

Effet à long terme des engrais organiques sur le rendement et la fertilisation azotée des cultures

Alexandra Maltas, Raphaël Charles, Vincent Bovet et Sokrat Sinaj

Station de recherche Agroscope Changins-Wädenswil ACW, 1260 Nyon

Renseignements: Sokrat Sinaj, e-mail: sokrat.sinaj@acw.admin.ch, tél. + 41 22 363 46 58



Effet de la fertilisation azotée sur la croissance du maïs (sous-procédé A: non-fertilisé en N; sous-procédé B: sous-fertilisé en N; sous-procédé C: norme N et sous-procédé D: sur-fertilisé en N). En 2011, l'absence de fertilisation azotée (sous-procédé A) marque plus fortement le maïs dans le procédé avec engrais-vert (photographie de gauche) que dans le procédé avec lisier (photographie de droite). Ceci semble indiquer une plus forte carence en N dans le procédé avec engrais vert.

Introduction

Quatre techniques de conservation de la fertilité des sols sont testées depuis 1976 à Changins: la restitution systématique des pailles de céréales, l'insertion d'engrais verts durant l'interculture et l'apport régulier d'engrais de ferme, fumier ou lisier. Ces quatre techniques reposent sur l'apport régulier «d'engrais organiques». En effet, les pailles de céréales, les engrais verts et les engrais de ferme apportent des éléments nutritifs sous forme organique, assimilable après minéralisation, mais aussi sous forme minérale, directement assimilable par les cultures. Ils présentent en ce sens un rôle amendant et fertilisant. Maltas *et al.* (2011) ont analysé les effets de ces engrais sur les propriétés organiques, chimiques et biologiques du sol. La présente étude complète ce travail, en évaluant leurs effets sur le rendement des cultures et le stock d'azote (N) minéral dans le sol et en quantifiant la valeur fertilisante en N de ces engrais.

Matériel et méthodes

Descriptif de l'essai

L'essai, présenté en détail dans Maltas *et al.* (2012), a débuté en 1976 à Changins (VD, 430 m). Le dispositif expérimental est un split-plot avec quatre répétitions. Six procédés permettent de tester la nature et la dose des engrais organiques: E_{min} (témoin recevant uniquement des apports minéraux), EV (insertion d'engrais vert de moutarde tous les deux ans), Pailles (restitutions des pailles de céréales), Fu35 (35 t ha⁻¹ de fumier de bovins tous les 3 ans), Fu70 (70 t ha⁻¹ de fumier de bovins tous les 3 ans) et Li60 (60 m³ ha⁻¹ de lisier de bovins dilué tous les ans de 1975–1993 et tous les trois ans après 1993). Les sous-procédés, A, B, C et D reçoivent des doses croissantes d'azote minéral (Maltas *et al.* 2012). Le sous-procédé A ne reçoit pas de N minéral alors que le sous-procédé D est sur-fertilisé en N (105–200 kg N ha⁻¹ selon les cultures).

En 2003 et 2004, les modalités du procédé Emin (aucun engrais organique apporté) sont appliquées sur les six procédés, afin d'étudier l'arrière-effet des procédés et des sous-procédés. Le sous-procédé A ne reçoit toujours pas d'azote et les sous-procédés B, C et D reçoivent tous trois la même dose d'azote (30 kg N ha⁻¹ en 2003 et 40 kg N ha⁻¹ en 2004). En 2003, la culture est un colza et en 2004 un blé d'automne.

Les rotations font alterner cultures de printemps et cultures d'automne et permettent ainsi l'insertion d'un engrais vert une année sur deux. D'une durée de 5 à 6 ans, elles comprennent 60 à 70 % de céréales, du colza et du maïs. Les pailles de maïs et de colza sont broyées puis enfouies dans le sol sur l'ensemble des traitements. Les pailles de céréales sont exportées après la récolte sauf dans le procédé «Pailles» où ces dernières sont restituées au sol. La fumure phospho-potassique (sous forme de superphosphate et de sel de potasse) est optimale sur l'ensemble des procédés selon les données de bases pour la fumure des grandes cultures (Ryser *et al.* 1987). Elle tient compte de la valeur fertilisante des restitutions de pailles et des arrières-effets du fumier et du lisier (Ryser *et al.* 1987).

Mesures et analyses statistiques

Les rendements en grains sont mesurés tous les ans à la récolte sur l'ensemble des traitements. Les rendements obtenus en absence de limitation en N sont qualifiés de rendements potentiels. Pour une année et un procédé donné, ils correspondent à la moyenne des rendements des sous-procédés qui ne diffèrent pas significativement du sous-procédé présentant le rendement maximal (généralement le sous-procédé D).

