

Comparaison d'une méthode de diffusion et d'une méthode géochimique pour estimer la production racinaire de CO₂

R. DURAND
N. BELLON *

RÉSUMÉ

La respiration racinaire de maïs cultivés en pot est estimée par deux méthodes faisant appel aux teneurs en carbone dans les phases gazeuses et liquides du sol. La première méthode utilise le profil de concentration en CO₂ dans le sol ; elle suppose que CO₂ respiré diffuse en phase gazeuse dans un système stratifié. La production de CO₂ peut être calculée si le système est en état stationnaire, et si le profil est imperméable aux gaz en profondeur. La deuxième méthode utilise la teneur en CO₂ de la phase gazeuse et la concentration de la solution du sol correspondante dans le même horizon. La production de CO₂ est calculée d'après la cinétique de neutralisation de CO₂ aqueux, en supposant que la réaction à l'interface gaz - solution n'est pas limitante. Les respirations obtenues par les deux méthodes sont du même ordre de grandeur, mais la méthode géochimique donne toujours des résultats légèrement supérieurs.

Mots-clés : respiration racinaire - système CO₂-H₂O - diffusion gazeuse - cinétique.

COMPARISON OF DIFFUSION AND GEOCHEMICAL METHODS TO ASSESS ROOT RESPIRATION

Root respiration of corn grown in pot is computed by using two methods, which take into account the carbon contents of gaseous and aqueous soil phases (Table II). The first method, the soil CO₂ profile method, calculates CO₂ diffusion out of a multilayer soil. The layers may have different depths. Each one has a determined CO₂ production and CO₂ diffusion coefficient. These properties may not change in any part of the layer and with time. The root CO₂ output may be calculated in steady-state conditions, and if the bottom layer is impervious to gas. The knowledge of the fraction of porosity available for gas is needed to apply these equations. The second method, the geochemical method, computes the carbon dioxide exchanges between the solution and the gas in a soil layer. The fluxes are obtained by using the kinetics of CO₂ hydration reactions. The first step of the reactions is CO₂ dissolution or degassing. The second step is taking place in solution : CO₂ enters in combination with H₂O or OH⁻. The kinetic constants of reactions in solution are known (table I), but not the kinetic constants of CO₂ dissolution or degassing. This geochemical method implies that the flux through the gas-liquid interface is faster than the reactions in solution. The thermodynamic driving

* I.N.R.A., BP 2078 - 06606 ANTIBES Cedex

force is the difference between the theoretical equilibrium pressure of CO_2 and measured $p\text{CO}_2$. In this case, the water content of soil is needed to calculate soil respiration. The results obtained with both methods are of the same order of magnitude (Table III), but the geochemical method always gives larger fluxes of root respiration than the soil CO_2 profile method.

Keywords : root respiration - CO_2 - H_2O system - gas diffusion - kinetics.

INTRODUCTION

La production de gaz carbonique dans le sol est un terme important dans le cycle global du carbone. L'émission de CO_2 résulte de la respiration des racines et des microorganismes ; elle dépend aussi, en milieu calcaire, des cycles de dissolution et de précipitation de la calcite. Les quantifications des rejets de carbone par les sols ont été réalisées par plusieurs méthodes (DE JONG *et al.*, 1979 ; GLINSKI et STEPNIIEWSKI, 1985) : la méthode de la chambre où CO_2 rejeté par le sol est retenu dans une enceinte, la méthode micrométéorologique qui mesure le gradient de concentration en CO_2 dans et au-dessus de la végétation, et la méthode du profil de concentration en CO_2 dans le sol. La méthode de la chambre et la méthode micrométéorologique peuvent donner des résultats éloignés de ceux obtenus par la méthode du profil de CO_2 dans le sol (DE JONG *et al.*, 1979). Une autre méthode a été proposée (KELLER *et al.*, 1987). Elle utilise la composition de la solution et du gaz du sol ; elle est fondée sur les cinétiques d'hydratation de CO_2 et de déshydratation de H_2CO_3 . La validation de cette dernière méthode a donc été testée, en comparaison avec la méthode du profil de CO_2 , dans des expériences de culture en laboratoire.

I - THÉORIE

1. Modèle fondé sur la diffusion en phase gazeuse dans un profil multicouche

Le modèle de calcul est adapté des modèles de Glinski et Stepniowski (1985) et de Jong et Schappert (1972). Il comprend trois hypothèses de base.

- Le substrat est constitué de plusieurs couches, qui ont des épaisseurs et des caractéristiques physiques différentes, mais qui ont chacune des propriétés homogènes.
- Il existe une couche imperméable à la base du profil qui empêche la diffusion en profondeur du gaz.
- La diffusion s'effectue à l'état stationnaire, ce qui implique qu'il n'y ait pas accumulation de CO_2 dans une strate, résultant d'une variation dans un espace de temps réduit de la production de CO_2 ou de la diffusion.

En un point donné du profil, la production de CO_2 est q_i mole. s^{-1} par m^3 de sol. La couche i a une épaisseur $h_i = z_i - z_{i-1}$ (Figure 1). Pour une surface unitaire, la production de la couche i est :

$$Q_i = q_i h_i \quad \text{en mole.m}^{-2}.\text{s}^{-1} \quad (\text{A1})$$

En un point de profondeur z , avec les hypothèses énoncées, le flux diffusif vers la surface est égal à la production de CO_2 entre les profondeurs z et z_n :

$$D_i \frac{\partial C_z}{\partial z} = (z_i - z) q_i + \sum_{j=i+1}^{j=n} h_j q_j \quad (\text{A2})$$

avec D_i coefficient de diffusion apparent dans la couche i , et C_z concentration en CO_2 dans l'air du sol en mole m^{-3} . Après intégration par rapport à z entre z_i et z_{i-1} , on obtient aux limites de la couche :

$$q_i = (C_i - C_{i-1}) \frac{2D_i}{h_i^2} - \frac{2}{h_i} \sum_{j=i+1}^{j=n} h_j q_j \quad (\text{A3})$$

