

Fertilisation azotée spécifique au site: méthodes actuelles et expériences

Joël Grossrieder¹, Cecil Ringger², Francesco Argento^{2,3}, Raphaël Grandgirard¹, Thomas Anken³, Frank Liebisch²

¹Institut agricole du canton de Fribourg, 1725 Posieux, Suisse

²Agroscope, 8046 Zurich, Suisse

³Agroscope, 8356 Ettenhausen, Suisse

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

<https://doi.org/10.34776/afs13-103f> Date de publication: 12. Juillet 2022



Figure 1 | Fertilisation azotée spécifique au site – Essais en plein champ à Grangeneuve.
(Photo: Joël Grossrieder, Institut agricole du canton de Fribourg)

Résumé

La réduction des excédents d'azote (N) est un thème phare de la politique agricole actuelle en Suisse. Différentes méthodes de fertilisation azotée spécifique au site (Fspé) sont en mesure de réduire les excédents d'azote existants, mais ne sont quasiment pas utilisées dans la pratique agricole suisse. Agroscope et l'Institut agricole de Grangeneuve ont testé cinq méthodes de Fspé dans des essais de blé d'automne sur deux sites et sur deux ans. Il s'agissait des méthodes suivantes: fertilisation selon norme corrigée, N_{\min} , N-Tester, Nitcheck et une méthode optique sans contact pour une modulation intraparcellaire de la fertilisation. Les résultats montrent que les méthodes de Fspé peuvent aider à atteindre deux objectifs qui semblent contradictoires, la protection de l'environnement et la maximisation du rendement. Avec les méthodes

étudiées, on a utilisé entre -40% et $+10\%$ de la quantité d'azote prescrite par la norme de fertilisation. En général, toutes les méthodes ont apporté une meilleure efficacité de l'azote par rapport à la norme et au témoin fortement fertilisé, sans réduction significative du rendement. Comme on pouvait s'y attendre, les teneurs en protéines ont été influencées par les apports d'azote, mais dépendaient aussi beaucoup du site, de l'année et de la variété. Dans ce contexte, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour améliorer la fiabilité. Le potentiel d'augmentation de l'efficacité montre que la Fspé peut contribuer de manière significative à la réduction des excédents d'azote.

Keywords: Nitrogen management, winter wheat, site-specific, precision farming, variable rate application.

Introduction

L'azote (N) est un élément constitutif important des composés organiques tels que les acides nucléiques et les acides aminés, qui permettent la croissance des plantes (Sinclair 1990). Dans la production végétale, son utilisation respectueuse des besoins garantit le rendement et la qualité des produits récoltés (Alva, 2004; Chatterjee *et al.*, 2018; Zörb *et al.*, 2018). Parallèlement, l'azote peut aussi s'échapper des systèmes de production agricole sous différentes formes.

Les principales voies de perte d'azote dans l'agriculture sont le lessivage des nitrates (NO_3) dans les eaux souterraines et la volatilisation du protoxyde d'azote (N_2O), gaz à effet de serre, dans l'atmosphère. Celle-ci est causée par la dénitrification ou la volatilisation de l'ammoniac (NH_3), qui s'échappe également dans l'atmosphère et peut affecter les écosystèmes sensibles (Omara *et al.*, 2019; Zörb *et al.*, 2018). Dans les cultures, le risque de lessivage des nitrates est plus élevé lorsque la quantité d'azote disponible sous forme de nitrates est supérieure à celle que les plantes peuvent absorber immédiatement. Une fertilisation azotée spécifique au site (Fspé) peut réduire le lessivage des nitrates (Delgado *et al.*, 2005), mais aussi le risque d'autres pertes d'azote. En Suisse et à l'étranger, différentes méthodes sont proposées pour pratiquer la Fspé. Dans les Principes de fertilisation des cultures agricoles en Suisse (PRIF, Sinaj & Richner, 2017), la méthode de la norme corrigée ainsi que la méthode N_{\min} sont décrites en détail pour la Suisse. Il existe en outre des tests rapides éprouvés qui permettent de déterminer la teneur en nitrates dans la sève des plantes (Jemison & Fox, 1988) ou la teneur en chlorophylle des feuilles (N-Tester) (Sinaj & Richner, 2017). Ces paramètres servent à évaluer l'état de nutrition des plantes cultivées. Des procédés sans contact, basés sur des capteurs, tels que la télédétection, offrent également des possibilités de déterminer les besoins en azote des cultures et de les gérer spécifiquement à l'échelle de la parcelle (Argento *et al.*, 2020; Gnyp *et al.*, 2016). Pour ce faire, des indices de végétation sont calculés à partir de données spectrales, qui fournissent des informations sur la biomasse présente et son état de nutrition azotée.

Avec près de 80 000 ha (2019), le blé d'automne est de loin la grande culture la plus répandue en Suisse (OFAG 2021), c'est pourquoi une optimisation de la fertilisation azotée de cette culture peut contribuer de manière significative à la réduction des excédents d'azote. Les principes de la Fspé peuvent également être appliqués à d'autres grandes cultures. Dans cette étude, différentes

méthodes de la Fspé ont été analysées sur le blé d'automne en fonction des problématiques suivantes:

1. Les méthodes de la Fspé disponibles permettent-elles de déterminer les besoins en engrais azoté du blé d'automne et de garantir le rendement et la qualité?
2. Les méthodes de la Fspé peuvent-elles contribuer à améliorer l'efficacité de l'azote et donc à réduire les excédents d'azote?
3. Ces méthodes peuvent-elles être mises en pratique moyennant un coût et une charge de travail raisonnables?

Pour répondre à ces questions, la méthode de la norme corrigée, la fertilisation selon la méthode N_{\min} , le N-Tester (teneur en chlorophylle) ainsi que le Nitrachek (analyse des nitrates dans la sève) ont été utilisés et comparés sur le site de Grangeneuve en 2019 et 2020. Pendant les mêmes années, sur le site de Tänikon, une méthode de mesure optique pour la modulation intraparcellaire de la fertilisation a été combinée à la fertilisation N_{\min} . Sur les deux sites d'essais, les apports d'engrais ont été effectués selon un procédé fractionné en trois applications avec du nitrate d'ammonium, usuel dans la pratique pour le blé d'automne. Un témoin non fertilisé et un témoin avec fertilisation accrue ont été intégrés aux essais à des fins de comparaison.

Matériel et méthodes

Sites et conception de l'essai

Au cours des deux années 2019 et 2020, différentes méthodes de Fspé ont été testées sur les sites de Grangeneuve (46,76975° N, 7,11392° E) et de Tänikon (47,4790021° N, 8,9059287° E) (Figure 2). L'essai de Grangeneuve a été réalisé sur des petites parcelles (7,5 m²) avec quatre répétitions et les variétés Baretta (Agroscope/DSP-Delley, Suisse) en 2019 (F1a) et CH Claro (Agroscope/DSP Delley, Suisse) en 2020 (F1b). L'engrais a été épandu manuellement sur les petites parcelles. A Tänikon, l'essai a été mis en place sur de grandes parcelles (15 m × 90 m = 1350 m²) afin de pouvoir utiliser la technique d'épandage avec un épandeur à disques (Sulky X40+ ECONOV, Sulky-Burel, Châteaubourg, France). Les variétés Arnold (Saatzucht Donau, Autriche) ont été cultivées en 2019 (F2, F3, F4) et Montalbano (Agroscope/DSP-Delley, Suisse) en 2020 (F5, F6, F7).

