traces	0,05	0,01	0,53	3,16	17	
<b>Vertisol :</b>								
BAV 21.....	25,77	1,57	0,10	0,13	27,57	32,60	85	25,7
22.....	21,87	1,56	0,11	0,09	23,63	23,45	101	
<b>Sol ferrugineux tropical lessivé :</b>								
CD 90.....	1,65	0,94	0,04	0,01	2,64	5,11	52	
91.....	0,87	0,47	0,03	0,01	1,38	5,09	27	
<b>Sol hydromorphe</b>								
CCB 310.....	0,47	0,47	0,06	0,13	1,13	5,83	19	
311.....	0,16	traces	0,02	0,03	0,21	3,42	6	

## ANNEXE 4

### MODE OPÉRATOIRE DÉTAILLÉ POUR LA MESURE DE L'ABSORPTION D'OXYGÈNE EN FLACON D'EAU (Bachelier, 1960, revu et corrigé).

#### Préparation des séries de flacons (flacons de verre d'un litre à bouchon de verre rodé)

La terre ayant été séchée à l'air pendant au moins un mois puis tamisée à 2 mm (ou, si nécessaire, à 1 ou 0,5 mm après broyage), en peser des échantillons de 3 g ou, éventuellement, des poids plus ou moins élevés si les terres sont abiotiques ou, au contraire, très organiques. Mais, pour des poids différents de 3 g, il ne faut pas oublier que les résultats que l'on obtiendra ne pourront être comparés à ceux obtenus avec 3 g que dans des conditions bien définies (cf. chap. 1, § B 3).

A l'aide d'une pompe à aquarium aérer pendant une nuit par barbotage d'air 10 litres d'eau distillée. Ces 10 litres d'eau distillée après repos de cinq minutes, serviront pour une série de dix flacons : huit flacons correspondront à des mesures du pouvoir nutritif et deux à des flacons témoins, ne renfermant que de l'eau distillée. (Un de ces deux flacons témoins peut être de 500 ml au lieu d'un litre, ce qui laisse une marge d'environ 500 ml d'eau toujours nécessaire avec des flacons, qui font souvent un petit peu plus d'un litre et ce qui permet aussi le dosage de l'oxygène dissous dans l'eau distillée au départ ; ce dosage, s'il n'est pas nécessaire pour la mesure du potentiel d'activité microbienne est cependant utile pour juger de l'oxygène absorbé dans les flacons témoins.)

Il est conseillé d'utiliser une eau distillée dont la température ne soit pas trop éloignée de celle à laquelle on va soumettre les flacons, ceci afin d'éviter des phénomènes de dilatation ou de rétraction de l'eau par trop marqués.

Dans des boîtes de Pétri inclinées, laisser imbiber les échantillons de sol sur papier-filtre pendant au moins un quart d'heure.

En s'aidant d'un entonnoir placé sur un support réglable et en opérant au-dessus d'une cuvette plate, transvaser les échantillons imbibés dans les flacons de verre avec un peu de l'eau distillée préalablement préparée, puis finir de remplir les flacons avec cette eau.

Tapoter doucement ces flacons avant de les boucher, au cas où de petites bulles d'air seraient retenues sur leurs parois, les boucher, les luter à la paraffine fondue à l'aide d'un compte-gouttes puis les retourner ensuite deux ou trois fois pour assurer un bon ensemencement et vérifier qu'il n'y ait pas de bulle d'air emprisonnée.

Conservier ensuite ces flacons sept jours à 20° avant d'en doser l'oxygène dissous dans le milieu. Il est généralement inutile de les retourner pendant ce laps de temps.

#### Dosage de l'oxygène dissous dans l'eau des flacons

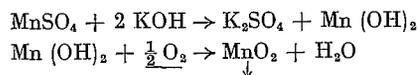
Après ces sept jours de repos, on reprend les flacons, on les retourne pour bien en homogénéiser le milieu et on dose l'oxygène dissous dès que le liquide est redevenu assez limpide.

