

Le procédé de fertilisation CULTAN réduit le lessivage de l'azote tout en maintenant les rendements

Guénola Bernert, Ernst Spiess et Frank Liebisch

Agroscope, groupe Protection des eaux et flux des substances, 8046 Zurich, Suisse

Renseignements: Frank Liebisch, frank.liebisch@agroscope.admin.ch

<https://doi.org/10.34776/afs14-207f> Date de publication: 4 octobre 2023



La fertilisation CULTAN consiste à fertiliser les cultures par injection d'une solution concentrée d'ammonium.
(Photo: Martin Häberli)

Résumé

La technique de fertilisation CULTAN (Controlled Uptake Long Term Ammonium Nutrition) consiste à fertiliser les cultures par injection d'une solution concentrée d'ammonium (NH_4^+) dans le sol et est censée avoir des effets positifs sur la physiologie des plantes et sur l'efficacité de l'utilisation de l'azote. Cette étude, basée sur un essai lysimétrique d'une durée de 12 ans et sur un essai en plein champ d'une durée de 3 ans, vise à évaluer si cette technique peut contribuer à réduire le lessivage de l'azote tout en maintenant les rendements dans les grandes cultures en Suisse. Le procédé CULTAN a donné des résultats similaires en termes de rendement à ceux du procédé avec épandage en surface de nitrate d'ammonium (ConvF). En

revanche, l'utilisation de l'azote a été tendanciellement plus efficace et le lessivage de l'azote par unité de rendement était inférieur de 38 % à celui de ConvF. Les essais suggèrent que l'emplacement et le moment de l'injection doivent être mieux adaptés à la physiologie des plantes et aux conditions pédoclimatiques pour obtenir une efficacité optimale de la solution nutritive. Nos observations indiquent également que CULTAN peut influencer d'autres flux de l'azote outre l'assimilation par les cultures et le lessivage.

Key words: N leaching, N fate, CULTAN, NH_4^+ nutrition, injection fertilisation

Introduction

Les niveaux élevés de nitrate (NO_3^-) dans les eaux souterraines sont souvent une conséquence de l'apport d'engrais azotés, en particulier dans les systèmes de grandes cultures. Dans le cadre de l'Observation nationale des eaux souterraines (NAQUA) en 2014, la concentration de NO_3^- relevée dans 40 % des points de mesure des zones dans lesquelles prédominent les grandes cultures dépassait la valeur limite fixée dans l'ordonnance sur la protection des eaux (25 mg l^{-1}), valeur au-delà de laquelle des mesures de réduction sont requises. Dans 12 % des cas, la valeur maximale de 40 mg l^{-1} fixée pour l'eau potable dans la législation sur les denrées alimentaires (OFEV, 2019) a même été dépassée. Le nitrate présent dans les eaux souterraines constitue un risque pour la santé humaine (Rohrman *et al.*, 2021) et contribue à l'eutrophication des mers après exfiltration dans un cours d'eau. La technique de fertilisation CULTAN (Controlled Uptake Long Term Ammonium Nutrition; Nutrition à l'ammonium contrôlée sur la durée) consiste à injecter dans le sol une solution d'ammonium (NH_4^+) hautement concentrée et à faible pH (<5,5). L'assimilation préférentielle par les plantes de l'azote sous la forme de NH_4^+ favorise un système racinaire plus dense, réduit le transfert des acides aminés des parties âgées vers les parties jeunes de la plante et fortifie le méristème apical caulinaire (Sommer et Scherer, 2007).

Cette étude se concentre sur les effets de CULTAN sur le rendement des cultures, l'utilisation plus efficace de l'azote et le lessivage de l'azote dans les grandes cultures.

Méthode

Nous avons analysé les résultats de deux études comparant la technique CULTAN à une fertilisation conventionnelle (ConvF) à base de nitrate d'ammonium épandu au sol. La première étude se base sur un essai lysimétrique réalisé à Zurich-Reckenholz d'une durée de 12 ans comprenant deux périodes d'une rotation des cultures usuelle sur le Plateau suisse et trois répétitions par procédé. L'apport d'azote dans le procédé ConvF s'élevait à 100 % des normes de fumure suisses (PRIF; Sinaj *et al.*, 2017) et celui de CULTAN fluctuait entre 100 et 120 % selon les années avec une moyenne de 115 % au cours de la période d'étude. En outre, les deux procédés ont été comparés au cours des sept premières années à un épandage au sol de nitrate d'ammonium avec un apport d'azote fixé à 130 % des normes PRIF, représentant une sur-fertilisation (SurF).