Sur les deux sites d'essai, une fertilisation minérale a été effectuée à base de nitrate d'ammonium

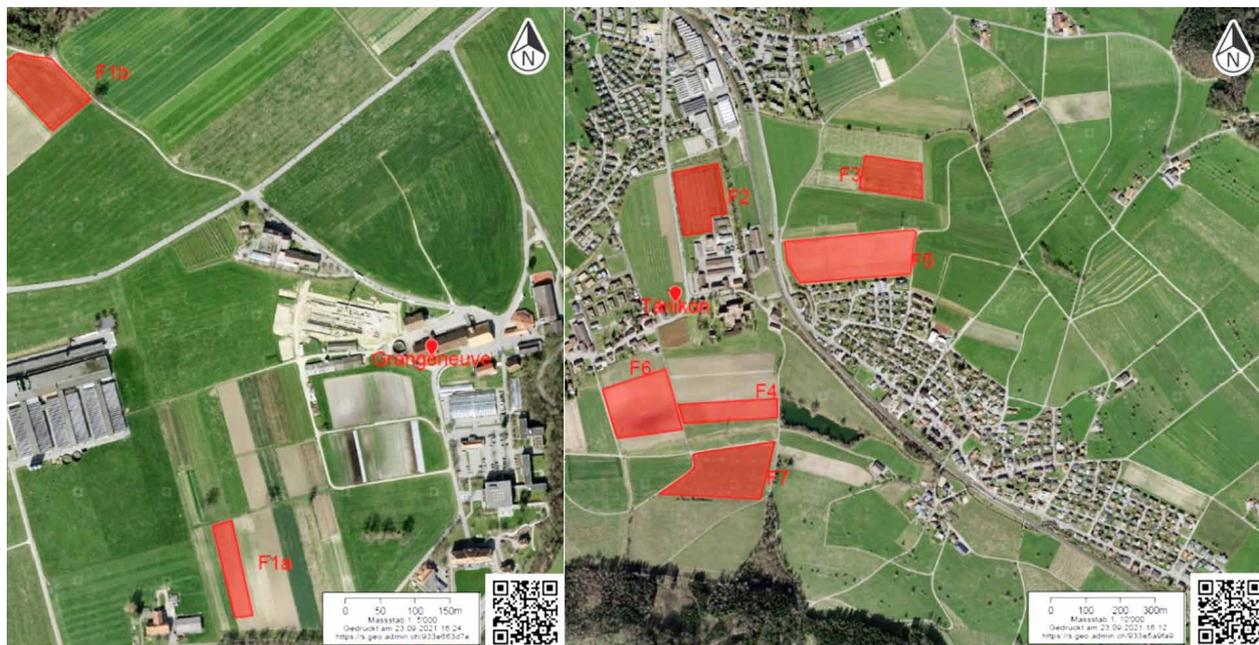


Figure 2 | Vue aérienne des deux sites d'essais, Grangeneuve, (F1a, F1b) et Tänikon (F2-7).

(50 % $\text{NH}_4\text{-N}$ /50 % $\text{NO}_3\text{-N}$). La fertilisation a été fractionnée en trois apports et appliquée aux stades de croissance BBCH 23–25, BBCH 31–32 et BBCH 39–50 (Tableau 2).

Sur le site de Grangeneuve, un herbicide (Othello®, Bayer, Allemagne) a été utilisé les deux années pour lutter contre les mauvaises herbes au printemps. Un régulateur de croissance (CCC 720®, Bayer, Allemagne) et un fongicide (Aviator® Xpro, Bayer, Allemagne) ont également été appliqués. Sur le site de Tänikon, la lutte contre les mauvaises herbes a associé un procédé mécanique, une herse de précision (Treffler, Allemagne) et un procédé chimique (Pacifica Plus® et Mero®, Bayer, Allemagne). Les principales données relatives aux parcelles sont présentées dans le Tableau 1.

Mise en pratique de la fertilisation azotée spécifique au site

Quatre méthodes de Fspé ont été testées à Grangeneuve: la méthode de la norme corrigée, la méthode N_{min} , le N-Tester (YARA GmbH & Co. KG, Allemagne) et le Nitracheck (Step Systems GmbH, Allemagne). En outre, une variante combinée (Combi = N_{min} + Nitracheck) a été testée. En plus du témoin non fertilisé (Minus), une variante avec un apport très élevé en azote (Plus, $1,5 \times \text{norme}_{\text{rendement}}$) a été mise en place à titre de témoin. A Tänikon, une autre méthode de Fspé, la modulation intraparcellaire de la fertilisation (MIIntra), a été comparée à la norme de fumure N corrigée en fonction du rendement ($\text{norme}_{\text{rendement}}$) ainsi qu'aux témoins Minus et Plus (Tableau 2).

Tableau 1 | Données relatives aux parcelles des deux sites d'essais Grangeneuve et Tänikon.

Site/Année	Parcelle	Date de semis	Précédent cultural	pH ¹	C _{org} (%)	Argile (%)	N _{min} ²
Grangeneuve 2019	1a	10.10.2018	Pommes de terre	7,6	4,8	20	116
Grangeneuve 2020	1b	24.10.2019	Maïs	6,4	1,6	15	70
Tänikon 2019	2	09.10.2018	Maïs	6,6	2,3	40	34
	3	12.10.2018	Maïs	6,8	1,3	26	18
	4	05.11.2018	Prairie temporaire	7,6	3,2	29	58
Tänikon 2020	5	24.10.2019	Maïs	7,7	1,6	27	31
	6	26.10.2019	Betteraves sucrières	7,8	1,9	28	43
	7	14.11.2019	Colza	7,7	3,8	27	37

¹Méthode H_2O (Sinaj & Richner, 2017); ² N_{min} 0–90 cm au début de la période de végétation (Sinaj & Richner, 2017).

Les paragraphes suivants décrivent comment est calculée la fertilisation dans les méthodes étudiées.

1. Norme_{rendement}

Conformément aux principes PRIF (Sinaj & Richner, 2017), la norme N pour le blé d'automne (140 kg N/ha, rendement de référence 60 dt/ha) a été adaptée aux rendements attendus (Grangeneuve: 70 dt/ha, Tänikon: 75 dt/ha).

Norme_{rendement} (kg N/ha) = norme (kg N/ha) + (rendement attendu (dt/ha) – rendement de référence (dt/ha)) × 1 kg N/dt

La norme_{rendement} était donc de 150 kg N (Grangeneuve), 155 kg N par hectare (Tänikon).

