

Influence du travail du sol sur la lixiviation des nitrates

Les différences sont plus faibles que prévu

Thomas Anken, Edward Irla, Jakob Heusser et Helmut Ammann, Station fédérale de recherches en économie et technologie agricoles (FAT), Tänikon, CH-8356 Ettenhausen

Walter Richner, Ulrich Walther, Peter Weisskopf et Jakob Nievergelt, Station fédérale de recherches en agroécologie et agriculture (FAL), Zürich-Reckenholz, CH-8092 Zürich

Peter Stamp, Ecole polytechnique fédérale, CH-8046 Zürich

Otto Schmid et Paul Mäder, Institut de recherche de l'agriculture biologique (IRAB), CH-5070 Frick

Quelle influence le labour et le semis direct ont-ils sur la dynamique de l'azote dans le sol, sur la lixiviation des nitrates et le sur le développement des plantes? Pour répondre à cette question dans des conditions proches de la pratique, la FAT a mis en place un essai en plein champ pendant plusieurs années. Outre les relevés habituels de paramètres agronomiques,

des cylindres en acier chromé (lysimètres) ont également été installés dans le sol dans le but de récupérer l'eau de percolation et de quantifier la lixiviation des nitrates (fig. 1). L'assolement était composé de maïs (1999) – de blé d'automne (2000) – de maïs (2001) – et de blé d'automne (2002). Après la première année de culture du maïs, moyen-

nant l'emploi d'engrais minéraux, on a constaté que la lixiviation des nitrates représentait 70 kg NO₃-N/ha dans les cultures de blé d'automne mises en place l'hiver et le printemps suivants avec semis direct. Avec labour, la lixiviation représentait 40 kg NO₃-



Fig. 1: Un excavateur a placé des cylindres en acier chromé d'un diamètre de 113 cm (surface de 1 m²) à 1,5 m de profondeur dans le sol. Ces dispositifs de mesure, appelés lysimètres, servaient à recueillir l'eau de percolation et à l'envoyer dans un collecteur de manière à déterminer la lixiviation des nitrates.

Sommaire	Page
Problématique	2
Installation d'essai, assolement et caractéristiques du site	2
Mesure de la lixiviation des nitrates	3
1999: première croissance lacunaire avec le semis direct	4
Rendements équilibrés 2000–2002	5
Faibles teneurs d'azote dans le sol et l'eau d'infiltration	5
Lixiviation des nitrates – aucune tendance nette	6
Un faible taux d'utilisation annuel entraîne des coûts élevés	7
Conclusions	8
Bibliographie	8

Problématique

Les réseaux d'eau potable de près de 350 communes suisses présentent des teneurs en nitrates trop élevées (OFAG 2002). Outre la modification des assolements, l'augmentation de la part de végétalisation et la réduction de la fumure azotée, la suppression du travail du sol (semis direct) permet-elle aussi de réduire la lixiviation des nitrates? Dans la littérature scientifique, la relation entre le travail du sol et la lixiviation des nitrates est controversée. A côté des travaux qui ont mis en évidence des quantités plus faibles de nitrates lessivés dans le cas du semis direct par rapport à des parcelles labourées ou travaillées (Addiscott 2000, Kohl et Harrach 1991, Tebrügge 2002, Chervet et al. 2003), il existe également des travaux, qui montrent qu'il n'existe pratiquement aucune différence d'un procédé de mise en place à l'autre (Goss et al. 1993, Randall et Iragavarapu 1995, Shipitalo et al. 2000). Weed et Kanwar (1996), Tan et al. (1998) et Dick et al. (1989) ont même relevé un volume de lixiviation des nitrates plus important avec le semis direct qu'avec le labour.

Le présent essai avait pour but d'étudier la dynamique de l'azote dans le sol et la lixiviation des nitrates dans la nappe phréatique dans le cas du labour et du semis direct, dans les conditions propres à la Suisse. Des analyses N_{min} et des analyses de l'eau du sol effectuées à l'aide de bougies poreuses ont montré la dynamique de l'azote minéralisé dans le sol. Des lysimètres ont permis de recueillir la totalité de l'eau de percolation. Sur la base de la quantité d'eau de percolation et de sa concentration en azote nitrique, les chercheurs ont pu déterminer la quantité d'azote nitrique lessivée.

N/ha. Dans le cas du semis direct, le carbone organique et l'azote résiduels issus de la prairie temporaire précédente, associés à des températures du sol favorables ont sans doute contribué à accroître la minéralisation de l'azote. Sous les cultures de maïs qui ont suivi (2001), les lysimètres ont recueilli environ 30 kg NO_3-N /ha, dans le cas du labour comme

