

# Apports en éléments nutritifs sur le blé d'automne – à partir de quand deviennent-ils limitants?

Lucie Gunst<sup>1</sup>, Walter Richner<sup>1</sup>, Paul Mäder<sup>2</sup> et Jochen Mayer<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Station de recherche Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, 8046 Zurich, Suisse

<sup>2</sup>Institut de recherche de l'agriculture biologique FiBL, 5070 Frick, Suisse

Renseignements: Lucie Gunst, e-mail: lucie.gunst@art.admin.ch, tél. +41 44 377 74 31



Blé d'automne dans l'essai DOC. (Photo: ART)

## Introduction

Le but de l'essai comparatif DOC mis en place depuis 1978 à Therwil BL est de comparer un système biologique-dynamique (D), un système organique-biologique (O), un système conventionnel (C; fumure organique minérale) et un système conventionnel-minéral (M; fumure exclusivement minérale) dans la perspective de la production durable et de la fertilité du sol (tabl. 1). L'essai joue sur deux niveaux de fumure (tabl. 1).

Les rendements se différencient nettement entre les niveaux de fumure ainsi qu'entre les systèmes de cultures biologiques et conventionnels. Avec le blé d'automne, les différences de rendement étaient de l'ordre de 15 % entre les procédés biologiques et conventionnels (Gunst *et al.* 2007). Les différences de rendement étaient légèrement moins prononcées entre les niveaux de fumure des procédés conventionnels (C1 vs. C2) qu'entre ceux de procédés biologiques (O1/D1 vs. O2/D2; Jossi *et al.* 2009). Dans l'agriculture biologique, on admet que l'azote (N) est le facteur limitant des rendements et que les autres éléments nutritifs essentiels comme le phosphore (P), le

potassium (K), le magnésium (Mg) et le calcium (Ca) peuvent être réintroduits en grande partie par les engrais de ferme ou puisés dans le sol (Berry *et al.* 2002).

Le projet avait pour objectif d'étudier l'approvisionnement du blé d'automne en éléments nutritifs dans l'essai DOC pendant les quatre premières périodes d'assolement de 1978 à 2005 et de réunir des informations sur l'effet limitant des éléments nutritifs dans les systèmes culturaux biologiques. Pour y parvenir, les chercheurs ont analysé et comparé l'absorption d'éléments nutritifs et les teneurs en éléments nutritifs des grains et de la paille. Pour compléter, les teneurs en phosphore, potassium et magnésium disponibles pour les plantes ont également été relevées dans la couche superficielle du sol.

## Matériel et méthodes

Dans l'essai comparatif DOC, l'assolement, le choix des variétés et le travail sont identiques dans tous les procédés. La fertilisation, la protection des plantes et le contrôle des adventices sont spécifiques aux systèmes culturaux dans les procédés conventionnels et biologiques (détails de l'essai, voir Gunst *et al.* 2007 et tabl. 1).

### Exploitation du blé d'automne

Durant les années étudiées, les variétés de blé d'automne cultivées étaient les suivantes: Probus (1979, 1983), Sardona (1986, 1989, 1990), Ramosa (1993), Tamaro (1996, 1997, 2000, 2002) et Titlis (2003). Les semences des systèmes C et M ont été traitées, dans les systèmes bio D, O et dans le procédé N0, par contre, la quantité de semences a été augmentée de 5 à 20 %. Seules les parcelles de blé avec des pommes de terre comme précédent cultural ont été évaluées car cette séquence d'assolement a pu être suivie sur l'ensemble de la période.

En moyenne, on a épandu du compost de fumier et du lisier (10 t/ha/an; 21 m<sup>3</sup>/ha/an) dans le système D2, du lisier (20 m<sup>3</sup>/ha/an) dans le système O2 et des tourteaux de ricin (763 kg/ha/an) durant les trois premières années. Les systèmes C et M ont reçu des apports d'azote, de

phosphore et de potassium sous forme minérale (tabl. 2). Il faut savoir que la quantité d'azote minérale appliquée dans le système C était de 65 % plus élevée que dans les systèmes D et O. La quantité d'azote épandue lors du premier apport a été mesurée en déduisant les réserves de Nmin dans le sol au début de la période de végétation. Dans les systèmes D, O et dans le procédé N0, la protection des plantes s'est limitée à la lutte mécanique contre les adventices à l'aide d'une herse et à l'application de produits biodynamiques dans les systèmes D et N0. Dans les systèmes C et M, une application d'herbicides et une application de régulateurs de croissance ont été pratiquées, ainsi qu'un à deux traitements avec des fongicides.

### Prélèvement d'échantillons et analyses

Les échantillons ont toujours été prélevés lors de la récolte. Après séchage et nettoyage des parties souillées, des barbes et des glumes, les grains et la paille ont été moulus et les teneurs en éléments nutritifs analysées. La teneur en azote a été déterminée selon Dumas, les teneurs en phosphore par spectrophotométrie et celles de potassium, de magnésium et de calcium par ICP-OES selon l'extraction des cendres dans HCl. Les teneurs en éléments nutritifs disponibles dans le sol (0–20 cm) ont été déterminées selon les méthodes de référence des stations de recherche Agroscope pour le phosphore, le potassium dans des extraits de CO<sub>2</sub>, pour le magnésium dans des extraits de CaCl<sub>2</sub> (Agroscope 2011).

