

# Porosité du sol et transport de gaz après 19 ans de semis direct et de labour

Andreas Chervet<sup>1</sup>, Wolfgang G. Sturny<sup>1</sup>, Peter Weisskopf<sup>2</sup>, Marlies Sommer<sup>2</sup>, Ingrid Martínez G.<sup>2</sup> et Thomas Keller<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Office de l'agriculture et de la nature du canton de Berne, Service de la protection des sols, 3052 Zollikofen, Suisse

<sup>2</sup>Agroscope, Institut des sciences en durabilité agronomique IDU, 8046 Zurich, Suisse

Renseignements: Thomas Keller, e-mail: thomas.keller@agroscope.admin.ch



**Figure 1** | Le labour ameublait les couches supérieures du sol, mais il tasse les couches sous-jacentes – même avec un labour superficiel on-land. (Photo: Liv Kellermann, HAFL)

## Introduction

Avec le semis direct (SD), les cultures sont semées sans ameublissement préalable du sol. Un sillon de semis est simplement ouvert dans le sol à l'aide de socs à disques, puis refermé une fois les semences déposées. Les raisons qui poussent à recourir au SD sont par exemple la lutte contre l'érosion, la consommation nettement plus faible

de carburant lors de la mise en place ou la réduction des travaux et des coûts (Soane *et al.* 2012). Renoncer à l'ameublissement du sol a également des effets positifs sur la structure du sol. Celle-ci désigne l'agencement dans l'espace des cavités et des composants solides du sol. Elle détermine d'importantes fonctions physiques du sol, comme la portance du sol ou encore le transport et le stockage de l'eau et de gaz. Lorsque ces fonctions sont

bien développées, elles influent de manière positive sur les réactions chimiques et l'activité biologique du sol. Le transport de gaz (c'est-à-dire la perméabilité à l'air et la diffusivité de gaz) est un facteur clé à ce niveau car il fournit (i) des informations sur les caractéristiques du système poreux dans le sol (Ball 1981) et (ii) parce qu'il participe activement à l'aération du sol et par conséquent à la chimie, la biologie du sol, ainsi qu'à la croissance racinaire et la productivité des cultures.

Dans les pores du sol remplis d'air, le transport de gaz s'établit en fonction des effets combinés de la diffusion le long de gradients de concentration et du flux volumique par advection due aux variations de pression à proximité de la surface. Tandis que la diffusion est pratiquement indépendante du rayon des pores, le flux volumique par advection est proportionnel à la puissance quatre du rayon des pores, en vertu de la loi de Hagen-Poiseuille. Par conséquent, la diffusion est essentiellement une fonction de la porosité occupée par l'air, tandis que la perméabilité à l'air est déterminée par les pores grossiers du sol à distribution continue (Ball *et al.* 1988). C'est pourquoi, pour décrire les propriétés du transport de gaz d'un système poreux, il faut combiner la diffusion, la perméabilité à l'air et leur rapport à la porosité occupée par l'air. Ces paramètres fournissent également des informations sur la continuité et la tortuosité du système poreux d'un sol (Ball *et al.* 1988).

Le fait de renoncer au travail du sol, comme c'est le cas avec le SD, peut favoriser le développement des pores grossiers à distribution continue (souvent pores d'origine biologique) et donc le transport de gaz d'un sol (Hartman *et al.* 2012). Cependant, ce développement stimule également les cheminements préférentiels, qui favorisent un déplacement rapide des engrais et des produits phytosanitaires vers les profondeurs (Jarvis 2007). Par rapport aux sols labourés, les sols avec SD ont tendance à avoir des couches supérieures plus denses, ce qui réduit l'aération et augmente la résistance à la pénétration par les racines (Kay et VandenBygaart 2002; Schjønning et Thomsen 2013). De son côté, le travail du sol classique avec la charrue (L) a des effets néfastes sur la population de vers de terre et la continuité des pores (Kay et VandenBygaart 2002). Avec le labour, le fait que les roues du tracteur s'appuient dans la raie de labour favorise le compactage de la couche sous-jacente du sol (Lipiec et Hatano 2003), ce qui conduit à la formation d'une semelle de labour avec un système poreux plutôt horizontal (Alaoui *et al.* 2011). Enfin, le travail du sol modifie aussi la distribution du carbone organique en profondeur, ce qui influe sur la structure du sol (Soane *et al.* 2012; article p. 216).

