

# Evaluation de deux méthodes pour optimiser la fertilisation azotée des grandes cultures

Alexandra Maltas, Raphaël Charles, Didier Pellet, Brice Dupuis, Lilia Levy, Alice Baux, Bernard Jeangros et Sokrat Sinaj  
Agroscope, Institut des sciences en production végétale IPV, 1260 Nyon, Suisse  
Renseignements: Sokrat Sinaj, e-mail: sokrat.sinaj@agroscope.admin.ch



Effet de la fertilisation azotée sur la croissance de colza, parcelle 24A à Changins. (Photo: C. Parodi)

## Introduction

Apporter la juste dose d'engrais azoté en complément de l'offre en azote (N) du sol pour couvrir les besoins de la culture permet à la fois d'optimiser la production agricole et de limiter les impacts environnementaux. Cependant, la dose optimale varie fortement en fonction des conditions culturales et pédoclimatiques de la parcelle, en raison des nombreux facteurs influençant le cycle de l'azote et de leurs interactions. Ainsi, il est difficile pour un agriculteur de prévoir cette dose. Il est donc nécessaire de développer des outils d'aide à la décision, simples d'utilisation et fiables, permettant de calculer cette dose optimale.

A ce jour, deux méthodes sont utilisées en Suisse pour calculer la dose d'engrais azoté: la méthode des normes corrigées, également appelée méthode par estimation, et la méthode Nmin. Ces méthodes sont référencées dans les DBF-GCH 2009, Données de base pour la fumure des grandes cultures et des herbages (Sinaj *et al.* 2009).

### La méthode des normes corrigées

Cette méthode estime la dose d'azote à apporter en appliquant des corrections à une dose de référence en fonction des conditions pédoclimatiques et culturales du site. Cette dose de référence, appelée aussi **norme de fumure**, correspond, pour une culture donnée, à la quantité d'azote qu'il faut apporter dans une situation stan-

dard pour obtenir le rendement moyen ou **rendement de référence** observé en Suisse pour cette culture. Ces normes de fumure et rendements de références sont issus d'expérimentations établissant des courbes de réponse des cultures à la fertilisation azotée, de l'expérience des agriculteurs et du savoir d'experts.

Dès que la situation pédoclimatique diffère de la situation standard, des facteurs de correction sont appliqués à la norme de fumure. Six facteurs de correction, qui peuvent prendre des valeurs négatives ou positives, sont pris en compte (Eq. 1). Le facteur rendement (*fRdt*) prédit la demande en N d'une prévision de rendement supérieure ou inférieure à la norme de fumure (Sinaj *et al.* 2009; Richner *et al.* 2010). Ensuite, cinq facteurs permettent d'estimer l'impact des conditions pédoclimatiques de la parcelle sur l'offre en N du sol (Sinaj *et al.* 2009). En considérant que ces facteurs s'additionnent et n'interagissent pas, la dose d'azote à apporter (X) se résume à l'équation suivante (Eq.1):

$$X = \text{Norme} + (fRdt + fMos + fPc + fMa + fPluie + fTs) \quad (\text{Eq.1})$$

Le facteur *fMos* prend en compte l'effet de la teneur en argile et en matière organique du sol (MOS) sur la minéralisation de la MOS; *fPc* tient compte de l'effet du type de précédent cultural et de sa date d'enfouissement sur la minéralisation des résidus de culture; *fMa* calcule la proportion de l'azote total contenu dans les engrais organiques disponible l'année suivant celle de l'apport; *fPluie* estime l'impact des pluies sur les pertes d'azote par lixiviation pendant l'hiver et le printemps; *fTs* simule l'effet positif de sarclages répétés sur la minéralisation de la MOS.

### La méthode Nmin

Cette méthode est fondée sur la mesure de l'azote minéral dans le sol. Elle se base sur une valeur de référence à laquelle on soustrait la mesure «Nmin», qui correspond au stock d'azote minéral présent dans le sol à un moment donné (avant le 1<sup>er</sup> ou le 2<sup>e</sup> apport d'azote). La période et la profondeur de prélèvement du Nmin dépend de la culture (Sinaj *et al.* 2009). La valeur de la mesure Nmin intègre des caractéristiques spécifiques de la parcelle car les effets des différents facteurs évoqués précédemment sont directement contenus dans cette mesure. Cette méthode simplifie le calcul de la dose d'azote optimale mais ne permet pas de prendre en compte l'effet de ces facteurs après la date de mesure du Nmin. Pour pallier à ce défaut, des facteurs de correction sont appliqués, comme pour la méthode des normes corrigées. Le nombre de ces facteurs est limité et seuls des facteurs de corrections négatifs sont pris en compte (Sinaj *et al.* 2009).

**Résumé** ■ Deux méthodes sont utilisées en Suisse pour optimiser la fumure azotée des grandes cultures: la méthode des normes corrigées et la méthode Nmin. Les deux méthodes proposent des approches différentes: la méthode des normes corrigées prend en compte des caractéristiques parcellaires influençant la disponibilité en azote, tandis que la méthode Nmin est basée sur la mesure de l'azote minéral présent dans le sol à des périodes décisives pour la croissance des plantes. Dans cet article, ces deux méthodes sont évaluées à partir d'essais de fertilisation azotée réalisés par Agroscope pour une large gamme de grandes cultures et de conditions pédoclimatiques. Les avantages et les limites de chacune des méthodes sont exposés et des voies d'amélioration proposées.