### Résumé

L'essai longue durée DOC visant à comparer les systèmes culturaux a permis notamment d'étudier les effets des apports en éléments nutritifs sur le blé d'automne de 1978 à 2003. Il doit fournir des informations sur le rôle joué par les éléments nutritifs sur le niveau des rendements dans les systèmes d'agriculture biologique.

Des différences de rendements considérables entre les systèmes culturaux «biologiques» et «conventionnels» et les niveaux de fertilisation ont pu être expliquées essentiellement par l'approvisionnement des plantes en éléments nutritifs, notamment en azote. Le phosphore a pu être exclu des facteurs co-limitants car l'approvisionnement du sol en phosphore était suffisant dans tous les procédés DOC pendant toute la durée de l'essai. Les analyses de la paille et des grains ont indiqué des valeurs élevées en phosphore et de faibles différences, ce qui confirme les résultats du sol.

Le potassium par contre a pu être identifié comme étant un facteur co-limitant de l'azote, dans les procédés bio avec niveau de fertilisation réduit ainsi que dans la parcelle témoin non fertilisée. La différence entre les teneurs en potassium dans la biomasse superficielle et le potassium disponible dans le sol l'indiquait également. Toutefois, les systèmes biodynamique et bioorganique montraient un apport équilibré en potassium avec un niveau de fumure élevé. Par conséquent, avec un niveau de fumure de ce type, les deux systèmes biologiques peuvent être considérés comme durables.

**Tableau 1** | Site, structure de l'essai, systèmes culturaux et assolement de l'essai DOC

Site et climat: Therwil BL, 300 m ü. M., 9,5 °C, 792 mm				
Sol: terre parabrune profonde sur loess, légèrement à pseudogley				
Structure de l'essai: carré latin, quatre répétitions, trois assolements identiques, mis en place parallèlement, mais décalés dans le temps				
Réalisation: Agroscope ART et FiBL				
Systèmes culturaux	D	O	C	M
Exploitation	Biologique-dynamique	Organique-biologique	Conventionnel <sup>2</sup>	Conventionnel <sup>2</sup> , apport d'engrais minéraux uniquement <sup>1</sup>
Forme d'engrais de ferme	Compost de fumier / Lisier	Fumier décomposé / Lisier	Fumier frais / Lisier	Aucun engrais de ferme
Fertilisation selon les directives DBF-GCH (2), 1,4 UGBF <sup>3</sup>	D2	O2	C2	M2
Demi-fertilisation (1), 0,7 UGBF	D1	O1	C1	
Sans fumure	N0			

<sup>1</sup>Depuis 1985, auparavant sans fertilisation, <sup>2</sup>depuis 1985 intégré et depuis 1999 exploité selon les directives des prestations écologiques requises, <sup>3</sup>1<sup>re</sup> et 2<sup>e</sup> période d'assolement (1978–1991): 1,2 resp. 0,6 UGBF, <sup>4</sup>Etudié: blé d'automne 1 avec précédent cultural unique, pommes de terre, 1978–2005.

#### Périodes d'assolement (PA) de 1978 à 2005:

1 <sup>re</sup> PA 1978–1984	2 <sup>e</sup> PA 1985–1991	3 <sup>e</sup> PA 1992–1998	4 <sup>e</sup> PA 1999–2005
Pommes de terre	Pommes de terre	Pommes de terre	Pommes de terre
Blé d'automne 1 <sup>4</sup>			
Chou blanc	Betteraves rouges	Betteraves rouges	Soja
Blé d'automne 2	Blé d'automne 2	Blé d'automne 2	Maïs ensilage
Orge d'automne	Orge d'automne	Prairie temporaire 1	Blé d'automne 2
Prairie temporaire 1	Prairie temporaire 1	Prairie temporaire 2	Prairie temporaire 1
Prairie temporaire 2	Prairie temporaire 2	Prairie temporaire 3	Prairie temporaire 2

### Dépouillement des données de l'essai

A partir des teneurs en éléments nutritifs des grains et de la paille, la teneur globale de la biomasse superficielle récoltée a été calculée d'après les teneurs moyennes pondérées des grains et de la paille. Les systèmes D1/O1 et D2/O2 ainsi que C2/M2 n'affichaient aucune différence de teneurs d'un niveau de fumure à l'autre. C'est pourquoi la représentation s'appuie sur la moyenne des teneurs. Le taux annuel de variation des éléments nutritifs disponibles dans le sol (P, K et Mg) a été déterminé à partir de la différence entre les teneurs moyennes du sol en 2000, 2002 et 2003 après la culture du blé d'automne et la teneur initiale en 1977. L'état des éléments nutritifs du sol dans les différents systèmes culturaux a été évalué selon les directives DBF-GCH 2009. Les teneurs en éléments nutritifs du blé ont été évaluées à l'aide d'une analyse de variance à deux facteurs (facteurs année x système cultural). Les moyennes ont été comparées au moyen du test de Newman-Keuls.