**Résumé** ■ Depuis 1994, deux systèmes culturaux – le semis direct et le labour – sont comparés sur la parcelle de suivi à long terme Oberacker à l'Inforama Rütli de Zollikofen, sur un limon sableux faiblement humique. Dans un essai en bandes sur six soles contiguës, une rotation de six cultures a été mise en place. Après 19 années d'essai, des échantillons non remaniés ont été prélevés avec des cylindres à 10 cm et 40 cm de profondeur. Ces prélèvements ont été complétés par des échantillons de référence provenant des bandes de prairies permanentes situées entre les parcelles d'essai. Les cylindres d'échantillonnage ont servi à déterminer la porosité occupée par l'air ( $\varepsilon_a$ ), la diffusivité relative du gaz ( $D_p/D_0$ ) et la perméabilité à l'air ( $k_a$ ) pour cinq potentiels matriciels différents compris entre -30 et -500 hPa. Avec le semis direct et dans les bandes de prairies permanentes, les propriétés du système poreux et du transport de gaz étaient semblables dans la couche supérieure et sous-jacente du sol; à noter qu'elles étaient moins favorables dans la couche supérieure du sol. Les sols labourés au contraire présentaient une stratification très nette: par rapport au semis direct et aux bandes de prairies permanentes,  $\varepsilon_a$ ,  $D_p/D_0$  et  $k_a$  étaient plus favorables dans la couche supérieure et moins favorables dans la couche sous-jacente du sol. Avec le semis direct, les couches sous-jacentes du sol riches en pores d'origine biologique ont eu tendance à donner des rendements plus élevés. Pour pouvoir évaluer les effets du système cultural sur la qualité du sol, il faut étudier la totalité du profil du sol (c'est-à-dire la couche supérieure et sous-jacente du sol) et tenir compte des fonctions essentielles du sol, comme les composantes et la régulation du rendement.

## Matériel et méthodes

Le site, la conception de l'essai et le travail du sol sont décrits dans l'article «Rendements et paramètres du sol après 20 ans de semis direct et de labour» en p. 216.

### Prélèvements d'échantillons et travaux de laboratoire

Afin d'étudier les répercussions à long terme de différents systèmes culturaux sur la porosité occupée par l'air ( $\varepsilon_a$ ), la diffusivité relative du gaz ( $D_p/D_0$ ) et la perméabilité à l'air ( $k_a$ ), des échantillons non remaniés (hauteur: 60 mm, diamètre: 100 mm) ont été prélevés avec des cylindres au printemps 2013 pour le SD et le L à des profondeurs de 8–14 cm et de 35–41 cm (désignées ci-après par 10 cm et 40 cm). L'échantillonnage, 19 ans après le début de l'essai, a eu lieu sur trois des six parcelles environ six mois après le dernier travail du sol pour le procédé L. Les prélèvements ont été complétés par des échantillons de référence provenant de deux bandes de prairie permanente (PP) situées entre les parcelles d'essai.

En laboratoire, les cylindres d'échantillonnage ont été saturés en eau. Celle-ci a ensuite été progressivement drainée de manière à passer par cinq potentiels matriciels différents ( $\psi$ ): -30 hPa (pF 1,5; sachant que  $pF = \log[-\psi]$ ), -60 hPa (pF 1,8), -100 hPa (pF 2,0), -200 hPa (pF 2,3) et -500 hPa (pF 2,7). A chaque potentiel matriciel, les cylindres d'échantillonnage ont été pesés et  $\varepsilon_a$ ,  $D_p/D_0$  resp.  $k_a$  ont été mesurés. Pour chaque potentiel matriciel, le diamètre des catégories de pores correspondant ( $d$ , en  $\mu\text{m}$ ) a été calculé à l'aide de l'équation  $d = 3000/\psi$  ( $\psi$  = potentiel matriciel en hPa) (Schjønning *et al.* 2002).  $k_a$  a été mesuré à l'aide de la méthode de l'état stationnaire. Pour  $D_p/D_0$ , une approche par état stationnaire a également été choisie avec de l'oxygène ( $\text{O}_2$ ) comme gaz de diffusion.