La loi des gaz parfaits permet d'exprimer la concentration en CO_2 sous forme de pression partielle :

$$q_i = (P_i - P_{i-1}) \frac{2D_i}{RTh_i^2} - \frac{2}{h_i} \sum_{j=i+1}^{j=n} h_j q_j \quad (\text{A4})$$

avec R constante des gaz parfaits, et T température absolue. Dans cette équation, le coefficient de diffusion apparent peut être exprimé en fonction de D_T le coefficient de diffusion de CO_2 dans l'air à la température T , suivant la relation empirique :

$$D_i = a \varepsilon_i^b D_T \quad (\text{A5})$$

avec ε_i porosité à l'air de la couche i , a et b paramètres d'ajustement pour un milieu poreux. Les valeurs employées pour ces paramètres de structure sont $a=0,6$ et $b=1$ (PENMAN, 1940). Le coefficient D_T est obtenu à partir de la valeur du coefficient de diffusion D_0 à $273,15^\circ\text{K}$, d'après la corrélation empirique de Fuller, Schettler et Giddings (REID *et al.*, 1977) :

$$D_T = D_0 \left(\frac{T}{273} \right)^{1,75} \quad (\text{A6})$$

D'où l'expression du coefficient de diffusion qui est utilisée dans l'équation A4 de production de CO_2 :

$$D_T = 0,6 \varepsilon_i \left(\frac{T}{273} \right)^{1,75} D_0 \quad (\text{A7})$$

La valeur du coefficient de diffusion de la loi de Fick D_0 , proche de celle du coefficient de diffusion binaire CO_2 - air pour les faibles teneurs en CO_2 (JAYNES et ROGOWSKI, 1984) est $1,39 \cdot 10^{-5} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (MARRERO et MASON, 1972 ; PRITCHARD et CURRIE, 1982).

La production totale du sol par unité de surface est donnée par :

$$Q = \sum_{j=1}^{j=n} h_j q_j \quad \text{en mole} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \quad (\text{A8})$$

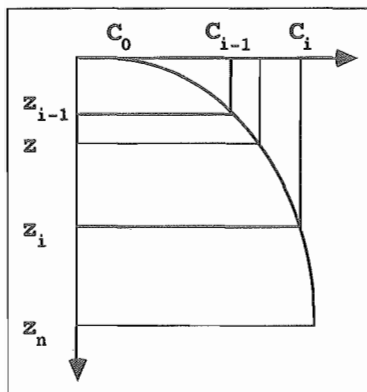


Figure 1 : Schéma du profil de concentration en CO_2 dans un sol multicouche.

Profile of CO_2 content in a multilayered soil.

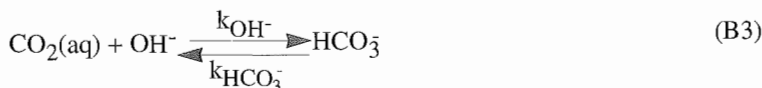
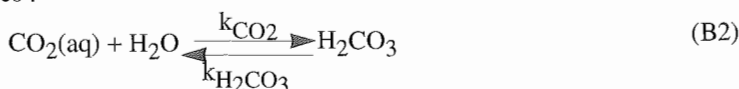
2. Modèle fondé sur la cinétique chimique

L'établissement de ce modèle utilise en partie les développements de KELLER *et al.* (1987), et il repose sur la synthèse de Kern (1960) relative aux cinétiques d'hydratation de CO_2 .

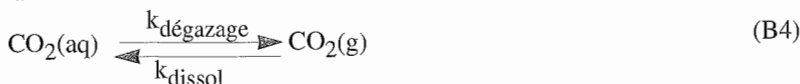
Le gaz carbonique se trouve sous deux formes en solution : $\text{CO}_2(\text{aq})$ et H_2CO_3 . La concentration analytique totale de CO_2 dissous est (STUMM et MORGAN, 1970) :

$$[\text{H}_2\text{CO}_3^*] = [\text{CO}_2(\text{aq})] + [\text{H}_2\text{CO}_3] \quad (\text{B1})$$

L'hydratation et la neutralisation de $\text{CO}_2(\text{aq})$ se produisent selon les deux voies suivantes :



Les deux réactions précédentes se produisent en solution. $\text{CO}_2(\text{aq})$ subit également des échanges avec la phase gazeuse. La réaction cinétique à l'interface gaz - solution est la suivante :



Le flux de variation de $\text{CO}_2(\text{aq})$ est la somme des flux des trois réactions précédentes :

$$J = - [\text{CO}_2(\text{aq})] \{ k_{\text{CO}_2} [\text{H}_2\text{O}] + k_{\text{OH}^-} [\text{OH}^-] + k_{\text{dégazage}} \} + k_{\text{H}_2\text{CO}_3} [\text{H}_2\text{CO}_3] + k_{\text{HCO}_3^-} [\text{HCO}_3^-] + k_{\text{dissol}} p\text{CO}_2(\text{g}) \quad (\text{B5})$$

Ce flux est positif pour la formation de $\text{CO}_2(\text{aq})$ à partir de H_2CO_3 , HCO_3^- , et $\text{CO}_2(\text{g})$.

