

Modélisation des transferts gazeux dans le lit de semence : application au diagnostic des conditions d'hypoxie des semences de betterave sucrière (*Beta vulgaris* L.) pendant la germination. II. Résultats des simulations

Guy RICHARD & Jérôme GUÉRIF

I.N.R.A. Station de Science du Sol, Centre de Recherches d'Avignon, Domaine Saint-Paul, B.P. 91, F84140 Montfavet

RÉSUMÉ

Un modèle de transferts gazeux dans les couches de sol cultivé appliqué à l'étude des conditions d'hypoxie des semences de betterave sucrière a été proposé par les auteurs dans un article précédent (RICHARD & GUÉRIF, 1988). Ce modèle est ici appliqué à un profil avec ou sans croûte de battance et pour différentes caractéristiques physiques de la croûte. En dehors d'un lit de semence quasiment saturé, le risque d'apparition de conditions hypoxiques dans le lit de semence est lié à la formation d'une croûte de battance et à la présence d'une forte activité microbienne au sein du profil. L'activité microbienne étant fortement dépendante de la température, la concentration en oxygène ne risque d'être limitante qu'à certaines périodes de la journée. L'influence des caractéristiques structurales et hydriques du lit de semence et des couches sous-jacentes est discuté suivant que la croûte de battance est saturée, ou désaturée ou fissurée.

Mots clés additionnels : *Aération, concentration en oxygène, coefficient de diffusion, porosité libre à l'air, respiration microbienne du sol, croûte de battance.*

SUMMARY

*Modeling gas transfer in seed beds : diagnosis of hypoxia conditions for sugar beet seed (*Beta vulgaris* L.) during germination. II. Results of simulations.*

A model of gas transfer in cultivated soil layers, intended for the study of hypoxia conditions for sugar beet seeds, was presented in an earlier paper (RICHARD & GUÉRIF, 1988). This model was applied to a profile with or without surface crusting and for different characteristics of the crust. Neglecting the case where the seed bed is quasi-saturated, it appeared that the oxygen concentration became limiting in the seed bed only if a crust formed at the surface and for high microbial respiration. Soil microbial respiration, greatly depends on temperature and oxygen concentration may be limiting only during short periods in the day ; the consequences on the germination are not known. The role of the structural and water potential characteristics of the profile are discussed either for a saturated, unsaturated or cracked crust.

Additional key words : *Aeration, oxygen concentration, gaz diffusion, air-filled porosity, soil microbial respiration, crust.*

I. INTRODUCTION

Dans un article précédent (RICHARD & GUÉRIF, 1988), les auteurs ont proposé un modèle de transferts gazeux dans les couches de surface des sols cultivés fondé sur les lois de diffusion gazeuse (lois de FICK).

Une stratification horizontale du profil est proposée. Chaque strate — croûte de battance, lit de semence et couches sous-jacentes — est définie par ses paramètres de transfert en fonction de ses variables d'états. La fonction puits à oxygène « semence » est négligée par rapport à la fonction puits à oxygène « biomasse », qui

fait, elle, partie intégrante du modèle. Il s'agit maintenant, à partir de simulations, de mettre en évidence les caractéristiques du profil qui risquent d'entraîner une perturbation de la germination de la semence de betterave sucrière par une limitation de son alimentation en oxygène ; une situation est considérée comme critique si, partant d'une concentration en oxygène au niveau de la semence de 21 p. 100, celle-ci s'abaisse à moins de 10 p. 100 en moins de 24 heures.

II. DÉMARCHE ADOPTÉE ET OUTILS MATHÉMATIQUES UTILISÉS

On simule l'évolution possible de l'état structural et hydrique du profil en considérant successivement : l'absence d'une croûte de battance à la surface du profil, la présence d'une croûte de battance continue et saturée, puis le dessèchement de cette croûte qui est alors désaturée et/ou fissurée.

On commence par hiérarchiser les situations à partir d'une analyse en régime permanent à température constante, et avec une fonction puits indépendante de la concentration en oxygène. On obtient alors la gamme extrême de situations à risques. On étudie ensuite ces situations de façon plus précise en régime transitoire, en tenant compte des variations de la fonction puits à oxygène avec la concentration en oxygène et la température.

En dehors des situations pour lesquelles il existe une solution analytique simple (régime permanent, géométrie monodimensionnelle et fonction puits à oxygène constante), on utilise un logiciel de résolution numérique des systèmes d'équations différentielles ordinaires et/ou aux dérivées partielles (logiciel « FOR-SIM », CARVER *et al.*, 1979 ; LAFOLIE & CHAHUNEAU, 1985). La méthode employée est la méthode dite « des lignes » associée à une discrétisation de l'espace par différences finies.