La valeur fertilisante des engrais organiques est calculée, chaque année, en comparant l'augmentation de rendement due aux engrais organiques à l'augmentation de rendement due à la fertilisation azotée selon l'équation suivante:

$$\text{Valeur fertilisante} = (\text{Rdt } iA - \text{Rdt } EminA) * \text{dose } EminB / (\text{Rdt } EminB - \text{Rdt } EminA)$$

Avec Rdt iA, Rdt EminA et Rdt EminB: rendement en grains respectivement du procédé i sous-procédé A, du procédé Emin sous-procédé A et du procédé E_{min} sous-procédé B, exprimés en dt ha⁻¹; dose E_{min} B: dose d'engrais azoté apportée dans le procédé E_{min} sous-procédé B exprimée en kg N ha⁻¹. Nous supposons ainsi que la réponse des cultures à la dose de N est linéaire. Les cultures sont vraisemblablement suffisamment carencées en N dans les sous-procédés A et B pour justifier cette hypothèse.

La teneur en N de la plante (grains et pailles) est mesurée en 2003 et 2004 dans les sous procédés A afin de calculer le N absorbé par la culture.

Résumé

Les conséquences de l'utilisation de différentes formes d'engrais organiques (engrais-vert de moutarde, pailles de céréales, 35 et 70 t ha⁻¹ de fumier tous les 3 ans et 60 m³ ha⁻¹ de lisier tous les 3 ans) sont testées à Changins depuis 1976. Cette étude analyse leurs effets à long terme (34 ans) sur le rendement des cultures, le besoin en engrais azoté et le stock d'azote (N) minéral dans le sol.

Lorsque le N est non limitant, les engrais organiques ont des effets contrastés sur le rendement en grains des cultures. L'année de l'apport organique et les années suivantes, le fumier et le lisier accroissent le rendement des cultures comparativement au témoin sans engrais organique alors que l'insertion d'engrais-vert et la restitution systématique des pailles de céréales le diminue. Cependant, en moyenne sur les 34 années d'essai, ces effets restent faibles. Par contre, lorsque l'azote est limitant, les engrais organiques ont tous un arrière-effet positif sur le rendement des cultures.

L'effet direct (l'année de l'apport) des engrais organiques peut-être positif ou négatif.

L'engrais vert non fertilisé accroît les besoins en engrais azoté l'année de sa destruction mais les réduit l'année suivante. Lorsqu'il est fertilisé avec 60 kg de N ha⁻¹, il diminue les besoins aussi bien l'année de sa destruction que l'année suivante. La valeur fertilisante des pailles de céréales est négligeable. Le fumier et le lisier réduisent les besoins en engrais N de manière significative les trois années qui suivent l'apport.

Lorsque la valeur fertilisante des engrais de ferme n'est pas prise en compte, le stock d'azote minéral présent à la récolte est plus élevé dans les procédés avec engrais de ferme que dans le témoin sans engrais organique.

Tableau 1 | Effet des procédés sur les rendements en grains potentiels (en absence de limitation azotée). Les rendements sont exprimés en pourcentage du témoin Emin (= 100 %)

Procédés	Maïs	Blé après maïs	Orge de printemps	Colza	Avoine de printemps	Blé après avoine	Moyenne 1976–2010
		(n ¹ =5)	(n ¹ =5)	(n ¹ =5)	(n ¹ =5)	(n ¹ =5)	
Emin	100 (76) ²	100 (48) ²	100 (48) ²	100 (32) ²	100 (48) ²	100 (53) ²	100,0 a
EV	93	98	96	97	100	98	96,4 b
Pailles	90	92	96	96	102	97	95,3 b
Fu35	97	96	100	105	105	102	100,5 a
Fu70	101	100	102	104	106	99	102,2 a
Li60	98	92	104	104	106	101	100,4 a

¹Nombre d'années.

²Rendement sec en grains maximal observé sur le procédé Emin (dt ha⁻¹).

Les lettres minuscules différentes au sein d'une même colonne indiquent des moyennes significativement différentes entre procédés au seuil de 5 % selon le test de Fisher.

Les stocks d'azote minéral dans le sous-procédé C sont mesurés en 2009, juste avant le semis, le 26 mars et un mois après récolte, le 24 août (Stations de recherche ART& ACW 2011). Les horizons 0–30; 30–60 et 60–90 cm sont prélevés à l'aide d'une tarière. Chaque prélèvement est constitué d'un composite de 8 à 10 carottes. Quatre répétitions sont effectuées.

Les analyses de variance sont réalisées en utilisant le logiciel XLSTAT 2010, Copyright Addinsoft 1995–2009, le test de Fisher est appliqué pour comparer les moyennes des procédés et sous procédés.