ce étudiés avec les lysimètres. Avec le procédé intitulé «préparation superficielle du sol» (PS), les relevés se sont limités aux paramètres agronomiques courants sans mesure de la lixiviation des nitrates. Avec le procédé SD, aucun travail du sol n'a été pratiqué pendant toute la durée de la période d'essai. Dans le cas du procédé LA, le sol a été labouré une fois par an à l'aide d'une charrue bisoc et hersé à l'aide d'une herse rotative à axes verticaux. Avec le procédé PS, le déchaumage a été effectué avec une herse à bêtes roulantes et le semis avec une combinaison d'outils entraînés à la prise de force pour le blé d'automne, tandis que le maïs était semé sur bandes fraisées (fig. 2). Les parcelles de ces procédés principaux ont été subdivisées en deux procédés annexes «fumure d'azote minéral» (MIN), «lisier» (LI, fig. 3) et avec un procédé «sans fumure d'azote minéral» (ON) (Split-Plot-Design avec 3 répétitions). L'engrais minéral azoté utilisé était du nitrate d'ammoniac contenant 27,5 % de N. Quant au lisier, il s'agissait de lisier de bovins complet. Le blé d'automne a été semé sur un interligne de 12,5 cm pour le LA, le PS et de 19 cm pour le SD. Quel que soit le procédé, la profondeur de semis était de 2-3 cm. Pour le semis de maïs, l'interligne était de 75 cm (densité de semis 10 grains/m², profondeur de mise en terre 5 cm). L'assolement était le suivant: maïs-ensilage - blé d'automne - maïs-ensilage - blé d'automne. Les principales données relatives à la mise en place des cultures sont répertoriées au tableau 3.

Installation d'essai, assolement et caractéristiques du site

Les lysimètres sont placés sur des parcelles d'essai de 10 x 12 m de la FAT Tänikon. Le sol est un sol brun lessivé, profond (limon). Le pourcentage de pierres de la parcelle représente environ 10 pour cent volumétrique (0-90 cm de profondeur). Le tableau 1 définit les différents paramètres pédologiques. La température annuelle moyenne et la somme des précipitations annuelles de 1999 à 2001 sont représentées au tableau 2. Le «labour» (LA) et le «semis direct» (SD) étaient les deux systèmes de mise en pla-

Tab. 1: Propriétés du sol sur le site d'essai

Paramètres pédologiques	Profondeur 0-20 cm	Profondeur 30-50 cm
Argile %	22	25
Silt %	35	34
Sable %	43	41
C. org. %	1.6	-
pH	6.6	6.8

Tab. 2: Sommes des précipitations annuel les et températures annuelles moyennes

	1999	2000	2001	Moyenne ¹
Précipitation s mm	1419	1128	1582	1180
Température °C	8.7	9.7	9.0	8.2

¹ Moyenne de 1970-2000



Fig. 2: Les trois procédés de mise en place étaient les suivants: labour (LA, en haut), préparation superficielle du sol (PS, en haut, droite) et semis direct (SD, droite). Dans le cas du SD, le sol n'a pas été travaillé pendant toute la période d'essai, tandis qu'avec la PS et le LA, le sol a été travaillé avant chaque culture principale.



Mesure de la lixiviation des nitrates

Pour recueillir l'eau d'infiltration, on a utilisé des lysimètres de forme cylindrique, monolithiques (remplis de sol non perturbé) en acier chromé qui présentaient une surface d'un mètre carré et une profondeur de 1,5 m. Depuis les lysimètres, l'eau était ensuite amenée jusqu'à un collecteur (fig. 1 et fig. 4), où des compteurs à augets basculants déterminaient la quantité d'eau de percolation. Cette eau était ensuite récupérée dans des bacs



Fig. 3: Le distributeur d'engrais pneumatique (gauche) répartissait les engrais minéraux dans les parcelles d'essai et l'épandeur à tuyaux souples (droite), le lisier.

en PVC pour déterminer la concentration d'azote nitrique (environ un prélèvement tous les 15 jours). Les lysimètres ont été fabriqués selon le modèle de Murer (1995). Ils ont été installés en trois répétitions pour le LA et le SD dans les parcelles avec fumure d'azote minéral (MIN). Dans les parcelles équipées de lysimètres, le travail du sol et le semis ont été effectués avec des machines traditionnelles après avoir retiré les anneaux supérieurs des lysimètres (fig. 4).

Pour comparer les concentrations de nitrates dans l'eau de percolation et dans l'eau du sol, on a également installé trois bougies poreuses dans chaque lysimètre, à une profondeur de 125 cm. Ces bougies poreuses en céramique ont permis d'aspirer l'eau stockée dans les cavités du sol (eau du sol).

1999: première croissance lacunaire avec le semis direct

Au printemps 1999, dans le procédé du semis direct (SD), le maïs-ensilage s'est très mal développé par rapport au procédé avec labour (LA) (fig. 5). Cette première croissance lacunaire n'a pu être expliquée ni par la température du sol, ni par l'approvisionnement en eau ou en azote. Les températures du sol relevées à 5 cm de profondeur ne varient pratiquement pas entre les procédés SD et LA. A partir de fin mai-juin, elles étaient supérieures à 15 °C, ce qui représente une température favorable au développement du maïs. D'autre part, sur les trois ans étudiés, la teneur en N des plantes n'affichait aucune différence significative entre le procédé SD et le procédé LA. Même pendant la première croissance lacunaire de l'année 1999, pendant laquelle les plantes étaient d'un vert très clair, la teneur en azote des plantes de SD n'était pas inférieure à celle des plantes de LA. La première croissance lacunaire est sans doute liée aux très fortes précipitations des mois de mai (244 mm) et juin 1999 (189 mm). Elles étaient en effet largement supérieures à la moyenne annuelle de 114 mm pour mai et de 139 mm pour juin. Dans le cas du semis direct (SD), où le terrain, contrairement au sol ameubli avec la charrue (LA), présente un volume de pores grossiers nettement plus faible, ces grosses quantités d'eau ont sans doute empêché un approvisionnement correct des racines en oxygène. Cette hypothèse n'a toutefois pas pu être