Dans les laboratoires froids, il est à éviter qu'un refroidissement trop marqué des flacons y détermine une rétraction de l'eau, une pénétration de l'air et un léger apport d'oxygène si les flacons séjournent trop longtemps dans le laboratoire avant d'être dosés.

Pour le dosage, on pose le flacon sur un support, on le débouche et, avec un tuyau en plastique, on le siphonne aussitôt aux trois quarts dans un petit flacon à bouchon de verre rodé d'environ 125 ml de contenance. Il est pratique d'effectuer ce siphonnage au-dessus d'une cuvette plate et inclinée qui recueille les eaux débordant du petit flacon.

Quand environ les trois quarts de l'eau du grand flacon se sont écoulés, on arrête le siphonnage par en bas, on bouche le petit flacon pour en ajuster le volume d'eau, puis on le redébouche pour y introduire au moyen de pipettes plongeant jusqu'au fond : 1 ml d'une solution de sulfate de manganèse (400 g/l) et 1 ml d'une solution d'iodure de potassium (700 g de potasse caustique et 150 g d'iodure de potassium dissous dans 1 l d'eau).

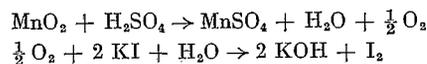
Reboucher sans laisser de bulles d'air et agiter; un précipité se forme aussitôt.



Au bout de dix minutes, déboucher de nouveau le petit flacon et ajouter en son milieu 1 ml d'acide sulfurique au 1/2.

Reboucher après avoir, si nécessaire, prudemment rajouté en surface un peu d'eau distillée afin que le volume du liquide soit suffisant pour qu'il n'y ait pas d'air emprisonné au cours de ce rebouchage.

Agiter et, lorsque tout le précipité formé précédemment s'est redissous, prélever 100 ml du liquide et titrer avec de l'hyposulfite de sodium N/80 jusqu'à disparition de la couleur jaune de l'iode. Déterminer la fin du dosage par addition de 1 ml d'empois d'amidon fraîchement préparé ou mieux une pincée de Thiodène Purkis-Williams, indicateur d'iode particulièrement pratique.



1 ml d'hyposulfite N/80 = 1 mg/l d'oxygène dissous, mais en fait (cf. plus loin le calcul des résultats), une légère correction est à faire car la prise de 100 ml d'eau du petit flacon, par suite des réactifs qui y ont été introduits, ne correspond pas exactement à 100 ml d'eau des grands flacons.

#### RÉACTIFS UTILISÉS

Acide sulfurique au 1/2.

Sulfate de manganèse (400 g/l).

Iodure de potassium (700 g potasse caustique et 150 g iodure de potassium dissous dans 1 l d'eau distillée).

Hyposulfite de sodium N/80 (plus exactement appelée maintenant thiosulfate de sodium).

Thiodène ou, à défaut, empois d'amidon.

#### PRÉPARATION, TITRAGE ET CONSERVATION DES SOLUTIONS D'HYPOSULFITE DE SODIUM

Il est nécessaire de préparer, au départ, 1 l d'acide sulfurique N/10 exact et 1 l d'hyposulfite N/10 approché qui serviront ensuite à préparer des solutions N/80.

Préparation :

Pour préparer 1 l d'hyposulfite de sodium à peu près décimale (N/10), mettre 24,8 g d'hyposulfite de sodium dans une fiole jaugée de 1 l, dissoudre l'hyposulfite dans 500 ml d'une eau distillée de préférence bouillie et refroidie à l'abri de l'air\* puis après dissolution, compléter à 1 l avec cette même eau et verser la solution ainsi préparée dans un flacon teinté.

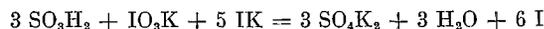
Laisser ensuite la solution se stabiliser une semaine à l'abri de la lumière et à la température du laboratoire, surtout si cette solution a été préparée avec de l'eau distillée ordinaire.

A partir de cette solution d'hyposulfite décimale, on prépare ensuite, au fur et à mesure des besoins, des solutions d'hyposulfite N/80 (125 ml de la solution d'hyposulfite N/10 amenés à 1 000 ml).