2. La méthode de la norme corrigée

Avec la méthode de la norme corrigée (PRIF 2017: chapitre 8), des facteurs relatifs aux mesures pédologiques, environnementales et culturales ont été pris en compte en plus de la norme_{rendement} pour calculer la quantité d'engrais azoté:

- Influence de la matière organique et de la teneur en argile du sol (f_{MOS}) sur la minéralisation de l'azote.
- Influence du précédent cultural et de sa date d'enfouissement sur la minéralisation de l'azote (f_{PC}).
- Proportion d'azote organique (N_{org}) épandu avec les engrais de ferme l'année précédente, disponible l'année suivant celle de l'apport (f_{MA}).
- Influence des précipitations sur le lessivage de l'azote en hiver et au printemps (f_{Pluie}).

La quantité d'engrais azoté qui en résulte a finalement été divisée en trois apports fractionnés, en tenant compte de l'influence temporelle des facteurs de correction. Ainsi, la forte correction de la quantité d'azote en 2019 était surtout due à la culture précédente de pommes de terre ainsi qu'aux précipitations hivernales inférieures à la moyenne. C'est la raison pour laquelle ce sont surtout les quantités du premier et du deuxième apports qui ont été réduites. En 2019, f_{MOS} , f_{PC} ainsi que f_{Pluie} étaient respectivement de -10, -10 et -20 (total -40). En partant d'une répartition des trois apports de 40/70/40 (pour une quantité standard de 150 kg N),

Tableau 2 | Quantité d'azote appliquée (moyenne ± écart-type) dans les différentes méthodes de fertilisation: fractionnements individuels, total et par rapport à la norme_{rendement} (en % de la norme_{rendement}). Les fractionnements spécifiques au site apparaissent en vert.

Lieu/Année	Méthode de fertilisation	Fractionnement 1	Fractionnement 2	Fractionnement 3	Total	% de la norme ^c
Grangeneuve 2019	Minus	0	0	0	0	0
	Plus	65	80	80	225	150
	Norme corrigée	30	50	30	110	73
	N _{min}	28,5 ± 12,7	70	40	138,5 ± 12,7	92
	N-Tester	40	26,5 ± 5	25 ± 5,8	91,5 ± 5	61
	Nitracheck	40	37,5 ± 5	55 ± 5,8	132,5 ± 9,6	88
Grangeneuve 2020	Minus	0	0	0	0	0
	Plus	65	80	80	225	150
	Norme corrigée	40	60	30	130	87
	N _{min}	70,5 ± 7,5	60	30	160,5 ± 7,5	107
	N-Tester	40	55 ± 5,8	70	165 ± 5,8	110
	Nitracheck	40	60	47,5 ± 5	147,5 ± 5	98
Tänikon 2019	Combi	70,5 ± 7,5	51,25 ± 2,5	40	161,75 ± 9	108
	Minus	0	0	0	0	0
	Norme _{rendement}	70	60	23/24 ^a	153/154 ^a	102
	Plus	100	60	0/18 ^b	160/178 ^b	111
Tänikon 2020	MIntra	68,4 ± 4,7	59,8 ± 4,8	18 ± 3,1	145,8 ± 4,2	97
	Minus	0	0	0	0	0
	Norme _{rendement}	70	60	25	155	103
	Plus	90	70	0	160	107
Tänikon 2020	MIntra	42,7 ± 7,5	39,1 ± 12,3	21,9 ± 3,4	103,75 ± 14,8	69
	Plus	90	70	0	160	107

^aF2/F3; ^bF2 & F3/une parcelle en F2; ^cNorme tirée des PRIF adaptée au rendement de référence 70 dt/ha (150 kg N/ha = 100 %).

f_{PC} et f_{Pluie} ont été déduits du premier et du deuxième apports et f_{MOS} du troisième. Il en résulte une répartition de 30/50/30.

3. Méthode N_{min}

Avec la méthode N_{min} , la teneur en nitrates (NO_3^- -N) et en ammonium (NH_4^+ -N) du sol a été mesurée pour les trois profondeurs 0–30 cm, 30–60 cm ainsi que 60–90 cm sur un échantillon combiné pour l'ensemble du champ, afin de déterminer la quantité d'engrais pour le 1^{er} apport fractionné. A Tänikon, seule la teneur en N_{min} (kg/ha) à une profondeur de 0–60 cm a été prise en compte en 2019, alors qu'en 2020, la teneur a été mesurée à une profondeur de 0–90 cm. Les quantités pour le 2^e et le 3^e apports fractionnés ont été déterminées sur la base de la norme_{rendement} et de valeurs empiriques s'appuyant sur les PRIF (chapitre 8).

4. N-Tester

Le N-Tester permet de déterminer l'indice SPAD (Soil Plant Analysis Development) avant le 2^e et le 3^e apports fractionnés, ce qui donne des informations sur la teneur en chlorophylle des plantes. Il s'agit de mesurer la quantité de lumière dans la zone rouge et proche de l'infrarouge absorbée par la chlorophylle dans la feuille. Comme la variété exerce une influence significative sur l'indice SPAD (Monostori *et al.*, 2016), l'application telle qu'elle est proposée par la société YARA en Allemagne intègre le facteur variété au processus de détermination de la quantité d'azote. Sachant qu'il n'existe pas d'étalement pour les variétés suisses, ce facteur n'a pas pu être utilisé ou seulement dans une moindre mesure. Ainsi, la quantité d'azote a été adaptée à l'aide d'un tableau de la société LANDOR. Ces valeurs ne se basent toutefois pas sur des essais pluriannuels pour toutes les variétés.

5. Nitrachek

Dans la méthode Nitrachek, la teneur en nitrates de la sève a été mesurée aux stades BBCH 31 et 39 avant les apports d'engrais respectifs (2^e/3^e apports fractionnés). Pour ce faire, la sève de 50 pousses a été extraite par pressage à la base. Celle-ci a été déposée sur des bâtonnets de test de nitrates (MQuant®, Merck, Allemagne) et évaluée avec le Nitrachek 404. Pour déterminer la quantité d'engrais azoté, on a utilisé les recommandations de l'Institut de l'agriculture du Land de Saxe (Ernst *et al.*, 2003), qui tient compte non seulement de la concentration en nitrates mesurée, mais aussi des objectifs de rendement et de qualité (céréales panifiables).

6. Combi

La méthode Combi associe N_{min} (1^{er} apport fractionné) et Nitrachek (2^e et 3^e apports fractionnés).

7. Modulation intraparcellaire de la fertilisation

A Tänikon, des cartes de préconisation ont été établies pour déterminer la quantité d'engrais azoté à l'aide des valeurs N_{min} (1^{er} apport fractionné) et d'un indice optique de végétation basé sur des capteurs (2^e et 3^e apports fractionnés). L'indice de végétation utilisé est l'indice «normalized difference red edge» (NDRE) (Barnes *et al.*, 2000), car il existe une forte corrélation entre ce dernier et l'absorption d'azote par la végétation (Argento *et al.*, 2022). Cette corrélation a été utilisée pour déterminer la quantité d'engrais azoté des surfaces en calculant le rapport relatif entre le NDRE de la surface et la valeur moyenne de la parcelle et en l'appliquant à la norme_{rendement}.