Cet article évalue la performance de ces deux méthodes à partir d'essais de fertilisation azotée réalisés par Agroscope sur une large gamme de cultures et de conditions pédoclimatiques. Il complète celui de Richner *et al.* (2010), dont le but était de vérifier la valeur des normes de fumure azotée pour les grandes cultures.

### Matériel et méthodes

#### Essais utilisés pour l'évaluation des méthodes

Quelque 65 essais combinant culture\*site\*année et réalisés par les stations de recherche Agroscope entre 1996 et 2010 sur les principales grandes cultures suisses ont été utilisés (tabl. 1). La majorité de ces essais (46) ont été réalisés dans le cadre de la révision des DBF-GCH 2009 (Sinaj *et al.* 2009; Richner *et al.* 2010). Les 19 essais supplémentaires (9 en pomme de terre, 6 en blé panifiable >

**Tableau 1 | Caractéristiques des essais culture\*site\*année. Les chiffres entre parenthèses indiquent le nombre d'essais.**

Caractéristiques des sites						
Année	Lieu			Texture du sol <sup>1</sup>		
1996 (1), 1997 (2), 1998 (2), 1999 (3), 2000 (2), 2002 (1), 2003 (1), 2004 (1), 2005 (15), 2006 (19), 2007 (15), 2008 (1), 2009 (1), 2010 (1).	Changins (33), Goumoëns (8), Tänikon (21), Reckenholz (2), Oensingen (1).			argile (1), argile limoneuse (2), limon argileux (8), limon (39), limon sableux (14), sable fortement limoneux (1).		
Historique culturel						
Travail du sol	Gestion des résidus	Culture intermédiaire	Engrais de ferme		Prairie	
Labour régulier (65)	<i>Suisse romande</i> : toujours enfouis (41).	Tous (65): 1 année sur 2	<i>Suisse romande</i> (41): généralement sans engrais de ferme depuis plus de 10 ans.		<i>Suisse romande</i> (41): jamais de prairie dans la rotation.	
	<i>Suisse alémanique</i> : enfouis une fois sur deux (24).		<i>Suisse alémanique</i> (24): toujours avec engrais de ferme, en général dernier apport de fumier datant de 1–3 ans.		<i>Suisse alémanique</i> (24): toujours avec prairies, retournement généralement depuis plus de 3 ans.	
Itinéraire technique sur la culture à fertiliser						
Culture	Travail du sol	Gestion des résidus	Engrais azoté	Engrais de ferme	Culture intermédiaire	Précédent
<p><i>Suisse romande</i>: blé panifiable (10), blé fourrager (4), colza (7), orge (5), pomme de terre (9), maïs grains (3), maïs ensilage (3).</p> <p><i>Suisse alémanique</i>: blé panifiable (3), blé fourrager (3), colza (3), orge (2), seigle (4), triticale (3), maïs grains (3), maïs ensilage (3).</p>	<p><i>Suisse romande</i>: labour (18), techniques culturales simplifiées (23).</p> <p><i>Suisse alémanique</i>: techniques culturales simplifiées (24).</p>	Toujours enfouis (53) sauf dans les cas de maïs ensilage (2).	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> (65)	Jamais (64), fumier de bovins (1).	Systématiquement avant le maïs et la pomme de terre (18).	blé d'automne (15), blé de printemps (1), colza (11), orge d'automne (4), orge de printemps (2), triticale (8), pois protéagineux (8), soja (3), maïs ensilage (12), pomme de terre (1)

<sup>1</sup>Classification des sols de Suisse, Sociétés Suisse de Pédologie, 2010.

et 4 en colza) n'ont pas été pris en compte par Richner *et al.* (2010).

Sur ces essais, la réponse du rendement à la fertilisation azotée a été testée grâce à 4 à 6 doses de N parmi les suivantes: (i) 0 kg N ha<sup>-1</sup> (procédé présent dans tous les essais), (ii) Norme-40 kg N ha<sup>-1</sup>, (iii) Norme, (iv) Norme + 40 kg N ha<sup>-1</sup>, (v) Norme + 80 kg N ha<sup>-1</sup> et (vi) Norme + 120 kg N ha<sup>-1</sup>. Les doses ont été fractionnées selon les recommandations de Sinaj *et al.* (2009).

Les essais étaient situés en Suisse romande (Changins et Goumoëns) et alémanique (Reckenholz, Oensingen et Tänikon). Les sites alémaniques se caractérisaient par (i) des températures plus fraîches et des précipitations plus importantes que les sites romands (tabl. 2) et (ii) une utilisation plus fréquente des amendements organiques et des prairies dans la rotation (tabl. 1).

Dans chaque essai culture\*site\*année, une à six variétés ont été testées: blé panifiable (Arina, Pegasso, Runal, Zinal, Titlis), blé fourrager (Tapidor, Drifter), orge d'automne (Boreale, Verticale, Fridericus, Franziska), seigle d'automne (Matador), seigle d'automne hybride

(Picasso), triticale d'automne (Triamant, Lamberto), colza d'automne (Trabant, Cormoran, Express), pomme de terre (Appell, Bintje, Derby, Gourmandine, Eden, Fontane, Innovator, Jelly, LadyClaire, LadyFelicia, LadyJo, LadyRosetta, Laura, Marlen, Naturella, Victoria), maïs-grain (Delitop, Atendo, LG2275) et maïs d'ensilage (Delitop, Atendo, LG2275).