## Résultats et discussion

### Densité apparente et porosité occupée par l'air

Avec le L, la densité apparente (tabl. 1) dans la couche supérieure du sol est significativement ( $p < 0,05$ ) plus faible (1,35 g  $\text{cm}^{-3}$ ) qu'avec le SD (1,47 g  $\text{cm}^{-3}$ ) et la PP (1,46 g  $\text{cm}^{-3}$ ). Par contre, dans la couche sous-jacente du sol, la densité apparente est légèrement plus élevée avec le L (1,54 g  $\text{cm}^{-3}$ ) qu'avec le SD et la PP (1,49 resp. 1,48 g  $\text{cm}^{-3}$ ). Avec le SD et la PP, les couches supérieures et sous-jacentes du sol affichent sensiblement la même densité apparente, tandis que des densités significativement différentes ont été observées entre la couche supérieure et sous-jacente du sol avec le L. De plus, le volume des pores ayant le plus grand diamètre

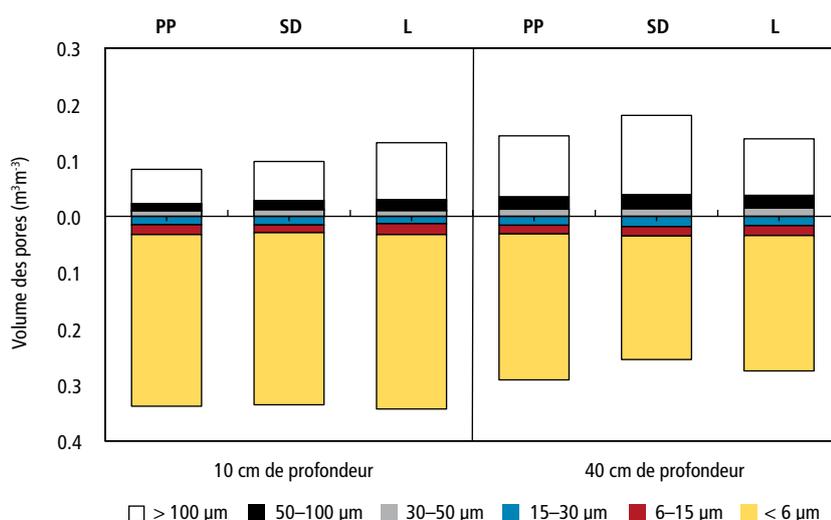
### Potentiel matriciel, valeur pF et capacité du champ

Le *potentiel matriciel* est la force de rétention avec laquelle l'eau est retenue dans le sol, et correspond à la tension de l'eau du sol avec un signe négatif. Le rapport entre le potentiel matriciel et la teneur en eau permet de tirer des conclusions sur le volume des pores et la distribution des tailles de pores dans le sol. Plus les pores sont fins, plus ils retiennent l'eau du sol. Le logarithme négatif du potentiel matriciel est appelé *valeur pF*. Plus la valeur pF est élevée, plus le sol est sec.

La *capacité du champ* désigne la teneur en eau du sol, qui, quelques jours après saturation en eau, s'établit sous l'effet de la force de gravité.

( $d > 100 \mu\text{m}$ ) est plus petit dans la couche supérieure que dans la couche sous-jacente du sol avec le SD et la PP (fig. 2). La densité apparente plus faible constatée avec le L par rapport au SD et à la PP dans la couche supérieure du sol est en grande partie due au volume plus important des pores d'un diamètre  $d > 100 \mu\text{m}$ . Ces pores sont d'origine biologique (canaux des racines ou galeries de vers de terre) ou sont des pores inter-agrégats (cavités entre les fragments de sol, issues du travail du sol). Dans les autres catégories de pores, les différences entre les systèmes culturaux sont pratiquement inexistantes. Seul le volume des pores d'un diamètre  $d < 6 \mu\text{m}$  est plus important dans la couche supérieure que dans la couche sous-jacente du sol avec le SD, le L et dans la PP. Dexter *et al.* (2008) expliquent ce phénomène par les teneurs plus basses en  $C_{\text{org}}$  dans la couche sous-jacente du sol. Des pores de très petits diamètres ( $d > 3 \mu\text{m}$ ) offrent un abri aux microorganismes contre les ravageurs (Schjønning *et al.* 2002).