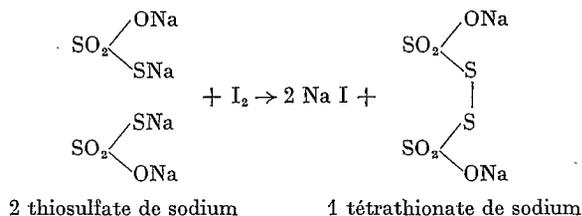
Titrage :

Les solutions d'hyposulfite se titreront au moyen d'un mélange d'iodure et d'iodate de potassium en milieu acide.

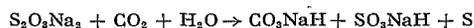
Placer dans un erlenmeyer 10 ml d'une solution aqueuse d'iodure de potassium (20 g/l), 15 ml d'une solution d'iodate de potassium à 2 % et 10 ml d'acide sulfurique titré exactement.



Ce sont ces six atomes d'iode qui réagissent sur l'hyposulfite de sodium, que l'on verse par la burette jusqu'à décoloration de la liqueur, la fin du dosage étant à préciser avec une pincée de thiodène ou 1 ml d'empois d'amidon.



\* Ceci afin de priver l'eau du CO<sub>2</sub> et de l'O<sub>2</sub> qui pourraient y être dissous. Le CO<sub>2</sub> en effet décompose l'hyposulfite de Na en donnant un dépôt de soufre :



La réaction est lente et demande plusieurs jours pour être complète. L'influence de l'O<sub>2</sub> est moins bien déterminée.

A 3  $\text{SO}_4\text{H}_2$  correspondent 6 I et 6 hyposulfites (ou thiosulfates) qui en milieu acide n'agissent que par une valence, d'où un dosage classique selon la forme  $nv = n'v'$  ; à 1 ml de  $\text{SO}_4\text{H}_2$  N/10 correspond 1 ml d'hyposulfite N/10.

Réactifs utilisés :

Iodure de potassium (20 g/l)

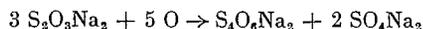
Iodate de potassium à 2 %

Acide sulfurique N/10 ou N/80 titré exactement

Thiodène ou, à défaut, empois d'amidon.

Conservation des solutions :

Les solutions N/10 d'acide sulfurique et d'hyposulfite peuvent se conserver au frais et à l'abri de la lumière mais, pour les solutions N/80, leurs titres peuvent lentement changer avec l'apparition de bactéries dans le milieu ; l'hyposulfite peut ainsi être oxydé par des bactéries en bâtonnets selon la formule :



Aussi avons-nous trouvé pratique de conserver au frigidaire toutes nos solutions titrées quitte à les sortir une heure avant le dosage pour qu'elles aient le temps de se réchauffer. Ceci peut être indispensable outre-mer pour les solutions d'hyposulfite N/80.

#### CALCUL DES RÉSULTATS

Dans le dosage de l'oxygène dissous, nous avons vu qu'à 1 ml d'hyposulfite N/80 correspond théoriquement 1 mg/l d'oxygène dissous, en fait ce n'est pas tout à fait exact.

En effet, en supposant à titre d'exemple que le petit flacon possède juste une capacité de 125 ml une fois bouché, on a dans ces 125 ml après la précipitation de l'oxygène 2 ml de réactifs (1 ml de  $\text{SO}_4\text{Mn}$  et 1 ml de IK) et seulement 123 ml d'eau.

Puis, après adjonction de 1 ml d'acide sulfurique au 1/2 pour redissoudre le précipité, on a 1,98 ml de réactifs, 122,02 ml d'eau et évidemment le centimètre cube d'acide sulfurique au 1/2.

A 125 ml correspondent donc 122,02 ml d'eau,

à 100 ml correspondent 97,61 ml d'eau

et 1 ml d'hyposulfite N/80 correspond en fait à 1,024 mg/l d'oxygène dissous,

ceci pour un petit flacon ayant juste une capacité de 125 ml une fois bouché car le calcul est évidemment différent pour un autre volume.

Par ailleurs, les grands flacons de leur côté possèdent rarement une capacité exacte d'un litre et il est utile, après mesure de leur capacité de leur adjoindre une étiquette en portant indication.