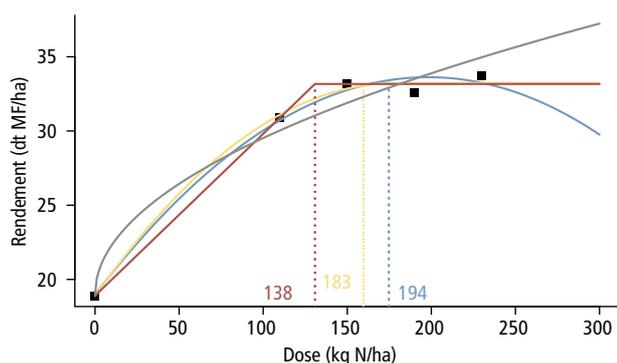
### Déterminer la dose d'azote économiquement optimale

La première étape pour déterminer la dose économiquement optimale consiste à décrire la réponse du rendement à la fertilisation azotée à l'aide de régressions non linéaires. La réponse du rendement à la fertilisation peut prendre diverses formes, les formes linéaires plus plateau, quadratique, quadratique plus plateau et racine carrée étant les plus employées. Sur les essais de cette étude, les quatre modèles ont obtenu une qualité d'ajustement bonne et similaire, mais le choix du modèle influençait de manière importante la dose optimale estimée (fig. 1). Cerrato et Blackmer (1990) ont observé le même résultat sur maïs et en ont déduit que le coefficient de détermina-

**Tableau 2 | Climat moyen de 2005–07 observé dans les différents sites d'étude**

	Suisse romande		Suisse alémanique		
	Changins (VD)	Goumoëns (VD)	Tänikon (TG)	Reckenholz (ZH)	Oensingen (SO)
Altitude (m)	430	600	540	440	460
Température moyenne (°C)	10,4	9,5	8,9	9,9	9,2
Cumul des précipitations (mm)	897	964	1130	1024	1161

tion n'est pas un critère pertinent de choix du modèle, compte tenu du nombre souvent restreint de doses testées et que des critères agronomiques doivent être pris en compte. Dans cette étude, c'est le modèle quadratique plus plateau qui a été choisi. Le modèle linéaire plus plateau a été écarté car il ne prend pas en compte la diminution progressive de l'efficacité de la fertilisation azotée avec la dose et sous-estime la dose optimale (Cerrato et Blackmer 1990). Enfin, les modèles quadratiques et racines carrée n'ont pas été retenus car ils tendent à surestimer la dose optimale (Cerrato et Blackmer 1990, Bullock et Bullock 1994, Godard 2005).



Modèles testés	Nopt (kg N/ha)	Yopt (dt/ha)	R <sup>2</sup>	RMSE (dt/ha)
Linéaire plus plateau	138	45,7	0,967	1,3
Quadratique plus plateau	183	45,8	0,988	0,8
Quadratique	194	46,2	0,986	0,8
Racine carrée	1643	83,5	0,985	0,9

**Figure 1 | Effet du choix du modèle sur l'estimation de la dose optimale (Nopt). Exemple d'un essai colza à Oensingen en 2006 (variété Expert).**

Le modèle quadratique plus plateau est décrit comme suit:

$$\text{si Dose} > X_{\text{max}} \text{ alors } Y = R_{\text{max}} \text{ sinon } Y = R_{\text{max}} - A * (\text{Dose} - X_{\text{max}})^2$$

Avec Y: rendement à l'humidité standard en dt/ha

Dose: dose de N appliquée en kg N/ha

A, R<sub>max</sub> et X<sub>max</sub>: paramètres de la courbe, ajustés par variété sur chaque essai culture\*site\*année. R<sub>max</sub>: rendement maximum et X<sub>max</sub>: dose permettant d'obtenir R<sub>max</sub>.

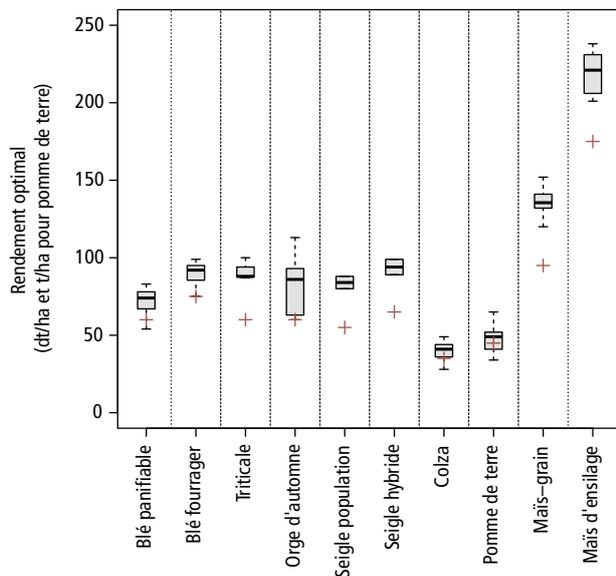
La dose permettant d'atteindre l'optimum économique (Nopt) a été ensuite déterminée en trouvant le point où le supplément de récolte ne compense plus le supplément d'engrais selon l'équation suivante (Eq.2):