La variation de $[\text{CO}_2(\text{aq})]$ est limitée soit par la réaction de dissolution - évaporation (équation B4), soit par les réactions en solution (équations B2 et B3). La cinétique de dissolution - évaporation de CO_2 n'est connue que pour quelques configurations

géométriques simples de l'interface gaz - solution (ROQUES, 1964). En l'absence de données sur la cinétique à l'interface dans un milieu poreux, il est supposé que cette réaction n'est pas limitante. Cette hypothèse peut se justifier par le grand développement de l'interface vis-à-vis du volume des phases gazeuse et liquide. Dans ces conditions, les réactions directes et inverses de B4 sont égales, et le flux de dégazage de la solution est égal au flux de formation de $\text{CO}_2(\text{aq})$ à partir de H_2CO_3 et HCO_3^- . L'équation B5 se simplifie :

$$J = -[\text{CO}_2(\text{aq})] \{ k_{\text{CO}_2}[\text{H}_2\text{O}] + k_{\text{OH}^-}[\text{OH}^-] + k_{\text{H}_2\text{CO}_3}[\text{H}_2\text{CO}_3] + k_{\text{HCO}_3^-}[\text{HCO}_3^-] \} \quad (\text{B6})$$

La teneur en $\text{CO}_2(\text{aq})$ peut alors être exprimée en fonction de $p\text{CO}_2$ en phase gazeuse d'après B1 et la loi de Henry :

$$[\text{CO}_2(\text{aq})] = p\text{CO}_2 K_H \left\{ 1 - \frac{K_1}{K_W} \frac{k_{\text{CO}_2}}{k_{\text{H}_2\text{CO}_3}} \frac{k_{\text{HCO}_3^-}}{k_{\text{OH}^-}} \right\} \quad (\text{B7})$$

avec $K_1 = (\text{H}^+) (\text{HCO}_3^-) / (\text{H}_2\text{CO}_3^*)$ et $K_W = (\text{H}^+) (\text{OH}^-)$. On obtient d'après les valeurs des constantes à 25°C (Tableau I) :

$$[\text{CO}_2(\text{aq})] = \frac{633}{634} K_H p\text{CO}_2 \quad (\text{B8})$$

La relation simplifiée B9 est utilisée par la suite dans l'équation B6

$$[\text{CO}_2(\text{aq})] \approx K_H p\text{CO}_2 \quad (\text{B9})$$

d'où

$$J = -K_H p\text{CO}_2 \{ k_{\text{CO}_2}[\text{H}_2\text{O}] + k_{\text{OH}^-}[\text{OH}^-] + k_{\text{H}_2\text{CO}_3}[\text{H}_2\text{CO}_3] + k_{\text{HCO}_3^-}[\text{HCO}_3^-] \} \quad (\text{B10})$$

La pression partielle équilibrante de la solution $p\text{CO}_{2\text{eq}}$ correspond à une vitesse égale des réactions directes et inverses de B2 et B3. On peut alors écrire les deux relations suivantes :

$$k_{\text{CO}_2} K_H p\text{CO}_{2\text{eq}} [\text{H}_2\text{O}] = k_{\text{H}_2\text{CO}_3} [\text{H}_2\text{CO}_3] \quad (\text{B11})$$

$$k_{\text{OH}^-} K_H p\text{CO}_{2\text{eq}} [\text{OH}^-] = k_{\text{HCO}_3^-} [\text{HCO}_3^-] \quad (\text{B12})$$

En reportant dans l'équation B10, on obtient l'équation du flux de dégazage de la solution :

$$J = - \{ p\text{CO}_{2\text{eq}} - p\text{CO}_2 \} K_H \{ k_{\text{CO}_2}[\text{H}_2\text{O}] + k_{\text{OH}^-} - K_W 10^{\text{pH}} \} \quad (\text{B13})$$

Les valeurs des constantes de cette équation varient en fonction de la température (Tableau I).

L'équation du flux de dégazage B13 fait apparaître comme premier terme une force thermodynamique de transfert, qui est la différence entre la pression partielle équilibrante de la solution et la pression partielle dans la phase gazeuse. Cette expression de la force est différente de celle obtenue à partir de la thermodynamique des processus irréversibles (MIGNARD et BÉNET, 1986). Le deuxième terme de l'équation du flux varie en fonction de la température, du pH, et de l'activité de l'eau. L'activité de l'eau étant liée à son potentiel (BOURRIÉ et PÉDRO, 1979), le dégazage de la solution sera influencé par la structure du milieu poreux.

Tableau I : Équations exprimant la variation en fonction de la température, des constantes thermodynamiques et cinétiques du système CO₂-H₂O.*The effect of temperature on the ionization and kinetic constants in CO₂-H₂O system.*

Constantes thermodynamiques $\log K_W = 6,0875 - 4470,99/T - 0,01706 T$ $\log K_H = -13,417 + 2299,6/T + 0,01422 T$ $\log K_1 = 14,8435 - 3404,71/T - 0,03279 T$	références Harned et Owen (1958) Harned et Davis (1943) Harned et Davis (1943)
Constantes cinétiques $\log k_{CO_2} = 329,85 - 110,541 \log T - 17625,4/T$ $\log k_{OH^-} = 13,635 - 2895/T$	Pinsent <i>et al.</i> (1956) Pinsent <i>et al.</i> (1956)

L'équation B13 donne le flux dégagé correspondant à un volume unitaire de solution. Pour connaître la production de CO₂ dans un sol, il suffit de multiplier le flux d'un volume d'eau unitaire par la quantité d'eau contenue dans une surface unitaire de sol.

II - MATÉRIELS ET MÉTHODES

Des maïs sont cultivés en pots sur sable siliceux et sur sable calcaire. Les plants sont élevés en serre jusqu'au stade 5 à 6 feuilles. A ce stade, les expérimentations sont conduites en laboratoire pendant deux semaines. A la fin des expériences, les maïs atteignent le stade 9-10 feuilles. Différentes expériences sont réalisées successivement avec des plants différents. Chaque expérience avec de nouveaux plants est indiquée par une lettre différente. L'éclairage sur les feuilles supérieures est de 100 $\mu\text{Einstein}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ pendant 12 heures par jour pour les expériences D et E, de 400 à 900 $\mu\text{Einstein}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ pendant 9 heures par jour pour les expériences F, G, H et I. Les pots sont alimentés avec des solutions nutritives contenant Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, K⁺, NO₃⁻, SO₄⁼, P, et des oligo-éléments. Les concentrations en éléments majeurs varient de 0,1 à 3 eq.m⁻³. Les pots ont une section de 80 cm², et une profondeur de 10 cm. L'arrosage est effectué en continu, avec un flux de 3,1.10⁻⁸ à 3,6.10⁻⁸ m³.s⁻¹. Ce flux est compris entre 30 et 40 % du volume poral total par heure, et il représente de 20 à 100 fois l'évapotranspiration du maïs. La fourniture de solution nutritive est poursuivie pendant les prélèvements de gaz. Il s'établit un régime stationnaire.

