

PROBLÈMES RELATIFS A L'ATMOSPHERE DU SOL ET UTILISATION POSSIBLE D'UN DÉTECTEUR DE GAZ POUR LA MESURE DE SA TENEUR EN GAZ CARBONIQUE

par G. BACHELIER*

RÉSUMÉ

En équilibre avec l'atmosphère libre des sols existe une atmosphère dissoute, dont la composition dépend du milieu pédologique, et qui intéresse directement les racines. Diverses caractéristiques du dynamisme des sols dont notamment la nitrification ou l'assimilabilité de certains éléments comme le potassium et le

Plusieurs auteurs ont montré assez récemment qu'il existait des possibilités de fixation biologique et d'absorption par les racines du gaz carbonique, ainsi que dans les sols hydromorphes des possibilités d'apport d'oxygène par les racines. Ce possible apport d'oxygène par les racines pourrait expliquer la formation autour de celles-ci de gaines ferrugineuses observables dans certains horizons de gley.

L'auteur a utilisé le Détecteur de gaz Drager, avec l'aide d'une série de sondes fixes pour suivre la teneur en gaz carbonique de l'atmosphère des sols.

L'étude des variations de teneur en CO_2 de l'atmosphère d'un sol brun calcaire a montré que, par suite des variations microclimatiques et structurales saisonnières qui se manifestent dans ce sol, la teneur en CO_2 de son atmosphère pouvait dans l'horizon supérieur y varier en sens inverse de son dégagement de CO_2 .

* Maître de Recherches à l'ORSTOM

PLAN

1. L'ATMOSPHÈRE DU SOL

Atmosphère libre et atmosphère dissoute

Influence de l'atmosphère du sol sur sa dynamique

Fixation biologique et absorption par les racines du CO₂ des sols.

Apport d'oxygène par les racines. Conséquences pédologiques possibles.

2. MÉTHODE D'ÉTUDE RAPIDE DE LA TENEUR EN CO₂ DANS L'ATMOSPHÈRE DES SOLS. EXEMPLE D'APPLICATION.

Utilisation possible d'un détecteur de gaz.

Variations saisonnières de la teneur en CO₂ d'un sol brun calcaire.

CONCLUSIONS

BIBLIOGRAPHIE

1 - L'ATMOSPHÈRE DU SOL

L'atmosphère du sol est intimement liée à la minéralisation du carbone et on considère qu'elle 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.

Sous cette simplicité apparente, se cache en fait une question assez complexe.

ATMOSPHÈRE LIBRE ET ATMOSPHÈRE DISSOUE

Des analyses sérieuses de l'air des sols ont été faites dès 1853 par BOUSSINGAULT et LEWY. Pour autant que le sol soit suffisamment poreux, la constitution de l'air du sol est généralement très voisine de celle de l'air ambiant, tout au moins dans les 20 cm supérieurs ; on peut ainsi y trouver 20 % d'oxygène au lieu de 21 % et 0,3 % de CO₂ au lieu de 0,03 %. Les variations de température, de pression, les pluies et les vents aident à l'aération des sols. Dans la profondeur des sols argileux compacts ou mal drainés, des concentrations d'oxygène inférieures à 10 % et des concentrations de CO₂ atteignant 10 % peuvent facilement se rencontrer.

KRISTENSEN et ENOCH (1967) par des expériences de laboratoire ont montré que dans l'atmosphère du sol la teneur en oxygène devient généralement nulle et la teneur en CO₂ voisine de 20 % bien au-dessus du plan d'eau de la nappe phréatique, et ce d'autant plus que la structure du sol est plus fine, le sol plus profond et la diffusion des gaz plus limitée.

ALIYEV (1966) a rappelé l'importance des variations saisonnières dans les processus biologiques et a montré que le CO₂ de l'atmosphère des sols d'Azerbaïdjan variait au cours de l'année de 0,1 % en période hivernale, à moins de 0,2 % en période de grande sécheresse s'accompagnant de fissuration du sol, et à 0,4 %, et même éventuellement 0,7 %, en période d'importante activité biologique.

RUSSELL et APPLEYARD (1915) ont fait remarquer qu'il existait en fait 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 les racines.

Le CO₂ à 0° est 35 fois plus soluble dans l'eau que l'oxygène, et 28 fois à 20°. Alors que 100 ml d'air renferment habituellement 21 ml d'oxygène, 100 ml d'eau pure, en absence de gaz carbonique, peuvent seulement en dissoudre 1 ml à 0° et 0,6 ml à 20°. L'eau du sol, dont la force ionique est élevée, qui est d'autant plus liée qu'elle est de nature capillaire et qui renferme normalement de fortes teneurs d'acide carbonique, ne peut dissoudre que très peu d'oxygène.