La structure du profil adoptée est rappelée sur la figure 1. Les symboles utilisés sont présentés dans le tableau 1. Dans la suite du texte, l'indice *i* relatif à D_i , N_i

TABLEAU 1
Symboles utilisés.
Symbols used.

x	profondeur (cm)
r	rayon (cm)
t	temps (h)
T	température (°C)
C	concentration en oxygène (%)
P	fonction puits à oxygène ($\text{mm}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^3$)
Q	consommation d'oxygène ou flux d'oxygène ($\text{mm}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$)
D	coefficient de diffusion apparent de l'oxygène dans le sol ($\text{cm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$)
D/D_0	coefficient de diffusion relatif du sol (sans dimension)
N	porosité de transfert (%)
N_a	porosité libre à l'air (%)
e	épaisseur de la croûte (cm)
p	profondeur du lit de semence (cm)
ps	profondeur de semis (cm)
L	profondeur de la couche labourée (cm)
$2.R$	maille de fissuration (cm)

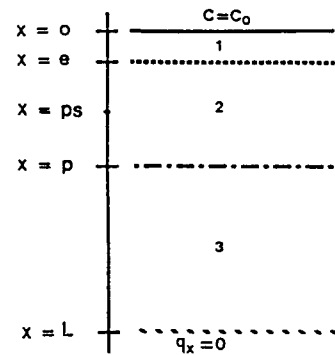


Figure 1

Présentation de la structure multicouche du profil.

1 : croûte de battance.

2 : lit de semence.

3 : couche labourée non remaniée.

Presentation of the multilayer structure of the profile.

1 : crust.

2 : seed bed.

3 : ploughed layer.

et P_i fera référence au numéro de la couche comme définie sur la figure 1. L'indice 0 représente le milieu « air » ; on a $D_0 = 720 \text{ cm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ et $C_0 = 21 \text{ p. 100}$.

III. RÉSULTATS DES SIMULATIONS

A. Profil sans croûte de battance

On doit résoudre les équations de diffusion (loi de FICK et équation de conservation de masse) appliquées aux couches 2 et 3, donc le système d'équations suivant :

$$N_2 \cdot \partial C / \partial t = D_2 \cdot \partial^2 C / \partial x^2 - P_2 \quad \text{pour } 0 \leq x \leq p \quad (1)$$

$$N_3 \cdot \partial C / \partial t = D_3 \cdot \partial^2 C / \partial x^2 - P_3 \quad \text{pour } p \leq x \leq L \quad (2)$$

$$\text{avec} \quad C_x(t=0) = C_0 ; \quad C_x(x=0) = C_0$$

$$\text{et} \quad q_x(x=L) = 0$$

La solution dans le lit de semence, en régime permanent et avec une fonction puits constante, est :

$$C - C_0 = (P_2 / (2 \cdot D_2)) \cdot x^2 - ((P_3 \cdot (L - p) + P_2 \cdot p) / D_2) \cdot x \quad (3)$$

Il apparaît que la concentration d'oxygène à l'équilibre à une profondeur donnée du lit de semence est indépendante du coefficient de diffusion relatif des

couches sous-jacentes (D_3), ainsi que de la porosité libre à l'air de l'ensemble du profil (N_2 et N_3) (si ce n'est au travers de la relation entre le coefficient de diffusion et la porosité libre à l'air). On peut alors ne considérer que la partie supérieure du profil : on réduit le système à une seule couche, dont l'épaisseur est déterminée par la profondeur maximale de semis (fixée à $ps = 5$ cm), avec à cette profondeur une condition de flux égal à la consommation d'oxygène des couches sous-jacentes (notée Q).

$$Q = (L - ps) \cdot P_3 \quad (4)$$

ou $Q = (L - ps) \cdot P_2$ en considérant la fonction puits homogène sur tout le profil du sol.

Le profil de concentration en oxygène ne dépend alors que de 3 paramètres : D_2 , P_2 et Q .

La figure 2 présente quelques simulations de profil de concentration d'oxygène dans les 5 premiers centimètres. En comparant respectivement les courbes b, d, f aux courbes c, e, g, il apparaît que le profil de concentration en oxygène est pratiquement indépendant de la fonction puits du lit de semence : l'accumulation de résidus de récolte dans le lit de semence, dans ces conditions, ne présente pas de risque particulier et elle constituerait même une situation plus favorable qu'une répartition homogène des résidus au sein du profil. En effet, ce n'est que pour des situations présentant de très fortes consommations d'oxygène dans les couches sous-jacentes à la semence, associées à un faible coefficient de diffusion du lit de semence (courbe f et g) que la concentration en oxygène se situe en dessous de 10 p. 100 à moins de 5 centimètres de profondeur.

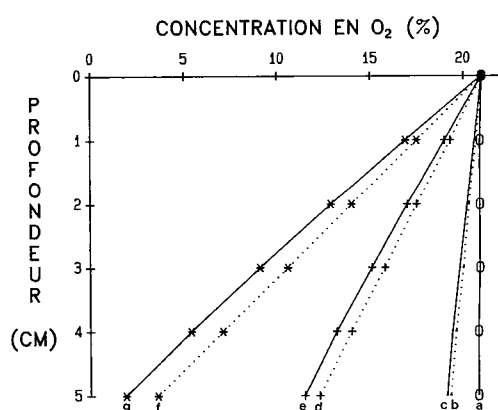


Figure 2
Profils de concentration d'oxygène à l'équilibre, dans un lit de semence sans croûte de battance, en considérant la fonction puits comme indépendante de la concentration d'oxygène.

Oxygen concentration profiles at equilibrium in a seed bed without crust, with P independent of the oxygen concentration.