Efficacité d'utilisation de l'azote NUE

L'efficacité de l'azote (NUE) se calcule comme suit:

$$NUE = \text{rendement en grains (kg/ha)} / \text{engrais azoté appliqué (kg/ha)} \text{ (Basso et al., 2016)}$$

Le rendement en grains a été normalisé à 14,5 % d'humidité. Cet indicateur NUE basé sur l'engrais est souvent utilisé dans la recherche appliquée pour évaluer l'effet de l'apport d'azote sur la productivité (Congreves *et al.*, 2021). Le calcul d'indicateurs d'efficacité plus complexes n'était pas possible avec les données disponibles (pas de rendement en paille, p. ex.).

Statistique

Les deux sites ont été évalués séparément. Pour évaluer l'effet de la méthode de fumure et de l'année, une analyse ANOVA à 2 facteurs (Y ~ méthode de fumure x année) a été réalisée (dans R 4.1.0, R Studio V1.41717). Le test de Tukey-HSD a été réalisé en tant que test post-hoc afin de déterminer quelles sont les méthodes de fumure qui diffèrent. Comme la variété et la parcelle ont également changé avec l'année sur les deux sites, ces facteurs peuvent avoir influencé le facteur de l'année. L'essai de Grangeneuve a été mis en place en blocs randomisés avec quatre répétitions et celui de Tänikon avec trois répétitions.

Résultats

La Fspé réduit les apports d'azote

Selon l'année (ou la variété/le site) et la méthode de fumure, les économies d'azote peuvent atteindre jusqu'à -39 % (59 kg N/ha) ou nécessiter une fertilisation supplémentaire allant jusqu'à +10 % (15 kg N/ha) par rapport à la norme_{rendement} (Tableau 2). En 2019, toutes les

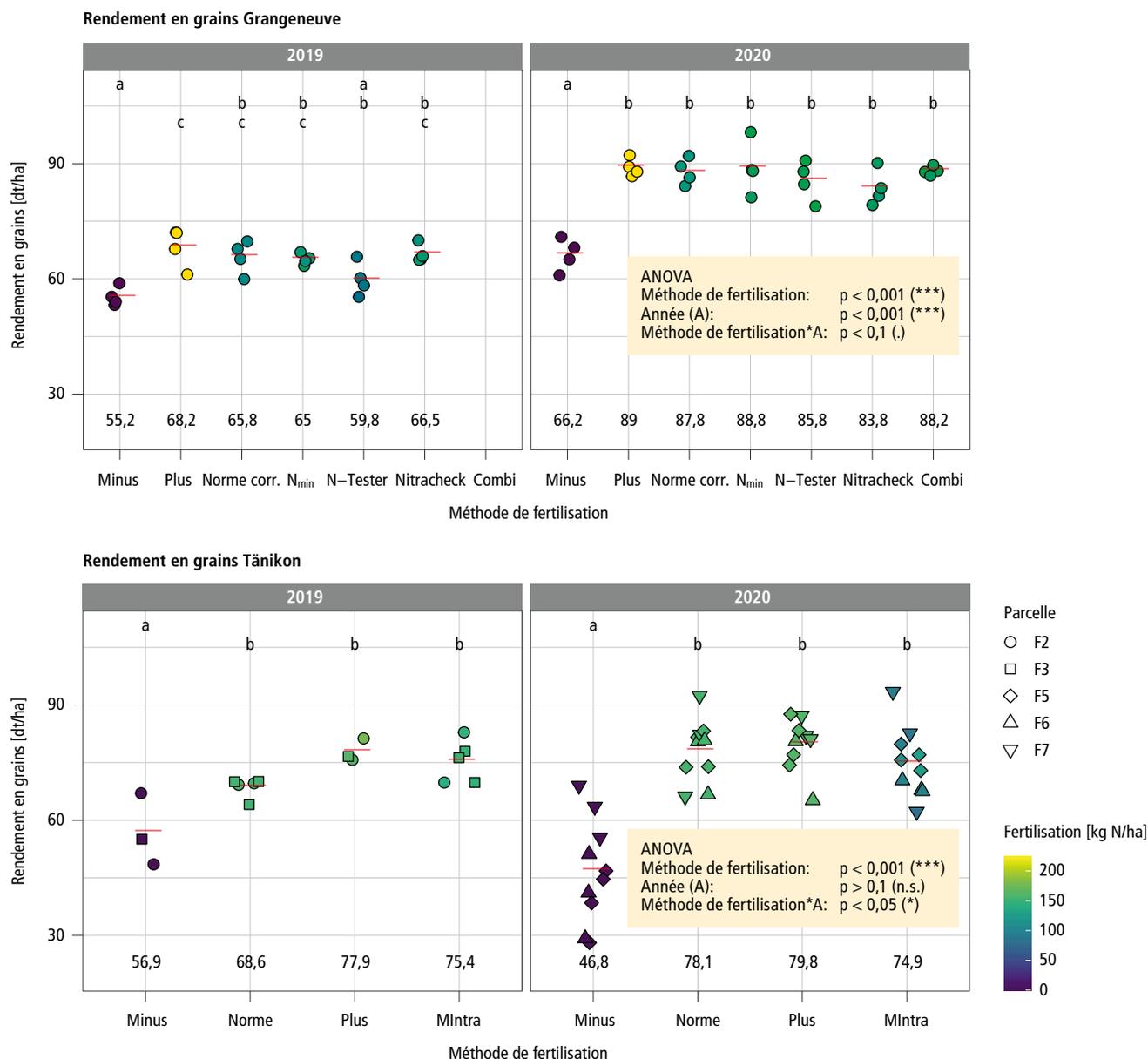


Figure 3 | Rendement en grains (14,5 % d'humidité) à Grangeneuve (en haut) et à Tånikon (en bas). Les résultats de l'analyse post-hoc (Tukey-HSD) sont intégrés sous forme de lettres minuscules. Le test post-hoc a été effectué séparément par site et par année. Les différentes parcelles sont représentées par des points ou des symboles. La moyenne est indiquée sous forme de barre et de valeur rouges. Les abréviations des méthodes de fertilisation se trouvent dans la partie consacrée aux méthodes.

méthodes Fspé testées sur les deux sites ont permis une économie d'azote par rapport à la norme_{rendement} (entre -3 et -40 %). En 2020, par contre, cela n'a été le cas que pour une partie des méthodes (Nitracheck -2 %, norme corrigée -13 %, MIntra -31 %); les autres ont recommandé un apport supplémentaire (N_{min} +7 %, Combi +8 %, N-Tester +10 %).