Les résultats obtenus seront à multiplier par la capacité exacte des flacons divisée par 1 000.

Cette correction n'est évidemment pas à faire pour les témoins d'eau distillée car, dans ceux-ci, il s'agit d'une absorption d'oxygène proportionnelle au volume d'eau et non d'une absorption d'oxygène par un poids de terre bien défini.

Il faudrait encore tenir compte du volume de l'échantillon de terre, mais pour 3 g il ne dépasse pas 1  $\text{cm}^3$  et cette correction peut être négligée.

# Table des matières

INTRODUCTION . . . . .	7
------------------------	---

## Chapitre 1 : SOLS ET TECHNIQUES UTILISÉS

A. SOLS ET COLLECTIONS DE SOLS UTILISÉS . . . . .	9
B. TECHNIQUES DE LABORATOIRE UTILISÉES . . . . .	12
1. Évaluation du potentiel d'activité biologique d'un sol par mesure de son dégagement de gaz carbonique en récipient fermé . . . . .	12
2. Adaptation d'un système manométrique et électrique pour mesure simultanée de la consommation d'oxygène, évaluation du quotient respiratoire et étude de son évolution dans le temps . . . . .	13
3. Absorption d'oxygène en flacon d'eau . . . . .	18
4. Dosage chimique du carbone, des glucides et de l'azote solubles . . . . .	19
4a. Extraction des composés solubles . . . . .	19
4b. Dosage par manganimétrie du carbone réducteur soluble . . . . .	20
4c. Dosage des glucides solubles . . . . .	20
<i>Examen des techniques</i> . . . . .	20
<i>Méthode colorimétrique à l'anthrone</i> . . . . .	21
<i>Méthode colorimétrique à l'orcinol</i> . . . . .	22
4d. Dosage de l'azote soluble . . . . .	22
5. Autres techniques . . . . .	23
C. TECHNIQUES DE TERRAIN UTILISÉES . . . . .	23
1. Mesure in situ du dégagement de gaz carbonique des sols à l'aide de l'ampoule de Koepf . . . . .	23
1a. Diversité des techniques de mesure in situ du dégagement de gaz carbonique des sols . . . . .	23
1b. Mesure à l'aide de l'ampoule de Koepf . . . . .	24
2. Mesure du CO <sub>2</sub> dans l'atmosphère des sols . . . . .	26
D. EXPRESSION DES RÉSULTATS . . . . .	27

## Chapitre 2 : MINÉRALISATION DU CARBONE DES SOLS

A. FACTEURS INFLUENÇANT LA MINÉRALISATION DU CARBONE . . . . .	31
1. Facteurs climatiques . . . . .	31
1a. Humidité et pF (cf. aussi § B) . . . . .	31
1b. Température . . . . .	33

2. Facteurs pédologiques . . . . .	40
2a. Surface des agrégats ; effet de broyage et structure . . . . .	40
2b. Stabilité structurale . . . . .	42
2c. Teneur en carbonates . . . . .	46
2d. Teneur en sels . . . . .	47
2e. Nature des argiles . . . . .	50
3. Facteurs expérimentaux . . . . .	50
3a. Radiations . . . . .	50
3b. Substances stimulantes . . . . .	53
B. MINÉRALISATION CONTINUE DU CARBONE. INFLUENCE DU TRAITEMENT DE L'ÉCHANTILLON. EFFET DE SÉCHERESSE . . . . .	54
C. CONCLUSIONS GÉNÉRALES DU CHAPITRE . . . . .	60

*Chapitre 3 : NATURE DU CARBONE IMMÉDIATEMENT MINÉRALISABLE  
ET INTRODUCTION A LA DYNAMIQUE DE LA MINÉRALISATION DU CARBONE*