La seconde étude est basée sur une série d'essais en plein champ avec du blé d'automne et du maïs réalisés dans la partie nord du canton de Zurich entre 2008 et 2010. Chaque culture a été semée sur deux sites chaque année composés de parcelles de $6 \text{ m} \times 20 \text{ m}$, avec 4 répétitions par procédé. L'apport d'azote a été déterminé par les agriculteurs exploitant les sites.

Dans les deux études, nous avons analysé les variables suivantes:

- Rendement relatif des produits principaux et des sous-produits récoltés des cultures (en pourcentage du rendement de référence des PRIF; Sinaj *et al.*, 2017)
- Structure du rendement des céréales: nombre d'épis par m^2 , de grains par épis et poids de mille grains
- Efficacité de l'utilisation de l'azote: différence d'absorption d'azote entre les parcelles fertilisées et les parcelles non fertilisées divisée par l'apport d'azote sous forme d'engrais.
- Bilan azoté: l'apport d'engrais azoté moins la différence d'absorption d'azote entre les parcelles fertilisées et celles non fertilisées.

Dans l'essai avec des lysimètres, la quantité d'eau de percolation, la concentration en NO_3^- de l'eau de percolation et le lessivage de l'azote ont été mesurés du 25 février 2009 au 25 mars 2021. Les valeurs de lessivage sont basées sur une période de référence allant du 1^{er} septembre au 31 août de l'année suivante. Afin d'évaluer l'effet du procédé CULTAN sur le lessivage de l'azote en tenant compte du rendement des cultures, le lessivage de l'azote a été exprimé non seulement par unité de surface, comme c'est habituellement le cas, mais aussi par unité de rendement du produit principal. Dans l'essai au champ, l'azote minéral du sol (N_{min}) est utilisé comme indicateur du risque de lessivage de l'azote et de la stabilité des dépôts de NH_4^+ . N_{min} a été mesuré sur la base d'échantillons de sol prélevés dans les horizons 0–90 cm et consolidés au niveau du site avant la première application d'engrais azoté ainsi qu'au niveau du procédé par la suite.

Résultats

Rendement et efficacité de l'utilisation de l'azote

Dans l'étude lysimétrique, le procédé CULTAN a obtenu un rendement du produit principal légèrement supérieur à ConvF (+7 %), avec des différences plus prononcées

pour les céréales. En revanche, dans les essais au champ, les deux méthodes ont donné des résultats similaires (tableau 1). Les rendements des sous-produits étaient plus élevés avec le procédé CULTAN qu'avec ConvF tant dans les essais avec lysimètres qu'au champ, avec une différence significative pour le blé d'automne et le triticale. Dans le procédé CULTAN, les céréales avaient un nombre plus élevé d'épis, mais le nombre de grains par épis et le poids de mille grains étaient tendanciellement plus faibles. Les rendements du maïs d'ensilage et du colza n'ont pas montré de différences significatives liées au procédé. Les rendements de la betterave sucrière ont eu tendance à être légèrement plus faibles avec le procédé CULTAN (6%). En revanche, ce procédé a montré une tendance à une plus grande efficacité de l'utilisation de l'azote pour toutes les cultures dans les deux essais, avec une différence significative pour le blé d'automne dans les essais au champ (tableau 1). Dans l'essai avec des lysimètres, le procédé CULTAN a présenté une efficacité

de l'utilisation de l'azote de 12% supérieure à celle du système ConvF et ce malgré les 15% d'apport en azote additionnel. Bien que la différence n'ait pas été significative, le procédé CULTAN a obtenu une efficacité plus élevée sur huit des onze années.