En comparant les méthodes Fspé, la recommandation de fertilisation azotée du N-Tester s'est distinguée par

amplitude de variation: en 2019, le N-Tester affichait le plus grand potentiel d'économie d'azote, alors qu'en 2020, il recommandait l'apport supplémentaire le plus important par rapport à la norme_{rendement}. Parmi les méthodes des PRIF, la norme corrigée obtenait un apport d'azote plus faible (environ 30 kg/ha) que N_{min} au cours des deux années. Nitracheck calculait un apport d'azote intermédiaire entre les méthodes des PRIF durant les deux années. Quant à Combi, il a calculé un apport N

plus élevé que les deux méthodes de base, car la 1^{re} application fractionnée basée sur N_{min} était plus élevée que l'apport fixe d'azote de Nitracheck. La MIntra, qui est la seule méthode à tenir compte de l'hétérogénéité dans la parcelle, a entraîné des économies plus importantes en 2020 (-31 %).

Aucune influence sur le rendement en grains – sauf pour N-Tester

Les rendements en grains de la Fspé ne diffèrent pas significativement de ceux de la fertilisation Plus et de la norme_{rendement} sur les deux sites/années – malgré des économies d'azote parfois importantes. Une réduction du rendement n'a été observée qu'avec la méthode N-Tester en 2019 par rapport à la fertilisation Plus. En 2019, le N-Tester était également la fertilisation avec le plus faible apport d'azote (Figure 3). L'effet de l'année n'a été significatif qu'à Grangeneuve, où les rendements étaient plus élevés en 2020 qu'en

2019 (ANOVA, Figure 3). Mais cette différence pourrait aussi être due à l'effet des variétés ou des parcelles. A Grangeneuve, l'apport d'azote était en outre plus élevé en 2020 qu'en 2019 dans les procédés Fspé. On peut toutefois exclure avec une forte probabilité que l'apport d'azote plus élevé de la Fspé soit le facteur principal de l'augmentation des rendements, car les rendements en grains étaient aussi nettement plus élevés dans les procédés témoins en 2020 (Figure 3).

Influence sur la teneur en protéines

Pour la teneur en protéines, le site et éventuellement le choix de la variété ont été déterminants. A Grangeneuve, les teneurs en protéines étaient généralement très élevées (en 2020, même dans le témoin Minus 13,6 %), alors qu'à Tänikon, elles étaient plutôt basses (en 2020, même dans le témoin Plus, moins de 11,5 %). Les méthodes de la Fspé testées ont permis d'obtenir des teneurs en protéines habituelles pour le site, qui ne se

Tableau 3 | Paramètres agronomiques: teneur en protéines et efficacité d'utilisation de l'azote (NUE) (moyennes, écart-type [sd]) ainsi que résultats de l'analyse ANOVA et de l'analyse post-hoc (Tukey-HSD).

Année (A)	Méthode de fertilisation (MF)	Teneur en protéine [%]	±sd	HSD	NUE	±sd	HSD
Grangeneuve 2019	Minus	11,0	0,8	a	NA	NA	NA
	Plus	15,2	0,7	c	30,3	2,3	a
	Norme corrigée	12,8	0,3	b	59,8	4,0	c
	N _{min}	13,9	0,5	b	47,3	5	b
	N-Tester	12,7	0,3	b	65,3	3,6	c
	Nitracheck	13,8	0,5	b	50,5	5,5	b
Grangeneuve 2020	Minus	13,6	0,5	a	NA	NA	NA
	Plus	15,0	0,1	b	39,6	1,0	a
	Norme corrigée	14,5	0,3	b	67,5	2,7	c
	N _{min}	14,5	0,2	b	55,3	2,8	b
	N-Tester	14,6	0,3	b	52,0	3,8	b
	Nitracheck	14,4	0,4	b	56,8	3,2	b
Tänikon 2019	Combi	14,4	0,1	b	54,7	3,1	b
	Minus	11,7	0,6	a	NA	NA	NA
	Norme _{rendement}	13,1	0,9	a	44,7	1,6	a
	Plus	13,1	1,9	a	47,0	1,1	ab
Tänikon 2020	MIntra	12,7	0,6	a	51,7	3,7	b
	Minus	9,7	0,9	a	NA	NA	NA
	Norme _{rendement}	11,4	1,1	bc	50,4	5,2	a
	Plus	11,5	0,9	c	49,9	4,4	a
	MIntra	10,3	0,8	ab	73,6	14,1	b
ANOVA (Y ~ MF × A)		Teneur en protéines			NUE		
Grangeneuve/Tänikon	MF	***/*			***/*		
	A	***/*			**/*		
	MF × A	**/_			**/*		

Codes de signification: *** p ≤ 0,001, ** p ≤ 0,01, * p ≤ 0,05, . p ≤ 0,1

distinguent pas statistiquement de la fertilisation normale sur le site en question. Toutefois, les méthodes de Fspé ont conduit en 2019 à Grangeneuve et en 2020 à Tänikon à des teneurs en protéines inférieures à celles du témoin Plus (ANOVA, Tableau 3). A Grangeneuve, les teneurs en protéines de la variante surfertilisée étaient toutefois, avec 15,2 %, nettement supérieures aux critères de promotion de la qualité prescrits par SwissGranum. En revanche en 2020, sur le site moins productif de Tänikon, l'objectif de qualité de SwissGranum d'au moins 12,8 % n'a pas pu être atteint avec la Fspé.

La Fspé augmente l'efficacité d'utilisation de l'azote (NUE)

L'effet de la méthode de fertilisation est généralement très significatif pour la NUE (Tableau 3). La NUE des méthodes de Fspé était généralement plus élevée que celle de la méthode de fertilisation Plus et de la méthode de la norme_{rendement} sur les deux sites/années (Tableau 3). Ce n'est qu'en 2019 à Tänikon que la NUE de la Fspé n'a pas été supérieure de manière statistiquement significative à celle de la fertilisation Plus. Comme la différence entre la Fspé et la méthode de la norme_{rendement} (qui se situe entre la méthode Plus et la Fspé) est significative, on peut supposer que cela est dû à une plus grande variabilité des parcelles et non à la recommandation elle-même. L'augmentation plus ou moins importante de la NUE durant les deux années étudiées indique que le calcul de la Fspé pourrait encore être optimisé.

Une NUE plus élevée signifie que le rendement obtenu par kg d'engrais azoté appliqué est plus important. Prenons un exemple: A Grangeneuve en 2019, on a obtenu entre 47 et 65 kg de rendement en grains par kg d'engrais azoté appliqué avec les méthodes de Fspé, contre seulement 30,3 avec la méthode de fertilisation Plus. A Grangeneuve, les méthodes de fertilisation Fspé différaient également de manière significative entre elles. Durant les deux années, la norme corrigée a affiché une NUE remarquablement élevée, qui se distingue significativement des autres méthodes de fertilisation. Seul le N-Tester avait une NUE plus élevée en 2019 (Tableau 3). Sur les deux sites, la NUE 2020 était significativement plus élevée en 2020 par rapport à 2019 (ANOVA, Tableau 3).