## Résultats et discussion

### Fertilisation et absorption d'éléments nutritifs

Ce sont les systèmes C2, M2 et D2 qui ont reçu les quantités d'éléments nutritifs les plus élevées (tabl. 2). A noter que dans le système D, les engrais de ferme plus riches en éléments nutritifs, qui provenaient de fermes situées dans des régions où les sols sont riches en calcaire, se sont traduits par des apports moyens en azote, potassium et magnésium plus élevés dans le procédé D2 que dans C2. En 1999, un apport de chaux (2680 kg CaCO<sub>3</sub> ha<sup>-1</sup>; tabl. 2) a permis de corriger le pH dans C1, C2 et M2. Sans cet apport supplémentaire de chaux, les apports de calcium par le biais des engrais auraient également été plus élevés dans le procédé D2. L'apport d'azote minéral dans le système O correspondait à celui du système D. En revanche, les apports d'azote total et de potassium étaient inférieurs de 50 % à ceux du système D, ceux de phosphore de 70 %, et ceux de calcium et de magnésium d'environ 85 %. C'est la conséquence de l'emploi de compost de fumier dans le système D et du lisier plutôt pauvre en éléments nutritifs dans la 3e période d'assolement (1993, 1996, 1997) utilisé dans le système O.

De même, en ce qui concerne l'absorption d'éléments nutritifs issus de la biomasse superficielle (grains et paille; fig. 1 a–f), les systèmes C2 et M2 affichaient souvent les valeurs les plus élevées et le procédé N0 les valeurs les plus basses. L'absorption d'éléments nutritifs ne se distinguait pratiquement pas dans les deux systèmes bio contrairement à l'apport d'éléments nutritifs. En dépit des différences de rendements, tous les systèmes ont assimilé approximativement la même quantité de calcium et de magnésium.

En général, tous éléments nutritifs confondus, l'absorption d'éléments nutritifs était plus importante au niveau de fumure 2 qu'au niveau 1. Avec le système C, ce phénomène était plus marqué (niveau 1: 81 % du niveau 2) que dans les deux systèmes bio (niveau 1: 87 % de niveau 2). Avec le procédé N0, l'absorption d'éléments nutritifs représentait encore 65 % des systèmes D2 et O2 et 52 % des systèmes C2 et M2. C'est pour le potassium que la différence entre les niveaux de fumure était la plus importante; elle était moins élevée pour l'azote et le phosphore et faible pour le calcium et le magnésium. Une augmentation de la fertilisation se traduisait donc par une augmentation de l'absorption de potassium, de phosphore et d'azote, mais avait peu d'influence sur l'absorption de calcium et de magnésium. Les faibles différences entre les systèmes et les niveaux de fumure en ce qui concerne l'absorption de calcium et de magnésium peuvent s'expliquer par le bon approvisionnement du sol (tabl. 6). Il est possible aussi qu'avec un apport accru en potassium, il se soit produit des interactions antagonistes (concurrence des ions); ces dernières ont conduit à une absorption relativement limitée de calcium et de magnésium dans les procédés C2 et M2 caractérisés par une importante fumure en potassium. (Spiess *et al.* 1993).

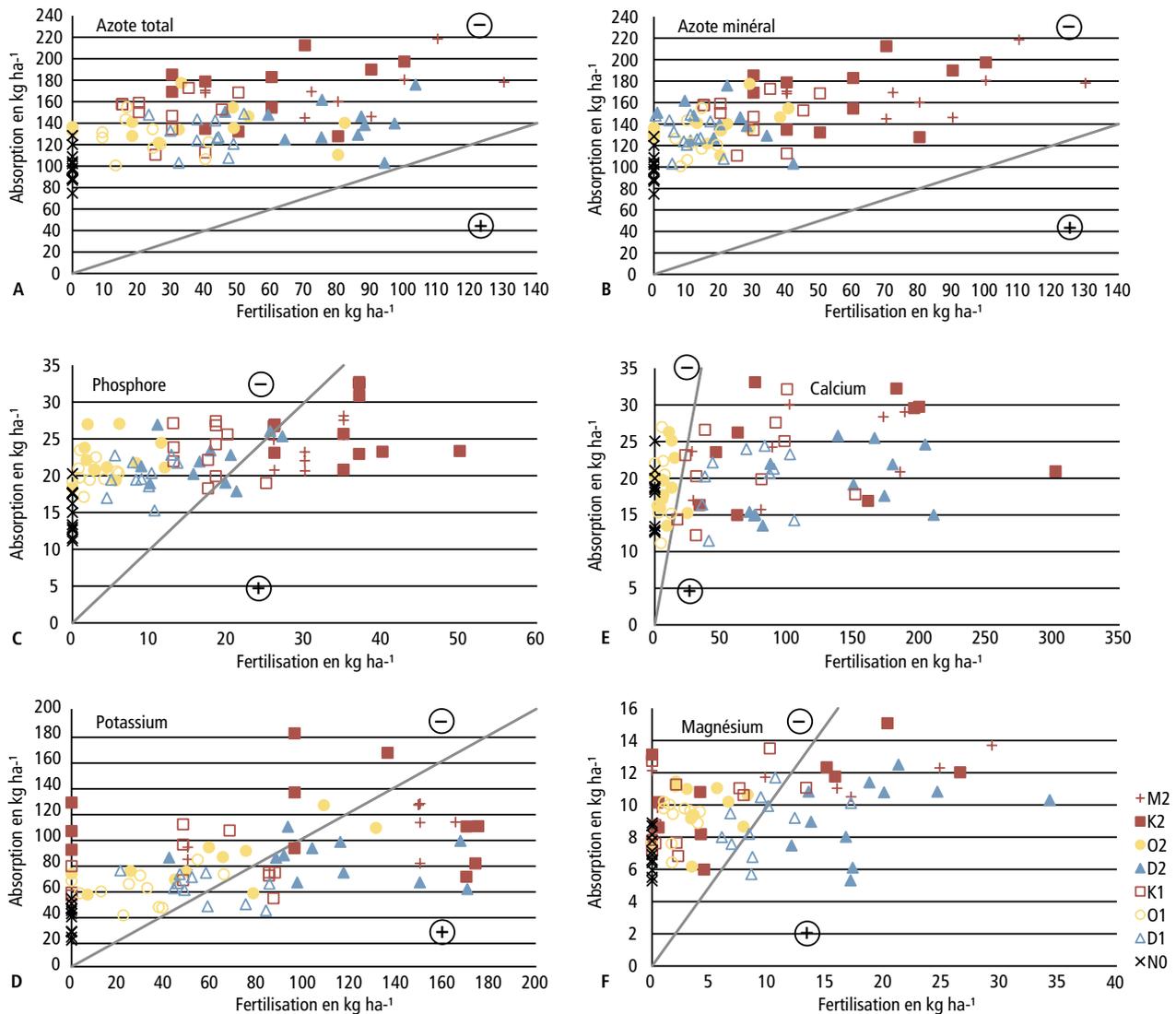
Les calculs des rapports entre apport et absorption des éléments nutritifs dans tous les procédés confirment les constats précédents. Ils indiquent des corrélations significatives pour l'azote total, l'azote minéral, le phosphore et le potassium avec des coefficients de corrélation compris entre  $r = 0,53$  et  $r = 0,65$  (tabl. 3). Le rapport était plus faible pour le magnésium et le calcium ( $r = 0,44$  resp.  $r = 0,29$ ).