Les gaz sont prélevés à trois profondeurs : 4 ou 5 cm, 7 cm et 10 cm, à l'aide de dispositifs en tube inox installés avant plantation des maïs. Ces tubes, de diamètre "1/8", possèdent à leur partie inférieure des chambres d'accumulation d'environ 1/4 cm³. Le tube est fermé à la partie supérieure par un septum. Des prélèvements de 1 cm³ sont effectués successivement à chaque profondeur avec des seringues, pour analyse par chromatographie avec un catharomètre.

Les pH des solutions sont mesurés à intervalles de 10 ou 15 mn sur chaque voie à l'aide d'électrodes implantées en permanence dans des cellules. Les solutions de drainage sont prélevées pour analyse à la sortie des cellules de mesure du pH. Les

carbonates sont obtenus d'après la mesure de l'alcalinité. Les activités ioniques et les équilibres entre les phases sont calculés sur un microordinateur Macintosh avec un logiciel écrit en Basic compilé.

III - RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Les teneurs en CO_2 de l'atmosphère du sol sont environ deux fois plus élevées sous les maïs cultivés en milieu siliceux qu'en milieu calcaire (Tableau II). Ceci résulte d'une activité métabolique plus forte, liée à un développement plus important des plants de maïs.

La solution nutritive étant fournie en continu, il s'établit un régime stationnaire entre la production racinaire continue de CO_2 et la sortie de carbone hors du dispositif expérimental sous forme gazeuse ou liquide. La variation cyclique journalière de la respiration ne perturbe pas le système, car les augmentations et diminutions de production sont lentes. De plus, l'exportation sous forme liquide est faible : elle ne représente que 1 à 15 % de l'effusion gazeuse.

Les teneurs en CO_2 montrent en général une diminution de la concentration depuis la profondeur jusqu'à la surface. Le gradient résulte d'une diffusion non limitante vers la surface. Les hypothèses nécessaires à l'application du modèle de diffusion sont satisfaites. Les pressions partielles équilibrantes, calculées à partir des compositions des solutions de drainage, sont en moyenne 3 à 4 fois plus élevées que les $p\text{CO}_2$ mesurées en profondeur. Il apparaît donc un gradient de pression partielle qui assure le dégazage de la solution, et qui permet l'application du modèle de cinétique chimique.

La production est calculée pour une plante, d'après la surface des pots et le nombre de plantes par pot (Tableau III). La production est légèrement plus élevée en milieu siliceux qu'en milieu calcaire. Les valeurs sont soit comparables aux intensités de la respiration racinaire du maïs publiées antérieurement (HARRIS et VAN BAVEL, 1957 ; MASSIMINO *et al.*, 1980, 1981), soit 10 fois plus fortes (HALLER et STOLP, 1985).

Les valeurs de production obtenues par les deux modèles sont du même ordre de grandeur, mais elles présentent un écart systématique. En milieu siliceux, le rapport entre la production d'après les modèles de cinétique et de diffusion est en moyenne de 1,5 ; le rapport est de 1,8 en milieu calcaire. La divergence peut provenir de la validité des modèles ou de la précision des données.

Le modèle de cinétique chimique a été simplifié en considérant que la réaction à l'interface gaz - liquide n'était pas limitante, mais il est possible que le changement de phase ralentisse le dégazage de la solution. La conséquence serait une augmentation de la concentration en $\text{CO}_2(\text{aq})$, et donc de la pression partielle équilibrante. La production de CO_2 serait surestimée. Les valeurs des coefficients cinétiques, qui ont été établies par une méthode manométrique, sont corrigées pour limiter l'effet de la diffusion à travers l'interface gaz - liquide (PINSENT et ROUGHTON, 1951). La correction reste inférieure à 10 %. Or, une diminution de 10 % des coefficients cinétiques, qui tiendrait compte du changement de phase, ne permet d'expliquer que partiellement les différences expérimentales entre les deux méthodes.

L'application du modèle de diffusion multicouche nécessite la connaissance de la

Tableau II : Teneurs en CO₂ mesurées (en atm) dans l'atmosphère du substrat et pressions partielles équilibrantes calculées d'après la composition de la solution.
CO₂ contents (in atm) measured in the atmosphère of the growing media and calculated contents of CO₂ in equilibrium with the solutions.