Avec le L, les valeurs  $\varepsilon_a$  sont significativement plus élevées dans la couche supérieure du sol par rapport au SD et à la PP pour tous les potentiels matriciels (fig. 3A); dans la couche sous-jacente du sol par contre, les valeurs sont plus élevées avec le SD et la PP qu'avec le L (fig. 3B). Avec les valeurs  $\varepsilon_a$  situées au-dessus de la ligne pointillée (fig. 3A et B), la croissance racinaire est bonne (Grable et Siemer 1968; McGarry 1993; McHugh *et al.* 2009; Schjønning et Thomsen 2013). Avec le L, cette ligne est atteinte dès le potentiel matriciel maximum (pF 1,5), c'est-à-dire avec un sol très humide, et ce, dans les deux profondeurs considérées. Dans la couche supérieure du sol avec SD et PP, cette ligne seuil



**Figure 2** | Volumes de six catégories de tailles de pores calculés sur la base de mesures de cinq potentiels matriciels pour les bandes de prairie permanente (PP) et les systèmes culturaux avec semis direct (SD) et labour (L) à 10 cm resp. 40 cm de profondeur.

n'est dépassée qu'à partir des potentiels matriciels respectivement de pF 2,3 et pF 2,7, c'est-à-dire avec un sol ressuyé au-delà de la capacité du champ.

#### Diffusivité relative des gaz

Contrairement au SD et à la PP, avec le L, les valeurs  $D_p/D_0$  sont significativement plus élevées dans la couche supérieure du sol pour tous les potentiels matriciels, mais plus basses dans la couche sous-jacente du sol (fig. 3C et D). Les valeurs  $D_p/D_0$  du SD et de la PP ne se différencient pas, tant dans la couche supérieure que sous-jacente du sol (exception: potentiels matriciels pF 1,5 et pF 1,8 dans la couche sous-jacente du sol). Si la ligne en pointillés à  $D_p/D_0 = 0,005$  a été proposée comme seuil critique de l'aération du sol (Stepniewski 1980, 1981), la ligne interrompue à  $D_p/D_0 = 0,02$  indique le seuil critique des conditions aérobies dans

les sols sableux (Schjønning et al. 2003). Les valeurs  $D_p/D_0$  dépassent le seuil de 0,005 pour chaque potentiel matriciel, mais tout juste dans la couche supérieure du sol du SD et de la PP avec une valeur pF de 1,5. Dans la couche sous-jacente du sol, les valeurs  $D_p/D_0$  dépassent déjà 0,02 pour le SD avec le potentiel matriciel maximum (pF 1,5); pour la PP, c'est le cas à partir d'un potentiel matriciel de pF 1,8 et pour le L, uniquement à partir de pF 2,3. Dans la couche supérieure du sol, en revanche, la valeur de 0,02 a été atteinte, voire dépassée, pour le L dès le potentiel matriciel de pF 1,8, dans le cas du SD et de la PP, uniquement à partir du potentiel matriciel le plus bas (pF 2,7).