Lessivage de l'azote dans l'essai avec lysimètres

Avec une quantité annuelle moyenne de 305 mm, le procédé CULTAN a généré 7% d'eau de percolation en moins que la méthode ConvF avec des volumes plus élevés sur seulement deux des douze années de l'essai (tableau 2). Tant la concentration en NO_3^- de l'eau de percolation que la quantité d'azote lessivée par unité de surface ou par unité de rendement étaient inférieures dans le procédé CULTAN, la différence n'étant significative que pour le lessivage de l'azote par unité de rendement. Le procédé CULTAN a obtenu des concentrations de NO_3^- et des pertes d'azote par lessivage plus faibles sur la plupart des années, respectivement dix et onze

Tableau 1 | Rendement et efficacité de l'utilisation de l'azote par culture et par procédé dans les deux essais (moyenne des répétitions au cours des années et sur les sites).

	Essai lysimétrique						Essai au champ	
	Maïs	Orge	Bett.	Blé	Colza	Trit.	Maïs	Blé
Rendement de référence PRIF (dt ha ⁻¹)								
Produit principal	185	60	900	75	35	60	185	75
Sous-produit		60	475	75	90	75		75
Rendement relatif du produit principal		*		*				
CULTAN	0,99a	1,82a	1,16a	1,31a	1,10°	1,54°	1,29a	0,97a
ConvF	0,97a	1,52b	1,23a	1,19b	1,11°	1,21°	1,24a	0,97a
Rendement relatif du sous-produit				*		*		*
CULTAN		1,35a	0,44a	1,32a	n.a.	1,26a		1,08a
ConvF		1,12a	0,39a	1,10b	n.a.	1,04b		0,99b
Efficacité de l'utilisation de l'azote								*
CULTAN	0,67a	0,88a	0,51a	0,80a	0,42a	0,56a	0,35a	0,68a
ConvF	0,57a	0,78a	0,47a	0,72a	0,37a	0,52a	0,30a	0,61b

Maïs ensilage (Maïs); orge d'automne (Orge); betterave sucrière (Bett.); blé d'automne (Blé); triticale (Trit.).

Des lettres différentes au sein d'une même culture et d'une même étude indiquent une différence significative entre les procédés ($p < 0,05$).

° Aucun test statistique n'a été effectué en raison de la non-normalité ou de l'hétéroscédasticité des résidus dans un modèle linéaire hiérarchique.

Les chiffres en italique et les couleurs plus claires représentent des mesures disponibles uniquement pour l'une des deux rotations.

Code couleur: gris: résultats similaires (à 4% près); vert: performances supérieures pour CULTAN (>4%); rouge: performances inférieures pour CULTAN (<4%).

Tableau 2 | Quantité annuelle moyenne d'eau de percolation, concentration de NO_3^- dans l'eau de percolation, lessivage de l'azote et bilan azoté dans l'essai lysimétrique.

	Quantité d'eau de percolation (mm)	Concentration en nitrate ($\text{mg NO}_3^- \text{ l}^{-1}$)	Azote lessivé par unité de surface (kg N ha^{-1})	Azote lessivé par unité de rendement (g N dt^{-1})	Bilan azoté (kg N ha^{-1})
CULTAN	305a	11a	7,5a	86a	44,5a
ConvF	328b	16a	11,8a	140b	47,3a

Des lettres différentes indiquent une différence significative entre les méthodes. Le test statistique pour le volume d'eau de percolation et le lessivage de l'azote par unité de surface a été réalisé sur les volumes cumulés pour la période allant du 25 février 2009 au 25 mars 2021. Les résultats sont présentés annualisés sur la base de 12,1 années. L'azote lessivé par unité de rendement est mesuré sur la base des périodes de référence. Le bilan azoté est basé sur 11 années seulement, car l'absorption de l'azote n'a pas été mesurée pour le colza dans la deuxième rotation.

années. L'azote lessivé par unité de rendement était inférieur de 38 % dans le procédé CULTAN par rapport au procédé ConvF.

La relation entre le bilan azoté et le lessivage de l'azote par unité de surface a mis en évidence une valeur atypique dans un lysimètre du procédé ConvF (figure 1). Le flux d'eau de percolation dans ce lysimètre était similaire aux flux observés dans les autres lysimètres et n'indique donc pas la présence d'un flux préférentiel inhabituel. En fixant l'ordonnée à l'origine à zéro, la pente de 0,2 n'indique qu'une faible relation entre le bilan azoté et le lessivage d'azote.