Tab. 3: Indications relatives aux cultures plantées ainsi qu'aux travaux de mise en place et de fumure

	1999	2000	2000	2001
Labour ¹	03.05.99	11.10.99	-	04.04.01
Préparation du lit de semences ² , semis	05.05.99	12.10.99	14.08.00	02.05.01
Culture Variété	Maïs-ensilage LG 22.65	Blé d'automne Titlis	Moutarde jaune Silenda	Maïs-ensilage LG 22.65
Densité de semis	10 grains/m ²	420 grains/m ²	20 kg/ha	10 grains/m ²
Fumure azotée en kg N/ha	150	120	-	160

¹ Pour le LA: charrue bisoc, 25 cm de profondeur

² Pour le LA et la PS: herse rotative à axes verticaux, 8 cm de profondeur; PS maïs: semis sur bandes fraisées.

Fig. 4: Un couvercle ferme les lysimètres à la base. L'écoulement conduit à un collecteur où l'eau d'infiltration passe par un compteur à augets basculants, avant d'être recueillie dans des bacs en PVC. Des bougies poreuses en céramique permettent d'aspirer l'eau du sol à 125 cm de profondeur.

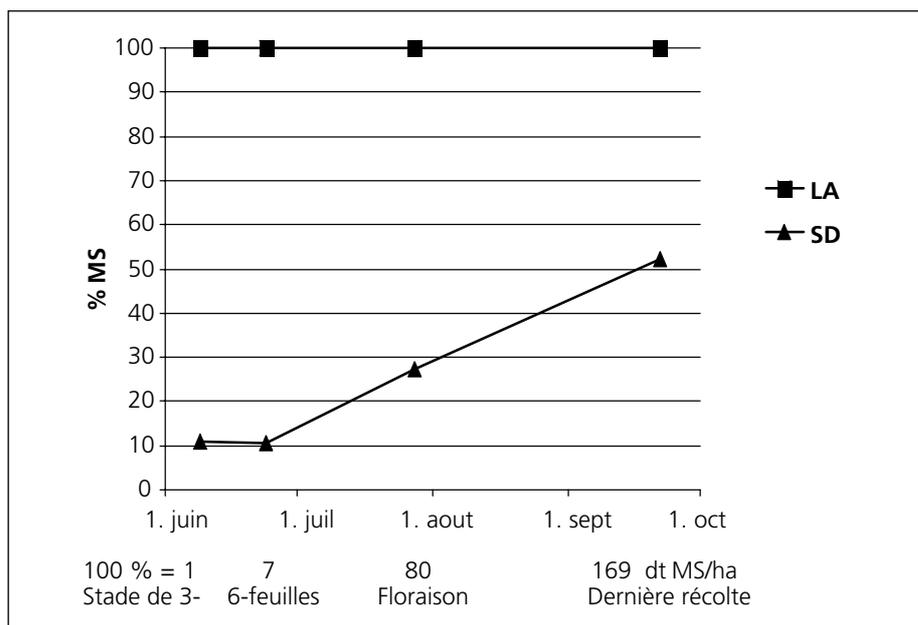
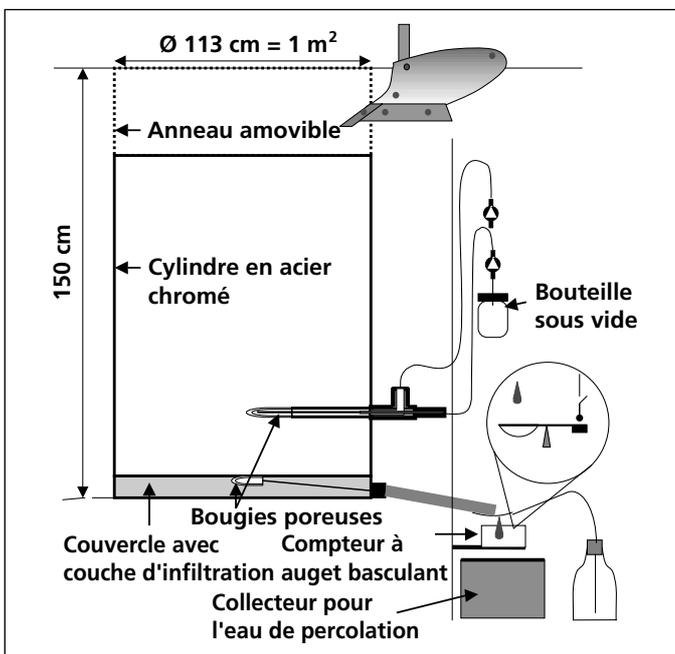


Fig. 5: Augmentation relative de la matière sèche (%) dans le cas du semis direct (SD) par rapport au labour (LA) en 1999. Les fortes précipitations pendant les mois de mai et de juin sont considérées comme la cause principale de la première croissance lacunaire avec le SD.

directement confirmée par des mesures. Outre les fortes précipitations, les conditions physiques dans le sillon de semis influencent également les modalités de développement pendant la phase de première croissance. Celles-ci se caractérisent par l'apport en oxygène, en eau et en éléments nutritifs des jeunes racines et par la résistance du sol à la pénétration. La phase de première croissance des plants de maïs, extrêmement mauvaise en 1999, montre que des améliorations peuvent encore être apportées en ce qui concerne la «préparation du lit de semences» dans le sillon. L'idéal serait d'avoir des systèmes de socs qui ne lissent pas le sillon même dans les terrains humides, qui émiettent le sol, referment le sillon sans compacter la terre et fonctionnent sans risque de bourrage.