Observations		maïs cultivé sur silice					maïs cultivé sur calcaire				
		pH	pCO ₂ mesuré			pCO ₂ équil.	pH	pCO ₂ mesuré			pCO ₂ équil.
			4/5 cm	7 cm	10 cm			4/5 cm	7 cm	10 cm	
D1	2	6,13	1,6.10 ⁻⁴	7,9.10 ⁻⁴	9,0.10 ⁻⁴	9,0.10 ⁻³	6,99	1,8.10 ⁻³	6,0.10 ⁻⁴	6,0.10 ⁻⁴	8,2.10 ⁻³
D3	moy	6,12	2,8.10 ⁻³	3,0.10 ⁻³	2,4.10 ⁻³	6,1.10 ⁻³	7,23	1,1.10 ⁻³	9,8.10 ⁻⁴	8,5.10 ⁻⁴	4,1.10 ⁻³
E1	moy	6,07	9,0.10 ⁻⁴	9,0.10 ⁻⁴	1,0.10 ⁻³	3,1.10 ⁻³	7,20	9,0.10 ⁻⁴	9,0.10 ⁻⁴	9,0.10 ⁻⁴	2,4.10 ⁻³
E2	5	5,65	8,3.10 ⁻⁴	9,0.10 ⁻⁴	8,7.10 ⁻⁴	8,7.10 ⁻⁴	7,50	8,0.10 ⁻⁴	9,0.10 ⁻⁴	1,1.10 ⁻³	1,5.10 ⁻³
E2	6	5,63	8,9.10 ⁻⁴	8,8.10 ⁻⁴	1,1.10 ⁻³	1,1.10 ⁻³	7,34	7,8.10 ⁻⁴	7,5.10 ⁻⁴	7,9.10 ⁻⁴	2,2.10 ⁻³
E3	2	6,39	3,7.10 ⁻³	4,0.10 ⁻³	5,6.10 ⁻³	5,3.10 ⁻³	7,12	2,1.10 ⁻³	2,5.10 ⁻³	2,7.10 ⁻³	5,5.10 ⁻³
E3	3	6,34	3,0.10 ⁻³	3,3.10 ⁻³	4,8.10 ⁻³	3,0.10 ⁻³	7,12	2,0.10 ⁻³	2,4.10 ⁻³	2,2.10 ⁻³	5,2.10 ⁻³
E3	4		2,2.10 ⁻³	2,3.10 ⁻³	2,3.10 ⁻³	2,7.10 ⁻³		1,7.10 ⁻³	1,7.10 ⁻³	1,9.10 ⁻³	4,8.10 ⁻³
E4	1	5,41	2,1.10 ⁻³	2,4.10 ⁻³			7,36	1,5.10 ⁻³	1,5.10 ⁻³	1,7.10 ⁻³	3,0.10 ⁻³
E4	2	5,43	1,9.10 ⁻³	2,0.10 ⁻³	1,0.10 ⁻²	2,1.10 ⁻²	7,35	1,5.10 ⁻³	1,5.10 ⁻³	1,7.10 ⁻³	3,0.10 ⁻³
E4	3		2,5.10 ⁻³	5,4.10 ⁻³			7,34	1,7.10 ⁻³	1,7.10 ⁻³	2,0.10 ⁻³	3,0.10 ⁻³
E4	4	5,94	2,6.10 ⁻³	4,0.10 ⁻³	1,1.10 ⁻²	3,6.10 ⁻²	7,32	1,7.10 ⁻³	1,7.10 ⁻³	2,0.10 ⁻³	2,9.10 ⁻³
E4	5	6,09	5,9.10 ⁻³	6,4.10 ⁻³	9,0.10 ⁻³	2,3.10 ⁻²	7,21	1,8.10 ⁻³	1,9.10 ⁻³	2,3.10 ⁻³	3,9.10 ⁻³
F	1	6,03	9,9.10 ⁻⁴	8,4.10 ⁻⁴	2,2.10 ⁻³	1,0.10 ⁻²	7,22	5,3.10 ⁻⁴	8,0.10 ⁻⁴	1,2.10 ⁻³	3,3.10 ⁻³
F	3	5,94	1,3.10 ⁻³	1,2.10 ⁻³		7,6.10 ⁻³	6,99	1,5.10 ⁻³	1,2.10 ⁻³		6,7.10 ⁻³
F	5	6,12	1,5.10 ⁻³	2,0.10 ⁻³		4,5.10 ⁻³	7,07	9,0.10 ⁻⁴	1,2.10 ⁻³		5,3.10 ⁻³
F	6	5,86	1,7.10 ⁻³	2,1.10 ⁻³		1,4.10 ⁻²	7,00	9,9.10 ⁻⁴	1,2.10 ⁻³		7,4.10 ⁻³
F	8	5,92	1,7.10 ⁻³	2,5.10 ⁻³		7,0.10 ⁻³	7,04	9,8.10 ⁻⁴	1,3.10 ⁻³		6,7.10 ⁻³
F	9	5,84	1,5.10 ⁻³	1,7.10 ⁻³		1,0.10 ⁻²	7,20	9,5.10 ⁻⁴	1,6.10 ⁻³		4,2.10 ⁻³
F	9		1,3.10 ⁻³			1,2.10 ⁻²					
G	1	5,70		3,0.10 ⁻³	2,1.10 ⁻³	1,6.10 ⁻²	7,54	1,2.10 ⁻³	1,4.10 ⁻³	2,0.10 ⁻³	2,7.10 ⁻³