L'azote minéral du sol dans les essais au champ

Avant la montaison du blé d'automne, 4 semaines après l'injection dans CULTAN et après le second apport d'azote dans le procédé ConvF, le sol contenait, dans le procédé CULTAN, 12 kg ha⁻¹ de moins d'azote disponible pour les plantes que dans ConvF (figure 2a). Avant l'épiaison, 6 à 8 semaines après l'injection et après le troisième apport d'azote dans ConvF, l'azote disponible pour les plantes s'élevait dans CULTAN à 20 kg ha⁻¹ de moins que dans ConvF.

Au stade 4–5 feuilles du maïs, 4 semaines après l'injection dans CULTAN et après le deuxième apport d'azote dans ConvF, la quantité d'azote minéral dans CULTAN était plus élevée que dans ConvF. Lors de la récolte de maïs, effectuée en moyenne 22 semaines après l'injection, le N_{min} mesuré dans CULTAN était en revanche inférieur de 21 kg ha⁻¹ à celui de ConvF (figure 2b).

Impact du surplus d'engrais azoté dans le procédé CULTAN de l'essai avec lysimètres

Au cours des sept premières années de l'essai lysimétrique, le rendement relatif dans le procédé SurF, avec un apport d'azote de 130 % des normes PRIF, ne différait pas significativement de ConvF ni de CULTAN. ConvF et SurF ont eu une efficacité d'utilisation de l'azote similaire, mais le bilan azoté était nettement plus élevé avec SurF qu'avec ConvF (données non présentées). La concentration de nitrate dans l'eau de percolation et le lessivage de l'azote se situaient dans une fourchette similaire pour ConvF et SurF.

Discussion

CULTAN permet de réduire le lessivage de l'azote tout en maintenant le rendement

Bien que la différence de 37 % de l'azote lessivé par unité de surface n'ait pas été significative, le procédé CULTAN a enregistré des pertes d'azote plus basses que

le procédé ConvF sur onze des douze années et dans toutes les cultures. En revanche, une différence statistique a été établie pour le lessivage d'azote par unité de rendement. En outre, dans l'essai en plein champ, les valeurs N_{min} lors de la récolte du maïs étaient tendanciellement plus basses pour CULTAN, ce qui signifie un risque réduit de lessivage de l'azote par rapport à ConvF. Les quantités annuelles d'azote lessivé par unité de surface étaient faibles pour les deux traitements en compa-

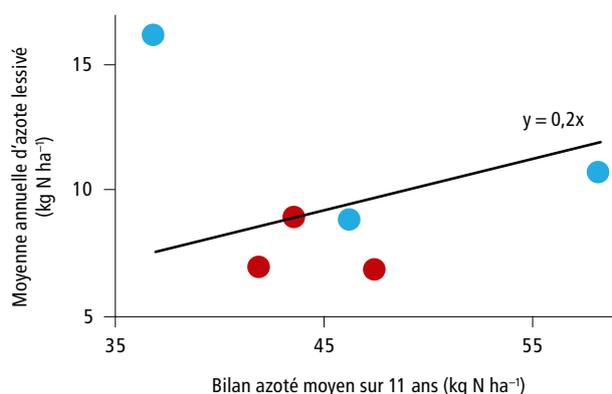


Figure 1 | Relation entre les pertes d'azote par lessivage et le bilan azoté pour chaque lysimètre (rouge: CULTAN, bleu: ConvF).