Caractéristiques des profils simulés (Profile characteristics) :

D_2/D_0	10^{-1}	10^{-1}	10^{-2}	10^{-2}	10^{-2}
Q ($mm^3 \cdot h^{-1} \cdot cm^{-2}$)	25	250	25	125	250
P^2 ($mm^3 \cdot h^{-1} \cdot cm^{-3}$)	1	0 10	0 1	0 5	0 10
	a	b c	b c	d e	f g

Dans ces conditions, l'analyse en régime transitoire avec une fonction puits dépendante de la concentration en oxygène et pour une température constante montre que :

— d'une part, le temps nécessaire pour atteindre la concentration d'oxygène à l'équilibre est faible par rapport au temps moyen de germination qui est de 3 jours à $20^\circ C$ pour la betterave sucrière (fig. 3) ;

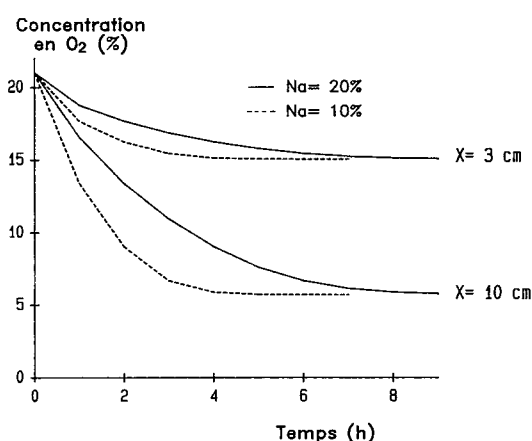


Figure 3
Evolution de la concentration d'oxygène au cours du temps dans un lit de semence sans croûte de battance, en considérant la fonction puits dépendante de la concentration d'oxygène.

Oxygen concentration with time in a seed bed without crust, with P dependent on the oxygen concentration.

Caractéristiques du profil simulé (Profile characteristics) :
 $L = 30$ cm ; $D_2/D_0 = D_3/D_0 = 10^{-2}$; $P_2 = P_3 = 10$ $mm^3 \cdot h^{-1} \cdot cm^{-3}$
 $N_2 = N_3 = N_a$.

— d'autre part, le profil de concentration en oxygène dépend alors du coefficient de diffusion relatif des couches sous-jacentes à la semence (fig. 4). Plus le coefficient de diffusion relatif des couches sous-jacentes à la semence est élevé (courbes b, c, d), plus la consommation d'oxygène par ces couches est élevée et plus la concentration en oxygène des premiers centimètres du lit de semence est réduite ; la concentration en oxygène reste néanmoins supérieure à celle calculée dans la situation où on ne prend pas en compte la variation de la fonction puits avec la concentration en oxygène (courbe a). Aussi, même dans le cas d'un profil avec un coefficient de diffusion relatif faible dans les 5 premiers centimètres, fort au-delà, et une forte fonction puits dans tout le profil (courbe b), la concentration en oxygène n'atteint 10 p. 100 qu'entre 4 et 5 centimètres de profondeur. Dès que la température est inférieure à $20^\circ C$, la concentration en oxygène des 5 premiers centimètres du lit de semence reste supérieure à 10 p. 100.

En l'absence d'une croûte de battance, pour la gamme de variation des différents paramètres que l'on s'est fixée, la concentration en oxygène ne risque donc pas de descendre en dessous de 10 p. 100 au niveau de la semence. Il est à noter que cette gamme ne prend pas en compte les valeurs très faibles de coefficient de diffusion relatif du lit de semence qui correspondent à la satura-

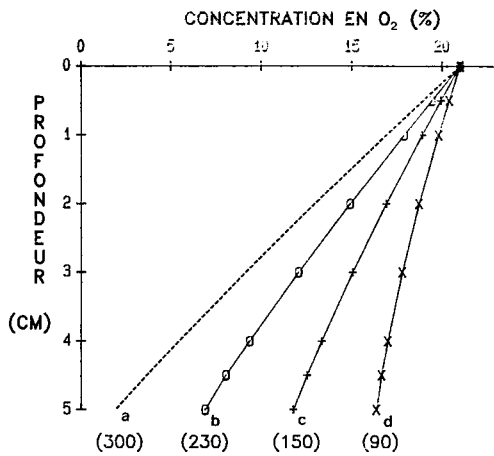


Figure 4

Profils de concentration d'oxygène à l'équilibre dans un lit de semence sans croûte de battance en fonction du coefficient de diffusion relatif de la couche labourée sous-jacente, en considérant la fonction puits dépendante de la concentration d'oxygène.

Relationships between oxygen concentration profiles at equilibrium in a seed bed without crust and the diffusivity of the ploughed layer under the seed bed, with P dependent on the oxygen concentration.

Caractéristiques du profil simulé (Profile characteristics): $L = 30$ cm; $p = 5$ cm; $D_2/D_0 = 10^{-2}$; $P_2 = P_3 = 10$ mm³·h⁻¹·cm³.

(\int): consommation totale d'oxygène dans le profil.

(\int): total oxygen uptake by the profile.

a: P est indépendante de la concentration en oxygène.

a: P is not dependent on the oxygen concentration.

b: $D_3/D_0 = 10^{-1}$.

c: $D_3/D_0 = 10^{-2}$.

d: $D_3/D_0 = 10^{-3}$.

tion; dans ce cas, la concentration en oxygène devient limitante du fait de la seule fonction puits « semence ».