A. QUOTIENT RESPIRATOIRE ET ÉVOLUTION DU QUOTIENT RESPIRATOIRE DES SOLS MIS EN INCUBATION. AUTRE RAPPORT DE MÊME NATURE . . . . .	63
B. CARBONE SOLUBLE ET GLUCIDES LIBRES . . . . .	68
1. Importance des glucides libres en tant que source énergétique dans le sol . . . . .	68
2. Action des glucides sur la structure des sols . . . . .	70
3. Substances humiques et sucres libres de divers sols . . . . .	71
C. QUOTIENTS DE MINÉRALISATION DU CARBONE TOTAL, DU CARBONE SOLUBLE ET DU CARBONE DES GLUCIDES LIBRES . . . . .	74
1. Représentation graphique des quotients de minéralisation . . . . .	74
2. Analyse de résultats. Dynamique de la minéralisation du carbone de divers sols en laboratoire . . . . .	77
3. Remarques sur l'interprétation des résultats . . . . .	86
D. AZOTE SOLUBLE, RAPPORT AVEC LE CARBONE SOLUBLE . . . . .	88
E. ACIDES HUMIQUES ET ACIDES FULVIQUES . . . . .	91
1. Nature et dynamique . . . . .	91
2. Circuit humique dans un sol brun calcaire tempéré et un sol ferrallitique équatorial . . . . .	92
3. Influence du climat sur le circuit humique . . . . .	92
4. Influence de la richesse minérale et du pH sur le circuit humique . . . . .	93
F. FAUNE, MICROFLORE ET MINÉRALISATION DU CARBONE . . . . .	94
G. CONCLUSIONS GÉNÉRALES DU CHAPITRE . . . . .	95

*Chapitre 4 : VARIATIONS SAISONNIÈRES DU CARBONE  
IMMÉDIATEMENT MINÉRALISABLE ET DÉGAGEMENT IN SITU DE CO<sub>2</sub>*

A. OBSERVATIONS SUR LES VARIATIONS SAISONNIÈRES DE LA DYNAMIQUE DE LA MINÉRALISATION DU CARBONE DANS UN SOL BRUN CALCAIRE . . . . .	99
1. Dispositif expérimental . . . . .	99
2. Résultats . . . . .	100
B. OBSERVATIONS SUR LES VARIATIONS SAISONNIÈRES DE LA DYNAMIQUE DE LA MINÉRALISATION DU CARBONE DANS UN SOL FERRALLITIQUE . . . . .	105

<b>TABLE DES MATIÈRES</b>	<b>145</b>
<b>C. OBSERVATIONS SUR LES VARIATIONS SAISONNIÈRES DE LA DYNAMIQUE DE LA MINÉRALISATION DU CARBONE DANS UN SOL PODZOLIQUE A PSEUDOGLEY . . . . .</b>	<b>108</b>
1. Étude pédologique du profil . . . . .	108
2. Résultats . . . . .	109
<b>D. MINÉRALISATION ANNUELLE DU CARBONE . . . . .</b>	<b>114</b>
<b>E. L'ATMOSPHÈRE DU SOL . . . . .</b>	<b>116</b>
<b>F. CONCLUSIONS GÉNÉRALES DU CHAPITRE . . . . .</b>	<b>118</b>

*Chapitre 5 : CONCLUSIONS ET EXEMPLES D'APPLICATIONS PRATIQUES*

<b>A. INTÉRÊT DE L'ÉTUDE DE LA MINÉRALISATION DU CARBONE DANS LES SOLS . . . . .</b>	<b>119</b>
<b>B. PRINCIPAUX RÉSULTATS ACQUIS . . . . .</b>	<b>119</b>
1. Sur le plan scientifique . . . . .	119
2. Sur le plan méthodologique . . . . .	122
<b>C. EXEMPLES D'APPLICATIONS PRATIQUES . . . . .</b>	<b>123</b>
1. Influence des pratiques agricoles. Santé et productivité du sol . . . . .	123
2. Recherche des carences minérales . . . . .	126
<b>BIBLIOGRAPHIE . . . . .</b>	<b>129</b>

**ANNEXES**

1. Granulométrie de sols du Sénégal . . . . .	137
2. Granulométrie de sols de l'Adamaoua . . . . .	138
3. Bases échangeables de divers sols . . . . .	139
4. Mode opératoire détaillé pour la mesure de l'absorption en flacon d'eau . . . . .	140