Toutefois, l'oxygène étant plus soluble que l'azote, il est intéressant de constater que dans l'air dissous la proportion d'oxygène serait en principe plus grande que dans l'air atmosphérique, si, étant donné la faible quantité d'oxygène dissous, son utilisation par les processus respiratoires du sol ne ramenait rapidement ce gaz à un pourcentage généralement très inférieur à celui existant dans l'atmosphère libre. ABROSIMOVA et REVUT (1964) ont calculé que dans le sol, une atmosphère libre renfermant 20 % d'oxygène, 1 % de gaz carbonique et 79 % d'azote correspond théoriquement à une atmosphère dissoute à 22,8 % d'oxygène, 32,3 % de gaz carbonique et 44,8 % d'azote. Une faible variation des teneurs en CO₂ peut changer considérablement les pourcentages d'oxygène et d'azote dans l'atmosphère dissoute. Dans les tourbières à sphaignes où l'eau stagne, les fortes teneurs en CO₂ limitent ainsi la solubilité de l'oxygène et consécutivement le développement et la diversité des plantes aquatiques (YURKEVICH, SMOLYAK et GARIN, 1966).

D'après GREENWOOD (1961), le passage du métabolisme aérobie au métabolisme anaérobie se situerait pour de très nombreux sols à une concentration d'oxygène dissous inférieure à 3×10^{-6} M, c'est-à-dire environ au millième de sa capacité de dissolution de l'oxygène dans l'eau pure.

À côté de la dissolution des gaz, il est aussi nécessaire d'en considérer la diffusion à travers les films d'eau, car, pour les racines, plus que la quantité d'oxygène dissoute importe la quantité d'oxygène susceptible de diffuser dans le temps à travers le film d'eau qui les entoure, or l'oxygène est un gaz qui diffuse très mal à travers l'eau. Les pluies, qui sont généralement plus riches en oxygène qu'en CO₂ dissous, jouent certainement un rôle important dans l'apport d'oxygène à l'atmosphère dissoute des sols.

Il est relativement aisé de connaître l'atmosphère libre des sols et d'en suivre les variations. On peut aussi assez facilement en étudier les possibilités de diffusion, encore que dans les calculs de circulation des gaz à l'intérieur des sols, il faille non seulement considérer la porosité des sols, mais aussi la « tortuosité » des conduits.

Il apparaît par contre beaucoup plus difficile d'étudier l'atmosphère dissoute des sols, car les possibilités de dissolution et de diffusion des gaz dans l'eau des sols changent constamment avec l'importance et les caractéristiques physico-chimique de l'eau.

En fait, le problème pour un sol est de posséder un bon régime air-eau, c'est-à-dire un film d'eau peu épais mais fortement retenu et réparti sur une grande surface avec une atmosphère libre facilement renouvelable à son contact. Les conditions pédologiques permettant de se rapprocher au mieux de cet idéal dépendent des impératifs du climat local et de la couverture du sol. En climat humide, ces conditions sont un bon drainage, une forte rétention d'eau et une porosité importante et différenciée que peuvent compléter des galeries jouant le rôle de conduits principaux de drainage et d'aération. En climat sec, le maintien de l'humidité passe en premier, pour autant qu'on reste en milieu globalement aérobie ou que les périodes de sécheresse compensent les périodes d'inondation. Le self-mulching revient à casser la remontée du film d'eau sans nuire à son aération.

Ce problème du régime air-eau, comme celui des autres facteurs de la fertilité, doit être considéré également en fonction des besoins des plantes, très variables selon les espèces ; les tomates sont ainsi, beaucoup plus que le riz, sensibles à l'aération du sol.

INFLUENCE DE L'ATMOSPHERE DU SOL SUR SA DYNAMIQUE

D'après LUNDEGARDH (1927), le CO₂ deviendrait toxique à partir de 1 % à 15 cm de profondeur. GEISLER (1967) a montré que la longueur des racines d'orge et de pois diminue à partir de 2 à 8 % de CO₂, selon la concentration en oxygène. VILAIN (1966) indique que le coton pourrait supporter une atmosphère à 15 % de CO₂, ce qui nous semble une valeur très élevée, encore que GIOVANNOZZI-SERMANNI et CACCIARI (1967) indiquent que la présence de 20 % de CO₂ autour des racines de *Phaseolus vulgaris* n'a pas d'effet inhibiteur. En général, les plantes ne répondent pas à un enrichissement artificiel du sol en CO₂, tant que la teneur en oxygène de l'atmosphère libre du sol demeure supérieure à 10 %. STOLZY, LETEY, SZUSZKIEWICZ et LUNT (1961) ont montré que les racines de maïs voient leur croissance limitée en dessous de cette concentration. L'aération du sol est surtout nécessaire aux périodes d'échauffement : les racines de maïs croissent ainsi 3 fois moins vite à 18 °C dans un sol à 3 % d'oxygène que dans les conditions d'atmosphère normale, 5 fois moins vite à 20 °C et 16 fois moins vite à 30 °C. GEISLER (1967) a aussi montré qu'en absence de CO₂ les racines de pois et d'orge deviennent d'abord de moins en moins nombreuses avec la raréfaction de l'oxygène, puis voient ensuite leur croissance limitée en dessous de 14 % d'oxygène pour les pois et de 7 % d'oxygène pour l'orge.