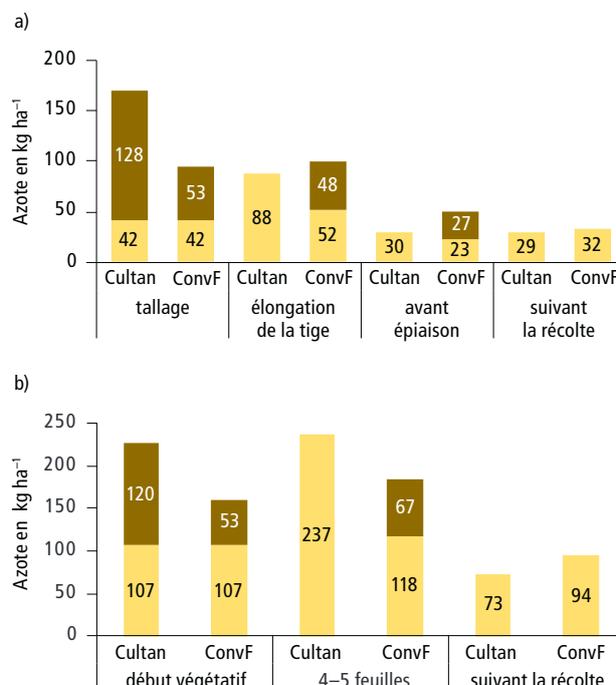


Figure 2 | Quantité d'azote disponible pour les plantes dans les deux procédés après chaque application d'engrais azoté et après récolte du blé d'automne (a) et du maïs (b) dans l'essai au champ. Jaune: azote minéral du sol (N_{min}) mesuré dans l'horizon 0–90 cm. Brun: apport d'engrais azoté.

raison de la valeur de 38 kg N ha^{-1} , calculée pour la totalité des terres arables suisses à l'aide du modèle de flux de substances MODIFFUS (Hutchings *et al.*, 2023). On peut donc se demander si les lysimètres reproduisent correctement les flux d'eau et d'azote. Les concentrations moyennes en nitrate dans les six lysimètres variaient de 9,5 à $21,5 \text{ mg NO}_3^- \text{ l}^{-1}$, ce qui est également faible au vu du fait que 40 % des stations de mesure suisses dans les régions prédominées par les grandes cultures présentaient des concentrations supérieures à 25 mg l^{-1} (OFEV, 2019).

Les deux études présentées ici ont montré que les niveaux de rendement peuvent être maintenus avec le procédé CULTAN. Ainsi, bien que les lysimètres ne puissent pas reproduire parfaitement les conditions de plein champ, le procédé CULTAN semble être une mesure envisageable pour les régions dans lesquelles les pertes de nitrate doivent être réduites dans les eaux souterraines.

Moment et emplacement de l'injection de CULTAN

Dans le procédé CULTAN, le faible pH et la teneur élevée en ammonium dans le dépôt devrait entraîner une diminution de l'activité microbienne et une nitrification progressive du dépôt d'ammonium. Cependant, les connaissances disponibles sur la dégradation du dépôt au fil du temps sont limitées et les deux études ont mis en évidence une synchronisation sous-optimale entre le taux de nitrification du dépôt et les besoins en azote des plantes à certains stades de croissance.

Dans les essais au champ, les mesures de N_{min} sous le blé d'automne ont indiqué que le dépôt de NH_4^+ s'était rapidement épuisé, conduisant à une assimilation d'azote élevée en début de croissance et moindre pendant la période ultérieure de remplissage des grains. Dans une étude au champ sur blé d'automne, Deppe *et al.* (2016) ont constaté que le dépôt de NH_4^+ était fortement diminué après 4 semaines et complètement dissout 10 semaines après l'injection. Dans l'essai avec des lysimètres, le rendement plus élevé de la paille, la plus grande densité d'épi et le poids légèrement inférieur de mille grains des céréales dans le procédé CULTAN indiquent également que la quantité d'azote disponible a pu évoluer différemment entre les deux procédés. Une injection plus tardive pourrait améliorer la teneur en azote de la céréale et le remplissage du grain. Cependant, les études analysant l'effet du recul du moment de l'injection sur le rendement des céréales d'automne ont donné des résultats contradictoires pointant une forte dépendance aux conditions pédologiques et climatiques (Donath *et al.*, 2009, Albert *et al.*, 2012, Schulz *et al.*, 2014).

En outre, certaines plantes cultivées peuvent également nécessiter, en raison de leur physiologie, une injection plus tardive pour optimiser le rendement. Dans l'essai avec des lysimètres, il convient de noter que le procédé CULTAN a obtenu des rendements relativement plus élevés pour la betterave sucrière et le colza dans la première rotation, lorsque l'injection a été faite respectivement quatre et trois semaines plus tard que le premier apport d'azote dans ConvF. Chez le colza, une carence précoce en azote peut généralement être compensée au cours des stades de croissances ultérieurs, mais une quantité trop élevée d'azote assimilée trop tôt peut entraîner un rendement excessif de paille au détriment du rendement en grains. Pour les betteraves sucrières, une injection plus tardive peut être recommandée parce que leurs racines poussent lentement au début de la période de culture et pourraient ne pas atteindre le dépôt à temps (Kücke, 2003). En outre, une nutrition précoce en NH_4^+ peut entraver la formation de sucre dans la betterave. Dans un essai en champ, dans lequel l'injection CULTAN n'a été effectuée qu'au stade 6–8 feuilles, des rendements et une teneur en sucre plus élevés ont été obtenus par rapport à une fertilisation en surface au nitrate d'ammonium (Kücke, 2003).