On remarquera qu'en l'absence d'une croûte de battance, un profil *a priori* favorable, caractérisé par une porosité structurale libre à l'air élevée dans la couche labourée et une répartition homogène de la matière organique, est en fait, la situation qui risque d'entraîner les concentrations en oxygène les plus faibles dans le lit de semence. Par contre, si les couches sous-jacentes à la semence sont saturées, la concentration en oxygène au niveau de la semence reste proche de 21 p. 100.

B. Profil avec une croûte de battance continue et saturée

1. Régime permanent avec une fonction puits constante

De la même manière que l'on a obtenu l'équation (3), si l'on néglige la fonction puits de la croûte, la concentration en oxygène à la base de la croûte est donnée par l'équation suivante :

$$C(x = e) = C_0 - (Q/D_1) \cdot e \quad (5)$$

Le flux maximum d'oxygène pouvant traverser la croûte est alors :

$$Q_{\max} = C_0 \cdot D_1/e \quad (6)$$

En considérant le coefficient de diffusion relatif le plus élevé pour la croûte saturée, c'est-à-dire égal à celui dans l'eau ($3,3 \cdot 10^{-6}$), et une épaisseur de la croûte faible (0,05 cm), le flux maximum d'oxygène pouvant traverser la croûte est de 10 mm³·h⁻¹·cm⁻² : il correspond à

des fonctions puits inférieures à 0,5 mm³·h⁻¹·cm⁻³ sur 20 à 30 cm de profil. Une fonction puits, même faible, dans le profil entraîne une concentration en oxygène nulle sous la croûte saturée : le flux maximal pouvant traverser la croûte est alors négligeable devant la consommation d'oxygène dans le profil et le système peut être considéré comme confiné.

2. Ordre de grandeur des fonctions puits « critiques »

Sachant que le système peut être considéré comme confiné pour de faibles fonctions puits, on peut utiliser le modèle pour estimer la valeur des paramètres caractéristiques d'une situation critique.

TABLEAU 2

Fonctions puits à oxygène telles que la concentration en oxygène sous la croûte saturée s'abaisse de 21 à 10 % en 24 heures en fonction de la porosité libre à l'air (N_a). La température est supposée constante.

P values inducing an oxygen concentration of 10 % under the crust in 24 h, according to different values of air-filled porosity (N_a). Temperature is constant.

N_a	P			
	a	b	c	d
10 %	0,5	0,6		
20 %	0,9	1,1	1,0	1,0
30 %	1,4	1,5	1,4	1,4
40 %	1,8	2,0		

a : selon la relation (7) (le système est considéré comme confiné et P est indépendant de la concentration d'oxygène).

b, c et d : à partir de simulations avec P dépendant de la concentration d'oxygène.

a : according to relation (7) (the system is confined and P is not dependent on the oxygen concentration).

b, c et d : simulation with P dependent on the oxygen concentration. Caractéristiques du profil simulé (Profile characteristics):

$L = 30$ cm; $D_1/D_0 = 3,3 \cdot 10^{-6}$; $N_1 = 3$ %; $P_1 = 0$. $D_2/D_0 = D_3/D_0 = 10^{-1}$; $N_2 = N_3 = N_a$; $P_2 = P_3 = P$ (en mm³·h⁻¹·cm³).

b : $e = 0,05$ cm.

c : $e = 0,2$ cm.

d : $e = 0,2$ cm et $D_2/D_0 = D_3/D_0 = 10^{-2}$.

Le tableau 2 présente les fonctions puits dites « critiques », c'est-à-dire celles entraînant en 24 heures une concentration en oxygène inférieure à 10 p. 100 pour une concentration en oxygène initiale de 21 p. 100 dans tout le profil. Il apparaît que le paramètre important à considérer est la porosité libre à l'air ; l'épaisseur de la croûte et le coefficient de diffusion relatif au sein du profil ne modifient pas le niveau de la fonction puits critique (colonnes b, c, d). On a présenté (colonne a) le cas simplifié où l'on considère que la concentration en oxygène ne reflète que le bilan local entre le stock initial d'oxygène et la consommation d'oxygène au cours du temps (avec P indépendant de C), ce qui peut se traduire par l'équation suivante :

$$C = C_0 - (P \cdot t) \cdot N_a \quad (7)$$

Il apparaît que cette équation simple suffit à rendre compte des fonctions puits critiques, dans le cas d'une porosité homogène dans le profil et d'une concentration en oxygène initiale uniforme dans le profil.

En considérant une concentration en oxygène initiale homogène de 21 p. 100 dans tout le profil, on surestime les fonctions puits à oxygène critiques. En effet, en conditions réelles, un gradient de concentration en oxygène préexiste au sein du profil quand la croûte apparaît.

TABLEAU 3

Fonctions puits à oxygène telles que la concentration en oxygène, à 3 cm de profondeur dans un lit de semence avec une croûte saturée, soit inférieure à 10 % en moins de 24 heures, en fonction des conditions initiales et de la diffusivité de la couche labourée (D_3/D_0).

P values inducing an oxygen concentration of 10 % at 3 cm depth in 24 h, according to different initial conditions and diffusivity of the ploughed layer under seed bed (D_3/D_0) in a seed bed with a saturated crust.