De l'atmosphère du sol dépend non seulement la respiration des racines, mais aussi le métabolisme même des sols et notamment la nitrification et l'absorption des éléments minéraux par les plantes.

HULPOI, DAKESIAN, ELIADE et CHINEA (1966) ont montré que, dans les chernozem peu lessivés, l'aération du sol liée à la porosité peut fortement influencer l'oxydation de l'ammonium ; un accroissement de l'humidité des sols y diminue la nitrification en y limitant les teneurs en air libre. Un manque caractérisé d'oxygène peut même entraîner de fortes dénitrifications (QUASTEL, 1965), et inversement RUSSELL et APPELYARD (1915) ont montré qu'une forte nitrification, liée à une forte humidité, détermine une forte diminution d'oxygène et une très nette augmentation du CO₂ dans l'atmosphère du sol.

Par contre, DU PLESSIS et KROONTJE (1966) ont noté que la présence du CO₂ dans l'atmosphère des sols accroît et stabilise la rétention de l'ammoniac par les argiles saturées en bases, et plus particulièrement les bentonites calciques et magnésiennes. On pense que le calcium et le magnésium, échangés contre l'ammoniac, sont précipités sous forme de composés insolubles.

Plusieurs auteurs s'accordent aussi à considérer que le manque d'oxygène contribue à diminuer l'absorption de nombreux éléments minéraux par les plantes, dont notamment le potassium et le manganèse. Etudiant les effets de l'oxygène et de l'irrigation sur les citronniers, LABANAUSKAS, LETEY, STOLZY et VALORAS (1966) ont de même montré que des faibles teneurs d'oxygène réduisent dans les sols les concentrations de certains éléments au profit d'autres. Suite au manque d'oxygène dans le sol, les quantités totales de N, P, K, Ca, Mg, Cl, Zn, Cu, Mn, B et Fe ont diminué dans les expériences de ces auteurs, alors que le sodium s'est au contraire accru.

Le problème des rapports entre la croissance des plantes et l'aération du sol est encore compliqué par les possibilités de fixation du CO₂ dans les sols et les possibilités plus ou moins développées qu'ont certaines plantes de transférer de l'oxygène de leurs parties aériennes vers les racines.

FIXATION BIOLOGIQUE ET ABSORPTION PAR LES RACINES DU CO₂ DES SOLS

Plusieurs mécanismes de fixation biologique du CO₂ existent dans les sols, en plus des processus habituels de formation chimique des carbonates et bicarbonates.

La fixation du CO₂ par les bactéries autotrophes chimiosynthétiques du sol, tels les ferrobactéries, les sulfobactéries, les hydrogénobactéries et surtout les bactéries nitrifiantes est maintenant bien connue, mais l'action de ces diverses bactéries sur la teneur en CO₂ de l'atmosphère des sols reste généralement insignifiante. Quelques bactéries photosynthétiques (souvent hétérotrophes à l'obscurité) peuvent aussi réduire le CO₂ à la surface des sols.

Plus important nous apparaît le fait démontré par plusieurs auteurs que de nombreuses bactéries hétérotrophes peuvent aussi fixer du CO₂. MOUREAUX (1959) a ainsi observé que les bactéries hétérotrophes déterminaient au-dessus de sols humides placés en récipients clos des variations négatives dans les teneurs en CO₂ de l'atmosphère de ces récipients. Par traitement des sols au toluène, ce même auteur a aussi montré la possibilité d'une absorption de CO₂ de nature purement enzymatique.