Les bilans apports-prélèvements pour le blé (fig. 1 a–f) montrent si la fumure était en mesure de couvrir le besoin en éléments nutritifs. En cas de bilans négatifs (valeurs au-dessus de la ligne de séparation), d'autres sources d'élé-

**Tableau 2 |** Quantités d'éléments nutritifs apportés par les engrais (moyenne de la période 1979–2003) dans le blé d'automne 1 avec pommes de terre comme précédent cultural dans différents systèmes culturaux de l'essai DOC

	Quantité d'éléments nutritifs kg ha <sup>-1</sup>					
	N total	N minéral	P	K	Ca	Mg
N0	0	0	0	0	0	0
D1	40	10	9	56	70	9
O1	20	10	3	29	5	2
C1	30	30	18	51	88*	4
D2	80	20	18	112	139	19
O2	40	21	5	58	10	4
C2	59	59	35	101	175*	8
M2	81	81	30	118	165*	11

\*Dans les procédés M2, C2, C1, un total de 2680 kg ha<sup>-1</sup> de CaCO<sub>3</sub> a été épandu en deux apports en 1999 sous forme de chaux d'acide carbonique (= 1070 kg ha<sup>-1</sup> Ca).



**Figure 1 a-f** | Quantités annuelles d'éléments nutritifs apportés et absorption d'éléments nutritifs par le blé d'automne dans différents systèmes culturaux de l'essai DOC. (le côté "+" de la ligne correspond à un bilan positif des éléments nutritifs, le côté "-" à un bilan négatif)

ments nutritifs doivent être trouvées comme les réserves du sol ou les légumineuses fixant l'azote. Les bilans étaient toujours négatifs pour l'azote, ce qui s'explique d'une part, par les apports supplémentaires en azote par les légumineuses fixant l'azote, apports disponibles indirectement via l'azote fourni par le sol, et d'autre part par le dépôt atmosphérique d'azote. Les bilans du phosphore étaient positifs pour C2 et M2. Le niveau 1 de fumure, ainsi que les systèmes bio, affichaient tous des soldes négatifs de phosphore. La situation était identique pour le potassium et le magnésium: les systèmes C2 et M2 affichent des soldes positifs et négatifs, tandis que les systèmes O2 et O1 affichent uniquement des soldes négatifs. Pour D2, les bilans sont en revanche presque toujours positifs, ce qui vient des apports d'engrais nettement plus élevés. Le calcium varie considérablement entre les systèmes C1, C2, M2, D2 et D1 avec des bilans

toujours positifs et O1 et O2 toujours négatifs. Cela vient des apports de chaux dans les systèmes C et M et du compost riche en calcium dans le système D.

Si l'on associe les résultats de l'absorption d'éléments nutritifs avec les soldes des bilans, il est probable que l'approvisionnement en éléments nutritifs ait un effet limitant sur les rendements, dans le cas de l'azote, du phosphore et du potassium. Cela devrait transparaître dans les teneurs en éléments nutritifs des produits de récolte ainsi que dans les éléments nutritifs disponibles dans le sol.