ACHEVÉ D'IMPRIMER SUR LES  
PRESSES DE L'IMPRIMERIE  
DARANTIERE A DIJON, LE  
VINGT-CINQ OCTOBRE MCMLXVIII

**IV. MÉMOIRES O.R.S.T.O.M.**  
(format rogné : 21 x 27, couverture grise)

N <sup>os</sup>		
1.	KOECHLIN (J.). — 1961 — <i>La végétation des savanes dans le sud de la République du Congo-Brazzaville.</i> 310 p. + carte 1/1 000 000 (noir) . . . . .	45 F
2.	PIAS (J.). — 1963 — <i>Les sols du Moyen et Bas Logone, du Bas-Chari, des régions riveraines du Lac Tchad et du Bahr-el-Ghazal.</i> 438 p. + 15 cartes 1/1 000 000, 1/200 000 et 1/100 000 (couleur) . . . . .	200 F
3 x.	LÉVÊQUE (A.). — 1962 — <i>Mémoire explicatif de la carte des sols de Terres Basses de Guyane française.</i> 88 p. + carte 1/100 000, 2 coupures (couleur) . . . . .	65 F
3 xx.	HIEZ (G.), DUBREUIL (P.). — 1964 — <i>Les régimes hydrologiques en Guyane française.</i> 120 p. + carte 1/1 000 000 (noir) . . . . .	70 F
3 xxx.	HURAUULT (J.). — 1965 — <i>La vie matérielle des Noirs réfugiés Boni et des Indiens Wayana du Haut-Maroni (Guyane française). Agriculture, Économie et Habitat.</i> 142 p. . . . .	65 F
3 xxxx.	LÉVÊQUE (A.). — 1967 — <i>Les sols ferrallitiques de Guyane française</i> . . . . .	50 F
3 xxxxx.	HURAUULT (J.). — 1968 — <i>Les Indiens Wayana de la Guyane française — Structure sociale et coutume familiale.</i> 168 p. . . . .	80 F
4.	BLACHE (J.), MITON (F.). — 1963 — Tome I. <i>Première contribution à la connaissance de la pêche dans le bassin hydrographique Logone-Chari-Lac Tchad.</i> 144 p. . . . .	
	BLACHE (J.). — 1964 — Tome II. <i>Les poissons du bassin du Tchad et du bassin adjacent du Mayo Kebbi. Étude systématique et biologique.</i> 485 p., 147 pl. Les deux volumes (1) . . . . .	75 F
5.	COUTY (Ph.). — 1964 — <i>Le commerce du poisson dans le Nord-Cameroun.</i> 225 p. . . . .	63 F
6.	RODIER (J.). — 1964 — <i>Régimes hydrologiques de l'Afrique Noire à l'ouest du Congo.</i> 18 x 27, 137 p. (1)	55 F
7.	ADJANOHOULIN (E.). — 1964 — <i>Végétation des savanes et des rochers découverts en Côte d'Ivoire centrale.</i> 250 p. . . . .	90 F
8.	CABOT (J.). — 1965 — <i>Le bassin du Moyen Logone.</i> 327 p. . . . .	100 F
9.	MOURARET (M.). — 1965 — <i>Contribution à l'étude de l'activité des enzymes du sol : L'asparaginase.</i> 112 p. . . . .	50 F
10.	AUBRAT (J.). — 1966 — <i>Ondes T dans la mer des Antilles.</i> 192 p. . . . .	60 F
11.	GUILCHER (A.), BERTHOIS (L.), LE CALVEZ (Y.), BATTISTINI (R.), CROSNIER (A.). — 1965 — <i>Les récifs coralliens et le lagon de l'île Mayotte (Archipel des Comores, Océan Indien).</i> 211 p. . . . .	100 F
12.	VEYRET (Y.). — 1965 — <i>Embryogénie comparée et blastogénie chez les Orchidaceae-Monandreae.</i> 106 p. . . . .	60 F
13.	DELVIGNE (J.). — 1965 — <i>Pédogenèse en zone tropicale. La formation des minéraux secondaires en milieu ferrallitique.</i> 178 p. (2) . . . . .	55 F
14.	DOUCET (J.). — 1965 — <i>Contribution à l'étude anatomique, histologique et histochimique des Pentastomes (Pentastomida).</i> 150 p. . . . .	60 F
15.	STAUCH (A.). — 1966 — <i>Le bassin camerounais de la Bénoué et sa pêche.</i> VIII-152 p. . . . .	56 F
16.	QUANTIN (P.). — 1965 — <i>Les sols de la République Centrafricaine.</i> 114 p. . . . .	30 F
17.	LE BERRE (R.). — 1966 — <i>Contribution à l'étude biologique et écologique de Simulium damnosum Théobald, 1903 (diptera, simuliidae).</i> 206 p. . . . .	50 F
18.	DEBRAY (M. M.). — 1966 — <i>Contribution à l'étude du genre Epinetrum (Ménispermacées) de Côte d'Ivoire.</i> 76 p. . . . .	25 F
19.	MARTIN (D.). — 1966 — <i>Études pédologiques dans le Centre Cameroun, Nanga-Eboko à Bertoua.</i> XLVI-92 p. + carte pédologique 1/50 000, 1/20 000 et 1/5 000, 11 coupures (couleur) + 2 cartes 1/400 000 + carte pédologique 1/200 000 (couleur) (3).	
20.	GUILLAUMET (J. L.). — 1967 — <i>Recherches sur la végétation et la flore de la région du Bas-Cavally, Côte d'Ivoire.</i> 266 p. . . . .	60 F
21.	ROBINEAU (C.). — 1967 — <i>Société et économie d'Anjouan (Océan Indien).</i> 274 p. . . . .	80 F
22.	HALLÉ (F.). — 1967 — <i>Étude biologique et morphologique de la tribu des Gardénieés (Rubiaceés).</i> 160 p. . . . .	60 F