Divers auteurs ont encore démontré la possibilité qu'avaient les racines d'absorber du CO₂. POEL (1953) a prouvé l'absorption de ¹⁴CO₂ par les racines d'orge ; cette absorption étant plus forte si les racines avaient été maintenues dans l'eau au préalable. KICK, SAUERBECH et FUHR (1965) cultivant des soleils en culture hydroponique renfermant du ¹⁴CO₂ ont confirmé l'absorption de CO₂ par les racines et le transport interne du carbone absorbé à travers la plante. Bien que dans les conditions expérimentales de ces auteurs la fixation de CO₂ par les racines s'élève à environ 1,3 % du carbone global assimilé, cette fixation doit demeurer beaucoup plus faible aux champs. Son influence en est cependant certainement importante. BERGUIST (1964) a obtenu dans des cultures hydroponiques de fèves, de tomates et de moutarde blanche des gains de productivité de 27 % avec le maintien d'une concentration modérée de CO₂ dissous. KURSANOV en 1957, toujours avec du carbone marqué, avait déjà indiqué l'importance et la signification physiologique de cette absorption de CO₂ par les racines. Dans certaines périodes de la vie des plantes, jusqu'à 50 % du produit de la photosynthèse migre des feuilles vers les racines, essentiellement sous forme de saccharose, avec en plus quelques acides organiques et acides aminés peu importants. Les sucres dans les racines, après absorption de CO₂ et d'NH₄ ou de nitrates, sont rapidement convertis en acides organiques, acides aminés et uréides. La sève transporte ensuite aux bourgeons un mélange de nombreuses substances organiques qui sont le produit du métabolisme des racines. Les mesures de radioactivité montrent que près de la moitié des produits d'assimilation qui descendent aux racines reviennent ensuite aux organes sus-jacents.

Le CO₂ ainsi fixé par les racines demeure cependant relativement faible par rapport au CO₂ dégagé par les bactéries du sol et la respiration des racines. Il ne peut guère influencer sur l'atmosphère libre des sols mais peut aider à l'aération des films d'eau entourant les racines. TANAKA et NAVASERO (1967) ont montré que l'acide carbonique, comme les autres acides organiques, était plus facilement absorbé par les racines du riz sous forme de sels solubles que sous forme dissociée. Plus l'acide carbonique présent dans les films d'eau peut former des carbonates alcalins ou des bicarbonates solubles, plus il est facilement absorbé par les racines et éliminé de l'atmosphère dissoute.

APPORT D'OXYGÈNE PAR LES RACINES - CONSÉQUENCES PÉDOLOGIQUES POSSIBLES

Inversement, de nombreux auteurs (cf. GRABLE, 1966) ont montré la possibilité de transfert de l'oxygène, à travers les lacunes aérifères des plantes, des parties aériennes vers les racines, transfert qui prendrait une importance toute particulière dans les plantes de marais. Ainsi, ARMSTRONG (1964), entourant les parties aériennes de *Molinia coerulea*, *Eriophorum augustifolium* et *Menyanthes trifoliata* d'une atmosphère enrichie en oxygène a pu observer une importante et rapide diffusion de ce gaz à la surface des racines, où il serait susceptible d'oxyder les substances réduites (ARMSTRONG, 1967).

Le transfert gazeux d'oxygène vers les racines peut ainsi jusqu'à un certain point rendre les plantes indépendantes de l'état d'aération du sol, mais il est nécessaire qu'une forte humidité ne détermine pas la saturation en eau des tissus végétaux et n'y empêche pas toute diffusion interne de l'oxygène. La richesse chimique du sol, en limitant l'absorption d'eau par les racines, favorise indirectement la diffusion de l'oxygène à l'intérieur des plantes, aussi l'apport d'engrais minéraux peut-il souvent permettre le développement de plantes dans des sols saturés ou des solutions nutritives peu aérées.

Une teneur excessive en eau est dans les sols vraisemblablement plus nuisible aux plantes qu'une aération déficiente et il est nécessaire de considérer le comportement de croissance d'une plante non seulement en fonction de l'aération du sol, mais aussi en fonction du régime hydrique et de la valeur nutritive de ce sol.

Cet apport possible d'oxygène par les racines dans les milieux hydriques nous suggère une hypothèse pour la formation des gaines ferrugineuses qui entourent les racines peu lignifiées au sein des horizons de gley, et notamment en régions équatoriales au sein des horizons de gley sous recouvrements ferrugineux ou ferrallitiques peu épais. Ces gaines ferrugineuses pourraient résulter de l'oxydation par les ferrobactéries du fer ferreux soluble présent dans le milieu et naturellement drainé vers les racines. Cette oxydation s'effectuerait à partir de l'oxygène apporté par les racines, et compte tenu de la présence simultanée, dans le milieu, du CO_2 nécessaire à ces bactéries chimiosynthétiques. Peut-être même n'est-ce que grâce à cette association, alors symbiotique, avec les ferrobactéries que les racines peuvent pénétrer dans les horizons de gley.