D_3/D_0	N_3	P		
		a	b	
10^{-1}	20 %	1,0	0,9	i
10^1	30 %	1,5	1,2	j
10^2	20 %	1,0	0,7	k
10^{-3}	20 %	1,0	0,6	l

Les conditions initiales sont :
 a : $C_x = C_0$ dans tout le profil.
 b : C_x est égale à la concentration d'oxygène à l'équilibre obtenue avant l'apparition de la croûte.
 Initial conditions are :
 a : $C_x = C_0$ in the whole profile.
 b : C_x is equal to the oxygen concentration at equilibrium before crust formation.

Caractéristiques du profil simulé (Profile characteristics) :
 $L = 30$ cm ; $p = 5$ cm ; $e = 0,1$ cm ; $D_1/D_0 = 3,3 \cdot 10^{-6}$;
 $N_1 = 3$ % ; $P_1 = 0$;
 $D_2/D_0 = 10^{-2}$; $N_2 = 20$ % ; $P_2 = P_3 = P$ (en $\text{mm}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^{-3}$).

Le tableau 3 compare les ordres de grandeur de la fonction puits critique pour 2 types de conditions initiales :

- la concentration en oxygène est uniforme et égale à 21 p. 100 dans le profil (colonne a) ;
- le gradient initial de concentration en oxygène au sein du profil est égal à celui à l'équilibre pour les mêmes caractéristiques du profil sans la croûte de battance (colonne b). Ce gradient a été calculé pour différents paramètres de transfert de la couche labourée (lignes i, j, k, l).

Pour ces 2 cas extrêmes de conditions initiales, le niveau de la fonction puits critique varie peu (colonnes a et b), même pour différents coefficients de diffusion relatifs de la couche labourée à une porosité donnée (lignes i, k, l). Plus le coefficient de diffusion relatif de la couche labourée est faible, plus le gradient de concentration au sein du profil est marqué, donc moins le stock d'oxygène est important au moment de l'apparition de la croûte : la fonction puits critique est alors légèrement plus faible. De plus, à un coefficient de diffusion relatif élevé dans la couche labourée correspond, en tendance,

une porosité libre à l'air élevée, donc un niveau de fonction puits critique plus élevé (lignes i et j).

Donc, en présence d'une croûte saturée, la concentration en oxygène dans le lit de semence dépend essentiellement du niveau de la fonction puits et de la porosité libre à l'air, et du coefficient de diffusion relatif du profil qui détermine le profil de concentration au moment de l'apparition de la croûte. La concentration en oxygène dans le lit de semence est inférieure à 10 p. 100 en moins de 24 heures pour des fonctions puits à oxygène potentielles faibles à moyennes (inférieures à $2 \text{ mm}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^{-3}$) dans une large gamme de porosité structurale libre à l'air.

3. Effet de la température

A 20°C , les fonctions puits critiques sont faibles à moyennes (inférieures à $2 \text{ mm}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^{-3}$). Le problème est de savoir comment varie ce niveau de fonction puits critique avec la température.

On ne va pas prendre en compte le gradient thermique au sein du profil, le déphasage et l'amortissement des variations thermiques avec la profondeur ; sinon, il serait alors nécessaire de réaliser un couplage des transferts thermiques et gazeux, ce qui n'est pas notre objectif dans ce travail. La relation (7) suffit à rendre compte de l'évolution de la concentration en oxygène sous une croûte de battance saturée. A partir de cette relation, on va seulement chercher à estimer le niveau de la fonction puits critique potentielle du sol pour différents régimes thermiques. On a simplifié alors encore plus le modèle en considérant une variation linéaire de la température au cours de la journée.

On définit :

— P_{ref} la fonction puits telle qu'en 24 heures, la concentration en oxygène soit inférieure à 10 p. 100 si la température est constante et égale à 20°C . P_{ref} est calculée à partir de la relation (7).

— P la fonction puits potentielle du sol (mesurée à 20°C et dans 21 p. 100 d'oxygène) telle que, compte tenu des conditions d'anisothermie, la concentration en oxygène soit inférieure à 10 p. 100 en moins de 24 heures.

- P_j la fonction puits réelle du profil au temps j.
- T_j la température du sol au temps j.

On a d'après la loi du Q_{10} (RICHARD & GUÉRIF, 1988) :

$$P_j = P \cdot (Q_{10})^{(T_j - 20)/10} \tag{8}$$

Si on considère une variation linéaire de la température journalière entre le minimum (T_{min}) et le maximum (T_{max}), on obtient :

$$T_j = T_{\text{min}} + (j-1) \cdot (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) / 11 \tag{9}$$

j étant l'indice horaire compris entre 1 et 12.

Compte tenu des variations de température, la concentration en oxygène devient inférieure à 10 p. 100 en 24 heures si :

$$2 \sum_{j=1}^{12} P_j = 24 \cdot P_{\text{ref}} \tag{10}$$

On obtient alors, à partir des équations (8, 9, 10) :

$$12 \cdot P_{ref} = P \cdot ((Q_{10})^{((T_{min} - 20)/10)}) \quad (11)$$

$$\cdot \sum_{j=1}^{12} ((Q_{10})^{((T_{max} - T_{min})/110) \cdot (j-1)})$$

soit
$$P = P_{ref} \cdot K(T_{min}, T_{max}) \quad (12)$$

Au vu des valeurs de K données par le tableau 4, la température apparaît déterminante vis-à-vis du risque d'apparition d'une concentration limitante dans le lit de semence. En effet, si la température journalière n'excède pas 15 °C, les fonctions puits critiques sont d'un ordre de grandeur triple de ceux présentés dans les tableaux 2 et 3. Dans ces conditions, si la porosité libre à l'air est inférieure à 20 p. 100, la situation devient critique pour des fonctions puits à oxygène potentielles de l'ordre de 3 mm³·h⁻¹·cm⁻³ qui correspondent à l'activité biologique maximale d'un sol sans résidus de récolte ; si la porosité libre à l'air est supérieure à 20 p. 100, la situation ne devient critique que si le sol contient des résidus de récolte.