Discussion

Fspé: utilisation plus efficace de l'azote, rendements constants et qualité élevée

La présente étude montre que la Fspé peut contribuer à rendre l'agriculture plus respectueuse des ressources.

Les méthodes de Fspé testées ont eu une NUE plus élevée par rapport aux méthodes Plus et norme_{rendement}, c'est-à-dire qu'elles ont permis d'obtenir un rendement en grains plus élevé par kg d'engrais minéral appliqué. Dans le cas extrême (Grangeneuve, 2019), l'adaptation de la fumure au site a même permis d'obtenir plus du double du rendement en grains par kg d'engrais minéral appliqué.

L'utilisation plus efficace de l'azote s'est généralement accompagnée d'économies d'azote (jusqu'à -31 %, 46,5 kg N/ha) par rapport à la norme_{rendement} et n'a pas entraîné de réduction significative du rendement par rapport aux méthodes Plus et norme_{rendement}. Pour le N-Tester, la forte réduction d'azote (de -39 %, 59 kg N/ha) a toutefois entraîné une légère baisse de rendement en 2019. Cette diminution pourrait s'expliquer par le fait que l'appareil n'a pas été étalonné pour les céréales suisses et que la mesure n'est pas seulement influencée par le statut azoté de la plante, mais aussi par la structure du feuillage et les conditions environnementales, p. ex. l'approvisionnement en eau et la pression des maladies (Wood *et al.*, 1993).

En 2020, pour certaines méthodes (N-Tester, N_{min}, Combi), la Fspé s'est toutefois traduite par un léger excédent de fumure (max. 10 %) par rapport à la norme_{rendement}. L'année 2020 a également été une année de rendements élevés (jusqu'à 89 dt/ha). Une Fspé pourrait donc aussi contribuer à garantir les rendements ou à exploiter le potentiel de rendement local, ce que confirment des études internationales (Khosla *et al.*, 2002; Maidl *et al.*, 2004).

En règle générale, les teneurs en protéines n'ont pas non plus été affectées par la Fspé. En revanche, le site – ou éventuellement le choix des variétés – s'est avéré déterminant. Les variétés mises en place à Grangeneuve ont permis d'obtenir des teneurs en protéines généralement très élevées, qui se situaient dans la fourchette des objectifs de qualité définis par Swiss Granum ou même les dépassaient (12,8–13,8 %, Sonderegger & Scheuner, 2014). A Tänikon, ces valeurs étaient faibles en comparaison et parfois inférieures aux objectifs de qualité. Dans la pratique, les teneurs en protéines élevées bénéficient d'un bonus depuis 2015, dans le but de promouvoir la qualité (Brabant & Häner, 2016). Dans la méthode témoin Plus fortement fertilisée, des teneurs en protéines parfois légèrement plus élevées ont été réalisées dans la présente étude (Grangeneuve 2019, Tänikon 2020). Une teneur en protéines plus élevée en raison d'une fertilisation azotée intensive peut toutefois s'accompagner d'une qualité boulangère moindre, car la fertilisation a également un impact sur la composition des protéines

(Brabant & Häner, 2016). Comme ce facteur n'a pas fait l'objet de relevés dans le cadre de la présente étude, il n'est pas possible d'évaluer de manière définitive l'effet de la Fspé sur la qualité.

L'examen et le choix des variétés revêtent une grande importance, car tant le potentiel de rendement que la teneur en protéines sont des propriétés spécifiques à la variété, qui sont influencées par le site. Selon Levy et Brabant (2016), le choix des variétés est considéré comme le moyen le plus simple d'obtenir des teneurs en protéines élevées. Les variétés de blé utilisées dans cette étude étaient exclusivement des variétés Top connues pour leur qualité élevée et leur bon profil de résistance, mais qui ne se démarquent pas par le rendement le plus élevé. Les expériences menées dans le cadre des examens variétaux pourraient permettre d'étalonner et d'étayer le N-Tester ou des méthodes similaires de Fspé pour les variétés suisses.

Une augmentation de l'efficacité de l'azote laisse supposer des effets positifs sur l'environnement

Une quantification directe des excédents d'azote n'a pas été possible avec les données disponibles, car aucun rendement en paille n'a été enregistré à Grangeneuve. Pour la Fspé à Tänikon, Argento (2021) a démontré que les excédents d'azote ont été réduits de 32 % en moyenne par rapport à la norme_{rendement}. Pour les méthodes Fspé testées à Grangeneuve, des excédents d'azote plus faibles sont également probables en raison des NUE et des économies d'azote plus élevées.

Transposition dans la pratique: comparaison des méthodes Fspé

Les méthodes testées peuvent contribuer à une agriculture respectueuse des ressources, mais elles diffèrent en termes de coûts, de charge de travail, de connaissances nécessaires et d'application saisonnière (fractionnement des apports d'engrais).

En ce qui concerne la norme corrigée, il existe aujourd'hui une description dans les PRIF et les premiers outils numériques sont mis à disposition par les services cantonaux de vulgarisation agricole (p. ex. outil Excel à Grangeneuve). Les données nécessaires sont disponibles dans les exploitations (caractéristiques du sol et calendrier des champs), car elles doivent être relevées pour satisfaire aux prestations écologiques requises (PER). Parmi les méthodes testées par la Fspé, la norme corrigée est celle qui demande le moins de temps (0,5 h) et qui coûte le moins cher (Tableau 4). Le défi de la méthode consiste à répartir la quantité totale d'engrais entre les différents apports fractionnés. Étant donné que le moment et la quantité d'azote appliquée ont une influence considérable sur le rendement, la teneur en protéines et donc aussi sur la NUE (Haile *et al.*, 2012; Levy & Brabant, 2016), des connaissances agronomiques approfondies, de l'expérience ou des conseils de fumure sont indispensables pour bien appliquer la méthode. Pour une utilisation optimale et à grande échelle, il serait utile – et possible – d'intégrer la méthode de la norme corrigée dans les logiciels de calendrier des champs et de gestion des exploitations agricoles.

Pour la méthode N_{\min} , le temps nécessaire (2 h) ainsi que les coûts de prélèvement et d'analyse des échantillons de sol sont plus élevés (environ CHF 150.– par échantillon à trois profondeurs, soit CHF 210.–, charge de travail comprise). La logistique peut également s'avérer difficile, car l'échantillon doit être apporté immédiatement au laboratoire et devrait être prélevé si possible juste avant la fertilisation. Cependant, l'envoi express dans des boîtes réfrigérées est généralement organisé par les laboratoires et est inclus dans le prix. Afin de mettre cette méthode à la disposition du plus grand nombre à un prix avantageux et en réduisant le temps de travail, il serait envisageable de créer des modèles régionaux ou cantonaux basés sur des parcelles de référence et d'en déduire chaque année des recommandations de fertilisation en

Tableau 4 | Estimation approximative des coûts et du temps nécessaires des différentes méthodes testées.