Le moment de l'injection peut également influencer le lessivage de l'azote. Dans une étude sur le blé d'automne et le colza, une injection plus tardive de respectivement quatre et deux semaines a entraîné une diminution du lessivage de l'azote au printemps, sans impact sur les concentrations de N_{min} l'hiver suivant (Kücke, 2003).

Enfin, dans chaque culture, l'emplacement des injections doit être adapté au développement structurel des racines, car la distribution spatiale de l'ammonium et du nitrate est plus hétérogène dans le procédé CULTAN (Deppe *et al.*, 2016). Dans l'essai avec des lysimètres, l'emplacement des injections n'a pas été effectué systématiquement, ce qui a pu influencer les résultats.

La diminution du lessivage de l'azote n'est pas uniquement due à une meilleure efficacité de l'azote

Nous n'avons trouvé qu'un faible lien entre le bilan azoté et le lessivage de l'azote. Cela pourrait être partiellement causé par l'absence de données sur l'absorption de l'azote par le colza dans la deuxième rotation, car il y a eu une importante différence entre les deux procédés au niveau du lessivage de l'azote au cours de l'année considérée. En outre, il n'est pas possible avec le bilan azoté de prédire de manière précise le lessivage de l'azote, car il ne tient compte ni des résidus de plantes non évacués (par exemple la paille de colza) ni des engrais verts, alors que ceux-ci influencent le lessivage de

l'azote. Buczko *et al.* (2010) ont également constaté dans l'analyse de divers essais de longue durée que le bilan azoté n'est que faiblement corrélé avec le lessivage de l'azote.

Cependant, la faible corrélation suggère que des différences entre les procédés ont pu également se produire au niveau d'autres flux d'azote. Il se peut que davantage d'azote ait été immobilisé dans le sol avec le procédé CULTAN, car selon Sommer et Scherer (2007), ce procédé favorise un système racinaire plus dense. Or aucun changement de la teneur en azote de la couche arable n'a pu être observé dans les deux méthodes entre 2009 et 2021. Il se peut également que la durée de transit au travers des lysimètres de l'engrais azoté non absorbé par les cultures soit plus longue que la période de référence d'un an. Dans les essais de Prasuhn *et al.* (2016) effectué dans la même station lysimétrique, il a fallu de 6 à 18 mois pour que la majeure partie d'un traceur de bromure atteigne la sortie du lysimètre. Un essai lysimétrique avec des engrais marqués au ^{15}N ont montré que les excédents d'azote sont en grande partie incorporés dans la matière organique du sol et se reminéralisent au cours des années et décennies suivantes (Sebilo *et al.*, 2013).

La dénitrification, pouvant générer des émissions de protoxyde d'azote (N_2O), est un autre flux possible, mais les effets du procédé CULTAN sur ce flux d'azote ne sont pas clairs. En 2009, les valeurs de pH dans les lysimètres CULTAN étaient plus élevées que dans les lysimètres ConvF, mais dans le procédé CULTAN, on a constaté une forte acidification du sol, de sorte qu'en 2021, les sols avaient, dans les deux méthodes, un niveau de pH similaire. Ainsi, l'activité microbienne et la dénitrification peuvent avoir évolué différemment dans les deux procédés au cours de l'étude. Dans leur étude, Deppe *et al.* (2016) ont constaté que les émissions de N_2O étaient à peu près similaires entre la fertilisation conventionnelle et la fertilisation selon la méthode CULTAN. Cependant, une production élevée de N_2O peut avoir lieu de façon localisée autour du dépôt de la solution injectée, en particulier dans les sols limoneux.