Rendements équilibrés 2000-2002

Dans les années 1999 (maïs) et 2000 (blé d'automne), le LA est le procédé qui a obtenu les rendements les plus élevés, ce résultat étant statistiquement significatif (fig. 6). Avec les cultures suivantes de maïs (2001) et de blé d'automne (2002), les procédés de mise en place ne se distinguent que de quelques pourcents, les différences n'étant pas statistiquement significatives. Par contre, quelle que soit l'année considérée, les différences de rendement d'un procédé de fumure à l'autre étaient toujours significatives. La fumure d'azote minéral (MIN) obtenait toujours les rendements les plus élevés; le procédé ON, toujours les plus petits. Le LI se situait entre les deux. Les rendements supplémentaires obtenus par kg d'azote épandu (azote ammoniacal pour le lisier) ont montré que la fumure minérale était plus apte à convertir l'azote appliqué en rendements (données non représentées). On peut supposer que malgré l'épandage du lisier par tuyaux souples, les pertes d'ammoniac sous forme gazeuse ont fait que l'azote ammoniacal contenu dans le lisier a été moins bien exploité, ce qui a entraîné des rendements inférieurs.

Faibles teneurs d'azote dans le sol et l'eau d'infiltration

La figure 7 présente les valeurs N_{min} mesurées dans le sol de 1999 à 2002. La

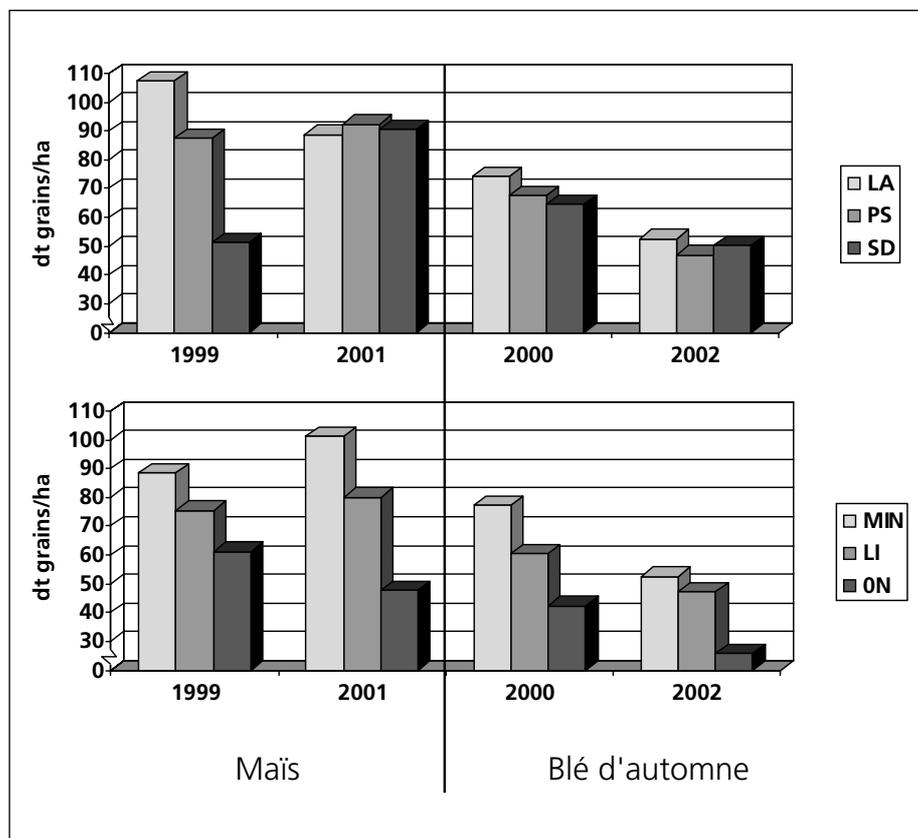


Fig. 6: Rendements en grains (dt/ha) du maïs et du blé d'automne de 1999 à 2002. La moyenne des rendements des différents procédés de travail du sol, labour (LA), préparation superficielle du sol (PS) et semis direct (SD) a été établie avec la fumure minérale et les apports de lisier. La moyenne des différents procédés de fertilisation, fumure minérale (MIN), lisier (LI), et sans azote (ON) a été établie pour tous les procédés de travail du sol.