Méthode de fertilisation	Temps nécessaire ¹ [h/parcelle]	Coûts d'acquisition/ Analyse [CHF]	Coûts par parcelle [CHF]
Norme corrigée	0,5	gratuit	15.–
N_{\min}	2	150.– ²	210.–
N-Tester	1,5	2200.– ³	47.20
Nitracheck	2	320.– ³	60.30
Combi	4	150.– ² + 320.– ³	270.30
MIntra	8,5	>7000.– ⁴ + N_{\min} ⁵	290.– + N_{\min} ⁵

¹ Salaire horaire 30.– fr.; ² Coûts d'analyse N_{\min} 50.– fr. par horizon de sol et par parcelle; ³ Hypothèse de 1000 utilisations; ⁴ Estimation approximative, hypothèse de 200 utilisations par drone et par système optique; ⁵ Charge pour N_{\min} par norme de surfaces dans la mesure où la méthode est appliquée.

fonction des saisons pour les parcelles dans la pratique. En ce qui concerne la méthode N_{\min} , seule la correction de la quantité d'azote pour le premier apport fractionné est recommandée en Suisse pour le blé d'automne. Le calcul d'autres apports fractionnés est généralement utile d'un point de vue technique et est également pratiqué en Allemagne et en France, mais il n'est pas rentable sur les petites parcelles. Pour les grandes surfaces, un échantillonnage spécifique à la surface, plus onéreux, peut également valoir la peine.

Pour le N-Tester, le temps de travail (1,5 h) et le coût (CHF 47.–) sont moyens (Tableau 4). Une utilisation multiple permet de réduire les coûts d'acquisition relativement élevés. Le N-Tester est souvent utilisé par plusieurs exploitations ou par des conseillers. En raison de l'absence d'étalonnage pour les variétés suisses, l'utilisation en Suisse est actuellement moins fiable et n'a de sens que si l'utilisateur dispose de valeurs empiriques pour la variété concernée. Dans le cadre de la vulgarisation, on utilise souvent des variétés de référence provenant de l'étranger. Or, les bases de cette comparaison ne sont ni transparentes ni connues. Un étalonnage sur des variétés suisses serait donc souhaitable, mais le fournisseur ne le propose pas aujourd'hui. Le N-Tester est utilisé pour le deuxième et le troisième apports fractionnés d'engrais. Le Nitracheck est moins cher à l'achat (CHF 320.–), les coûts d'amortissement sont donc moins élevés en cas d'utilisation par plusieurs exploitations (Tableau 4). Cependant, la mesure prend plus de temps (environ 2 heures). De plus, l'extraction manuelle de la sève peut s'avérer difficile. Dans la pratique, cette méthode est également utilisée pour déterminer la quantité d'engrais dans le deuxième et le troisième apports fractionnés et, comme le montrent les résultats, elle a fourni des résultats fiables lors de l'essai.

Dans le cas de la méthode Combi (N_{\min} + Nitracheck), les trois apports d'engrais fractionnés ont été optimisés sur la base de données. Néanmoins, cette méthode n'obtient pas de meilleurs résultats en termes de rendement, de teneur en protéines et de NUE que les méthodes N_{\min} et Nitracheck appliquées séparément. C'est la raison pour laquelle il n'est pas possible de déterminer de manière définitive si la variabilité annuelle est un avantage de cette méthode. Le temps nécessaire et les coûts sont toutefois relativement élevés en comparaison (Tableau 4).

Les essais réalisés à Tänikon montrent que la Fspé permet une utilisation plus efficace de l'azote et que la méthode peut être appliquée dans les conditions de la pratique. En raison des coûts d'acquisition nette-

ment plus élevés et du temps nécessaire ainsi que des connaissances requises pour l'utilisation des drones et le traitement des données multispectrales, il est judicieux de partager l'achat entre plusieurs exploitations et de collaborer avec des conseillers et des experts. En effet, l'utilisation individuelle du procédé par l'agriculteur est rarement lucrative. L'application présentée ici peut toutefois être représentative de systèmes similaires d'aide à la fertilisation basés sur des capteurs, comme les systèmes de mesure montés sur le tracteur (p.ex. Yara N Sensor, GreenSeeker), qui permettent une optimisation de la fertilisation en temps réel et nécessitent moins de savoir-faire, ou les systèmes de soutien par satellite basés sur le web (p.ex. farmstar conseil, Vista, one soil), dont le coût par parcelle est d'environ 20 euros. La Fspé est la seule des méthodes testées à tenir compte de la variabilité des conditions du sol au sein de la parcelle. Plus celle-ci est importante, plus la valeur ajoutée de la Fspé est grande (Pannell *et al.*, 2019; Späti *et al.*, 2021). Néanmoins, il existe encore une marge d'amélioration pour la Fspé, notamment en ce qui concerne les recommandations d'utilisation spécifiques aux variétés et la prise en compte des données pédologiques, raison pour laquelle ces méthodes devraient être optimisées dans les conditions de la pratique. Il semble qu'une combinaison avec la norme corrigée puisse également être utile dans les conditions de la pratique.

Obstacles actuels pour la pratique

Pour l'instant, il existe encore des obstacles à l'application de la Fspé dans la pratique agricole suisse, ce qui peut expliquer le faible taux d'utilisation. Les principaux obstacles cités sont les avantages économiques limités d'une fertilisation efficace en raison des coûts généralement bas des engrais minéraux et des coûts élevés de la technologie (Schlöpfer 2016; Späti *et al.*, 2021). L'investissement en temps plus important pour la planification et l'échantillonnage ainsi que les connaissances nécessaires à l'application des méthodes aggravent encore la situation. De plus, la Fspé et l'efficacité de la fertilisation ne font pas partie du Suisse-Bilanz dans le cadre des PER. Il serait toutefois possible d'appliquer la Fspé dans le Suisse-Bilanz par le biais du calendrier des champs ou d'un plan de fumure. Des études à l'étranger (Basso *et al.*, 2016; Cohan *et al.*, 2018; Stamatiadis *et al.*, 2018) ont également confirmé qu'une Fspé peut augmenter la NUE. La prise en compte de la Fspé dans les directives d'exécution pourrait donc être un bon moyen de réduire les excédents d'azote et donc potentiellement les pertes agricoles.

Conclusion

L'étude montre le grand potentiel de la Fspé pour une utilisation plus efficace de l'azote, à partir de l'exemple du blé d'automne. L'éventail de dispositifs possibles va de solutions très bon marché et simples comme la norme corrigée à l'optimisation de la fertilisation basée sur des capteurs, qui entraîne des coûts plus élevés, implique

d'avoir un grand savoir-faire et vaut particulièrement la peine pour une application à grande échelle.