Sous une croûte de battance saturée et continue, il apparaît donc que le risque que la concentration en oxygène ne devienne limitante en 24 heures est étroitement lié à la température et à la présence de résidus de récolte.

C. Profil avec une croûte de battance désaturée et/ou fissurée

La température et l'ETP sont corrélées et une température élevée accroît la probabilité que la croûte se désature ou se fissure en l'absence de nouvelles pluies. On ne va pas chercher à estimer cette probabilité en fonction des conditions climatiques ; on ne présente que les conséquences d'une désaturation ou d'une fissuration de la croûte sur l'évolution ultérieure de la concentration en oxygène dans le lit de semence.

On choisit comme condition initiale une concentration en oxygène uniforme de 10 p. 100 dans tout le profil. Cette concentration est supposée avoir été atteinte pendant que la croûte était saturée. On peut

considérer que la concentration en oxygène initiale est homogène sur tout le profil car, en présence d'une croûte saturée, le gradient de concentration en oxygène au sein du profil est pratiquement nul quelques heures seulement après l'apparition de la croûte, quelles que soient les caractéristiques du profil. On recherche alors les conditions pour lesquelles la concentration en oxygène au niveau de la semence reste en dessous de 10 p. 100, malgré l'évolution de la croûte. On se fixe 3 niveaux de fonction puits : moyen (2,5 mm³·h⁻¹·cm⁻³), fort (5 mm³·h⁻¹·cm⁻³) ou très fort (10 mm³·h⁻¹·cm⁻³).

1. Cas d'une croûte de battance désaturée

La figure 5 montre que :

— le système ne peut plus être considéré comme équivalent à un système confiné, sauf pour un coefficient de diffusion relatif de la croûte très faible (courbes f et g). Dans ce cas, la concentration en oxygène diminue très en deçà de 10 p. 100 ;

— si le coefficient de diffusion relatif de la croûte est supérieur à 10⁻³, la concentration en oxygène au niveau de la semence, même pour une très forte fonction puits, se stabilise rapidement vers 15 p. 100 (courbe a) ;

— pour des coefficients de diffusion relatifs de la croûte intermédiaire, de l'ordre de 10⁻⁴, des fonctions puits de 2,5 à 5 mm³·h⁻¹·cm⁻³ maintiennent une concentration en oxygène sous la croûte inférieure à 10 p. 100, suivant l'épaisseur de la croûte (courbes b et d) et le coefficient de diffusion relatif du profil (courbes c et e).

Donc, une fois la croûte désaturée, la concentration en oxygène ne reste limitante que si la diffusivité de la croûte est faible (inférieure à 10⁻⁴) et pour des fonctions puits potentielles minimales de 2,5 à 5 mm³·h⁻¹·cm⁻³. De la même manière que pour un profil sans croûte de battance, le niveau de fonction puits critique dépend alors du coefficient de diffusion relatif du profil.

2. Cas d'une croûte de battance fissurée

Le dessèchement peut aussi entraîner une fissuration de la croûte dont la discontinuité risque de modifier considérablement ses propriétés de transfert.

TABLEAU 4

Variations du coefficient K (relation (12)) en fonction de la température minimale (T_{min}) et de la température maximale (T_{max}) pour différentes valeurs du Q_{10} .

Variation of the coefficient K (relation (12)) according to minimal temperature (T_{min}) and maximal temperature (T_{max}) for different Q_{10} values.

T_{min}	T_{max}	10			15			20		
	Q_{10}	2	3	5	2	3	5	2	3	5
5		2,4	3,9	<u>7,0</u>	1,9	<u>2,9</u>	<u>4,4</u>	<u>1,6</u>	<u>2,0</u>	2,6
10					1,7	<u>2,3</u>	<u>3,2</u>	<u>1,4</u>	<u>1,6</u>	2,0

Les valeurs soulignées correspondent aux valeurs probables du Q_{10} compte tenu de la gamme de température (d'après ROSS & CAIRNS, 1978). Underlined values correspond to probable values of Q_{10} (according to ROSS & CAIRNS, 1978).

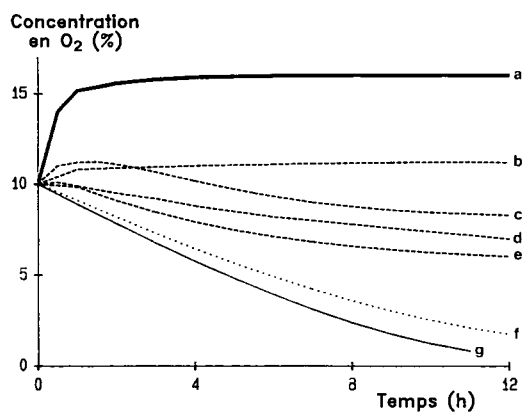


Figure 5
Evolution de la concentration en oxygène au cours du temps à 3 cm de profondeur sous une croûte désaturée, en considérant la fonction puits dépendante de la concentration d'oxygène.

