

Redo

FIXATION DE GAZ CARBONIQUE PAR LE SOL

par

Cl. MOUREAUX

La fixation du gaz carbonique de l'atmosphère par la microflore autotrophe du sol est un processus bien connu du pédobiologiste.

C'est le fait de plusieurs groupes de germes. Les algues bleues et vertes, bien représentées sur les Hauts-Plateaux malgaches, dans les rizières, et parfois sur les sols de collines, en saison des pluies, réalisent cette fixation de la même manière que les plantes vertes, grâce à la chlorophylle qu'elles contiennent. Parmi les bactéries, il faut citer le groupe autotrophe, de première importance pour la fertilité des sols, les nitrificateurs qui oxydent l'ammoniaque résultant de l'ammonification des résidus végétaux et animaux retournant au sol, à l'état de nitrates éminemment absorbables par les plantes.

La réaction exothermique de l'oxydation permet à ces germes d'utiliser le gaz carbonique atmosphérique.

Un certain nombre d'autres germes autotrophes sont aussi capables d'utiliser le gaz carbonique de l'atmosphère comme les bactéries du fer, les bactéries oxydant le méthane et l'hydrogène, le groupe des bactéries du soufre.

A ces germes dits chimio-synthétiques, il faut ajouter quelques bactéries photosynthétiques qui, comme les plantes, utilisent l'énergie de la lumière pour réduire le gaz carbonique en glucides. Un comportement hétérotrophe est généralement possible à l'obscurité. Les pigments de ces bactéries diffèrent d'ailleurs sensiblement de la chlorophylle des végétaux.

Cependant, les algues mises à part, ces microorganismes autotrophes paraissent jouer un rôle insignifiant dans l'augmentation du stock carboné du sol à partir du carbone atmosphérique.

En effet, les hétérotrophes représentent l'immense majorité de la microflore du sol. Sur un nombre total de germes pouvant dépasser un milliard par gramme de sol fertile, on ne dénombre qu'exceptionnellement plus de 5.000 bactéries de la nitrification, groupe pourtant le mieux représenté dans un sol de culture bien drainé.

Le calcul montre qu'à raison d'une molécule de CO_2 réduite par ces dernières bactéries, lors de l'oxydation de 30 atomes d'azote, proportion trouvée par WINOGRADSKY, la concentration en azote nitrique serait

O. R. S. T. O. M.

Collection de Référence

n° 12522

75 NOV. 1968

portée à 4,77 ‰ (exprimée en N) dans 20 g de sol pour seulement 10 mg de CO₂ puisé dans l'atmosphère. Or une telle concentration en nitrates est très loin d'être jamais atteinte.

Les concentrations en nitrates déterminées lors des mesures du pouvoir nitrificateur des sols, en étuve, à l'obscurité, pendant 4 semaines, n'accusent que rarement des valeurs supérieures à 50 mg N-NO₃ par kg de sol, ce qui n'amènerait, par la fixation de 0,105 mg de CO₂ pour 20 g de sol, qu'un accroissement insignifiant de carbone dans le sol, de 1,43 mg par kg !

Quant aux algues, elles ne peuvent travailler efficacement que dans des sols très particuliers comme les rizières, ou temporairement sur les sols latéritiques imperméables des collines lorsque les averses y occasionnent de petites collections d'eau. Or nous avons observé, à Tsimbazaza, au cours d'essais sur la respiration des sols, une absorption notable du gaz carbonique dans le sol à l'obscurité, bien supérieure à l'utilisation qui aurait pu avoir lieu par l'action des germes de la nitrification.

Une série d'erlenmeyers de 100 cm³, contenant 20 g de sol humidifié à 25 %, ont été bouchés hermétiquement et mis en étuve obscure à 30°. L'échantillon représentait l'horizon humifère d'un sol latéritique rouge (T15) sur roche cristalline acide, sous prairie dense (aux environs de Tananarive). Dans l'atmosphère au contact du sol, on a dosé après des temps variables, la quantité de CO₂ en utilisant, pour chaque mesure, un échantillon qui était ensuite éliminé. Le gaz carbonique avait été balayé avant l'incubation par une circulation d'air ayant barboté dans une solution de soude.