G	2	5,51	2,0.10 ⁻³	2,8.10 ⁻³	2,8.10 ⁻³	1,4.10 ⁻²	7,55	1,3.10 ⁻³	1,5.10 ⁻³	2,0.10 ⁻³	2,6.10 ⁻³
G	8	5,56	1,8.10 ⁻³	2,8.10 ⁻³		1,9.10 ⁻²	7,58	1,7.10 ⁻³	1,5.10 ⁻³	1,9.10 ⁻³	2,3.10 ⁻³
G	9	5,51			2,8.10 ⁻³	9,9.10 ⁻³					
G	14	5,31	1,9.10 ⁻³	2,6.10 ⁻³	2,6.10 ⁻³	1,0.10 ⁻²	7,57	1,1.10 ⁻³	1,5.10 ⁻³	1,9.10 ⁻³	2,3.10 ⁻³
G	17	5,46	2,0.10 ⁻³	2,7.10 ⁻³		9,2.10 ⁻³	7,61	1,3.10 ⁻³	1,6.10 ⁻³	2,1.10 ⁻³	2,1.10 ⁻³
H	1	6,18	1,1.10 ⁻³	1,3.10 ⁻³	1,3.10 ⁻³	4,9.10 ⁻³	7,79	7,5.10 ⁻⁴	8,3.10 ⁻⁴	1,0.10 ⁻³	1,1.10 ⁻³
H	2	6,23	1,5.10 ⁻³	1,6.10 ⁻³	1,6.10 ⁻³	3,1.10 ⁻³	7,67	8,7.10 ⁻⁴	8,9.10 ⁻⁴	9,0.10 ⁻⁴	1,4.10 ⁻³
H	4	6,28	1,5.10 ⁻³			3,5.10 ⁻³	7,57	7,9.10 ⁻⁴			1,8.10 ⁻³
H	5	6,42		1,7.10 ⁻³	2,2.10 ⁻³	7,8.10 ⁻³	7,26		1,2.10 ⁻³	1,2.10 ⁻³	5,1.10 ⁻³
H	7	6,21	1,5.10 ⁻³	1,8.10 ⁻³	2,0.10 ⁻²	1,1.10 ⁻²	7,33	8,5.10 ⁻⁴	1,1.10 ⁻³	1,3.10 ⁻³	4,1.10 ⁻³
H	8	6,30			2,3.10 ⁻³	1,1.10 ⁻²	7,27		1,2.10 ⁻³		5,0.10 ⁻³
H	11	6,01	1,2.10 ⁻³	1,7.10 ⁻³	2,1.10 ⁻³	5,0.10 ⁻³	7,39	6,3.10 ⁻⁴	8,8.10 ⁻⁴	1,2.10 ⁻³	2,7.10 ⁻³
H	13b		1,8.10 ⁻³	2,0.10 ⁻³	2,4.10 ⁻³	1,1.10 ⁻²		9,2.10 ⁻⁴	1,2.10 ⁻⁴	1,5.10 ⁻³	5,9.10 ⁻³
H	17b		1,2.10 ⁻³	1,2.10 ⁻³	1,4.10 ⁻³	8,1.10 ⁻³		7,0.10 ⁻⁴	7,6.10 ⁻⁴	9,5.10 ⁻⁴	3,3.10 ⁻³
H	19	6,19	1,7.10 ⁻³	1,9.10 ⁻³	2,3.10 ⁻³	1,3.10 ⁻²	7,19	1,1.10 ⁻³	1,4.10 ⁻³	1,8.10 ⁻³	6,3.10 ⁻³
H	22b		1,5.10 ⁻³	1,7.10 ⁻³	2,2.10 ⁻³	1,6.10 ⁻²		1,0.10 ⁻³	1,3.10 ⁻³	1,8.10 ⁻³	7,5.10 ⁻³
H	23	6,06	1,9.10 ⁻³	2,0.10 ⁻³	2,5.10 ⁻³	2,4.10 ⁻²	7,04	1,3.10 ⁻³	1,7.10 ⁻³	2,2.10 ⁻³	1,0.10 ⁻²
H	24	6,15	1,5.10 ⁻³	1,7.10 ⁻³	2,9.10 ⁻³	1,6.10 ⁻²	7,10	8,7.10 ⁻⁴	1,2.10 ⁻³	1,6.10 ⁻³	8,6.10 ⁻³
H	25	6,21	2,2.10 ⁻³	2,6.10 ⁻³	3,4.10 ⁻³	2,1.10 ⁻²	7,01	1,3.10 ⁻³	1,8.10 ⁻³		1,2.10 ⁻²
I	7	6,19	1,6.10 ⁻³	2,6.10 ⁻³	3,2.10 ⁻³	3,5.10 ⁻³	7,46	1,0.10 ⁻³			2,1.10 ⁻³
I	8	6,22	2,0.10 ⁻³			1,2.10 ⁻²					
I	9	6,07	1,6.10 ⁻³	2,0.10 ⁻³		8,0.10 ⁻³	7,40	8,0.10 ⁻⁴	1,0.10 ⁻³		2,2.10 ⁻³
I	13	6,15	1,6.10 ⁻³	2,6.10 ⁻³		7,5.10 ⁻³	7,39	8,0.10 ⁻⁴	1,0.10 ⁻³	1,3.10 ⁻³	2,8.10 ⁻³
	moy		1,8.10 ⁻³	2,3.10 ⁻³	3,1.10 ⁻³	1,1.10 ⁻²		1,2.10 ⁻³	1,3.10 ⁻³	1,6.10 ⁻³	4,3.10 ⁻³