Option d'une utilisation plus durable des engrais azotés

La production d'engrais minéraux azotés nécessite 3 à 5 % de la consommation mondiale de gaz naturel. Or les coûts énergétiques devraient rester élevés à long terme. Dans ce contexte, le procédé CULTAN pourrait être considéré comme un moyen de réduire les problèmes environnementaux liés à l'utilisation d'engrais minéraux pour deux raisons.

Tout d'abord, la cohérence au fil des années et des études de la tendance à une utilisation plus efficiente de l'azote observée dans le procédé CULTAN suggère que les niveaux de rendement pourraient être maintenus même avec un apport d'azote plus faible. Malheureusement, dans l'essai lysimétrique, le procédé CULTAN a reçu plus et non moins d'engrais azoté que le système ConvF. Cependant, la comparaison faite au cours des sept premières années entre le procédé CULTAN à 113 % du taux d'azote recommandé et SurF à 130 % a clairement montré que, malgré un apport d'azote plus faible, CULTAN a obtenu un rendement et une efficacité de l'utilisation de l'azote similaires à ceux de SurF.

Deuxièmement, la solution utilisée dans le procédé CULTAN peut être obtenue à partir de NH_4^+ recyclé provenant du traitement des eaux usées et du traitement du lisier. En Suisse, quelques stations d'épuration ont mis en place un processus de stripping du NH_4^+ pour produire un engrais liquide à base de sulfate d'ammonium qui est exempt de métaux lourds et d'autres polluants. Bien que le procédé nécessite un investissement initial et dépende du coût de l'acide sulfurique, le procédé CULTAN représente un débouché intéressant pour l'utilisation de cet engrais et peut ainsi contribuer à fermer le cycle de l'azote.

Conclusions

Cette étude a montré que le procédé de fertilisation CULTAN peut conduire à une réduction importante du lessivage de l'azote par rapport à une fertilisation conventionnelle en surface au nitrate d'ammonium avec des rendements similaires et une tendance à une utilisation plus efficiente de l'azote. Le moment et l'emplacement de l'injection dans le procédé CULTAN doivent être mieux adaptés à la croissance et à la physiologie des types de culture ainsi qu'aux conditions pédoclimatiques. Une injection plus tardive, en particulier, peut améliorer la synchronicité entre la nitrification du dépôt d'ammonium et les besoins en azote des plantes et favoriser ainsi les rendements. Nous avons également constaté que le lessivage réduit de l'azote n'était que faiblement lié à l'utilisation plus efficiente de l'azote, ce qui indique que le procédé CULTAN peut influencer d'autres flux de l'azote.

Sur la base de ces résultats et compte tenu de la possibilité de valoriser l'ammonium issus des eaux usées, il semble raisonnable d'encourager l'utilisation du procédé CULTAN dans les zones à forte concentration de NO_3^- dans les eaux souterraines. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour étudier les effets de ce

procédé sur d'autres flux d'azote, sur les conséquences sur les rendements d'un apport en azote réduit et sur l'évolution temporelle de la nitrification du dépôt dans différentes conditions pédoclimatiques afin d'optimiser son application dans les cultures principales. Enfin, une transition vers le procédé CULTAN nécessite des adaptations au niveau des exploitations agricoles (p. ex. matériel spécial pour l'épandage, transport et stockage intermédiaire de l'engrais liquide). Soit l'exploitant agricole doit réaliser lui-même ces investissements, soit il fait appel à une entreprise spécialisée dans l'application de ce procédé. ■

Remerciements

Cette étude a été financée par l'Office fédéral de l'environnement (OFEV). Les auteurs tiennent à remercier Clay Humphrys et Volker Prasuhn pour la réalisation de l'essai lysimétrique dans l'installation de lysimètres, René Flisch pour les données des essais au champ et ses précieux commentaires et Martin Häberli, Guido Steger et Peter Briner AG pour les discussions et les commentaires utiles.