Les chiffres suivants ont été obtenus lors des dosages du CO₂ après un nombre variable de jours pendant lesquels le sol était resté en atmosphère confinée (technique de mesure décrite dans une précédente note : 1) :

Durée de l'incubation en jours	mgCO ₂
1	7,92 (*)
2	10,12
3	11,21
4	16,13
5	19,44
6	14,38
8	11,90
12	10,81
15	9,37
20	10,78
29	14,74
40	13,60
49	25,43

(*) Chiffres affectés d'une erreur type de 0,22 mg.

La diminution périodique de la concentration en gaz carbonique dans l'atmosphère closé au contact du sol demeurerait peu compréhensible sans la découverte relativement récente de l'utilisation du CO₂ par les germes hétérotrophes.

Dès avant 1930, plusieurs chercheurs avaient observé que le gaz carbonique était indispensable, à faible dose, pour la croissance et le métabolisme des germes, mais c'est en 1935 que les expériences de WOOD et WERKMAN montraient la forte probabilité de la fixation du gaz carbonique par les bactéries hétérotrophes de l'acide propionique (5). Woods, en 1936, démontrait la réduction par *Escherichia coli* du CO_2 en acide formique (7).

L'utilisation des isotopes du carbone en 1940 (6) devait prouver irréfutablement le passage du carbone du gaz carbonique à l'acide succinique. Il était observé que cette fixation « hétérotrophe » du CO_2 n'est pas seulement l'apanage des bactéries, mais a lieu également chez les levures, les protozoaires, les moisissures, pour ne citer que les organismes intéressant la microbiologie des sols (1).

En 1953, SAUERLANDT et GROETZNER constatant les oscillations du taux de carbone organique dans des sols en jachère et, notamment, son augmentation pendant des mois d'hiver, ont expliqué ces phénomènes par l'activité des germes hétérotrophes, dont le bilan carboné serait tantôt positif, tantôt négatif (4).

Cependant, puisqu'il s'agissait de sol en place où des algues — voire même de petites plantes vertes — pouvaient exercer leur activité en passant inaperçues, ces variations du niveau carboné établies par analyses chimiques du sol apportaient, à notre sens, une présomption plutôt qu'une preuve de la fixation du gaz carbonique par le sol.

Dans les conditions de notre expérience en étuve obscure, l'activité des algues et des plantules vertes est éliminée; quant à celle des bactéries de la nitrification, principal groupe des germes autotrophes dans les sols fertiles étudiés, nous avons vu qu'elle ne pouvait qu'être négligeable dans la fixation de gaz carbonique.

Il faut donc admettre que c'est la flore hétérotrophe qui amène cet appauvrissement de l'atmosphère en CO_2 au bénéfice, par conséquent, du sol.

Le graphique de la fig. 1 illustre la variation du CO_2 dégagé au cours de l'incubation, et montre que le dégagement initial élève rapidement la concentration dans l'enceinte close.

Le processus de fixation du CO_2 semble stimulé par cette forte concentration qui, peut-être, d'ailleurs, commence à être néfaste à l'activité normale des germes (à la température de 30° et à la pression locale de 670 mm Hg, les 19,44 mg de CO_2 représentent $12,5 \text{ cm}^3$ et amènent une concentration en CO_2 voisine de 14 %). Cette concentration peut d'ailleurs être dépassée dans le sol: un taux de 17,6 % a été mesuré à Rothamsted — en sol fumé — (2) et, par ailleurs, M. B. RUSSEL (3), écrit que la concentration de gaz carbonique dans l'atmosphère du sol est de 10 à 1.000 fois plus élevée que dans l'atmosphère libre.

La quantité de CO_2 mesurée est la résultante entre son dégagement et sa réutilisation et l'aspect de la courbe, à un moment donné, traduit l'intensité relative des deux processus.

(1) Les levures sont abondantes dans les sols latéritiques rouges des Hauts-Plateaux malgaches.