$$\text{Nopt} = \min[0, (\text{CP}/-2A) + X_{\text{max}}] \quad (\text{Eq.2})$$

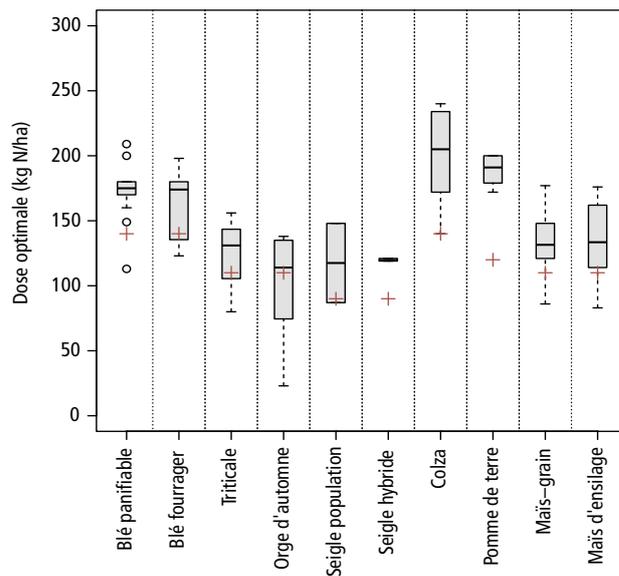
Avec CP: ratio entre le prix de l'engrais (1,57 fr./kg) et le prix de vente de la récolte (fr./dt). Les prix de référence des récoltes s'élevaient à 36,5 fr./dt pour le blé fourrager et le maïs-grain, 53 fr./dt pour le blé panifiable de classe top (Runal et Titlis), 50 fr./dt pour le blé panifiable de classe I (Arina et Zinal), 44 fr./dt pour le blé panifiable de classe III (Pegassos), 34,5 fr./dt pour l'orge et le triticale, 40 fr./dt pour le seigle, 90 fr./dt pour le colza classique et 36 fr./dt pour la pomme de terre (non triées) (Pilet et Frei 2012).

La valeur de Nopt obtenue avec le modèle n'est pas fiable lorsque cette valeur est supérieure à la dose maximale testée (Burns 2006, Hernandez et Mulla 2008). Afin d'éviter toute extrapolation abusive, nous avons considéré dans ces cas que Nopt prend la valeur de la dose maximale testée (Hernandez et Mulla 2008, Richner et al. 2010). Ceci concernait principalement des essais de blé panifiable (57 % des cas), colza (45 % des cas) et pomme de terre (71% des cas).

Le rendement économique (Yopt) associé à la dose Nopt ainsi que les rendements obtenus avec les normes



**Figure 2** | Rendements optimaux médians<sup>1</sup> observés à partir du modèle quadratique plus plateau. Les croix rouges représentent les rendements de référence des DBF-GCH, 2009, c'est-à-dire les rendements moyens observés en Suisse.



**Figure 3** | Doses d'azote optimales médianes<sup>1</sup> observées à partir du modèle quadratique plus plateau. Les croix rouges représentent les normes de fumure des DBF-GCH, 2009.

<sup>1</sup>Signification des boîtes à moustaches: les boîtes s'étendent du premier au troisième quartile. Le trait gras situé à l'intérieur des boîtes représente la médiane. Les moustaches s'étendent entre les valeurs minimale et maximale tant que la longueur de ces dernières est inférieure à 1,5 fois l'intervalle interquartile. Dans le cas contraire, les valeurs extrêmes ne sont pas incluses dans les moustaches, elles sont considérées comme des valeurs exceptionnelles et sont représentées par des cercles.

de fumure, les normes corrigées et le conseil Nmin ont ensuite été calculés en utilisant les valeurs des paramètres du modèle obtenues à l'étape précédente. Pour l'ensemble des cultures, Yopt vaut de 97,4 à 99,8% de Rmax (résultats non présentés).

Le modèle a été ajusté individuellement pour chacune des variétés testées. Une moyenne des différentes variétés a ensuite été calculée pour les divers rendements et doses (optimum économique, norme de fumure, normes corrigées, Nmin) afin d'obtenir une valeur par culture et par milieu (site\*année) pour les 65 essais culture\*site\*année. Les caractéristiques de ces essais sont résumées dans les tableaux 1 et 2. Le rendement optimum a été utilisé comme objectif de rendement dans la méthode des normes corrigées pour les cultures faisant intervenir le facteur de correction *fRdt* (céréales et colza d'automne). Lorsque Yopt était supérieur au rendement maximal prévu par ce facteur de correction, la borne maximale de rendement a été employée (Sinaj *et al.* 2009; Richner *et al.* 2010).

#### Mesure de l'azote minéral dans le sol (Nmin)

Les stocks d'azote minéral utilisés dans la méthode Nmin ont été prélevés dans les 60 premiers cm de sol pour les cultures de pomme de terre et sur l'horizon 0–90 cm

pour les autres cultures. Les prélèvements ont été réalisés à la sortie de l'hiver pour les cultures d'automne et 15 à 30 jours après plantation pour le maïs à Tänikon. Pour les cultures de maïs et pomme de terre à Changins, les prélèvements ont eu lieu à la plantation, soit avant la date conseillée par la méthode Nmin (feuillage à environ 10 cm de hauteur pour la pomme de terre et au stade 5–6 feuilles pour le maïs, Sinaj *et al.* 2009).