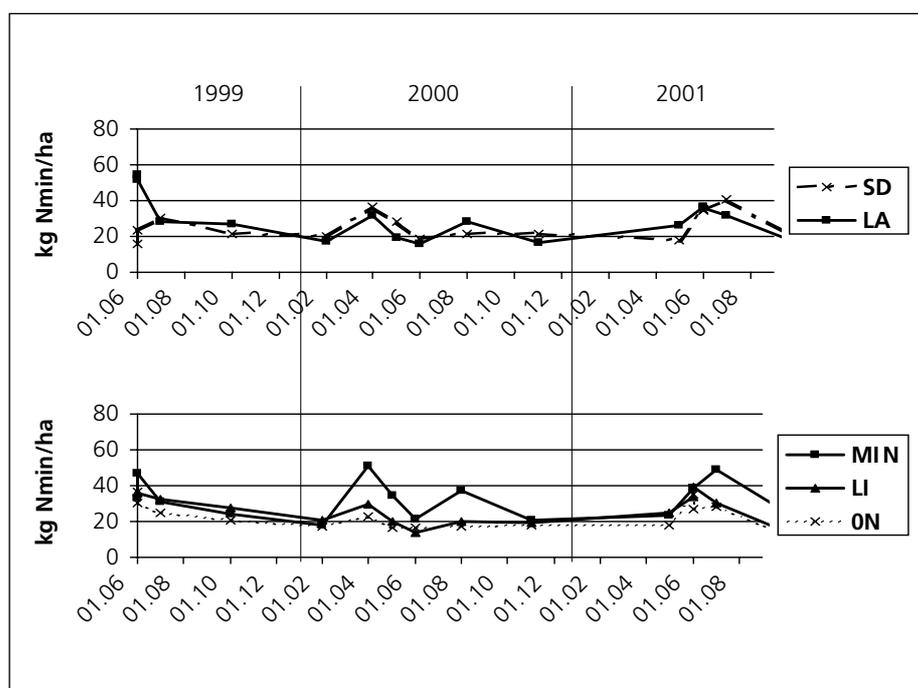


Fig. 7: Teneurs du sol en N_{min} (kg Nmin/ha) de 1999 à 2002. A aucun moment, les valeurs ne sont élevées. La moyenne des valeurs des procédés de travail du sol avec labour (LA) et semis direct (SD) a été établie pour les trois procédés de fertilisation (fumure minérale (MIN), lisier (LI), et sans azote (ON)) et vice versa.

teneur du sol en azote minéral était assez faible pendant toute la période considérée. On a uniquement relevé des valeurs N_{min} légèrement plus élevées pendant la phase de première croissance du maïs et du blé d'automne juste après la fumure. Les deux procédés de mise en place ne se distinguent de manière significative que dans des cas isolés. Comme on pouvait s'y attendre, la fumure minérale (MIN) est celle qui a obtenu les valeurs les plus élevées dans la majorité des cas. Le lisier (LI) arrive en deuxième position et le procédé sans fumure azotée (ON) est celui qui a obtenu les valeurs les plus basses.

La concentration en azote nitrique dans l'eau du sol (fig. 8) affiche une évolution similaire pour le LA et le SD. Tout comme les relevés N_{min} , les concentrations n'ont jamais atteint des valeurs très élevées. A l'instar des valeurs enregistrées pour l'eau du sol, les concentrations de l'eau de percolation en azote nitrique après la récolte de maïs-ensilage en automne 1999 et pendant l'hiver suivant étaient nettement plus élevées pour le SD que pour le LA (fig. 9). Il se peut que les teneurs en azote et en carbone organiques plus élevées avec le SD par rapport au LA proviennent de la prairie temporaire précédente ou que le prélèvement plus réduit d'azote par les plants de maïs soit lié à une minéralisation plus importante de l'azote à la fin de l'automne. Pendant les deux années suivantes, les deux procédés de mise en place ne se sont pas véritablement distingués l'un de l'autre. Les plus fortes concentrations de l'ordre de 15 mg NO_3-N/l ont été relevées après le maïs en 1999 et après la fumure du maïs en 2001.

Lixiviation des nitrates – aucune tendance nette

La figure 10 indique la lixiviation des nitrates déterminée à l'aide des lysimètres. Après la première année de culture en maïs, le blé d'automne qui a suivi avec SD a enregistré une lixiviation des nitrates de 70 kg NO_3-N/ha . Pour le LA, le chiffre était de 40 kg NO_3-N/ha . Sous la culture de maïs suivante (2001), les lysimètres ont recueilli environ 30 kg NO_3-N/ha pour le LA comme pour le SD. Les quantités de nitrates lessivées étaient donc relativement faibles. Dans le présent essai, il semble que l'apport d'azote due à la minéralisation naturelle et à la fumure ait

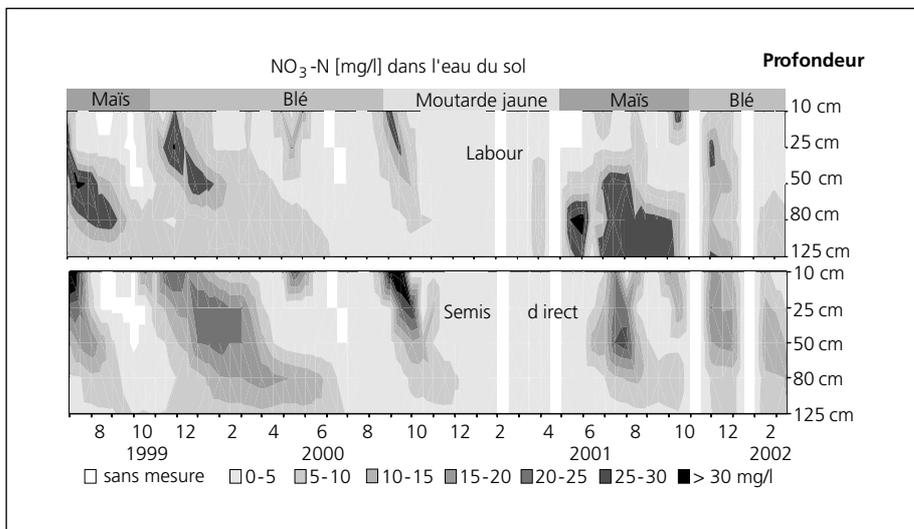


Fig. 8: Evolution temporelle de la concentration en azote nitrique (mg/l) dans le sol pour les procédés Labour et Semis direct avec fumure minérale de 1999 à 2002. Les «motifs de base» se ressemblent beaucoup.