23.	COUTY (Ph.). — 1968 — <i>Le commerce du poisson au Tchad.</i> 252 p. . . . .	70 F
24.	HERVIEU (J.). — 1968 — <i>Contribution à l'étude de l'alluvionnement en milieu tropical.</i> 466 p. . . . .	110 F
	ROSSIGNOL (M.). — <i>Le thon à nageoires jaunes de l'Atlantique</i> . . . . .	s. presse
	VENNETIER (P.). — <i>Pointe-Noire et la façade maritime du Congo-Brazzaville</i> . . . . .	s. presse
	VERIN (P.). — <i>L'ancienne civilisation de Rurutu (Iles australes — Polynésie française) — La période classique</i> . . . . .	s. presse
	BERTHOIS (L.), HOORELBECK (J.). — <i>Étude dynamique de la sédimentation dans trois cours d'eau de la Guyane française : la rivière Mahury, la rivière de Cayenne et le fleuve Maroni.</i> . . . . .	s. presse
	GIRARD (G.), HERBAUD (J.), DUBREUIL (P.). — <i>Monographie hydrologique du bassin du Jaguaribe.</i> . . . . .	s. presse
	MOREL (G.). — <i>Contribution à l'étude de la synécologie des oiseaux du Sahel sénégalais.</i> . . . . .	s. presse
	BACHELIER (G.). — <i>Contribution à l'étude de la minéralisation du carbone.</i> . . . . .	s. presse
	SOURNIA (A.). — <i>Diatomées planctoniques du Canal de Mozambique et de l'île Maurice.</i> . . . . .	s. presse

**V. INITIATIONS/DOCUMENTATIONS TECHNIQUES**

(format rogné : 21 x 27, couverture verte)

Hors Série.