Oxygen concentration with time at 3 cm depth under a desaturated crust, with P dependent on the oxygen concentration.

Caractéristiques du profil simulé (Profile characteristics) :

$L = 30 \text{ cm}$; $e = 0,1 \text{ cm}$; $N_1 = 3 \%$; $N_2 = N_3 = 20 \%$

$D_2/D_0 = D_3/D_0 = D/D_0$; $P_2 = P_3 = P$.

	a	b	c	d	e	f	g
D_1/D_0	10^{-3}	10^{-4}	10^4	10^{-4}	10^4	10^{-5}	0
P	10	2,5	5	2,5	5	2,5	2,5
D/D_0	10^1	10^{-1}	10^2	10^{-1}	10^1	10^{-1}	10^1
e	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1

On a simplifié le phénomène en considérant une situation extrême, compte tenu des résultats pour une croûte saturée : on suppose la croûte saturée entre les fissures et on néglige le flux d'oxygène qui la traverse. On impose donc à la surface du volume de sol, que l'on a assimilé à un cylindre dans ces conditions (RICHARD & GUÉRIFF, 1988), une condition de flux nul : $q_x(x = 0) = 0$.

D'après P. STENGEL (communication personnelle), la maille maximale de fissuration serait comprise entre 5 et 10 cm compte tenu de la faible épaisseur des croûtes considérées.

A partir d'une situation initiale de concentration en oxygène égale à 10 p. 100 dans tout le profil et en considérant la fonction puits comme indépendante de la concentration en oxygène, ce qui évite de prendre en compte le coefficient de diffusion de la couche labourée, la figure 6 montre que :

— si le coefficient de diffusion relatif du lit de semence est fort, même pour une fonction puits très forte, la concentration en oxygène reste supérieure à 10 p. 100 (courbe a) ;

— si le coefficient de diffusion relatif du lit de semence est faible (10^{-2}), des fonctions puits potentielles de 2,5 à $5 \text{ mm}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^3$ tendent à maintenir la concentration en oxygène inférieure à 10 p. 100 suivant la maille de fissuration (courbes b, c, d). Mais, compte tenu de la situation initiale considérée, la concentration en oxygène ne reste inférieure à 10 p. 100 que pour une maille de fissuration de 20 cm et une fonction puits forte de $5 \text{ mm}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^3$ (courbe d). Cette valeur de fonction puits critique ne représente en plus qu'une valeur mini-

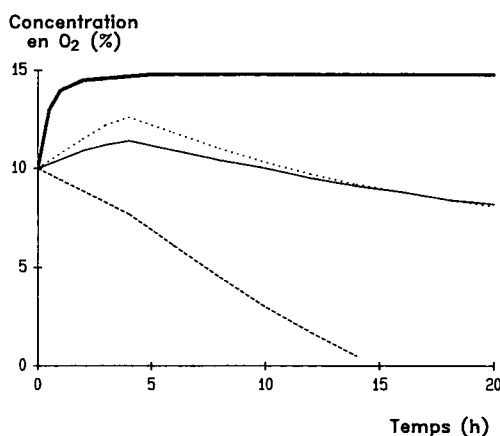


Figure 6
Evolution de la concentration d'oxygène au cours du temps à 3 cm de profondeur sous une croûte fissurée en considérant la fonction puits indépendante de la concentration en oxygène ($r = 0$).

Oxygen concentration with time at 3 cm depth in a seed bed with a cracked crust, with P independent of the oxygen concentration ($r = 0$).

Caractéristiques du profil simulé (Profile characteristics) :

$L = 30 \text{ cm}$; $e = 0,2 \text{ cm}$; $N_2 = N_3 = 20 \%$

$D_2/D_0 = D_3/D_0 = D/D_0$; $P_2 = P_3 = P$.

	a	b	c	d
D/D_0	10^1	10^{-2}	10^{-2}	10^2
P	10	5	2,5	5
R	10	5	10	10

male puisque l'on n'a pas pris en compte la variation de la fonction puits avec la concentration en oxygène.

Si la croûte se fissure, même si elle est toujours saturée entre les fissures, sauf pour un faible coefficient de diffusion relatif dans le lit de semence et une forte consommation d'oxygène par le profil, la concentration en oxygène n'est plus limitante.

3. Effet de la température

Que la croûte soit désaturée ou fissurée, la fonction puits critique est forte, de l'ordre de $5 \text{ mm}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^3$ si la température est constante et de 20°C . Si la température est de 10°C , une fonction puits potentielle forte de $5 \text{ mm}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^3$ ne représente qu'une fonction puits réelle de moins de $2 \text{ mm}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^3$, insuffisante dans la plupart des situations pour maintenir la concentration en oxygène inférieure à 10 p. 100. Vu la rapidité avec laquelle les régimes d'équilibre sont atteints, la concentration en oxygène ne sera donc inférieure à 10 p. 100 qu'à certains moments de la journée. Le problème est alors de savoir si de courtes périodes d'hypoxie sont susceptibles de modifier le comportement en germination de la semence.