### Teneurs en éléments nutritifs dans les grains et la paille

Hormis la teneur en phosphore, les teneurs moyennes en éléments nutritifs de la biomasse superficielle (teneurs moyennes du grain et de la paille) se distinguaient considérablement les unes des autres pour tous les systèmes et sur l'ensemble de la durée de l'essai (tabl. 4; fig. 2 a-e). ➤

**Tableau 3 | Coefficients de corrélation du rapport entre la quantité d'éléments nutritifs contenus dans les engrais et les éléments nutritifs absorbés par le blé dans la biomasse superficielle du sol**

Élément nutritif	Coefficient de corrélation
N total	0,53
N minéral	0,65
P	0,62
K	0,55
Ca	0,29
Mg	0,44

C'est avec le potassium que les influences du système sont les plus nettes. Là, les teneurs en potassium suivent l'intensité d'exploitation: C2/M2 affichent la teneur la plus élevée avec 9,3 g kg<sup>-1</sup> de MS, tandis que les teneurs de D2/O2 ne représentent que 82 % de C2/M2, celles de D1/O1 68 % et celles de N0 54 %. Il est étonnant de constater que les teneurs en phosphore ne sont influencées que par C2/M2, tandis que les autres systèmes et le procédé N0 présentent les mêmes concentrations. Le calcium et le magnésium réagissent indifféremment et atteignent les valeurs les plus élevées dans le procédé N0. Avec l'augmentation de l'intensité de fumure, les teneurs de calcium et de magnésium ont tendance à baisser dans les procédés biologiques entre les niveaux de fumure 1 et 2. Les fortes teneurs en calcium dans les systèmes C2/M2 sont dues aux apports en chaux. Le fait que les teneurs en calcium et en magnésium diminuent plus l'intensité augmente peut s'expliquer par l'effet de dilution suite à des rendements plus élevés en biomasse et est sans doute associé à des effets antagonistes en cas d'apport élevé en potassium (D2/O2; C2/M2).

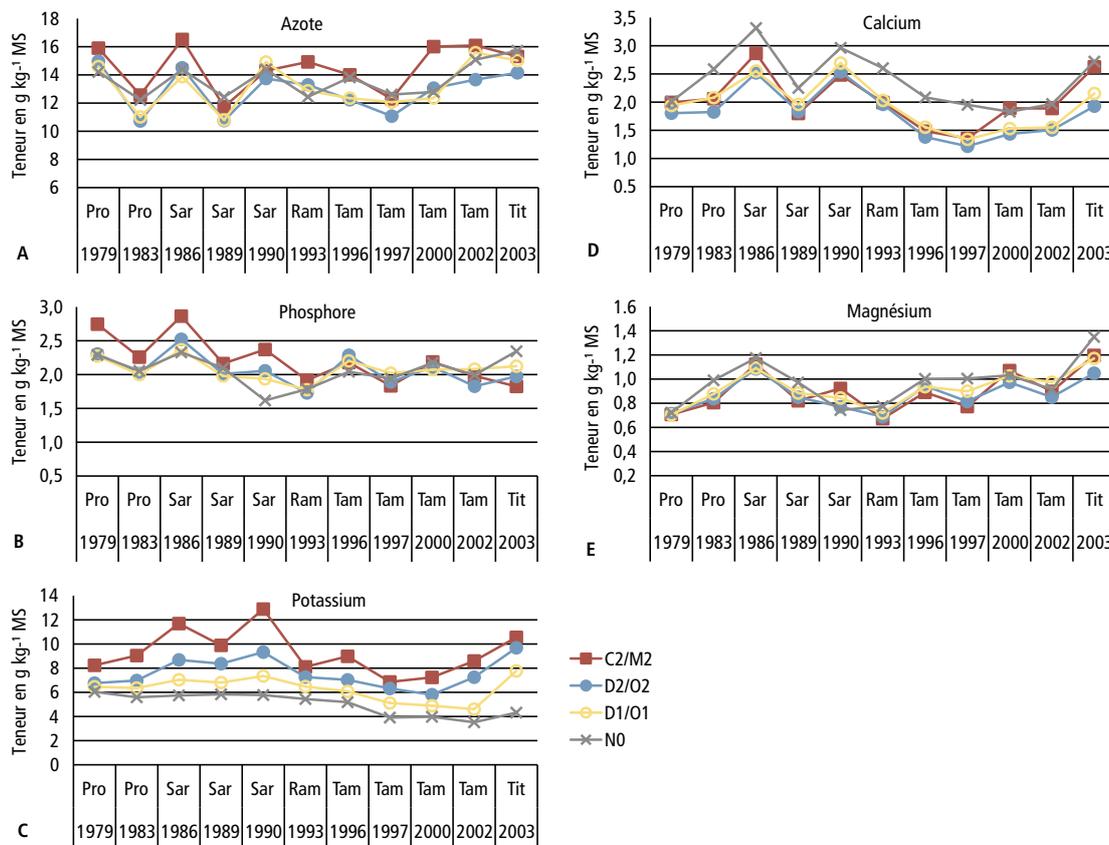
Les teneurs en azote présentent des différences moindres, le procédé N0 étant celui qui affiche les deuxièmes plus hautes teneurs. Lorsque les plantes ont atteint la maturité nécessaire au battage, ces teneurs ne donnent que des informations relatives sur l'approvisionnement des cultures en éléments nutritifs. Ainsi, les systèmes C2/M2 étaient dans l'ensemble les mieux approvisionnés, mais le procédé N0 non fertilisé depuis 1978 affichait des teneurs en azote relativement élevées bien que les rendements en grains n'aient représenté en moyenne que 67 % de ceux de C2. Cela peut s'expliquer par la formation des rendements dans les cultures de blé. Dans le procédé N0 et les procédés bio, l'approvisionnement modéré des jeunes plantes de blé en azote au début de la période de végétation s'est traduit par une densité plus faible du peuplement. Aux stades de développement ultérieurs, les plantes disposaient toutefois d'une quantité suffisante d'azote. Cela a entraîné des teneurs relativement élevées en azote avec des rendements très faibles. On peut expliquer de la même manière la teneur plus élevée en azote des systèmes bio avec un niveau de fumure réduit (D1/O1) par rapport à ceux qui affichent un niveau de fumure plus élevé (D2/O2).