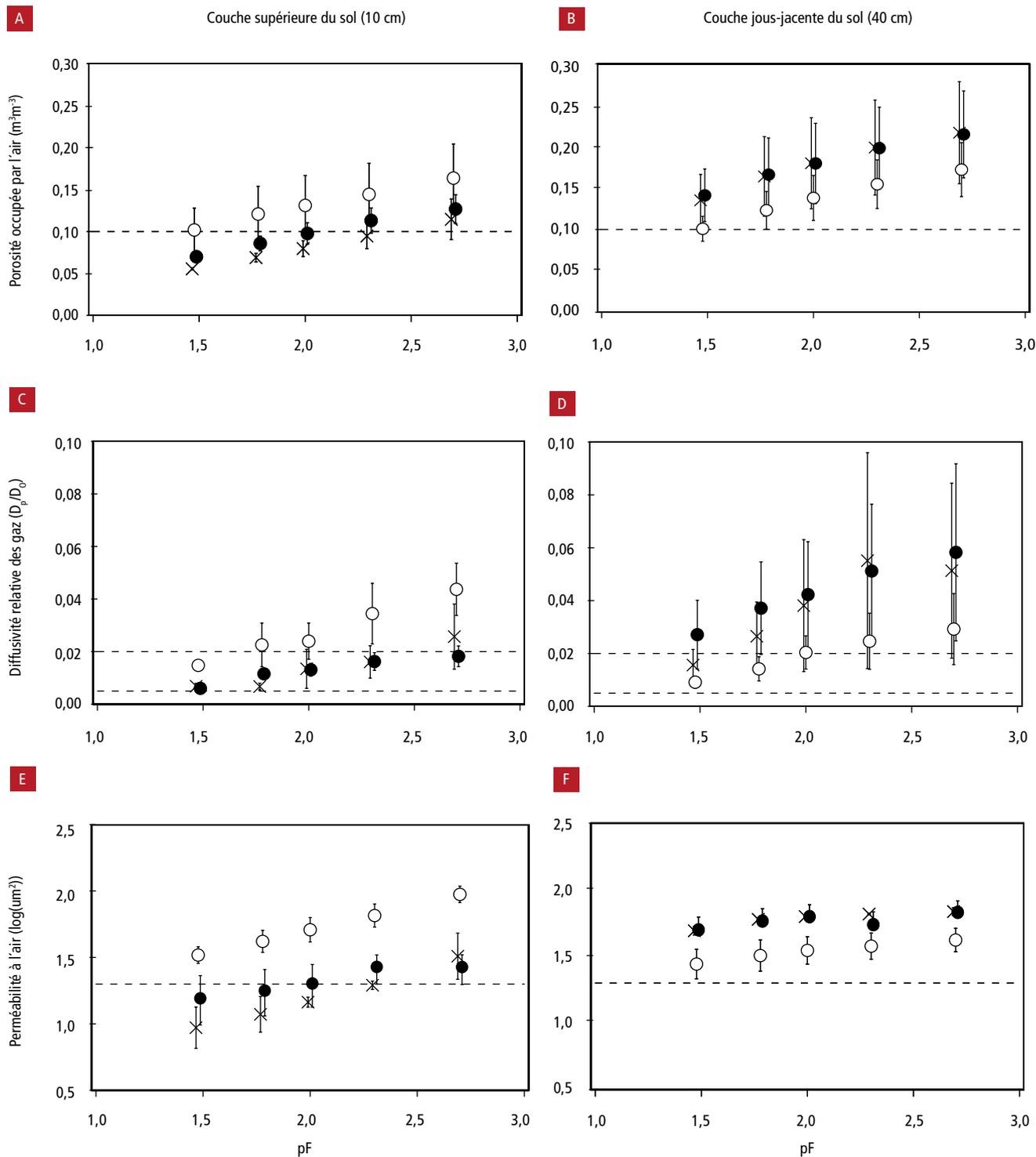
#### Perméabilité à l'air

Avec le L, les valeurs  $k_a$ , qui sont en corrélation avec le volume des pores de  $d > 100 \mu\text{m}$  à 10 cm de profondeur

**Tableau 1** | Propriétés de la couche supérieure (10 cm de profondeur) et sous-jacente du sol (40 cm de profondeur) en fonction du système cultural. Taille des particules des catégories granulométriques: argile  $< 0,002$  mm; limon 0,002–0,05 mm; sable 0,05–2 mm. La valeur entre parenthèses correspond à l'erreur-type de la moyenne.

Propriétés du sol	Couche supérieure du sol (10 cm)			Couche sous-jacente du sol (40 cm)		
	SD	L	PP	SD	L	PP
Argile (% en poids)	19,0 (1,7)	18,2 (1,2)	17,4 (1,1)	15,4 (4,3)	16,1 (3,5)	15,4 (6,0)
Limon (% en poids)	22,6 (1,8)	22,7 (0,5)	23,4 (1,5)	19,6 (4,7)	22,0 (1,1)	20,5 (0,0)
Sable (% en poids)	58,4 (3,3)	59,1 (0,5)	59,2 (0,9)	65,0 (8,5)	61,9 (2,9)	64,1 (6,0)
$C_{\text{org}}$ (% en poids)	2,3 (0,3)	2,7 (0,2)	2,6 (0,6)	1,0 (0,3)	1,0 (0,2)	1,0 (0,0)
Densité apparente ( $\text{g cm}^{-3}$ )	1,47 (0,02)	1,35 (0,02)	1,46 (0,02)	1,49 (0,02)	1,54 (0,02)	1,48 (0,03)

SD = semis direct, L = labour, PP = bandes de prairie permanente,  $C_{\text{org}}$  = carbone organique.



**Figure 3** | Porosité occupée par l'air ( $\epsilon_a$ ; A, B), diffusivité relative des gaz ( $D_p/D_0$ ; C, D) et perméabilité à l'air ( $k_a$ ; E, F) dans les bandes de prairie permanente (croix) et les deux systèmes culturaux avec semis direct (ronds noirs) et labour (ronds blancs) à 10 cm (A, C, E) et 40 cm de profondeur (B, D, F) en fonction de l'humidité du sol (pF = logarithme négatif du potentiel matriciel). Les lignes interrompues correspondent aux seuils limites pour  $\epsilon_a$  selon Grable et Siemer (1968), pour  $D_p/D_0$  selon Stepniewski (1980, 1981) resp. selon Schjøning *et al.* (2003) et pour  $k_a$  selon Fish et Koppi (1994). Les barres d'erreur correspondent aux erreurs-types de la moyenne.