Si l'on suppose que la forte concentration en CO_2 atteinte le 5^e jour soit toxique pour la plus grande partie des germes, on peut admettre que le mécanisme de fixation du CO_2 qui apparaît nettement du 5^e au 15^e jour soit, en partie tout au moins, de nature enzymatique, ou bien le fait d'un groupe spécial de microorganismes. Le 15^e jour, la concentration en CO_2 s'étant abaissée à nouveau à moins de 7 %, le dégagement de CO_2 l'emporte à

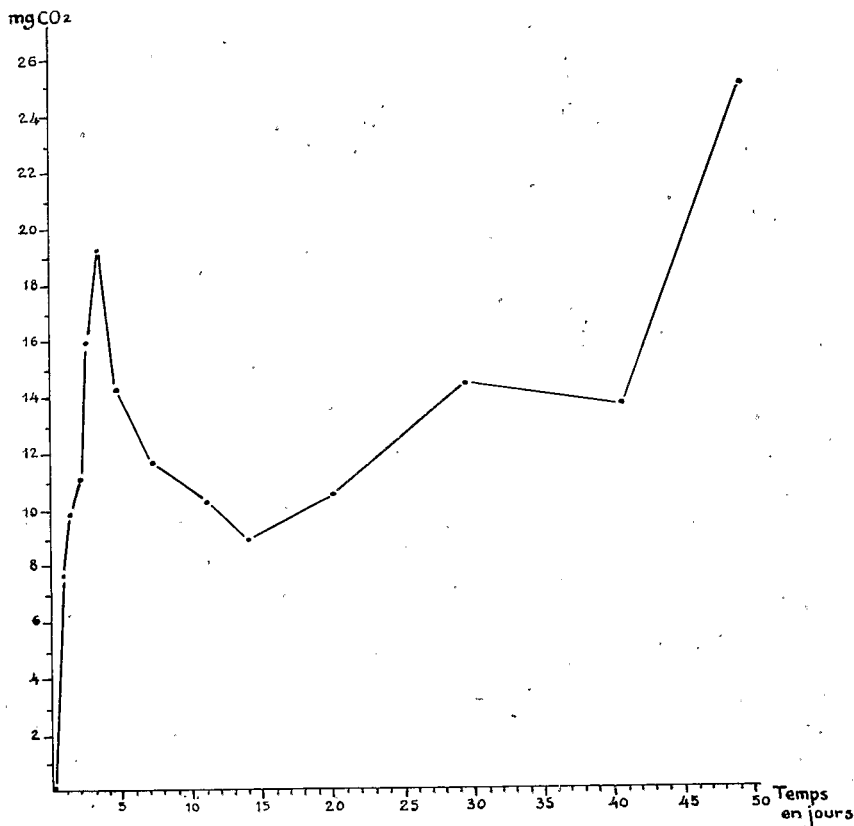


FIG. 1. — Variation de la concentration en CO_2 de l'atmosphère close au contact du sol Ti5 au cours de l'incubation à 30°.

nouveau et, après une oscillation de faible amplitude, la concentration en CO_2 s'élève à un niveau supérieur à celui du 5^e jour. Deux causes peuvent concourir à ces oscillations : la toxicité du CO_2 freinant la respiration, l'intensité de la fixation du CO_2 d'autant plus forte que sa concentration est plus élevée.

La même expérience d'incubation de durée variable a été faite sur un sol différent, un sol maraîcher provenant d'une terrasse sur sol latéritique rouge Ti4 (sol humifère légèrement fumé).

Durée de l'incubation en jours	mg CO ₂
1	6,25
2	13,64
3	8,58
4	8,14
5	14,30
7	21,56
8	16,32
9	12,06
15	10,24
20	12,53
25	11,88

On observe sur ce sol des oscillations plus rapides, et, en début d'expérience, de plus grande amplitude, que sur le précédent, un maximum de CO₂ étant observé dès le 2^e jour (fig. 2).