Par conséquent, les différences des teneurs de potassium indiquent en premier lieu une co-limitation des rendements de blé par le potassium et l'azote. Afin de confirmer cette hypothèse, les teneurs en phosphore, potassium et magnésium ont été comparées avec les valeurs indicatives de l'agriculture suisse (DBF-GCH, Flisch *et al.* 2009). Les teneurs en éléments nutritifs qui sont mentionnées dans le tableau 60a de cette publication sont des valeurs moyennes tirées des données compilées à l'issue des

**Tableau 4 | Teneurs moyennes totales des éléments nutritifs de la biomasse superficielle, calculées comme teneurs pondérées des éléments nutritifs des grains et de la paille de blé d'automne (années 1979–2003), dans différents systèmes culturaux de l'essai DOC**

	N			P			K			Ca			Mg		
	g/kg MS		%												
N0	13,64	b	94	2,06	b	93	5,03	d	54	2,39	a	100	0,97	a	100
D1/O1	13,22	c	91	2,08	b	94	6,27	c	68	1,94	c	81	0,92	b	95
D2/O2	12,92	d	89	2,07	b	93	7,59	b	82	1,81	d	76	0,87	d	90
C2/M2	14,51	a	100	2,21	a	100	9,28	a	100	2,04	b	85	0,90	c	92
Analyse de variance ** P<0,01; test Newman Keul: P=0,05															
Procédé		**			**			**			**			**	
Année		**			**			**			**			**	
Procédé*Année		**			**			**			**			**	

Le tableau indique les moyennes des systèmes D1/O1, D2/O2 et C2/M2. Différentes lettres dans les colonnes indiquent des différences de moyennes significatives.



**Figure 2 a-e |** Evolution dans le temps des teneurs totales en éléments nutritifs de la biomasse superficielle récoltée, calculées comme teneurs pondérées des éléments nutritifs des grains et de la paille de blé d'automne dans les années 1979–2003, dans différents systèmes culturaux de l'essai DOC. Le tableau indique les moyennes des systèmes D1/O1, D2/O2 und C2/M2 par an. Pro: Probus, Sar: Sardona, Ram: Ramosa, Tam: Tamaro, Tit: Titlis.

essais des stations de recherche. La plage de teneurs indiquée montre dans quelle fourchette se situent les teneurs des éléments nutritifs des cultures en Suisse. Le phosphore et le magnésium sont généralement accumulés dans les grains, le potassium en revanche essentiellement dans la paille. Les teneurs en phosphore et en magnésium des grains de tous les procédés étaient proches de la moyenne DBF-GCH, en tout cas dans la fourchette observée avec les conditions typiques de la Suisse (tabl. 5; Spiess *et al.* 1995). Par contre, les teneurs en potassium de la

paille qui atteignaient 5,3 g kg<sup>-1</sup> MS dans le procédé N0 se situaient nettement en dessous de la teneur minimale de 6,8 g kg<sup>-1</sup> MS. Dans les procédés D1/O1 avec 7,4 g kg<sup>-1</sup> MS et D2/O2 avec 9,4 g kg<sup>-1</sup> MS, elles se situaient en dessous de la moyenne de 10,5 g kg<sup>-1</sup> MS malgré des apports élevés en potassium dans D2.

#### Éléments nutritifs disponibles pour les plantes dans le sol

Les éléments nutritifs disponibles dans le sol confirment les résultats des analyses de plantes. Pour le phosphore, ➤

**Tableau 5 |** Teneurs moyennes des éléments nutritifs dans les grains et la paille et valeurs comparables des DBF-GCH 2009 (Flich *et al.* 2009)

		Grains N	Grains P	Grains K	Grains Ca	Grains Mg	Paille N	Paille P	Paille K	Paille Ca	Paille Mg
		g/kg MS					g/kg MS				
	N0	24,3	4,0	4,7	0,6	1,3	6,6	0,7	5,3	3,6	0,8
	D1/O1	24,8	4,2	4,5	0,5	1,4	5,9	0,8	7,4	2,9	0,6
	D2/O2	25,1	4,2	4,4	0,4	1,3	6,1	0,9	9,4	2,6	0,6
	C2/M2	26,7	4,2	4,4	0,4	1,3	7,1	1,0	12,3	3,0	0,7
DBF-GCH	Valeur moyenne	23,8	4,2	4,2	–	1,4	3,6	0,9	10,5	–	0,8
DBF-GCH	min.	17,6	3,6	2,9	–	0,9	3,5	0,5	6,8	–	0,7
DBF-GCH	max.	29,4	5,2	5,9	–	1,4	8,2	1,5	14,7	–	1,2

**Tableau 6 | Teneurs en éléments nutritifs du sol en mg/kg et classe de fertilité selon DBF-GCH 2009 (Flisch *et al.* 2009) pour 1977 et pour la moyenne des années 2000–2003 ainsi que variation annuelle des teneurs 1977–2003**