#### Critères d'évaluation des méthodes

La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE, *Root Mean Squared Error*, Eq. 3) et l'écart médian entre la dose observée et la dose conseillée par la méthode des normes corrigées ou par la méthode Nmin ont été utilisés comme critères d'évaluation de ces méthodes de conseil. Ces deux critères donnent une estimation de l'erreur du conseil en kg N/ha. L'écart médian indique si le conseil surestime (valeur négative) ou sous-estime (valeur positive) en moyenne la dose optimale, mais des erreurs de signe différent se compensent. D'où l'intérêt d'un second estimateur de l'erreur avec la RMSE que l'on souhaite la plus petite possible.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \hat{x}_i)^2}{n}} \quad (\text{Eq. 3})$$

Où  $n$  indique le nombre de situations,  $x_i$  la valeur de  $N_{opt}$  observée pour la situation  $i$ ,  $\hat{x}_i$  la dose conseillée par la méthode de conseil de la fertilisation testée (normes corrigées ou  $N_{min}$ ).

## Résultats et discussion

### Doses d'azote et rendements optimaux

Les essais d'Agroscope sont tous situés sur le plateau suisse, en zones favorables aux grandes cultures. Dans la pratique, les principales grandes cultures sont également présentes dans des zones moins productives (Richner *et al.* 2010). Ainsi, les rendements optimaux médians obtenus sur les essais d'Agroscope se situent généralement au-dessus des rendements de référence des DBF-GCH (Sinaj *et al.* 2009; fig. 2) et des rendements moyens observés en Suisse (Pilet et Frei 2012). Ceci est particulièrement marqué pour les céréales d'automne (triticale, orge, seigles) et le maïs (grain et ensilage).

Pour toutes les cultures, les normes de fumure présentées dans les DBF-GCH sont également souvent plus faibles que les doses optimales observées dans cette étude (fig. 3). Ceci peut être mis en relation, pour les céréales d'automne et les maïs, avec les hauts rendements des essais analysés dans cette étude (fig. 2). Ce constat est à l'origine du facteur de correction  $f_{Rdt}$  introduit en 2009 dans les DBF-GCH (Sinaj *et al.* 2009; Richner *et al.* 2010). Les écarts importants observés sur colza et pomme de terre (écart médian de 65 et 71 kg N/ha; tabl. 3) sont par contre surprenants. Pour ces deux cultures, le rendement médian observé étant proche du rendement de référence (fig. 2), la norme de fumure semble sous-estimée. Malgré les changements de techniques culturales et de variétés, les normes de fumure n'ont pas évolué depuis 20 ans ou plus [depuis 1987 pour le blé et le seigle d'automne (Ryser *et al.* 1987) et depuis 1994 pour les autres cultures (Ryser *et al.* 1994)]. Toutefois, ces écarts à la dose optimale doivent être relativisés. En effet, d'une part leurs effets sur les rendements restent limités (tabl. 3). D'autre part, si elle prend bien en compte le coût des engrais, l'approche de la dose optimale choisie n'intègre pas l'impact de la fertilisation azotée sur la qualité des récoltes et les coûts liés aux épandages d'engrais azotés, fongicides et régulateurs de croissance, ni les effets du fractionnement de la dose d'azote sur le rendement. Selon les recommandations de Sinaj *et al.* (2009), les doses devraient être fractionnées en trois apports au-delà de 140 kg N/ha pour les cultures d'automne (céréales et colza) et 160 kg N/ha pour les cultures d'été (maïs et pomme de terre). Ainsi, pour les cultures de blés, colza et pomme de terre,

deux apports suffiraient avec les normes de fumure, tandis que trois apports seraient nécessaires avec les doses optimales (tabl. 3).

Pour une même culture, de fortes variations du  $N_{opt}$  ont été observées entre les essais: par exemple de 113 à 209 kg N/ha pour le blé panifiable et de 23 à 137 kg N/ha pour l'orge d'automne (fig. 3). Ainsi, même si la norme de fumure se situe en moyenne dans la zone de l'optimum (exception faite des cultures de colza et de pomme de terre), appliquer la norme de fumure quelle que soit la situation occasionne à la fois de fortes sous- et sur-fertilisations (fig. 4). Il est donc essentiel d'ajuster la dose en fonction des caractéristiques parcellaires, afin de réduire les pertes de revenu (tabl. 3) ou d'azote vers l'environnement.

### Évaluation de la méthode des normes corrigées

En intégrant certaines caractéristiques parcellaires, la méthode des normes corrigées permet une assez bonne prédiction de la variabilité de la dose optimale (fig. 4). Par rapport aux normes non corrigées, il en résulte une légère amélioration de la RMSE. Les cas de sous-estimations restent nombreux et particulièrement importants pour le colza et la pomme de terre (écart médian de 41 et 80 kg N/ha; tabl. 3). Mais leurs impacts sur le rendement et la marge brute restent encore une fois limités (perte médiane maximale de 7% sur pomme de terre; tabl. 3). Ces sous-estimations corroborent les pratiques agricoles recensées entre 2001 et 2004 par Favre et Charles (2006). D'après ces auteurs, les agriculteurs romands et tessinois ont apporté en moyenne, selon les cultures, entre 10 et 36 kg N/ha de plus que la norme corrigée, l'excédent le plus important intervenant pour le colza. Ces auteurs notent, par contre, un excédent moyen pour la pomme de terre de seulement 10 kg N/ha probablement en raison des exigences en matière de qualité de la récolte (teneur en amidon et calibres des tubercules, paramètres non inclus dans le calcul de l'optimum dans cette étude).