(fig. 2), sont plus élevées dans la couche supérieure du sol qu'avec le SD et la PP, et ce, tous potentiels matriciels confondus (fig. 3E). Avec un potentiel matriciel de pF 2,3 les valeurs  $\log(k_a)$  se montent à 1,3 (correspond à  $k_a = 20 \mu\text{m}^2$ ). En dessous de cette valeur de  $k_a$ , les sols sont, conformément aux observations de Fish et Koppi (1994), difficilement perméables et pas assez aérés. Par rapport au SD et à la PP, des valeurs de  $k_a$  plus basses ont été observées dans la couche sous-jacente du sol avec le L; elles se situent toutefois au-dessus de la valeur de  $\log(k_a) = 1,3$  avec tous les systèmes et tous les potentiels matriciels (fig. 3F). En dépit des valeurs  $k_a$  plus basses dans la couche sous-jacente du sol, les volumes des pores de  $d > 100 \mu\text{m}$  ne se distinguent pas avec le L, comparé à la couche supérieure du sol (fig. 2). Par conséquent, il semble qu'avec le L, la couche supérieure du sol présente une macroporosité avec davantage de continuité (moins de pores bouchés ou étroits) ou moins de tortuosité que la couche sous-jacente du sol. Par contre, avec le SD et la PP, le volume des pores de  $d > 100 \mu\text{m}$  est plus petit dans la couche supérieure que dans la couche sous-jacente du sol (fig. 2), et les valeurs  $k_a$  à 10 cm de profondeur sont de l'ordre de la valeur  $\log(k_a) = 1,3$  (fig. 3E). Ce phénomène est dû à l'absence de travail du sol. Il se peut que le système poreux de la couche supérieure du sol soit plus tortueux avec le SD et la PP, ce qui pourrait également expliquer les faibles valeurs de  $k_a$ . Si le système poreux de la couche supérieure du sol peut être qualifié de «spongieux» avec le SD et la PP, avec le L, la couche supérieure du sol présente des pores plutôt «canalisés» (Schjønning *et al.* 2002; Schjønning *et al.* 2011). Avec le L, les valeurs relativement basses de  $k_a$  dans la couche sous-jacente du sol sont liées au labour: le fait que les roues du tracteur s'appuient dans la raie de labour a conduit, à l'interface entre la couche supérieure et sous-jacente du sol, à des cisaillements ou des colmatages des pores d'origine biologique et à la décimation de la population de vers de terre. Cette sollicitation mécanique du sol par le labour a un effet négatif sur la continuité des pores dans la couche sous-jacente du sol, ce qui réduit la croissance racinaire (Munkholm *et al.* 2005; Olesen et Munkholm 2007). En revanche, l'absence de travail du sol avec le SD conduit à une augmentation de la population de vers de terre et à un accroissement des pores d'origine biologique dans la couche sous-jacente du sol (Kautz *et al.* 2013). Les résultats actuels le confirment: par rapport au L, on a constaté une valeur  $k_a$  plus élevée avec le SD dans la couche sous-jacente du sol (fig. 3F) et davantage de macropores (fig. 2).

### Transport de gaz et croissance végétale

Des valeurs  $D_p/D_0$  et  $k_a$  élevées favorisent l'échange de gaz entre le sol et l'atmosphère (absorption d' $\text{O}_2$  dans le

sol ou libération de  $\text{CO}_2$  et de gaz toxiques provenant de la zone racinaire dans l'atmosphère). Par contre, des valeurs  $D_p/D_0$  et  $k_a$  basses ont tendance à créer des conditions anaérobies dans le sol, ce qui stimule l'émission de gaz à effet de serre. Sur la base du seuil limite de diffusion ( $D_p/D_0 = 0,02$ ) proposé par Schjønning *et al.* (2003) pour les sols sableux, les mesures réalisées sur un limon sableux humide indiquent des valeurs  $D_p/D_0$  basses dans la couche supérieure du sol du SD et de la PP (fig. 3C). Toutefois, les valeurs sont toujours restées au-dessus du seuil critique ( $D_p/D_0 = 0,005$ ) proposé par Stepniewski (1980, 1981). Il est possible que les valeurs soient différentes pour le SD, car ces seuils limites de diffusion ont été établis dans des sols labourés (Reichert *et al.* 2009). Pour un potentiel matriciel donné, la capacité de transport de gaz avec le L est à son maximum dans la couche supérieure et à son minimum dans la couche sous-jacente du sol. Les valeurs  $D_p/D_0$  ne permettent pas de tirer de conclusions directes sur les émissions de gaz à effet de serre ( $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ), car des facteurs comme la température, les interactions entre différents groupes de microorganismes et la disponibilité de N ou de C n'ont pas été pris en compte, alors qu'ils jouent un rôle essentiel dans le transport de gaz (Ball 2013).