—	HOUPEAU (J. L.), LHOSTE (J.). — 1961 — <i>Inventaire des appareils français pour l'épandage des pesticides.</i> 530 p. multigr. Les cinq volumes. . . . .	40 F
---	---	------

N <sup>os</sup>		
1.	BASCOULERGUE (P.). — 1962 — <i>Notions d'hygiène alimentaire adaptées au Sud-Cameroun.</i> 31 p. . . . .	6 F
2.	BASCOULERGUE (P.). — 1963 — <i>Notions d'hygiène alimentaire adaptées au Nord-Cameroun.</i> 44 p. . . . .	6 F
3.	BACHELIER (G.). — 1963 — <i>La vie animale dans les sols.</i> 18 + 26, 280 p. . . . .	16 F
4.	SÉGALIN (P.). — 1964 — <i>Le fer dans les sols.</i> 150 p. (1).	21 F
5.	RUELLAN (A.), DELETANG (J.). — 1967 — <i>Les phénomènes d'échange de cations et d'anions dans les sols.</i> 124 p. . . . .	30 F
6.	ROTH (M.). — 1968 — <i>Initiation à la systématique et à la biologie des Insectes.</i> 189 p. . . . .	20 F
7.	CROSNIER (A.). — 1968 — <i>Les crevettes commerciales de la côte ouest de l'Afrique intertropicale.</i> 70 p. . . . .	25 F
8.	DIDIER DE SAINT-AMAND (J.), DEJARDIN (J.). — 1968 — <i>Méthodes de fractionnement des constituants phosphorés végétaux et de correction des résultats de dosage.</i> 43 p. . . . .	13 F

**VI. L'HOMME D'OUTRE-MER**  
(volume broché : 13 x 22) (4)

1.	DESCHAMPS (H.). — 1959 — <i>Les migrations intérieures à Madagascar.</i> 284 p. . . . .	19,50 F
2.	BOUTILLIER (J. L.). — 1960 — <i>Bongouanou, Côte d'Ivoire.</i> 224 p. (épuisé).	
3.	CONDOMINAS (G.). — 1960 — <i>Fokon'olona et collectivités rurales en Imerina.</i> 236 p. (épuisé).	
4.	TARDITS (C.). — 1960 — <i>Les Bamiléké de l'Ouest-Cameroun.</i> 136 p. (épuisé).	
5.	LE ROUVREUR (J.). — 1962 — <i>Sahariens et Sahéliens du Tchad.</i> 468 p. . . . .	60 F
6.	DESCHAMPS (H.). — 1962 — <i>Traditions orales et archives au Gabon.</i> 176 p. (épuisé).	
7.	OTTINO (P.). — 1963 — <i>Les économies paysannes malgaches du Bas-Mangoky.</i> 376 p. . . . .	65 F
8.	KOUASSIGAN (G. A.). — 1966 — <i>L'homme et la terre. Droits fonciers coutumiers et droit de propriété en Afrique occidentale.</i> 284 p. . . . .	30 F
	FROELICH (J. C.). — <i>Les montagnards paléonigritiques.</i> s. presse	

**VII. OUVRAGES HORS COLLECTION OU EN DÉPOT**

—	ROCHE (M.). — 1963 — <i>Hydrologie de surface.</i> 18 x 27, 432 p. (1) . . . . .	75 F
---	--	------

**VIII. CARTES THÉMATIQUES**

Cartes imprimées en couleurs ou en noir, avec ou sans notice, à petites, moyennes et grandes échelles, concernant :

— l'Afrique du Nord, l'Afrique de l'ouest, l'Afrique centrale et équatoriale, Madagascar, la Nouvelle-Calédonie, Saint-Pierre-et-Miquelon, la Guyane française...

dans l'une ou plusieurs des matières suivantes :

— Géophysique. — Géologie. — Hydrologie. — Pédologie et utilisation des terres. — Botanique. — Entomologie médicale. — Sciences humaines.

(1) En vente chez Gauthier-Villars, 55, quai des Grands-Augustins, Paris VI<sup>e</sup>.

(2) En vente chez Dunod, 92, rue Bonaparte, Paris VI<sup>e</sup>.

(3) Ce volume ne peut être obtenu que par des organismes scientifiques ou des chercheurs contre paiement des frais d'expédition.

(4) En vente chez Berger-Levrault, 5, rue Auguste-Comte, Paris VI<sup>e</sup>.

O. R. S. T. O. M.

*Direction Générale :*

24, rue Bayard, PARIS-8<sup>e</sup>

*Service Central de Documentation :*

70-74, route d'Aulnay, 93 - BONDY