A l'opposé, les normes corrigées surestiment deux situations en maïs (fig. 4). Il s'agit de maïs cultivés en 2007 à Tänikon sur une parcelle présentant un fort stock d'azote minéral au semis (153 kg N/ha). La période entre la sortie de l'hiver et le semis du maïs, période sans absorption de N par les cultures maïs avec une bonne minéralisation de la MOS, est relativement étendue pour cette culture. Si la pluviométrie et la température durant cette période sont favorables à la minéralisation, les stocks de N minéral au semis peuvent être très élevés, comme c'était le cas en 2007. La version actuelle des normes corrigées ne permet pas de tenir compte de cette forte offre en N car les effets des conditions

**Tableau 3** | Médiane de la dose d'azote, du rendement et de la marge brute simplifiée observée à l'optimum et écart médian entre la valeur observée à l'optimum et la valeur obtenue avec la norme de fumure, la dose conseillée par la méthode des normes corrigées et la dose conseillée par la méthode Nmin. Un écart médian positif indique une diminution par rapport à l'optimum.

		Blé panifiable	Blé fourrager	Triticale	Orge	Seigle	Colza	Pomme de terre	Maïs grain	Maïs d'ensilage	
Dose (kg N/ha)	Observée à l'optimum	175	174	131	114	120	205	191	132	134	
	écart médian	Normes	35	34	21	4	30	65	71	22	24
		Normes corrigées	32	42	34	8	20	41	80	2	-22
		Nmin	32	21	38	22	22	61	21	38	31
Rendement <sup>1</sup> (dt/ha)	Observé à l'optimum	74,0	92,1	87,8	85,7	88,4	40,6	487	135,9	221,3	
	écart médian	Normes	3,2	3,2	3,1	2,5	3,0	2,9	39	3,1	4,5
		Normes corrigées	2,8	3,3	3,7	1,1	1,6	1,6	35	1,8	-0,2
		Nmin	2,1	2,6	4,1	2,2	1,7	2,8	11	5,6	5,0
Marge brute simplifiée (fr./ha) <sup>2</sup>	Observée à l'optimum	3415	3077	2905	2749	3324	3390	17232	4577	3365	
	écart médian	Normes	113	67	112	65	72	155	1291	69	66
		Normes corrigées	90	53	70	62	31	67	1128	60	57
		Nmin	62	73	81	77	34	150	354	117	33

<sup>1</sup>Les rendements «Normes», «Normes corrigées» et «Nmin» ont été calculés séparément pour chaque variété et chacun des 65 essais à l'aide des paramètres du modèle quadratique plus plateau et de la dose d'azote correspondante.

<sup>2</sup>Marge brute simplifiée = (Rendement \* prix de vente) – (Dose \* prix de l'engrais)

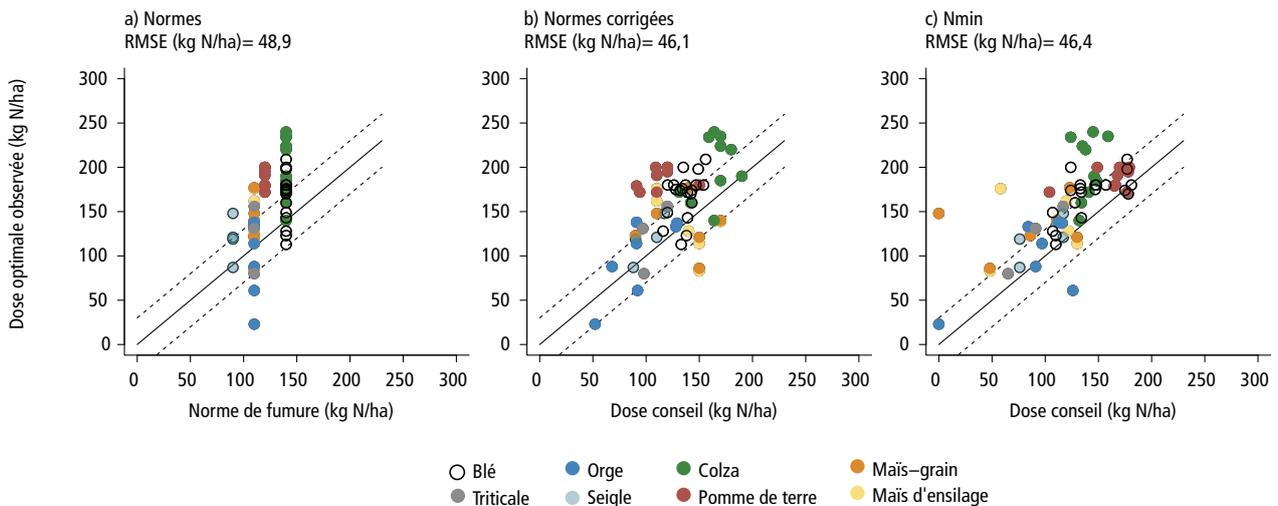
hydriques et thermiques printanières sur la minéralisation de MOS ne sont pas pris en compte. Seuls les effets des pluies printanières sur la lixiviation de l'azote sont pris en compte via le facteur pluie (*fPluie*). Dans la version romande de 1987 (Ryser *et al.* 1987), il existait un facteur de correction qui intégrait les effets des conditions printanières sur la minéralisation de la MOS et la disponibilité de l'azote. Ce facteur a été retiré depuis la version de 1994 (Ryser *et al.* 1994) et remplacé par une nouvelle colonne intégrant les pluies printanières (*fPluie*). Au vu des résultats de cette étude, il pourrait être judicieux d'étudier l'impact de la réintroduction de ce facteur sur la qualité du conseil fourni par la méthode des normes corrigées.