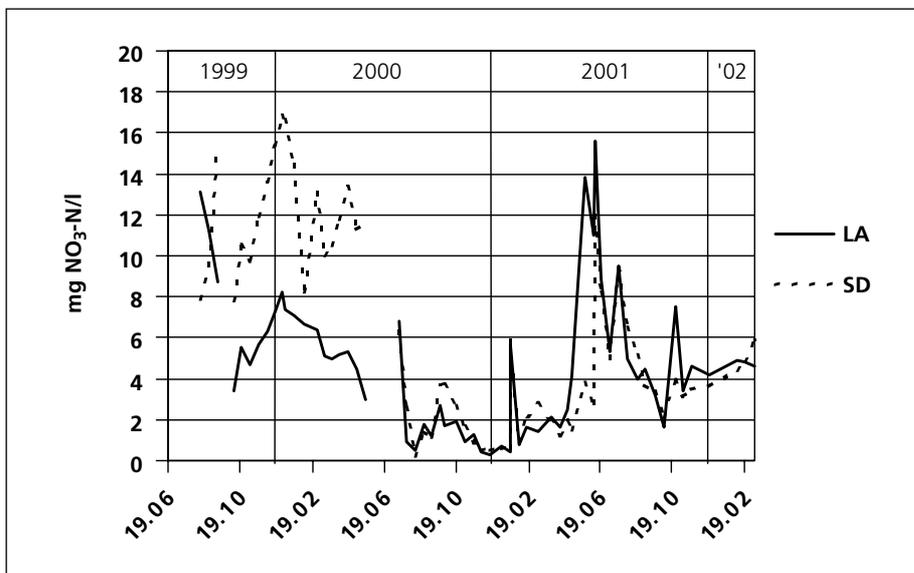


Fig. 9: Concentration en azote nitrique (mg/l) dans l'eau d'infiltration recueillie dans les lysimètres pour les procédés Labour (LA) et Semis direct (SD) de 1999 à 2002. Les deux procédés ne montrent pas de différences systématiques.

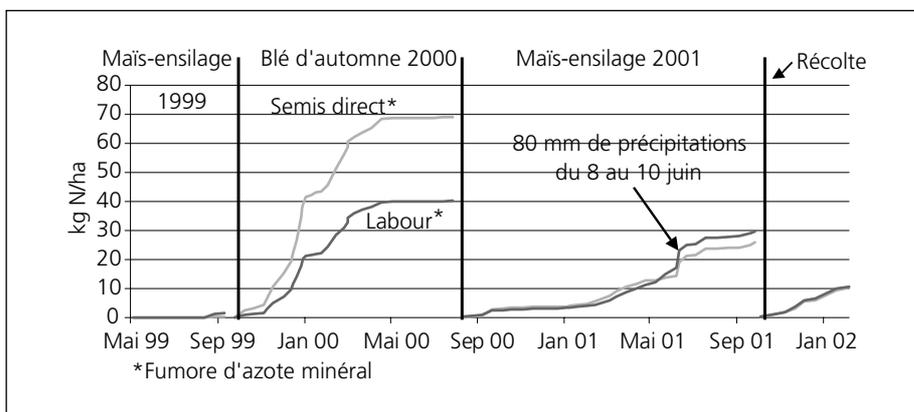


Fig. 10: Quantité d'azote nitrique (kg N/ha) lessivée et recueillie dans les lysimètres de terrain pour le labour et le semis direct dans les années 1999 à 2002. Sauf en l'an 2000, le Labour et le Semis direct ne diffèrent pas.

été relativement synchronisé par rapport à l'absorption d'azote par les plantes. Comme l'azote minéral était bien exploité par les plantes, peu d'azote nitrrique pouvait être lessivé pendant la période de repos végétatif. Seul l'automne 1999 fait exception. A cette époque, les parcelles de SD ont en effet minéralisé plus d'azote que le blé d'automne ne pouvait absorber, ce qui s'est traduit par une augmentation de la lixiviation.

La lixiviation des nitrates enregistrée au printemps 2001, provenait très vraisemblablement de l'azote qui avait été minéralisé ou apporté sous forme d'engrais au printemps. Les valeurs N_{min} et les analyses d'eau du sol ont en effet montré qu'à la fin de l'hiver, il n'y avait pratiquement plus de nitrates dans l'ensemble du sol. Ce point confirme l'importance de fertiliser au bon moment et en quantités appropriées et adaptées aux besoins des plantes. Si le maïs est fertilisé trop tôt, les nitrates risquent d'être lessivés en cas de fortes précipitations.