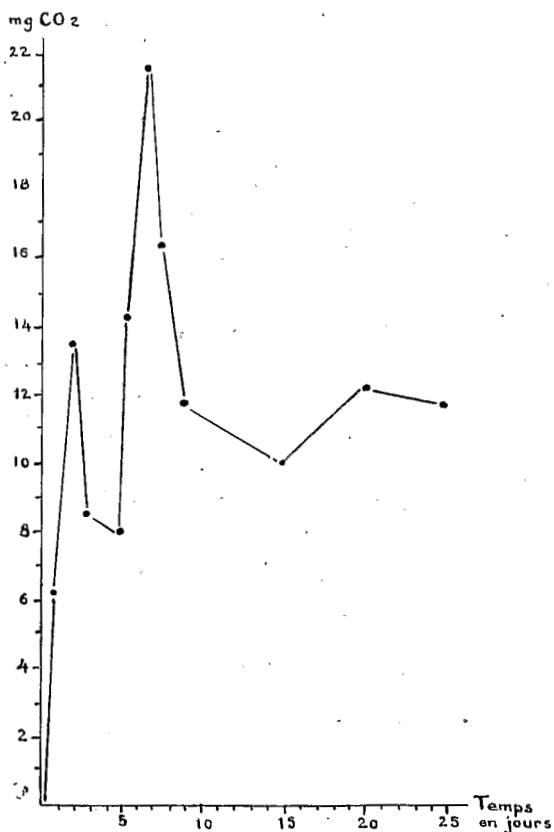


FIG. 2. — Variation de la concentration en CO₂ de l'atmosphère close au contact du sol Ti4 au cours de l'incubation à 30°.

Dans une autre expérience, l'incubation a été réalisée pour le sol Ti5 du début traité par 12,5 % de toluène ce qui a pour effet de tuer la microflore sans s'opposer au déroulement des réactions enzymatiques.

Durée de l'incubation en jours	mg CO ₂
1	4,84
2	5,10
3	5,59
4	3,61
5	4,36
7	4,88
9	6,51

Les chiffres obtenus sont très abaissés par rapport à la première série, mais ne sont cependant pas nuls, ce qui prouve qu'une respiration enzymatique a lieu. L'abaissement de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère au contact du sol montre l'existence d'un processus enzymatique de fixation.

Dans un autre type d'expérience, nous avons opéré sur une masse plus grande de sol, les échantillons ayant été prélevés en octobre, c'est-à-dire 5 mois plus tard que pour les essais précédents.

Une masse de 2 kg de sol se trouvait encluse dans un récipient hermétique de 10 l de façon à conserver le rapport précédent (20 g dans 100 cm³), humidifiée à 25 % et incubée à l'obscurité, à 30°. Le dégagement de CO₂ a été suivi par le prélèvement journalier d'un faible volume de gaz (de l'ordre de 100 cm³) et le CO₂ dosé sur ce volume par l'eau de baryte. Le gaz prélevé était remplacé par de l'air frais privé de CO₂ de façon à maintenir la pression atmosphérique.

La fig. 3 donne l'allure des 3 courbes obtenues, 2 d'entre elles sur les mêmes sols que précédemment, T-OC 4 et 5, mais prélevés en octobre au lieu de mai et la 3^e sur un sol colluvial humifère, sous Pin, prélevé à Tsimbazaza (T-OC 15). On a noté, en ordonnées, les poids de CO₂ dans l'atmosphère close et, en abscisses, les durées d'incubation en jours.

On constate que l'allure des courbes se différencie des précédentes : l'abaissement périodique des concentrations en CO₂ est moins marqué mais il n'en existe pas moins indubitablement, atteignant pour T-OC 5 640 mg entre les 20^e et 22^e jours d'incubation et 1.085 mg entre les 28^e et 30^e jours.

L'absorption maximum pour le sol 5 est même relativement plus élevée que celle observée sur 20 g de sol (19,44 à 14,38 soit 5,06 pour 20 g de sol ou 506 mg pour 2 kg) mais elle se produit pour une concentration en CO₂ dans l'enceinte close de l'ordre de 30 %. Cependant, pour les sols 4 et 15, de nettes absorptions de CO₂ ont lieu pour des concentrations voisines de 18 %, mais sont moins importantes pour le sol 4 que dans l'expérience avec 20 g de sol.