La prise en compte des caractéristiques pédoclimatiques et culturales se limite à seulement six facteurs considérés comme les plus significatifs. Ce nombre limité s'explique par la nécessité de recourir à des tables de références. Néanmoins, cela conduit à une prise en compte seulement partielle de la diversité des situations. Un autre problème lié aux normes corrigées provient du fait que l'influence des différents facteurs n'est pas cumulative et que les possibilités de combinaisons de leurs effets sont presque illimitées (Walther *et al.* 1998). Deux raisons sont à l'origine de ce problème: (i) la situation standard considérée comme normalement pourvue en N n'est pas clairement définie et (ii) les facteurs de

correction, outre le fait que leur origine est ancienne et souvent inconnue, ont été ajoutés successivement et indépendamment les uns des autres au cours de l'évolution de la méthode, ceci en faisant régulièrement recours au «savoir d'experts». Il est difficile aujourd'hui de confronter ces facteurs avec les données de la littérature internationale car ils correspondent à des corrections par rapport à une norme et non à la valeur d'un poste du bilan N (tel que la minéralisation de l'humus, la lixiviation etc.).

### Evaluation de la méthode Nmin

Dans ces essais, la méthode Nmin est celle qui retranscrit le mieux la variabilité du Nopt toutes cultures confondues (meilleure répartition des points autour de la diagonale; fig. 4). Cette méthode obtient surtout de meilleurs résultats que celle des normes corrigées pour la pomme de terre. Rappelons toutefois que pour la pomme de terre, le prélèvement Nmin a été effectué avant la date préconisée par la méthode. La moitié des maïs (six sur un total de douze) sont dans la même situation et ceci conduit à une forte sous-estimation des besoins dans deux cas. Il s'agit de deux maïs cultivés en 2007 à Changins avec un stock d'azote minéral très élevé au semis (209 et 142 kg N/ha) qui a probablement été en partie lixivié par les précipitations importantes intervenues après sa mesure (60 mm dans les dix jours suivant la



**Figure 4** | Prise en compte de la variabilité de la dose optimale par a) la norme de fumure, b) la méthode des normes corrigées et c) la méthode Nmin. Les lignes en pointillé représentent la dose optimale observée  $\pm$  30 kg N/ha.

mesure). Le conseil Nmin aurait vraisemblablement été plus proche de la dose optimale si le prélèvement avait été effectué avant le deuxième apport azoté, tel que préconisé par la méthode Nmin (Sinaj *et al.* 2009). Ces résultats sur pomme de terre et maïs à Changins ont donc une valeur indicative mais ne présument en rien de la valeur du conseil qui aurait été obtenue si les prélèvements Nmin avaient été effectués aux dates conseillées. Sur les autres maïs et les céréales d'automne, la méthode Nmin obtient des résultats satisfaisants et comparables à ceux de la méthode des normes corrigées. Par contre, elle est mise en défaut avec le colza (fig. 4) et notamment lorsque les colzas étaient peu développés à la sortie de l'hiver. Le colza est une culture capable d'accumuler d'importantes quantités de N avant l'hiver, avec de grandes variations suivant l'année et les conditions climatiques. En France, le COMIFER (Comité français d'études et de développement de la fertilisation raisonnée; 2013) rapporte que le N absorbé avant la reprise de la végétation peut varier de 25 à plus de 150 kg N/ha pour le colza d'automne. Dans ces essais d'Agroscope, des quantités allant de 15 à 97 kg N/ha ont été observées. Or, à mesure Nmin identique, un colza bien développé présentera des besoins en N moindres qu'un colza peu développé, le premier ayant déjà absorbé une bonne partie du N dont il a besoin. C'est pourquoi le CETIOM (Centre technique interprofessionnel des oléagineux et

du chanvre) a développé en France la réglette azote colza. Celle-ci déduit de la dose conseillée l'azote déjà absorbé par le colza à la sortie de l'hiver à partir d'une estimation visuelle de la biomasse de la culture.

Sinaj *et al.* (2009) mentionnaient déjà que la précision de la méthode Nmin est réduite quand la teneur en MOS excède 20% et inutilisable lorsque le niveau de la nappe phréatique est élevé ou variable. Cette étude montre que cette méthode est également prise en défaut avec le colza lorsque les plantes sont particulièrement petites ou grandes à la sortie de l'hiver. L'ajout d'un nouveau facteur de correction prenant en compte l'état du colza au moment du prélèvement Nmin pourrait améliorer les résultats.

## Conclusions

Les deux méthodes, normes corrigées et Nmin, conduisent à des doses conseillées proches de la dose optimale. Elles permettent de diminuer les cas de sur- et sous-fertilisation azotée par rapport à une dose d'azote fixe correspondant à la norme de fumure. D'autre part, elles montrent l'intérêt de moduler la fumure azotée selon les conditions pédoclimatiques.