Il est à noter que dans les sols tempérés sur sables ferrugineux et de couleur ocre plus ou moins rouge, les zones de réduction observables autour des racines apparaissent autour de racines très lignifiées, mortes ou en desquamation, et sont déterminées par la décomposition des substances organiques végétales. Dans la profondeur des podzols sableux, des zones plus claires peuvent aussi s'observer autour des racines, mais plus qu'à des phénomènes de réduction, on a alors affaire dans ce cas à des processus de micropodzolisation commandés notamment par la nature des excréments de racines ou la pénétration de substances organiques solubles le long de ces racines.

2 - MÉTHODE D'ÉTUDE RAPIDE DE LA TENEUR EN CO_2 DANS L'ATMOSPHÈRE DES SOLS (1). EXEMPLE D'APPLICATION

UTILISATION POSSIBLE D'UN DÉTECTEUR DE GAZ

Nous nous servons pour étudier la teneur en gaz carbonique de l'atmosphère des sols du détecteur de gaz Drager. Ce dispositif 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

(1) Une très bonne technique d'extraction de petits échantillons de gaz du sol et de dosage de ces échantillons par chromatographie gazeuse vient d'être publiée par VILAIN et DRUELLE (1967).

le tube réactif avec une combinaison de l'hydrazine, et la transformation de cette dernière y est mise en évidence par un réactif coloré. D'autres tubes réactifs existent pour l'oxygène (5 à 25 %), mais ils ne nous ont pas donné jusqu'ici satisfaction.

Pour les prélèvements d'air, nous plantons en permanence dans le sol des sondes de différentes longueurs. Ces sondes sont constituées par des tubes de cuivre de diamètre 12-16 mm, enfoncés dans des trous de 16 mm forés au préalable. Les trous doivent être de 2 à 3 cm plus profonds que les sondes afin de constituer une petite chambre d'air à la base de ces dernières. En surface, les sondes dépassent de 5 cm le niveau du sol et sont munies à ce niveau 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 robinet soigneusement graissé ou un simple bouchon de caoutchouc.

La lecture du CO₂ de l'atmosphère du sol se fait en branchant le tube réactif au robinet de la sonde ou en l'introduisant dans la sonde même 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 CO₂ présent. 5 coups de pompe sont nécessaires pour les tubes réactifs CO₂ gradués de 0,1 à 1,0 %. 10 coups de pompe sont nécessaires pour les tubes réactifs CO₂ gradués de 0,02 à 0,3 %.

VARIATIONS SAISONNIÈRES DE LA TENEUR EN CO₂ D'UN SOL BRUN CALCAIRE

A titre d'exemple, nous donnons ici les différentes teneurs mensuelles en CO₂ d'un sol brun calcaire non lessivé, formé sur matériaux d'apport limono-sableux et situé sous pommiers dans la région parisienne ; sols dont le dynamisme a déjà fait pour d'autres facteurs l'objet d'une précédente publication (BACHELIER 1964).

Le profil de ce sol est le suivant :

- 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.

Les résultats de nos mesures sont résumés dans la figure 1. Il peut y être observé que dans l'atmosphère de l'horizon organique humifère (0-25 cm) de ce sol existent pour la teneur en CO₂ deux maxima : un de printemps 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 correspondre à un ralentissement possible, mais temporaire, de l'activité biologique lié à la sécheresse (cf. fig. 2) (BACHELIER, 1966), mais il dépend surtout d'une meilleure diffusion des gaz, résultant de l'amélioration estivale très nette de la structure du sol, précédemment mise en évidence (BACHELIER, 1964).

Au contraire, dans l'horizon sous-jacent (27-72 cm), limono-sableux, à structure polyédrique et à porosité plus faible, la teneur en CO₂ du sol suit 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 grande compacité du matériel. Une décomposition chimique des bicarbonates y est aussi envisageable, bien qu'elle doive y demeurer assez faible.