Un faible taux d'utilisation annuel entraîne des coûts élevés

Outre les répercussions écologiques, on peut également se demander quel est le coût des machines et du tracteur pour les différents procédés de mise en place. Suivant l'assolement, le site et les connaissances du chef d'exploitation, les procédés avec travail minimal du sol peuvent présenter des inconvénients par rapport aux procédés traditionnels. Ces inconvénients peuvent prendre la forme de rendements plus faibles ou de coûts plus importants pour la protection des plantes. Lorsqu'on compare les procédés, ce sont les machines qui entraînent les différences de coûts les plus importantes, tandis que les différences de rendements ou de coûts de la protection des plantes sont plus fluctuantes. C'est la raison pour laquelle les calculs suivants ne portent que sur les coûts de machines. La figure 11 et le tableau 4 indiquent les coûts directement attribuables à différents procédés de mise en place. Les tarifs employés correspondent à ceux des «Frais de machines 2003» (Rapport FAT 589). Suivant le taux d'utilisation annuel, on constate ce qui est le plus intéressant d'un point de vue économique: louer les machines, en être propriétaires ou encore faire faire les travaux en régie. Lorsque le taux d'utilisation augmente, il est alors

Tab. 4: Coûts directement attribuables par procédé. Fixes = coûts fixes (amortissement, intérêts, taxes, assurance) Var = coûts variables (carburant, réparations), propriété = propres machines, location = combinaison d'outils loués, régie = travaux confiés à une entreprise

Procédé		Charrue, 4 socs	Combinaison d'outils, 3m	Tracteur, 4-roues motrices, 70 kW (95 CV)
LA propriété	Charrue + combinaison d'outils en propriété	Fixes + Var	Fixes + Var	Var
LA propriété + T	Charrue + combinaison d'outils en propriété, tracteur de 70 kW au lieu de 50 kW	Fixes + Var	Fixes + Var	Var + Différence coûts fixes tracteur
CO propriété	Combinaison d'outils en propriété	-	Fixes + Var	Var
CO location	Combinaison d'outils en location	-	Location	Var
CO régie	Combinaison d'outils en régie	-	Tarif régie	-
SD régie	Semis direct en régie	-	Tarif régie	-

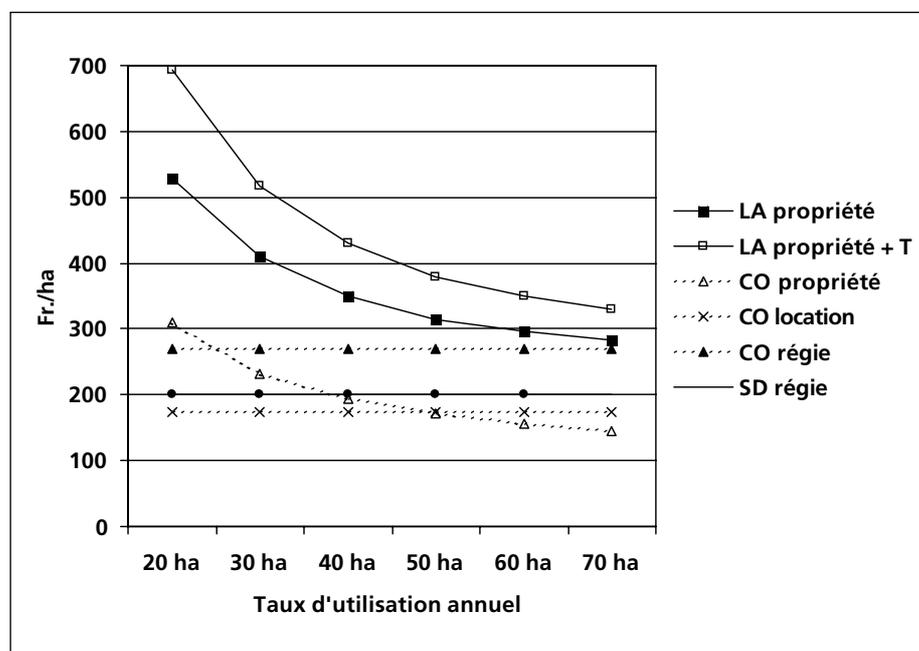


Fig. 11: Coût de différents procédés de travail du sol pour différents taux d'utilisation annuels. Lorsque le taux d'utilisation annuel est faible, la location et les travaux en régie sont plus avantageux que l'achat de ses propres machines (légende cf. tableau 4).

possible de répartir les coûts fixes, invariables quel que soit l'emploi des machines, sur plusieurs unités de travail, ce qui permet d'obtenir des coûts plus faibles par hectare. Sans tenir compte du coût des bâtiments, le procédé «LA propriété» (cf. tableau 4) génère Fr. 7190.– de coûts fixes par an. Avec un taux d'utilisation de 20 hectares par an, cette somme représente Fr. 360.– par hectare. Les coûts variables, sans tenir compte de l'entretien, se montent à Fr. 170.– par hectare,

y compris un tracteur de 70 kW (95 CV). Les coûts directement attribuables par hectare s'élèvent donc à Fr. 530.–. Mais, lorsque l'exploitation achète un tracteur plus puissant uniquement à cause du labour et du travail du sol («LA propriété + T»), les coûts fixes sont alors plus importants qu'avec le tracteur précédent. La différence alourdit d'autant le coût du procédé considéré. Sans tenir compte du coût des bâtiments, un tracteur de 70 kW (95 CV) représente environ Fr. 10 600.–

de coûts fixes par an. Par contre, un tracteur de 50 kW (68 CV) ne coûte plus qu'environ Fr. 7300.– par an. La différence de Fr. 3300.– tient essentiellement au coût plus élevé des intérêts et de l'amortissement, sachant que la différence de prix entre les deux tracteurs neufs est de Fr. 31 000.–.