Dans les bonnes conditions de production de cette étude, les doses conseillées par ces deux méthodes sont en moyenne inférieures à la dose optimale. Les sous-

estimations les plus importantes ont été observées pour la pomme de terre avec la méthode des normes corrigées et pour le colza avec les deux méthodes. Les deux méthodes obtiennent les meilleurs résultats avec les céréales d'automne. Elles préconisent en effet des doses comparables et assez proches de la dose optimale. Cette étude suggère les améliorations méthodologiques suivantes: une prise en compte de la biomasse du colza à la sortie de l'hiver pour moduler la fumure azotée en fonction de l'état de la culture et une prise en compte de la minéralisation printanière pour les cultures sarclées de printemps.

Combiner ces méthodes à des outils de diagnostic de l'état de nutrition azoté du couvert en cours de culture permettrait de corriger les éventuelles carences azotées induites par une sous-estimation de la dose optimale.

Les potentialités de nouveaux outils de conseil existant sur le marché européen et prenant davantage en compte les caractéristiques parcellaires et le climat doivent encore être testées. ■

**Remerciements:**

Les auteurs remercient Walter Richner, Agroscope, Institut des sciences en durabilité agronomique, pour la mise à disposition des données des essais réalisés en Suisse alémanique.

## Riassunto

### Valutazione dei due metodi per ottimizzare la fertilizzazione azotata delle colture

In Svizzera per l'ottimizzazione della concimazione azotata in coltura si basa su due metodi: il metodo delle norme corrette e il metodo Nmin. Questi due metodi si differenziano tra loro nell'approccio all'analisi: il metodo delle norme corrette tiene conto delle varie caratteristiche di una parcella che influenzano la disponibilità dell'azoto, mentre il metodo Nmin si basa su misurazioni dell'azoto minerale presente nel suolo in periodi decisivi per la crescita delle piante. In questo articolo i due metodi sono valutati sulla base di esperimenti inerenti la concimazione azotata su diverse colture e in condizioni pedoclimatiche diverse fra loro realizzati da Agroscope. L'articolo mette in evidenza vantaggi e limiti dei due metodi, così come alcune proposte di miglioramento.

## Summary

### Evaluation of two methods for optimising nitrogen fertilisation of field crops

Two methods are used in Switzerland to optimise the nitrogen fertilisation of field crops: the «corrected norms» method and the Nmin method. Each of the methods suggests a different approach: the «corrected norms» method takes into account field characteristics influencing nitrogen availability, while the Nmin method is based on the measurement of mineral nitrogen present in the soil during periods that are crucial for the plants growth. In this article, both methods are evaluated using nitrogen fertilisation experiments performed by Agroscope for a wide range of arable crops and pedoclimatic conditions. The advantages and limits of each method are presented, and ways for improvement are suggested.

**Key words:** field crops, nitrogen fertilization, fertilizer recommendation, «corrected norms» method, Nmin method.

## Bibliographie

- Bullock D.G. & Bullock D. S., 1994. Quadratic and quadratic-plus-plateau models for predicting optimal nitrogen rate of corn: a comparison. *Agronomy Journal* **86**, 191–195.
- Burns I. G., 2006. Assessing N fertilizer requirements and the reliability of different recommendation systems. *Acta horticulturae* **700**, 35–48.
- Cerrato M. E. & Blackmer A. M., 1990. Comparison of models for describing corn yield response to nitrogen-fertilizer. *Agronomy Journal* **82** (1), 138–143.
- COMIFER, 2013. Calcul de la fertilisation azotée. Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales. COMIFER, Groupe Azote. 159 p.
- Favre G. & Charles R., 2006. Gestion de la fumure azotée en grandes cultures de 1992 à 2004. Agridea. 54 p.
- Godard C., 2005. Modélisation de la réponse à l'azote du rendement des grandes cultures et intégration dans un modèle économique d'offre agricole à l'échelle européenne : application à l'évaluation des impacts du changement climatique. Thèse de doctorat. Institut National Agronomique Paris Grignon. 278 p.
- Hernandez J. A & Mulla D. J., 2008. Estimating uncertainty of economically optimum fertilizer rates. *Agronomy Journal* **100** (5), 1221–1229.
- Pilet F. & Frei C., 2012. Mémento agricole 2013. Agridea. 240 p.
- Richner W., Flisch R., Sinaj S & Charles R., 2010. Détermination des normes de fumure azotée pour les grandes cultures. *Recherche Agronomique Suisse* **1** (11–12), 410–415.
- Ryser J. P., Charles J. P., Chauvin B., Degallier J., Dougoud R., Felber R., Maillard A., Rossier D., Thöni E. & Vullioud P., 1987. Directives de fumure pour les grandes cultures et les herbages en Suisse romande. *Revue suisse d'Agriculture* **19** (6), 297–318.
- Ryser J.P., Walther U. et Menzi H. 1994. Données de base pour la fumure des grandes cultures et des herbages. *Revue suisse d'Agriculture* **26** (4), 196–242.
- Sinaj S., Richner W., Flisch R. & Charles R., 2009. DBF-GCH 2009 – Données de base pour la fumure des grandes cultures et des herbages. *Revue suisse d'Agriculture* **41** (1), 1–98.
- Walther U., Weiskopf P. & Jaggli F., 1998. Schätzung der optimalen N-Düngung zu Wintergetreide? *Agrarforschung* **5**, 185–188.