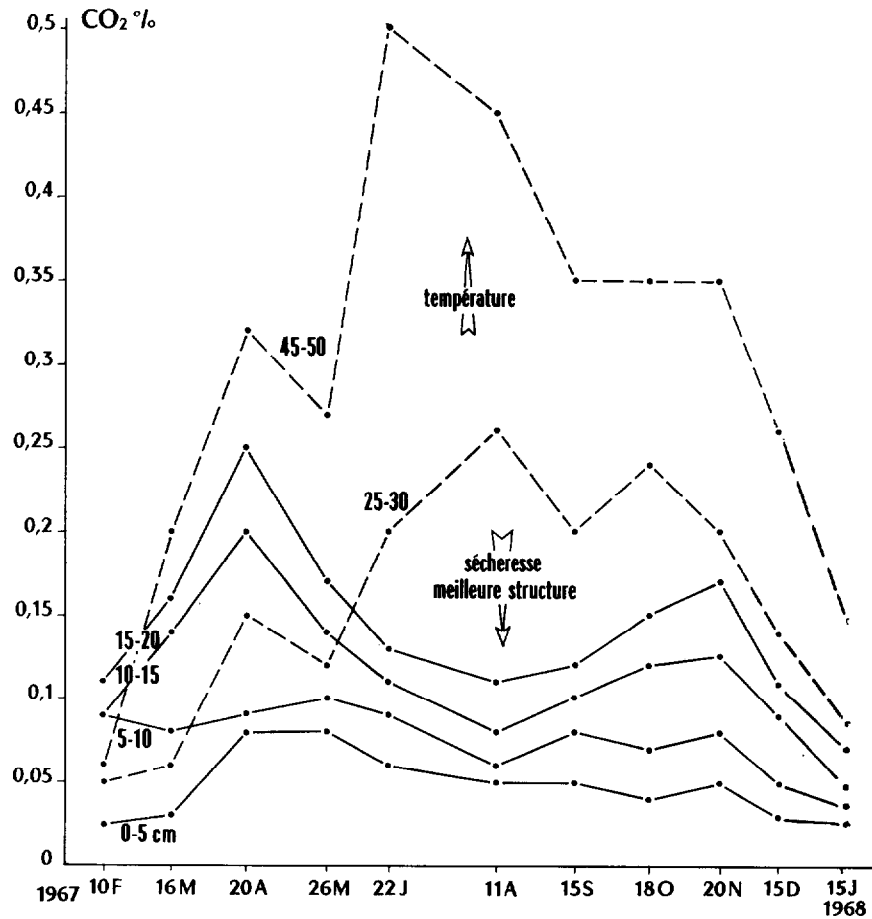


Fig. 1. — Atmosphère du sol brun calcaire de Bondy - teneur en CO₂

CONCLUSIONS

De l'examen du problème de l'atmosphère des sols et de ses variations saisonnières ressort la nécessité de traiter celui-ci non seulement en fonction de la minéralisation du carbone des sols, mais aussi en fonction de l'eau, de la valeur nutritive du sol, de son pouvoir nitrifiant et même de la physiologie respiratoire des plantes. Cette dernière est certainement plus compliquée, ou tout au moins plus souple, qu'on ne l'imaginait il y a encore peu de temps, et pourrait peut-être aider à expliquer certaines formations pédologiques, telles les gaines ferrugineuses observables autour des racines dans les horizons de gley.

Utilisant le détecteur de gaz Drager et une série de sondes fixes, l'examen de la teneur en CO₂ dans l'atmosphère d'un sol brun calcaire nous a montré que les teneurs en CO₂ dans l'atmosphère libre de l'horizon supérieur d'un sol pouvaient varier en sens inverse de son dégagement de CO₂ par suite des variations microclimatiques et structurales saisonnières qui s'y manifestent.