A condition que l'activité biologique et la croissance racinaire soient plus importantes dans la couche supérieure que sous-jacente du sol, les conditions de croissance devraient généralement être plus favorables avec le L qu'avec le SD et la PP. Par contre, la couche supérieure du sol se ressuie plus rapidement avec le L (fig. 3C), et les faibles capacités de transport de gaz avec le SD et la PP se limitent à la couche supérieure du sol (fig. 3E et F) et à des périodes limitées dans le temps (avec des sols détremés jusqu'à pF 2,0). Des valeurs critiques sont également atteintes avec le L dans la couche sous-jacente du sol. Durant les mois d'été, de juin à août, Chervet *et al.* (2006) ont effectué des mesures de potentiel matriciel et de TDR dans le maïs en période de croissance. Avec le SD, le sol était en moyenne légèrement plus humide en surface et légèrement plus sec dans la couche sous-jacente du sol qu'avec le L. Gut *et al.* (2015) n'ont par contre trouvé aucune différence entre le SD et le L en ce qui concerne les moyennes des potentiels matriciels à long terme à 30 cm de profondeur.

Sachant que les plantes tirent une grande partie de leurs besoins en eau et en nutriments de la couche sous-jacente du sol, des compactages de ces zones entraînent des pertes de rendements durables (Kautz *et al.* 2013). Les rendements significativement plus élevés avec le SD par rapport au L pour les cultures d'orge, de blé, de féveroles et de pois protéagineux, prouvent que la couche sous-jacente du sol est aisément accessible aux racines

des plantes (cf. article p. 216). À l'inverse, les rendements généralement supérieurs des betteraves sucrières pourraient être expliqués par les sols ameublés en surface caractéristiques du (cf. article p. 216) suggèrent que la densité plus élevée de la couche supérieure du sol avec le SD est compensée par les concentrations plus importantes de nutriments et de  $C_{org}$  à 0–10 cm de profondeur.

Avec le L, la biomasse des vers de terre est plus faible d'environ 50 % qu'avec le SD après dix ans d'essais (Maurer-Troxler *et al.* 2005). L'espèce anécique *Lumbricus terrestris* qui creuse en profondeur est en particulier nettement plus fréquente avec le SD qu'avec le L. Ces résultats sont en corrélation avec les valeurs  $D_p/D_0$  et  $k_a$  plus basses dans la couche sous-jacente du sol avec le L et confirment qu'avec le SD, les pores continus d'origine biologique sont plus nombreux (Dao 1996). Cette propriété facilite l'accès de la couche sous-jacente du sol aux racines des plantes (Kautz *et al.* 2013), ce qui, à Oberacker, a contribué à des rendements significativement supérieurs avec le SD pour certaines cultures.

## Conclusions

Avec le SD à long terme, les valeurs de  $\varepsilon_a$ ,  $D_p/D_0$  et  $k_a$  sont semblables à celles de la PP, avec de faibles différences entre couche supérieure et sous-jacente du sol. Avec le L par contre, les valeurs de  $D_p/D_0$  et  $k_a$  varient considérablement entre la couche supérieure et sous-jacente du sol. Tandis que le système poreux de la couche supérieure ameublie par le L est marqué par le travail du sol, avec le SD et la PP, les pores à 10 cm de profondeur semblent être plus tortueux. La couche sous-jacente du sol quant à elle est plus compactée avec le L qu'avec le SD et la PP et affiche des valeurs  $D_p/D_0$  et  $k_a$  moins favorables dues au nombre inférieur de pores continus d'origine biologique. Ces propriétés influencent également les fonctions pédologiques, comme la capacité d'absorption d'eau et la résistance à l'érosion. Les valeurs  $D_p/D_0$  et  $k_a$  peuvent descendre à un seuil critique lorsque le sol est humide dans la couche supérieure du sol avec le SD et la PP et dans la couche sous-jacente du sol avec le L. Comme les résultats de l'évaluation de la qualité du sol entre la couche supérieure et sous-jacente du sol peuvent être exactement opposés, une évaluation des systèmes culturaux en ce qui concerne leurs effets sur la qualité du sol doit tenir compte des propriétés de l'ensemble du profil pédologique. Les différences marquées entre les systèmes de SD et de L ont des impacts différents sur les rendements des cultures: tandis que le blé, l'orge, les féveroles et les pois protéagineux ont donné des rendements significativement plus élevés avec le SD, les betteraves sucrières ont eu tendance à fournir des rendements supérieurs avec le L (cf. article p. 216). ■