Bibliographie

- Albert, E., Schliephake, W., & Grunert, M. (2012). Ergebnisse zur N-Düngung mit dem CULTAN-Verfahren auf verschiedenen Sächsischen Standorten. Nährstoff- und Wasserversorgung der Pflanzenbestände unter den Bedingungen der Klimaerwärmung. Bernburg-Strenzfeld.
- Buczko, U., Kuchenbuch, R. O. & Lennartz, B. (2010). Assessment of the predictive quality of simple indicator approaches for nitrate leaching from agricultural fields. *Journal of Environmental Management* Vol. 91, Issue 6, 1305-1315. DOI:10.1016/j.jenvman.2010.02.007
- Deppe, M., Well, R., Kücke, M., Fuss, R., Giesemann, A., & Flessa, H. (2016). Impact of CULTAN fertilisation with ammonium sulfate on field emissions of nitrous oxide. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 219, 138–151. DOI:10.1016/j.agee.2015.12.015
- Donath, S., Döhler, J., Grossmann, I., Schulz, R., Gruber, S., Claupein, W., & Müller, T. (2009). Ammonium-Depot-Düngung zu Winterweizen im Feldexperiment. *VDLUFA-Schriftenreihe* 65, 407–413.
- Flisch, R., Zihlmann, U., Briner, P., & Richner, W. (2013). Le procédé de fumure azotée CULTAN testé en conditions de cultures suisse. *Recherche Agronomique Suisse* 4, 40–47.
- Hutchings, C., Spiess, E., & Prasuhn, V. (2023). Abschätzung diffuser Stickstoff- und Phosphoreinträge in die Gewässer der Schweiz mit MODIFFUS 3.1, Stand 2020. *Agroscope Science* Nr. 155, 161.
- Kubešová, K., Balík, J., Sedlář, O., & Peklová, L. (2014). The impact of nitrogen fertilizer injection on kernel yield and yield formation of maize. *Plant Soil Environment*. 60, 1–7. DOI: 10.17221/208/2013-PSE
- Kücke, M. (2003). Anbauverfahren mit N-Injektion (CULTAN) Ergebnisse, Perspektiven, Erfahrungen; Beiträge des Workshops am 29. November 2001 in Braunschweig. *Landbauforschung Völkenrode Sonderheft* 245, Contributions des pages 23-44, 45-53, 81-92, 105-118.
- OFEV (2019). État et évolution des eaux souterraines en Suisse: Résultats de l'Observation nationale des eaux souterraines NAQUA, état 2016. Office fédéral de l'environnement (OFEV), Bern. *Etat de l'environnement* Nr 1901, p. 58.
- Prasuhn, V., Humphrys, C., & Spiess, E. (2016). Seventy-two lysimeters for measuring water flows and nitrate leaching under arable land. *NAS International Workshop on Applying the Lysimeter Systems to Water and Nutrient Dynamics*, 124-146. Wanju, Korea: National Institute of Agricultural Sciences.
- Rohrmann S., Bisig-Inanir D., Dehler A., & Brüscheiler B.J. (2021): Hat der Nitratgehalt im Trinkwasser einen Einfluss auf das Dickdarmkrebsrisiko? *Schweizer Ernährungsbulletin* 60–73. DOI: 10.24444/blv-2021-0111
- Schulz, R., Makary, T., Hubert, S., Hartung, K., Gruber, S., Donath, S., et al. (2014). Is it necessary to split nitrogen fertilisation for winter wheat? On-farm research on luvisols in South-West Germany. *Journal of Agriculture Science*, 153, 575-587. DOI:10.1017/S0021859614000288
- Sebilio, M., Mayer, B., Nicolardot, B., Pinay, G., & Mariotti, A. (2013). Long-term fate of nitrate fertilizer in agricultural soils. *Proc Natl Acad Sci USA* 110(45):18185–18189. DOI: 10.1073/pnas.1305372110
- Sinaj, S., Charles, R., Baux, A., Dupuis, B., Hiltbrunner, J., Levy, L., Pellet, D., Blanchet, G., & Jeangros, B. (2017). Fertilisation des grandes cultures: Principes de fertilisation des cultures agricoles en Suisse (PRIF). *Recherche Agronomique Suisse*.
- Sommer, K., & Scherer, H. (2007). Source / Sink – Relationships in Plants as Depending on Ammonium as «CULTAN», Nitrate or Urea as Available Nitrogen Fertilisers. *International Symposium «Sink-Source Relationships in Plants»*. Kalingrad, Russia: Scientific Committee of the Symposium.