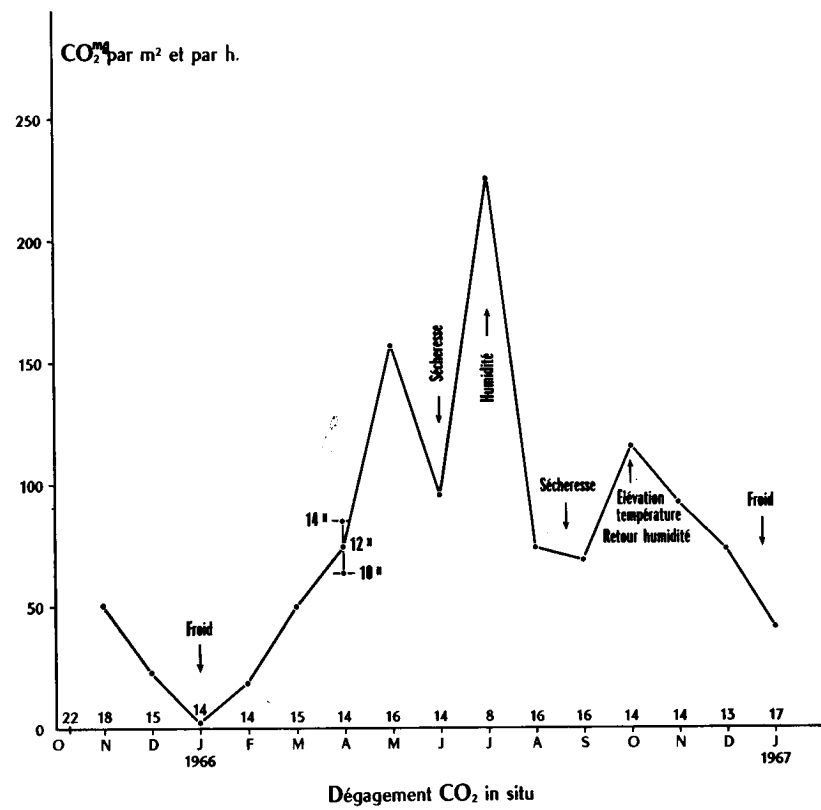
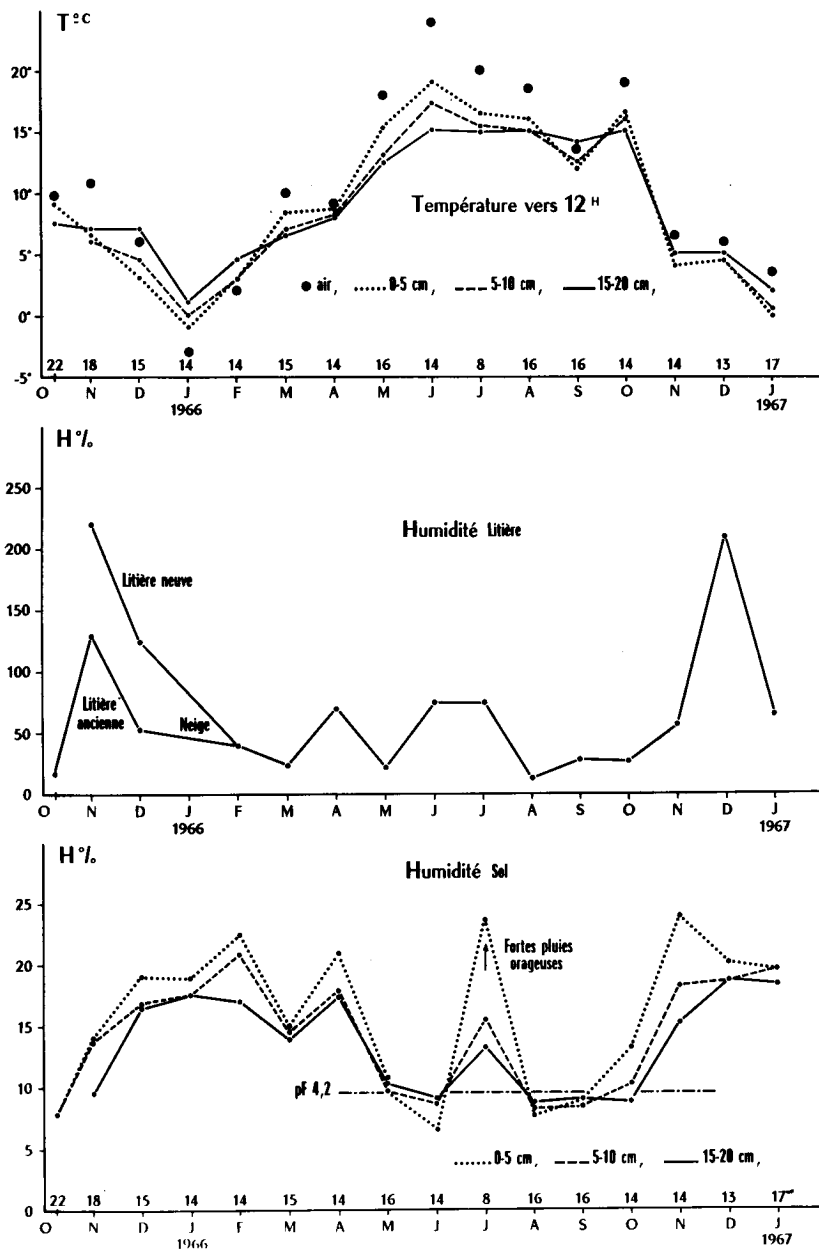


Fig. 2. — Humidité, Température et Dégagement de CO₂ in situ du sol brun calcaire de Bondy en 1966 (mesures mensuelles faites vers midi).