Lorsque le taux d'utilisation annuel est faible, il est plus rentable de louer les machines ou de faire effectuer les travaux en régie que d'avoir ses propres machines. Avec une combinaison d'outils, les coûts de la mécanisation propre («CO propriété») et de la location de machines («CO location») sont les mêmes pour une surface de 54 ha. Les coûts de la mécanisation propre et des travaux en régie («CO régie») sont égaux pour une surface de 24 hectares. A ce niveau, le temps de travail n'a pas été pris en compte dans les calculs en termes monétaires.

Chaque exploitation doit donc définir quelle est la stratégie de mécanisation la mieux adaptée à son cas particulier. Le programme de coûts des machines «Tarifat» (à commander auprès de la LBL et du SRVA) est un outil précieux qui aide à choisir la stratégie optimale pour chaque exploitation.

Conclusions

- Sur le site étudié, l'essai réalisé avec les lysimètres n'a pas permis de mettre en évidence une influence manifeste des systèmes de travail du sol sur la lixiviation des nitrates.
- Si l'on jette un oeil à la bibliographie, on constate que sur ce point, les travaux publiés au niveau international ne sont pas non plus arrivés à une conclusion claire et nette.
- Le climat, les propriétés du sol, l'assolement et la fumure sont les facteurs déterminants en ce qui concerne la lixiviation des nitrates.
- La grande efficacité des procédés appliquant un travail minimal du sol permet d'atteindre des taux d'utilisation annuels élevés lorsque les machines sont utilisées en commun, ce qui réduit considérablement le coût du travail du sol et du semis.
- Les procédés appliquant un travail minimal du sol et le semis direct stimulent les organismes vivants dans le sol, réduisent l'érosion, améliorent la traficabilité des parcelles et diminuent la consommation de carburant. Ils apportent donc une contribution précieuse à l'exploitation durable de nos terres assolées.

Bibliographie

Addiscott T.M., 2000. Tillage, mineralization and leaching. *Soil and Tillage Research Special Issue*, 163–165.

BLW, 2002. Nitrat gehört nicht ins Wasser. Pressemitteilung des Bundesamt für Landwirtschaft, 27. Mai, 1 p.

Chervet A., Flückiger H., Kündig C., Maurer-Troxler C., Ramseier L., Schwarz R., Sturny W., Fehlmann A., Roberts L., Rytz I. et Stössel F., 2003. *Bodenbericht 2003*. Abteilung Umwelt und Landwirtschaft Kt. Bern, Zollikofen. 51 S.

Dick W.A., Roseberg R.J., McCoy E.L., Edwards W.M. et Haghiri F., 1989. Surface Hydrologic Response of Soils to No-Tillage. 53, 1520–1526.

Goss, M. J., Howse K.R., Lane P.W., Christian D.G. et Harris G.L., 1993. Losses of nitrate-nitrogen in water draining from under autumn-sown crops established by direct drilling or mouldboard ploughing. *Journal of soil science*. 44, 35–48.

Kohl R. et Harrach T., 1991. Zeitliche und räumliche Variabilität der Nitratkonzentration in der Bodenlösung in einem langjährigen Bodenbearbeitungsversuch. *Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung*. 32, 80–87.

Murer E., 1995. Wassergüteeerfassungssysteme in der ungesättigten Bodenzone. Ergebnisbericht aus dem Grundwassersanierungs-Pilotprojekt «Obere Pettenbachrinne». In: «Gewässerverträgliche Landbewirtschaftung» Österreichisches Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, 160–173.

Randall G. W. et Iragavarapu T.K., 1995. Impact of long-term tillage systems for continuous corn on nitrate leaching to tile drainage. *J. environ. Qual.* 24, 360–366.

Shipitalo M.J., Dick W.A. et Edwards W.M., 2000. Conservation tillage and macropore factors that affect water movement and the fate of chemicals. *Soil and Tillage Research* 53 3–4, 167–183.

SVLT, Fachkommission 2., 2003. *Richtansätze 2003*. Schweizer Landtechnik. 3, 23.

Tan C.S., Drury C.F., Soultani M., van Wesenbeeck I.J., Ng H.Y.F., Gaynor J.D. et Welacky T.W., 1998. Effect of Controlled Drainage and Tillage on Soil Structure and Tile Drainage Nitrate Loss at the field scale. *Water Science and Technology* 38. 4-5, 103–110.

Tebrügge F., 2002. Verminderte Nitrat- auswaschung. *UFA-Revue*. 9, 42–43.

Weed J. et Kanwar R.S., 1996. Nitrate and water present in and flowing from root zone soil. *J. Environ. Qual.* 25, 709–719.

Weisskopf P., Zihlmann U. et Walther U., 2001. Einfluss der Bewirtschaftung auf die Stickstoffdynamik im Bodenwasser. *Agrarforschung*. 8 (9), 348–353.