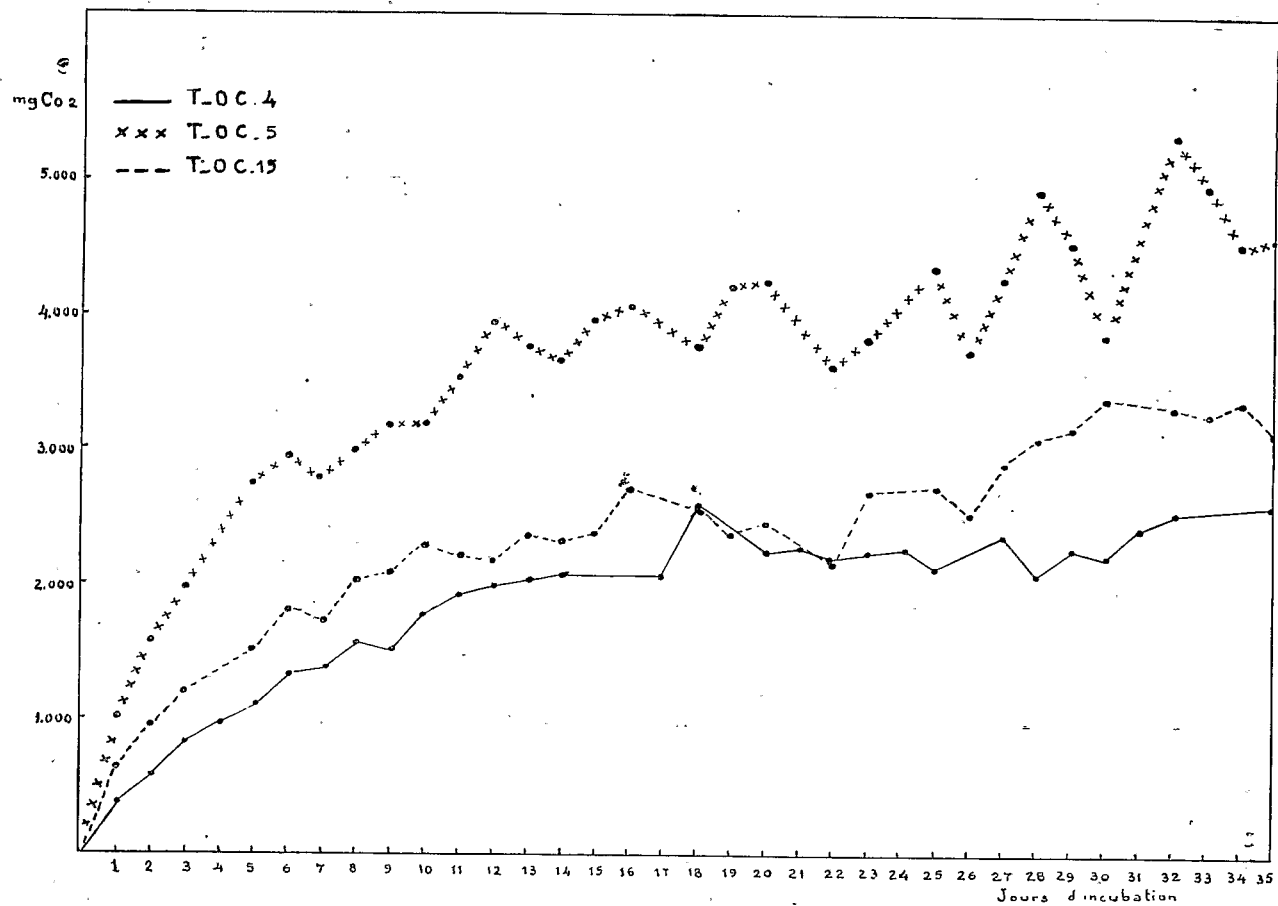


FIG. 3. — Variations respectives de la concentration en CO₂ de l'atmosphère close au contact des sols T-OC 4,5 et 15 (2 kg de terre) au cours de l'incubation à 30°.

A quoi attribuer ces différences ? Trois explications peuvent être avancées :

1^o la période différente du prélèvement des échantillons;