	P:					K:					Mg:				
	1977	Classe de fertilité	2003	Classe de fertilité	Variation taux/an	1977	Classe de fertilité	2003	Classe de fertilité	Variation taux/an	1977	Classe de fertilité	2003	Classe de fertilité	Variation taux/an
	mg/kg		mg/kg			mg/kg		mg/kg			mg/kg		mg/kg		
N0	2,4	D	0,3	B	-0,08	7,1	B	3,0	A	-0,15	95,4	C	60,6	B	-1,29
D1	2,4	D	0,5	B	-0,07	7,0	B	5,7	A	-0,05	100,2	C	82,0	C	-0,67
O1	2,7	D	0,4	B	-0,08	8,1	B	5,5	A	-0,10	94,3	C	79,8	C	-0,54
C1	2,8	D	0,6	B	-0,08	7,8	B	5,0	A	-0,10	94,2	C	72,3	C	-0,81
D2	2,5	D	1,0	C	-0,05	6,9	B	10,7	B	0,14	101,5	C	97,8	C	-0,14
O2	2,6	D	0,9	C	-0,06	7,7	B	10,3	B	0,10	92,9	C	99,0	C	0,23
C2	2,6	D	1,4	C	-0,04	7,5	B	8,8	B	0,05	94,2	C	91,7	C	-0,09
M2	2,4	D	0,9	C	-0,06	6,8	B	9,8	B	0,11	98,3	C	101,3	C	0,11

L'approvisionnement du sol en éléments nutritifs a été représenté à l'aide des classes de fertilité A=pauvre, B=modéré C=suffisant D=riche; teneur moyenne en argile 15–20%.

les teneurs moyennes des années 2000 à 2003 avec niveau de fumure 2 se situent dans tous les systèmes dans la classe de fertilité C (suffisant; Flisch *et al.* 2009; tabl. 6). Avec un niveau de fumure 1, les valeurs atteignent la classe de fertilité B (modéré) même avec le procédé N0. Cette valeur est généralement considérée comme suffisante pour le niveau de rendement de l'agriculture biologique (Kolbe et Schuster 2011). Cela n'est pas étonnant, car les teneurs du sol en phosphore au début de l'essai en 1977 se situaient également à un niveau très élevé (classe de fertilité D, riche). Cependant au niveau de fumure 2, on observe une baisse continue par rapport à l'état initial. Ce n'est donc qu'une question de temps pour que l'approvisionnement en phosphore ait un effet limitant pour la croissance des plantes (tabl. 6). Dans le procédé N0 et au niveau de fumure 1, on a observé une nette baisse du magnésium disponible tandis qu'au niveau de fumure 2, les valeurs sont pratiquement restées constantes. Toutefois, les sols étaient tellement bien pourvus en magnésium qu'aujourd'hui encore, ils sont classés dans la catégorie C. Il n'y a que dans le procédé N0 que les teneurs ont baissé au point de passer dans la classe de fertilité B. La situation est totalement différente pour le potassium. Au début de l'essai, les teneurs en potassium disponible se situaient déjà à un niveau bas (classe de fertilité B). Au niveau de fumure 2, les teneurs ont même pu être légèrement relevées. Il faut cependant noter que ce phénomène était le plus marqué dans les deux systèmes bio D2 et O2. Cependant les teneurs ont considérablement baissé avec le niveau de fumure 1 et dans le procédé N0 pour passer dans la classe de fertilité A. Au niveau de fumure 1, elles n'atteignaient plus qu'environ 50 % des valeurs du niveau 2 et 30 % avec le procédé N0.

## Conclusions

Pour le blé d'automne de l'essai DOC, les différences autant dans les systèmes culturaux (D, O, C, M) que dans les niveaux de fumure ont une influence capitale sur les rendements. Ils dépendent avant tout de l'approvisionnement des plantes en azote, sachant que ce sont surtout les formes minérales d'engrais azoté qui contribuent à différencier les rendements. Le phosphore a pu être exclu des facteurs co-limitants, car l'approvisionnement en phosphore se situait à un haut niveau au début de l'essai. Malgré une baisse continue des éléments nutritifs disponibles dans le sol, en 2003, l'approvisionnement en phosphore est resté correct avec le niveau de fumure élevé et suffisant avec le niveau de fumure bas. La faible différence des teneurs en phosphore de la paille et des grains confirme ce constat.

Par contre, le potassium a pu être identifié comme étant un facteur co-limitant de l'azote dans les cultures de blé, en cas d'apport réduit dans les procédés bio au niveau de fumure 1 et dans le procédé N0. C'est ce qu'indique la différence entre les teneurs de potassium dans la biomasse superficielle et les teneurs de potassium disponible dans le sol. Oberson *et al.* (2012) aboutissent à des résultats comparables dans leur étude sur la fixation biologique de N2 et le caractère limitant des éléments nutritifs dans la croissance du trèfle dans la prairie temporaire de l'essai DOC. Il faut toutefois souligner que les procédés bio au niveau de fumure 2 (soit 1,4 UGBF/ha) présentent un approvisionnement équilibré en potassium et que les deux systèmes biologiques peuvent être considérés comme durables avec ce niveau de fumure. Dans ce cas, l'amélioration des rendements passe essentiellement par une amélioration de l'alimentation en azote. ■

**Riassunto****Esperimento DOC: approvvigionamento in sostanze nutritive nelle colture di frumento autunnale - dove si evidenziano limitazioni?**

Il confronto tra sistemi su lungo periodo DOC si è concentrato anche sull'analisi dell'approvvigionamento in sostanze nutritive delle colture di frumento autunnale dal 1978 al 2003, al fine di fornire indicazioni sulle limitazioni di resa riconducibili alle sostanze nutritive nei sistemi agricoli biologici.