IV. CONCLUSION

Il apparaît donc que la concentration en oxygène des premiers centimètres du lit de semence, en dehors du cas où celui-ci est quasiment saturé, ne devient critique

qu'après la formation d'une croûte de battance et, dans la plupart des situations, pour de fortes activités microbiennes. Cette dernière condition suppose la présence de résidus de récolte dans le profil et une température relativement élevée (20 °C).

Dans tous les cas, un coefficient de diffusion relatif et/ou une porosité libre à l'air du lit de semence faibles augmentent le risque d'apparition de conditions d'hypoxie des semences. Dans le cas d'une croûte fissurée, un faible coefficient de diffusion relatif du lit de semence est même une condition nécessaire pour que la concentration en oxygène devienne limitante. Ces 2 paramètres dépendent essentiellement du taux de saturation du volume poral d'origine structurale, et donc du régime d'infiltration de l'eau après les pluies et de l'ETP. Un obstacle à l'infiltration de l'eau, comme un lissage lié au travail du sol avant semis, alors associé à une croûte en surface qui limite l'évaporation, apparaît comme un facteur d'augmentation important du risque d'hypoxie.

Cependant, si la croûte se désature ou se fissure, un faible coefficient de diffusion relatif et/ou une faible porosité libre à l'air des couches sous-jacentes à la semence diminuent, contrairement au cas où la croûte est saturée, le risque que la concentration en oxygène ne devienne critique au niveau de la semence. La présence d'un lissage, qui équivaldrait à un plan de flux nul diminue alors le risque d'hypoxie lorsque la croûte n'est plus saturée. Le jugement que l'on peut porter sur les caractéristiques structurales et hydriques d'un profil donné doit donc dépendre de l'évolution de l'état structural et hydrique de la croûte.

On n'a pas pris en compte la fonction puits à oxygène « semence » puisque l'on s'est intéressé ici aux capacités globales de transfert d'oxygène du lit de semence. Cependant, pour de forts potentiels de l'eau (supérieurs à -2 kPa), la germination de la semence de betterave sucrière est inhibée du fait de la formation d'un film d'eau autour de la semence (RENARD, 1974 ; AURA,

1975). La gamme de potentiel critique dépend directement de la concentration en oxygène à l'interface « film d'eau/air ». Il s'agit donc, dans une étape ultérieure, de coupler le modèle présenté à un modèle de diffusion de l'oxygène au niveau de la semence, compte tenu de son environnement structural et hydrique : le modèle présenté devrait fixer les conditions aux limites du système « semence et son environnement immédiat ».

Enfin, malgré les hypothèses que nécessite un tel modèle, et l'impossibilité actuelle de le valider, une telle démarche apparaît intéressante :

— d'une part, pour évaluer les risques d'apparition de conditions d'hypoxie des semences en fonction de caractéristiques pédoclimatiques et du régime de restitution organique,

— d'une part, pour établir pour l'agronome une grille d'observations du lit de semence et du profil en vue d'un diagnostic des conditions d'hypoxie des semences. C'est finalement la confrontation entre des états physiques observés et un comportement du végétal, considéré alors comme un révélateur de l'évolution de la concentration en oxygène dans le lit de semence, qui devra permettre de juger l'intérêt d'une telle démarche. Pour y parvenir, on devra préciser nos connaissances sur le comportement de la semence en hypoxie et sur les relations entre « états structural et hydrique du sol » et coefficient de diffusion relatif.

Reçu le 1^{er} décembre 1987.
Accepté le 3 mai 1988.

REMERCIEMENTS

Nous remercions l'Institut de recherche MENNESSON (Anizy-le-Château, France) pour avoir soutenu ce travail, F. LAFOLIE pour nous avoir initié à l'utilisation du logiciel « FORSIM » et G. MONNIER et P. STENGEL pour leur soutien scientifique permanent.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aura E., 1975. Effects of soil moisture on the germination and emergence of sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *J. Scient. Agric. Soc. Finl.*, **47**, 1-70.
- Carver M. B., Stewart D. G., Blair J. M., Selander W. N., 1979. *The FORSIM VI simulation package for the automated solution of arbitrarily defined partial and/or differential equations systems*. Atomic Energy of Canada Limited, Chalk River Nuclear Laboratories, Ontario, 153 p.
- Lafolie F., Chahuneau F., 1985. *Le logiciel FORSIM de résolution numérique des systèmes d'équations différentielles ordinaires et/ou aux dérivées partielles*. Laboratoire de Biométrie, I.N.R.A., Jouy-en-Josas, 109 p.
- Renard H. A., 1974. Précisions sur les besoins en eau de la betterave (*Beta vulgaris* L.) lors de sa germination. *Inst. Int. Rech. Bett.*, **6**, 163-175.
- Richard G., Guérif J., 1988. Modélisation des transferts gazeux dans le lit de semence : application au diagnostic des conditions d'hypoxie des semences de betterave sucrière (*Beta vulgaris* L.) pendant la germination. 1. Présentation du modèle. *Agronomie* **8** (6). 539-547.
- Ross D. J., Cairns A., 1978. Influence of temperature on biochemical processes in some soils from tussock grasslands. 1. Respiratory activity. *N. Z. J. Sci.*, **21**, 581-589.