Tableau III : Comparaison des productions de CO₂ (en mole·s⁻¹ par plant) calculées d'après le modèle de diffusion en système muticouche (Q) et le modèle de cinétique chimique (J).

Comparison of CO₂ evolution (in mole·s⁻¹ per seedling) computed with the multilayer profile diffusion model (Q) and the chemical kinetic model (J).

Observations	maïs cultivé sur silice			maïs cultivé sur calcaire		
	Q	J	J/Q	Q	J	J/Q
D1	2					
D3	moy	2,46.10 ⁻⁷	1,94.10 ⁻⁷	2,36.10 ⁻⁷	3,23.10 ⁻⁷	1,4
E1	moy	6,70.10 ⁻⁸	9,25.10 ⁻⁸	9,29.10 ⁻⁸	9,35.10 ⁻⁸	1,0
E2	5	5,29.10 ⁻⁸	6,27.10 ⁻⁸	6,41.10 ⁻⁸	7,98.10 ⁻⁸	1,2
E2	6	7,05.10 ⁻⁸		5,45.10 ⁻⁸	2,33.10 ⁻⁸	0,4
E3	2	3,89.10 ⁻⁷		5,52.10 ⁻⁸	9,08.10 ⁻⁸	1,6
E3	3	3,12.10 ⁻⁷		1,72.10 ⁻⁷	1,14.10 ⁻⁷	0,7
E3	4	1,96.10 ⁻⁷	8,10.10 ⁻⁹	1,53.10 ⁻⁷	1,20.10 ⁻⁷	0,8
E4	1	1,76.10 ⁻⁷		1,56.10 ⁻⁷	1,18.10 ⁻⁷	0,8
E4	2	4,06.10 ⁻⁷	2,81.10 ⁻⁷	1,35.10 ⁻⁷	6,64.10 ⁻⁸	0,5
E4	3	8,10.10 ⁻⁸		1,35.10 ⁻⁷	6,58.10 ⁻⁸	0,5
E4	4	3,73.10 ⁻⁷	6,01.10 ⁻⁷	1,60.10 ⁻⁷	4,84.10 ⁻⁸	0,3
E4	5	3,73.10 ⁻⁷	6,01.10 ⁻⁷	1,60.10 ⁻⁷	4,10.10 ⁻⁸	0,3
E4	5	6,42.10 ⁻⁷	3,68.10 ⁻⁷	1,68.10 ⁻⁷	7,44.10 ⁻⁸	0,4
F	1	1,35.10 ⁻⁷	2,01.10 ⁻⁷	1,68.10 ⁻⁷	7,44.10 ⁻⁸	0,4
F	2	1,35.10 ⁻⁷		3,32.10 ⁻⁸	9,63.10 ⁻⁸	2,9
F	3	1,41.10 ⁻⁷	2,00.10 ⁻⁷	1,67.10 ⁻⁷		
F	4	1,64.10 ⁻⁷		6,53.10 ⁻⁸	3,14.10 ⁻⁷	4,8
F	5	1,55.10 ⁻⁷	1,08.10 ⁻⁷	8,29.10 ⁻⁸		
F	6	1,55.10 ⁻⁷	3,78.10 ⁻⁷	7,76.10 ⁻⁸	2,28.10 ⁻⁷	2,9
F	8		1,86.10 ⁻⁷	5,83.10 ⁻⁸	3,58.10 ⁻⁷	6,1
F	9		2,46.10 ⁻⁷		3,21.10 ⁻⁷	
F	9		2,87.10 ⁻⁷		1,79.10 ⁻⁷	
G	1		3,99.10 ⁻⁷	1,34.10 ⁻⁷	3,72.10 ⁻⁸	0,3
G	2	1,90.10 ⁻⁷	3,29.10 ⁻⁷	1,35.10 ⁻⁷	3,11.10 ⁻⁸	0,2
G	8	1,64.10 ⁻⁷	5,31.10 ⁻⁷	2,10.10 ⁻⁷	1,92.10 ⁻⁸	0,1
G	9		2,02.10 ⁻⁷	1,05.10 ⁻⁷	2,51.10 ⁻⁸	0,2
G	14	1,89.10 ⁻⁷	2,19.10 ⁻⁷	1,39.10 ⁻⁷		
G	17	2,02.10 ⁻⁷	2,62.10 ⁻⁷			
H	1	1,05.10 ⁻⁷	1,10.10 ⁻⁷	6,37.10 ⁻⁸	6,09.10 ⁻⁹	0,1
H	2	1,52.10 ⁻⁷	4,56.10 ⁻⁸			
H	5	1,80.10 ⁻⁷	2,05.10 ⁻⁷	7,58.10 ⁻⁸	3,30.10 ⁻⁸	0,4
H	7	1,63.10 ⁻⁷	2,96.10 ⁻⁷	4,85.10 ⁻⁸	2,63.10 ⁻⁷	5,4
H	8		2,98.10 ⁻⁷	6,87.10 ⁻⁸	1,82.10 ⁻⁷	2,6
H	11	1,11.10 ⁻⁷	9,31.10 ⁻⁸			
H	13b	2,00.10 ⁻⁷	3,06.10 ⁻⁷	4,37.10 ⁻⁸	9,55.10 ⁻⁸	2,2
H	17b	1,16.10 ⁻⁷	2,10.10 ⁻⁷	1,71.10 ⁻⁷	2,84.10 ⁻⁷	1,7
H	19	1,92.10 ⁻⁷	3,85.10 ⁻⁷	5,83.10 ⁻⁸	1,37.10 ⁻⁷	2,3
H	22b	1,76.10 ⁻⁷	4,70.10 ⁻⁷	1,03.10 ⁻⁷	2,88.10 ⁻⁷	2,8
H	23	2,18.10 ⁻⁷	7,50.10 ⁻⁷	1,00.10 ⁻⁷	3,50.10 ⁻⁷	3,5
H	24	1,78.10 ⁻⁷	4,22.10 ⁻⁷	1,34.10 ⁻⁷	5,23.10 ⁻⁷	3,9
H	25	2,56.10 ⁻⁷	6,11.10 ⁻⁷	8,17.10 ⁻⁸	4,16.10 ⁻⁷	5,1
I	7	1,54.10 ⁻⁷	1,21.10 ⁻⁸	1,17.10 ⁻⁷		
I	9	1,58.10 ⁻⁷	3,23.10 ⁻⁷	2,4		
I	13	1,37.10 ⁻⁷	2,97.10 ⁻⁷	5,73.10 ⁻⁸	9,54.10 ⁻⁸	1,7
I	13	1,37.10 ⁻⁷	2,97.10 ⁻⁷	6,86.10 ⁻⁸	6,07.10 ⁻⁸	0,9

porosité accessible à l'air. Le modèle de cinétique demande d'appréhender la quantité d'eau contenue dans le milieu. Une erreur possible de 10 % sur la porosité entraînerait, si la porosité était plus élevée, une augmentation de 9 à 11 % de la production de CO_2 d'après le modèle de diffusion, dans les conditions expérimentales utilisées ; à l'inverse, une diminution de la porosité de 10 % conduirait à une diminution de la production de 10 à 12 %. Avec le modèle de cinétique chimique, la variation de production serait proportionnelle à l'erreur sur la teneur en eau ; elle serait inférieure à 5 %. Les imprécisions sur les grandeurs physiques, porosité à l'air et teneur en eau, ne suffisent pas à expliquer les divergences. L'écart entre les résultats obtenus par les deux méthodes proviendrait de l'appréhension des valeurs de pCO_2 ; l'erreur serait due à la difficulté de prélever du gaz à trois profondeurs peu distinctes dans les pots de faible volume.