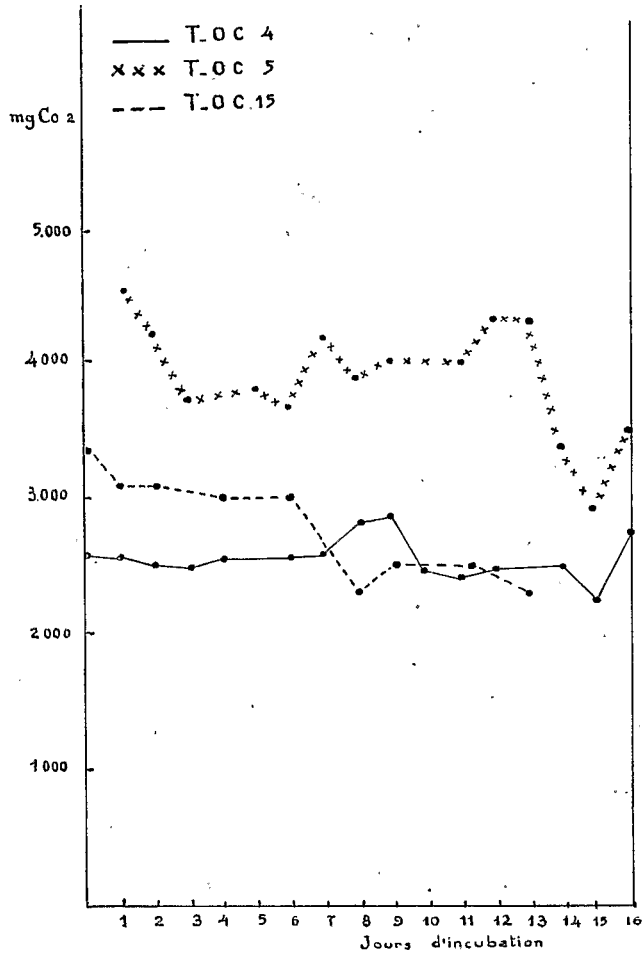


FIG. 4. — Incubations successives à diverses températures : T-OC 4, 30° du 1^{er} au 9^e jour, 20° du 10^e au 15^e jour et 30° le 16^e jour; T-OC 5, 20° le 1^{er} jour, 8° du 2^e au 5^e jour, 20° du 6^e au 12^e jour et 8° du 13^e au 16^e jour; T-OC 15, 20° du 1^{er} au 6^e jour et 8° du 7^e au 13^e jour. En ordonnées, figurent les concentrations en CO₂ de l'atmosphère close au contact du sol.

2^o l'effet de masse du sol ou, plus simplement, le rapport différent de la surface en contact avec l'atmosphère close au poids du sol (6,25 fois plus élevé dans l'expérience en erlen avec 20 g de sol que dans le flacon de 10 l avec 2 kg de sol);

3° l'effet perturbateur des prélèvements de gaz suivis d'entrée d'air frais.

Les échantillons d'octobre ayant été épuisés, le premier type d'expérience ne peut malheureusement pas être répété sur ceux-ci de façon à éliminer éventuellement la première hypothèse.

Quoiqu'il en soit ces derniers résultats peuvent laisser supposer que si la fixation du CO₂ n'est manifeste qu'aux fortes concentrations de ce gaz, le phénomène se produirait dans la nature moins fréquemment que l'expérimentation avec un faible poids de sol pourrait le laisser envisager.

Le tableau suivant donne les résultats numériques obtenus et portés dans la figure 3 :

mg CO ₂ dans l'atmosphère au-dessus du sol			
	TOC 4	TOC 5	TOC 15
1	386	1.000	621
2	576	1.554	950
3	813	1.970	1.200
4	957	—	—
5	1.108	2.750	1.510
6	1.340	2.950	1.803
7	1.353	2.800	1.742
8	1.577	2.980	2.015
9	1.548	3.180	2.100
10	1.780	3.200	2.297
11	1.918	3.540	2.222
12	—	3.960	2.187
13	2.043	3.795	2.370
14	2.078	3.660	2.330
15	2.083	3.980	2.396
16	—	4.075	2.724
17	2.083	—	—
18	2.600	3.780	2.580
19	—	4.215	2.397
20	2.249	4.250	2.460
21	2.285	—	—
22	2.204	3.610	2.200
23	2.243	3.810	2.695
24	2.280	—	—
25	2.130	4.375	2.735
26	—	3.720	2.520
27	2.390	4.295	2.900
28	2.080	4.925	3.062
29	2.280	4.550	3.150
30	2.225	3.840	3.397
31	2.411	—	—
32	2.528	5.315	3.317
33	—	4.980	3.283
34	2.570	4.540	3.351
35	—	4.565	—

ESSAI DE VARIATION DE TEMPÉRATURE

Les deux flacons précédents contenant les sols 5 et 15 ont été enlevés de l'étuve à 30° et placés, soit à 20°, soit à 8°. On constate que, chaque

fois, le refroidissement a amené un abaissement de la concentration de l'atmosphère interne en CO_2 (fig. 4).