Les essais montrent qu'il est possible d'augmenter l'efficacité de l'azote et de réduire les excédents sans subir de pertes de rendement. Outre le site et la variété, la fertilisation a également une influence sur la teneur en protéines, ce dont il faut tenir compte en conséquence. ■

Bibliographie

- Alva, L. (2004). Potato nitrogen management. *Journal of vegetable crop production*, **10**(1), 97–132.
- Argento, F. (2021). Combined digital and standard methods to optimize nitrogen (N) management and reduce N surplus in winter wheat (T. aestivum) production. *ETH Zürich*.
- Argento, F., Anken, T., Abt, F., Vogelsanger, E., Walter, A., & Liebisch, F. (2020). Site-specific nitrogen management in winter wheat supported by low-altitude remote sensing and soil data. *Precision Agriculture*, 1–23.
- Argento, F., Liebisch, F., Simmler, M., Ringger, C., Hatt, M., Walter, A., & Anken, T. (2022). Linking soil N dynamics and plant N uptake by means of sensor support. *European Journal of Agronomy*, **134**, 126462.
- Barnes, E., Clarke, T., Richards, S., Colaizzi, P., Haberland, J., Kostrzewski, M., Waller, P., Choi, C., Riley, E., & Thompson, T. (2000). Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground based multispectral data. *Proceedings of the Fifth International Conference on Precision Agriculture, Bloomington, MN, USA*.
- Basso, B., Fiorentino, C., Cammarano, D., & Schulthess, U. (2016). Variable rate nitrogen fertilizer response in wheat using remote sensing. *Precision Agriculture*, **17**(2), 168–182.
- OFAG (2021). *Rapport agricole 2021 - Utilisation des surfaces, extrait le 24.01*. www.agrarbericht.ch/fr/production/production-vegetale/utilisation-des-surfaces
- Brabant, C., & Häner, L. L. (2016). Influence de la fumure azotée et de son fractionnement sur la qualité boulangère du blé. *Recherche Agronomique Suisse*, **7**(2), 88–97.
- Chatterjee, A., Subedi, K., Franzen, D., Mickelson, H., & Cattanach, N. (2018). Nitrogen fertilizer optimization for sugarbeet in the Red River Valley of North Dakota and Minnesota. *Agronomy journal*, **110**(4), 1554–1560.
- Cohan, J., Soenen, B., Vericel, G., & Laurent, F. (2018). Improving nitrogen use efficiency in wheat: recent progress and prospects in France. *Proceedings of Phloème, first biennials of cereal innovation, Paris, 24th–25th January*.
- Congreves, K. A., Otchere, O., Ferland, D., Farzadfar, S., Williams, S., & Arcand, M. M. (2021). Nitrogen use efficiency definitions of today and tomorrow. *Frontiers in Plant Science*, **12**.
- Delgado, J., Khosla, R., Bausch, W., Westfall, D., & Inman, D. (2005). Nitrogen fertilizer management based on site-specific management zones reduces potential for nitrate leaching. *Journal of Soil and Water Conservation*, **60**(6), 402–410.
- Ernst, H., Förster, F., & Albert, E. (2003). *Merkblatt zur Anwendung des Nitrat-Schnelltests bei Wintergetreide und zum Einsatz von stabilisierten N-Düngern im Rahmen des Agrarumweltprogramms «Umweltgerechte Landwirtschaft im Freistaat Sachsen» (UL)*.
- Gnyp, M., Panitzki, M., Reusch, S., Jasper, J., Bolten, A., & Bareth, G. (2016). Comparison between tractor-based and UAV-based spectrometer measurements in winter wheat. *Proceedings of the 13th International Conference on Precision Agriculture*.
- Haile, D., Nigussie, D., & Ayana, A. (2012). Nitrogen use efficiency of bread wheat: Effects of nitrogen rate and time of application. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, **12**(3), 389–409. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162012005000002>
- Jemison, J., & Fox, R. (1988). A quick-test procedure for soil and plant tissue nitrates using test strips and a hand-held reflectometer. *Communications in soil science and plant analysis*, **19**(14), 1569–1582.
- Khosla, R., Fleming, K., Delgado, J., Shaver, T., & Westfall, D. (2002). Use of site-specific management zones to improve nitrogen management for precision agriculture. *Journal of Soil and Water Conservation*, **57**(6), 513–518.
- Levy, L., & Brabant, C. (2016). L'art de fractionner l'azote pour optimiser le rendement et la teneur en protéines du blé. *Recherche Agronomique Suisse*, **7**(2), 80–87.
- Maidl, F., Schächtl, J., & Huber, G. (2004). Strategies for site-specific nitrogen fertilization on winter wheat. *Proceedings of the 7th International Conference on Precision Agriculture and Other Precision Resources Management, Hyatt Regency, Minneapolis, MN, USA, 25–28 July, 2004*.
- Monostori, I., Árendás, T., Hoffman, B., Galiba, G., Gierczik, K., Szira, F., & Vágújfalvi, A. (2016). Relationship between SPAD value and grain yield can be affected by cultivar, environment and soil nitrogen content in wheat. *Euphytica*, **211**(1), 103–112.
- Omara, P., Aula, L., Oyebiyi, F., & Raun, W. R. (2019). World cereal nitrogen use efficiency trends: review and current knowledge. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, **2**(1), 1–8.
- Pannell, D., Gandorfer, M., & Weersink, A. (2019). How flat is flat? Measuring payoff functions and the implications for site-specific crop management. *Computers and electronics in agriculture*, **162**, 459–465.
- Schläpfer, F. (2016). Une taxe d'incitation sur l'azote pour l'agriculture suisse? *Recherche Agronomique Suisse*, **7**(11–12), 496–503.
- Sinaj, S., & Richner, W. (2017). Principes de fertilisation des cultures agricoles suisses. *Recherche Agronomique Suisse, Publication spéciale* (chapitre 8). www.prif.ch
- Sinclair, T. (1990). Nitrogen influence on the physiology of crop yield. *Theoretical production ecology: Reflections and prospects*, **181**.
- Sonderegger, O., & Scheuner, S. (2014). Bekenntnis zur Qualitätsstrategie – Getreidebranche einigt sich auf Proteinbezahlung. Retrieved 01.12. from <https://admin.ipsuisse.ch/CMS/ModanFileHandler.axd?DateiGUID=162274c1-64b9-4570-92e2-3233773a539e>
- Späti, K., Huber, R., & Finger, R. (2021). Benefits of Increasing Information Accuracy in Variable Rate Technologies. *Ecological Economics*, **185**, 107047.
- Stamatiadis, S., Schepers, J., Evangelou, E., Tsadilas, C., Glampedakis, A., Glampedakis, M., Dercas, N., Spyropoulos, N., Dalezios, N., & Eskridge, K. (2018). Variable-rate nitrogen fertilization of winter wheat under high spatial resolution. *Precision Agriculture*, **19**(3), 570–587.
- Wood, C., Reeves, D., & Himelrick, D. (1993). Relationships between chlorophyll meter readings and leaf chlorophyll concentration, N status, and crop yield: a review. *Proceedings of the agronomy society of New Zealand*.
- Zörb, C., Ludewig, U., & Hawkesford, M. J. (2018). Perspective on wheat yield and quality with reduced nitrogen supply. *Trends in plant science*, **23**(11), 1029–1037.