Si les productions de CO_2 estimées d'après les deux méthodes étaient semblables, il serait possible de calculer (KELLER *et al.*, 1987) les paramètres de la structure qui lient la diffusion et la porosité dans l'équation A5. Les rapports des valeurs de respiration de 1,5 à 1,8 obtenus d'après les deux méthodes, ne permettent pas d'accéder à ces paramètres.

En conclusion, la quantification de la production de CO_2 par le sol est délicate. La méthode du profil de concentration en CO_2 et la méthode cinétique donnent des résultats comparables, mais qui présentent des écarts. Une meilleure connaissance de la cinétique à l'interface gaz - solution permettrait peut-être d'améliorer la concordance des résultats. Les résultats obtenus avec les autres méthodes peuvent également donner des valeurs éloignées (DE JONG *et al.*, 1979). La production de CO_2 par le sol ne pourrait donc être obtenue que de façon approchée.

Remerciements : Les auteurs souhaitent exprimer leurs remerciements à G. Bourrié et P. Renault pour leur lecture critique du manuscrit.

Reçu pour publication : Janvier 1993

Accepté pour publication : Août 1993

BIBLIOGRAPHIE

- BOURRIÉ G. & PÉDRO G., 1979 - La notion de pF, sa signification physico-chimique et ses implications pédogénétiques. *Science du Sol*, 313-322
- GLINSKI J. & SPETNIEWSKI W., 1985 - Soil aeration and its role for plants. CRC Press, Boca Raton, Florida, 59-62.
- HALLER Th. & STOLP H., 1985 - Quantitative estimation of root exudation of maize plants. *Plant and Soil*, **86**, 207-216.
- HARNED H.S. & DAVIS R., 1943 - The ionization constant of carbonic acid in water

and the solubility of carbon dioxide in water and aqueous salt solutions from 0 to 50°C. *J. Amer. Chem. Soc.*, **65**, 2030-2037.

- HARNED H.S. & OWEN B.B., 1958 - *The physical chemistry of electrolytic solutions*. Amer. Chem. Soc. Monograph Series, Reinhold Publishing Corporation New York.
- HARRIS D.G. & BAVEL C.H.M., 1957 - Root respiration of tobacco, corn and cotton plants. *Agron. J.*, **49**, 182-184.
- JAYNES D.B. & ROGOWSKI A.S., 1983 - Applicability of Fick's law to gas diffusion. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **47**, 425-430.
- DE JONG E. & SCHAPPERT H.J.V., 1972 - Calculation of soil respiration and activity from CO₂ profiles in the soil. *Soil Sci.*, **113**, 328-333.
- DE JONG E., REDMANN R.E. & RIPLEY E.A., 1979 - A comparison of methods to measure soil respiration. *Soil Sci.*, **127**, 300-306.
- KELLER C., BOURRIE G. & VEDY J.C., 1987 - Formes de l'alcalinité dans les eaux gravitaires. Influence des métaux lourds contenus dans des composts. *Science du Sol*, **25**, 17-29.
- KERN D.M., 1960 - The hydration of carbon dioxide. *J. Chem. Education*, **37**, 14-23.
- MARRERO T.R. & MASON E.A., 1972 - Gaseous diffusion coefficients. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **1**, 3-118.
- MASSIMINO D., ANDRÉ M., RICHAUD C., DAGUENET A., MASSIMINO J. & VIVOLI J., 1980 - Évolution horaire au cours d'une journée normale de la photosynthèse, de la transpiration, de la respiration foliaire et racinaire et de la nutrition N.P.K. chez *Zea mays*. *Physiol. Plant.*, **48**, 512-518.
- MASSIMINO D., ANDRÉ M., RICHAUD C., DAGUENET A., MASSIMINO J. & VIVOLI J., 1981 - The effect of a day at low irradiance of a maize crop. I. Root respiration and uptake of N, P and K. *Physiol. Plant.*, **51**, 150-155.
- MIGNARD E. & BENET J.C., 1986 - Vérification expérimentale de la relation phénoménologique de dissolution d'un gaz dans l'eau d'un milieu poreux non saturé. Modèle de relation entre la phase gazeuse et la solution d'un sol non saturé. *C.R. Acad. Sci. Paris, série II*, **302**, 371-376.
- PENMAN H.L., 1940 - Gas and vapour movements in the soil. II The diffusion of carbon dioxide through porous solids. *J. agric. Sci.*, **30**, 570-581.
- PINSENT B.R.W., PEARSON L. & ROUGHTON F.J.W., 1956 - The kinetics of combination of carbon dioxide with hydroxide ions. *Trans. Faraday Soc.*, **52**, 1512-1520.
- PINSENT B.R.W. & ROUGHTON F.J.W., 1951 - The kinetics of combination of carbon dioxide with water and hydroxide ions. *Trans. Faraday Soc.*, **47**, 263-269
- PRITCHARD D.T. & CURRIE J.A., 1982 - Diffusion coefficients of carbon dioxide, nitrous oxide, ethylene and ethane in air and their measurement. *J. Soil Sci.*, **33**, 175-184.
- REID R.C., PRAUSNITZ J.M., SHERWOOD T.K., 1977 - *The properties of gases and liquids*. Third ed. McGraw-Hill New-York, 554 p.
- ROQUES H., 1964 - Contribution à l'étude statique et cinétique des systèmes gaz carbonique - eau - carbonate. *Ann. Spéléol.*, **19**, 255-484.
- STUMM W. & MORGAN J.J., 1970 - *Aquatic chemistry. An introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters*. Wiley-Interscience New-York, 118-160.