**Riassunto****Porosità del terreno e trasporto di gas dopo 19 anni di semina diretta e aratura**

Dal 1994, sulla superficie di osservazione sul lungo periodo Oberacker presso il centro Inforama Rütli a Zollikofen, vengono confrontati i due sistemi di coltivazione della semina diretta e dell'aratura su argilla sabbiosa povera di humus. In una prova sulle file con sei diverse superfici gestite, nell'ambito di una rotazione colturale vengono coltivate sei colture. Dopo 19 anni di sperimentazione, dai terreni coltivati con entrambi i sistemi sono stati prelevati campioni cilindrici indisturbati a 10 cm e a 40 cm di profondità. Il prelievo dei campioni è stato integrato con campioni di riferimento ricavati dalle strisce permanentemente inerbite tra le parcelle di sperimentazione. Nei campioni cilindrici sono stati determinati la porosità occupata dall'aria ( $\varepsilon_a$ ), la diffusione relativa del gas ( $D_p/D_0$ ) e la permeabilità all'aria ( $k_a$ ) in presenza di cinque diversi potenziali matriciali compresi tra -30 e -500 hPa. Nella semina diretta e nelle strisce permanentemente inerbite le caratteristiche del sistema poroso e del trasporto di gas si presentavano simili sia nello strato superiore che in quello inferiore del suolo, per quanto nello strato superiore fossero più sfavorevoli. Al contrario, i terreni arati mostravano una chiara stratificazione:  $\varepsilon_a$ ,  $D_p/D_0$  e  $k_a$  erano più favorevoli nello strato superiore del suolo e più sfavorevoli in quello inferiore rispetto a quanto riscontrato nella semina diretta e nelle strisce permanentemente inerbite. Ricchi di biopori, gli strati inferiori dei terreni coltivati con il sistema della semina diretta hanno prodotto rese tendenzialmente maggiori. Nell'ambito di una valutazione degli effetti del sistema di coltivazione sulla qualità del terreno sarebbe necessario analizzare l'intero profilo del suolo (vale a dire strato superiore e inferiore) nonché contemplare anche le funzioni centrali del suolo, come la crescita del raccolto.

**Summary****Soil porosity and gas transport properties after 19 years of no-till and conventional tillage**

No-till and conventional plough tillage have been compared since 1994 in the Oberacker long-term field experiment at Inforama Ruetli in Zollikofen (Switzerland) on a slightly humic sandy loam soil. Crops were grown in a six-year crop rotation in a strip trial with six adjoining plots. Nineteen years into the trial, undisturbed cylindrical samples were taken at 10 cm and 40 cm depth from both cropping systems. The sampling was supplemented with reference samples from the permanent-grassland strips between the experimental plots. The samples were used to determine air-filled porosity ( $\varepsilon_a$ ), relative gas diffusivity ( $D_p/D_0$ ) and air permeability ( $k_a$ ) at five different matrix potentials between -30 and -500 hPa. For no-till and the permanent-grassland strips, pore-system and gas-transport characteristics were similar in both the topsoil and subsoil, although less favourable in the topsoil. By contrast, conventionally tilled soils exhibited a clear stratification:  $\varepsilon_a$ ,  $D_p/D_0$  and  $k_a$  were more favourable in the topsoil and less favourable in the subsoil than for no-till and the permanent grassland strips, respectively. With no-till, the biopore-rich subsoils tended to lead to higher yields than under conventional tillage. In an evaluation of impacts of cropping systems on soil quality, the entire soil profile (i.e. topsoil and subsoil) should be studied, and key soil functions such as productivity should be included in the assessment.

**Key words:** air-filled porosity, air permeability, gas diffusivity, tillage system, no-tillage, mould-board ploughing.

**Bibliographie**

- La bibliographie est disponible auprès des auteurs.