En particulier, pour le sol 15, le passage de 30° à 20° a été suivi d'une fixation de CO_2 dans le sol, continue pendant 5 jours, quoique assez peu intense, ce qui ne s'était pas produit à 30° (durée maximum de fixation : env. 3 jours). Ensuite, le passage de 20° à 8° a fait fortement tomber la concentration (695 mg en 2 jours, alors que le maximum à 30° en 2 jours n'avait pas dépassé 260 mg — du 20 au 22^e jour). La fixation paraît donc favorisée par un abaissement de température. Remarquons, d'ailleurs, que la fixation de carbone par le sol nu, décelée par SAUERLANDT et GROETZNER en Allemagne, se situe en hiver. S'il est certain que l'abaissement de température cause une fixation physique du gaz carbonique, puisque la solubilité des gaz dans l'eau (du sol) est d'autant plus grande que la température s'abaisse, l'équilibre doit cependant être atteint avant 24 heures. Dans le cas où la fixation se prolonge pendant 5 jours, il est logique de penser à un effet favorisant de la baisse de température sur le processus biologique de fixation.

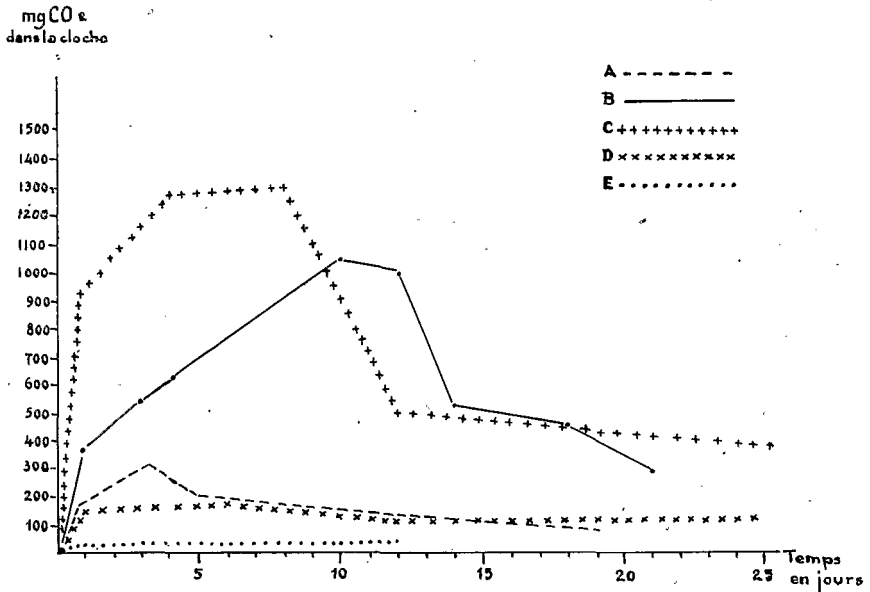


FIG. 5. — Variations dans le temps des concentrations en CO_2 dans l'atmosphère de cloches situées sur différentes parcelles.

D'autre part, des essais sur les 3 mêmes sols longuement stérilisés à 120° et en présence de concentrations en CO_2 de l'ordre de celles précédemment observées n'ont montré aucune fixation, ce qui indique que la fixation, observée précédemment à 30° , ne peut s'expliquer par des phénomènes physiques.

A ces essais au laboratoire, nous avons ajouté des mesures *in situ* sur divers types de sol à Tsimbazaza-Tananarive. Nous avons mesuré

les variations dans le temps de la concentration en CO_2 sous cloche fermée enfoncée dans le sol de façon à former joint.

Dans presque tous les cas, on peut observer une augmentation de la quantité de gaz carbonique sous la cloche, au-dessus du sol nu, le passage par un maximum, puis une chute. Parfois, la concentration augmente à nouveau. Certes, dans les mesures au champ, les algues jouent souvent un rôle actif (on pouvait les observer en grande abondance sur sol hydromorphe, en janvier, l'humidité étant encore accrue par la cloche), mais, en sol sec, elles n'étaient pas visibles. Il est vraisemblable, de toute façon, que les germes hétérotrophes sont une des causes de cette fixation du CO_2 par le sol (comme SAUERLANDT et GROETZNER le déduisaient des oscillations du taux de C dans le sol).