I notevoli scarti di resa tra sistemi agricoli «biologici» e «convenzionali» e il livello di concimazione hanno potuto essere essenzialmente ricondotti all'approvvigionamento in sostanze nutritive delle piante, soprattutto in azoto. È stato escluso il ruolo di fattore co-limitante del fosforo, poiché il tenore di fosforo del suolo risultava sufficiente per tutta la durata dell'esperimento in tutti i processi DOC. Le analisi effettuate su paglia e chicchi indicano valori elevati di fosforo e una bassa differenziazione, confermando quindi i risultati ottenuti dall'analisi del suolo.

Il potassio, invece, è stato identificato quale fattore co-limitante dell'approvvigionamento in azoto nei processi biologici a basso livello di concimazione e nelle superfici di controllo non concimate. Ciò è confermato dalla differenziazione dei tenori di potassio nella biomassa superficiale e quelli disponibili nel suolo. Tuttavia il sistema biologico-dinamico e quello biologico-organico indicavano un approvvigionamento di potassio equilibrato a un livello di concimazione elevato. Entrambi i sistemi biologici possono pertanto essere ritenuti sostenibili a questo livello di concimazione.

**Bibliographie**

- Agroscope, 2011. Schweizerische Referenzmethoden der Eidg. landw. Forschungsanstalten, Band 1.
- Berry P. M., Sylvester\_Bradley S., Philipps L., Hatch D. J., Cuttle S. P., Rayns F. W. & Gosling P., 2002. Is the productivity of organic farms restricted by the supply of available nitrogen? *Soil Use and Management* **18**, 248–255.
- Flisch R., Sinaj S., Charles R. & Richner W., 2009. Données de base pour la fumure des grandes cultures et des herbages (DBF). *Revue suisse d'Agriculture* **41** (1), 89–91.
- Gunst L., Jossi W., Zihlmann U., Mäder P. & Dubois D., 2007. DOK-Versuch: Erträge und Ertragsstabilität 1978 bis 2005. *Agrarforschung* **14**, 542–547.
- Jossi W., Gunst L., Zihlmann U., Mäder P. & Dubois D., 2009. DOK-Versuch. Erträge bei halber und praxisüblicher Düngung. *Agrarforschung* **16**, 296–301.
- Kolbe H. & Schuster M., 2011. Bodenfruchtbarkeit im Öko-Betrieb. Untersuchungsmethoden. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden. Accès: <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/11877>.

**Summary****DOC trial: nutrient supply in winter wheat – where is the deficit?**

The nutrient supply of winter wheat was one of the topics investigated by the DOC long-term system comparison from 1978 to 2003. The aim of this trial is to provide evidence of nutrient-related yield limitations in organic farming systems. Substantial differences in yield between «organic» and «conventional» farming systems and different fertilisation intensities were primarily attributed to the delivery of nutrients – in particular, nitrogen – to the plants. Because the soil phosphorus supply was adequate in all DOC systems over the entire trial period, phosphorus was ruled out as a co-limiting factor. The plant analyses of straw and grain exhibited high figures and a low differentiation for phosphorus, thus confirming the soil findings. By contrast, potassium was identified along with nitrogen as a co-limiting factor in the organic systems at the low fertilisation intensity and in the unfertilised control. This was indicated by the differentiation of potassium content in the above-ground biomass and the available soil potassium content. Despite this, both the bio-dynamic and bio-organic system exhibited a balanced potassium supply at the high fertilisation intensity. Both bio-systems may therefore be considered sustainable at this fertilisation intensity.

**Key words:** farming systems, organic farming, wheat, plant nutrition, nutrient limitation.

- Oberson A., Frossard E., Bühlmann C., Mayer J., Mäder P. & Lüscher A., 2012. Nitrogen fixation in grass-clover leys under organic and conventional cropping systems. *Plant and Soil*, submitted.
- Spiess E., Daniel R., Stauffer W., Niggli U. & Besson J.M., 1995. DOK-Versuch: Vergleichende Langzeit-Untersuchungen in den drei Anbausystemen biologisch-Dynamisch, Organisch-biologisch und Konventionell. V. Qualität der Ernteprodukte: Stickstoff- und Mineralstoffgehalte, 1. und 2. Fruchtfolgeperiode. *Schweizerische Landwirtschaftliche Forschung, Sonderheft DOK Nr. 3*, 1–33.
- Spiess E., Stauffer W., Niggli U. & Besson J. M., 1993. DOK-Versuch: Vergleichende Langzeit-Untersuchungen in den drei Anbausystemen biologisch-Dynamisch, Organisch-biologisch und Konventionell. IV. Aufwand und Ertrag: Nährstoffbilanzen, 1. und 2. Fruchtfolgeperiode. *Schweizerische Landwirtschaftliche Forschung* **32**, 565–579.