BIBLIOGRAPHIE

- ABROSIMOVA (L.N.), REVUT (I.B.), 1964. — Biological activity and the composition of soil air in the plow layer. *Soviet Soil Sci.*, 7, 682-691.
- ALIYEV (S.A.), 1966. — Seasonal phases of biological processes in soils of the Azerbaydzhan SSR. *Soviet Soil Sci.*, 3, 306-314.
- ARMSTRONG (W.), 1966. — Oxygen diffusion from the roots of some British bog plants. *Nature*, Lond., 204, 4 960, 801-802.
- ARMSTRONG (W.), 1967. — The relationship between oxidation-reduction potentials and oxygen-diffusion levels in some waterlogged organic soils. *J. of Soil Sci.*, 18, 1, 27-34.
- BACHELIER (G.), 1964. — Observations sur la dynamique d'un sol brun calcaire. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, II, 1, 13-28.
- BACHELIER (G.), 1966. — Mesure in situ du dégagement de gaz carbonique des sols à l'aide de l'ampoule de Koepef (Notice technique). *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, IV, 2, 93-97.
- BERGQUIST (M.O.), 1964. — Absorption of carbon dioxide by plant roots. *Botaniska notiser*, 117, 3, 249-261.
- BOUSSINGAULT (J.B.), LEWY (), 1853. — Mémoire sur la composition de l'air confiné dans la terre végétale. *Ann. Chim. Phys.*, 37, 5-50.
- DU PLESSIS (M.C.F.), KROONTJE (W.), 1966. — The effect of carbon dioxide on chemisorption of ammonia by base saturated clays. *Proc. Sol Sci. Soc. Amér.*, 30, 693-696.
- GEISLER (G.), 1967. — Interactive effects of CO₂ and O₂ in soil on root and top growth of barley and peas. *Pl. Physiol.*, 42, 305-307.
- GIOVANNONZI-SERMANNI (G.), CACCIARI (I.), 1967. — Increase of production by means of CO₂ applied to the roots. *Agrochimica*, 11, 124-131.
- GRABLE (A.R.), 1966. — Soil aeration and plant growth. *Adv. in Agron.*, 18, 57-106.
- GREENWOOD (D.J.), 1961. — The effect of oxygen concentration on the decomposition of organic materials in soil. *Plant and Soil*, XIV, 4, 360-376.
- HULPOI (N.), DAKESIAN (S.), ELIADE (Gh.), GHINEA (L.), 1966. — Beziehungen zwischen der Durchlüftung und der Nitrifikationsfähigkeit des Bodens. *Z. Pfl-Ernähr., Düng., Bodenkunde*, 113, 1, 45-55.
- KICK (H.), SAUERBECK (D.), FUHR (F.), 1965. — Die Aufnahme von Kohlendioxid durch die Pflanzenwurzel. III. Untersuchungen über die mengenmässige Bedeutung. *Plant and Soil*, XXIII, 2, 181-191.
- KRISTESEN (K.J.), ENOCH (H.), 1964. — Soil air composition and oxygen diffusion rate in soil columns at different heights above a water table. *Trans. 8 th. int. Congr. Soil Sci.*, 2, 159-170.
- KURSANOV (A.L.), 1957. — The root system as an organ of metabolism. *Int. Conf. Radioisotopes in Sci. res.*, 24, 128, 12 p. (UNESCO).
- LABANAUSKAS (C.K.), LETEY (J.), STOLZY (L.H.), VALORAS (N.), 1966. — Effects of soil oxygen and irrigation on the accumulation of macro and micro-nutrients in citrus seedlings (*Citrus sinensis* var. Osbeck). *Soil Sci.*, 101, 5, 378-384.
- LUNDEGARDH (H.), 1927. — Carbon dioxide evolution of soil and crop growth. *Soil Sci.*, 23, 417-453.
- MOUREAUX (C.), 1959. — Fixation de gaz carbonique par le sol. *Mém. Inst. Rech. Sci. Madagascar*, IX, D, 109-120.
- POEL (L.W.), 1953. — Carbon dioxide fixation by barley roots. *J. exp. Bot.*, 4, 11, 157-163.
- QUASTEL (J.H.), 1965. — Soil metabolism. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 16, 217-240.
- RUSSEL (E.J.), APPLEYARD (A.), 1915. — The atmosphere of the soil : its composition and the causes of variation. *J. agric. Sci.*, VII, I, 1-48.
- STOLZY (L.H.), LETEY (J.), SZUSZKIEWICZ (T.E.), LUNT (O.R.), 1961. — Root growth and diffusion rates as functions of oxygen concentration *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 25, 6, 463-467.
- TANAKA (A.), NAVASERO (S.A.), 1967. — Carbon dioxide and organic acids in relation to the growth of rice. *Soil Sci. and Plant Nutr.* (Nagoya, Japon), 13, 1, 25-30.
- VILAIN (M.), 1966. — L'aération du sol. *Bull. Ass. Fr. Et. Sol*, 6/7, 161-175.
- VILAIN (M.), DRUELLE (J.P.), 1967. — Extraction de petits échantillons de gaz du sol. Dosage par chromatographie. *Ann. agron.*, 18, 5, 507-528.
- YURKEVICH (I.D.), SMOLYAK (L.P.), 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.