Le prélèvement gazeux était effectué sous la cloche (par l'intermédiaire de robinets rodés) à l'aide d'un flacon dans lequel le vide avait été préalablement réalisé au laboratoire.

La figure 5 reproduit les courbes obtenues sur 5 parcelles (au mois de mars, les sols étant humides) :

A. — Alluvions hydromorphes, micacées, humifères. Sol labouré une semaine avant la pose de la cloche.

B. — Mêmes alluvions avec apport récent de fumier de ferme.

C. — » » avec paillis d'*Aristida similis*.

D. — Sol latéritique rouge sur colline (peu érodé).

E. — Sol latéritique rouge très érodé sur colline.

On voit que pour les alluvions hydromorphes, la diminution de la concentration en CO_2 dans la cloche est très marquée après un maximum plus ou moins rapidement atteint.

Ces maximum se classent dans le même ordre que le dégagement de CO_2 au cours des premières 24 heures; ce dernier permet d'ailleurs de calculer le dégagement de CO_2 par m^2 en 24 h, d'après la surface couverte par la cloche. On trouve pour les 5 parcelles :

	g $\text{CO}_2/\text{m}^2/24$ h
A	2,54
B	5,95
C	14,1
D	2,00
E	0,58

Le dégagement important de la parcelle paillée est dû, en partie, à la décomposition de la couverture morte.

Le processus du passage du CO_2 de la cloche vers le sol ne s'observe pas pour le sol érodé dont la faible respiration n'a qu'à peine élevé la concentration en CO_2 . Les concentrations en CO_2 (en volume) dans la cloche sont au maximum de 5,45 % sous paillis (parcelle C) et de 4,13 % sur la parcelle fumée B.

Une autre mesure sur les mêmes alluvions hydromorphes, non fumées, mais en pleine saison des pluies (janvier-février) donne les résultats suivants :

Nombre de jours	mg CO ₂ dans la cloche
1	546
4	1.295
10	1.724
12	1.915
28	1.432
43	526

Les algues étaient très abondantes sous la cloche après le 28^e jour, ce qui peut causer la fixation plus intense du CO₂.

La température plus élevée qu'en mars explique la respiration plus forte (8,3 g CO₂/m²/24 h).

En juillet, une nouvelle série de mesures, sur la parcelle D très sèche sur colline, sans algues visibles, a donné les chiffres suivants :

Nombre de jours	mg CO ₂ dans la cloche
1	158
3	272
5	156
8	185
13	111
15	66

En résumé, nous avons observé la fixation du gaz carbonique par le sol, d'une part au laboratoire selon un processus très vraisemblablement surtout hétérotrophe; d'autre part une fixation a lieu également sur le terrain avec possibilité des deux phénomènes simultanés de fixation hétérotrophe et autotrophe : les algues jouaient logiquement le rôle le plus actif dans les alluvions humides mais non sur les sols de colline.

BIBLIOGRAPHIE

1. MOUREAUX (Cl.), 1957. — Tests biochimiques de l'activité biologique de quelques sols malgaches. — *Mém. Inst. sci. Madagascar*, D, VIII, p. 225-241.
2. RUSSEL (E.J.) and APPLEYARD (A.), 1915. — *J. Agr. Sci.*, 7, 1.
3. RUSSEL (M.B.), 1952. — Soil aeration and plant growth in Soil physical conditions and plant growth. — Shaw (B.T.) Ed., New-York.
4. SAUERLANDT (W.) und GROETZNER (E.), 1953. — Untersuchungen über organisch gebundenen Kohlenstoff in landwirtschaftlich genutzten Böden-2. Schwankungen des Gehaltes an organisch gebundenem Kohlenstoff in unbestellten Ackerböden. — *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde*, 61, (106), p. 142-149, Berlin.
5. WOOD (H.G.) and WERKMAN (C.H.), 1936. — *Biochemistry J.*, 30 : 618-23.
6. WOOD (H.G.), WERKMAN (C.H.), HEMINGWAY (A.) and NIER (A.O.), 1940-41. — *J. Biol. Chem.*, 135 : 789-790; 139 : 365-376.
7. WOODS (D.D.), 1936. — *Biochem. J.*, 30, 515-527.