Résultats et discussion

Rendement potentiel des cultures

Lorsque l'azote est non limitant, les rendements observés sur maïs, blé, orge, colza et avoine (tabl. 1) sont proches de ceux mentionnés dans les «Données de base pour la fumure», respectivement 81, 51, 47, 33 et 47 dt sec ha⁻¹ (Sinaj *et al.* 2009).

L'effet des procédés sur le rendement potentiel est constant quelle que soit la culture puisque l'interaction entre procédé et culture n'est pas significative (P > 0,05).

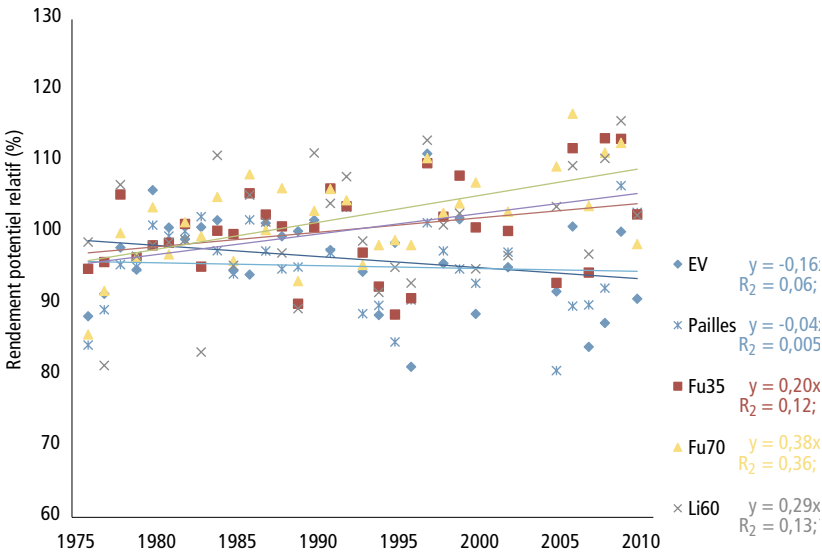


Figure 1 | Evolution des rendements potentiels relatifs (Emin = 100 %) dans les procédés avec engrais organiques.
 ns: régression non significative au seuil de 10 % selon le test de Fisher.
 *: régression significative au seuil de 10 % selon le test de Fisher.
 **: régression significative au seuil de 5 % selon le test de Fisher.
 ***: régression significative au seuil de 1 % selon le test de Fisher.

En moyenne sur 34 ans d'essai, l'effet des engrais organiques, bien que significatif, reste faible (-4,7 à +2,2 % par rapport à E_{min} ; tabl. 1).

Le procédé EV obtient un rendement potentiel significativement plus faible que celui du témoin E_{min} (-3,6 %; tabl. 1). Duval (1996) a également observé que les engrais verts de crucifères, et plus particulièrement ceux de moutarde, peuvent avoir un effet nuisible sur la culture qui suit en raison de la présence de composés phytotoxiques dans leurs résidus. Dans cet essai, l'effet supposé allélopathique de la moutarde est observé aussi bien sur les cultures qui suivent l'engrais vert (maïs et orge) que sur les cultures suivantes (blé et colza; tabl. 1). Seule l'avoine ne semble pas affectée.

Le rendement du procédé Pailles est inférieur de 4,7 % à celui du témoin E_{min} (tabl. 1). La restitution des pailles de céréales dans une rotation largement céréalière a probablement favorisé les maladies des céréales (Charles *et al.* 2011).

L'effet moyen des engrais de ferme (Fu35, Fu70 et Li60) sur la période 1976–2010 est très faible (+0,4 à +2,2 % par rapport à E_{min} ; tabl. 1) et n'est pas significatif. Toutefois, ces procédés présentent tous des rendements potentiels supérieurs à celui du témoin E_{min} . Ce résultat est cohérent avec un autre essai longue durée mené à Changins, qui a mis en évidence une augmentation des rendements potentiels, en moyenne sur 12 années d'essai, de 2 à 13 % avec engrais de ferme (Maltas *et al.* 2012). Cette augmentation peut être imputée à un effet «matière organique» qui améliore les propriétés physiques, hydriques et biologiques du sol (Lal 2009) et/ou à une augmentation de la disponibilité en nutriments (Zhang *et al.* 2009). En effet, les sols des procédés avec engrais de ferme présentent des teneurs en matière organique (MO) supérieures à celles du témoin mais aussi des teneurs en zinc et fer extractibles à l'acétate ammonium EDTA plus importantes (Maltas *et al.* 2011). Le zinc et le fer sont des micronutriments favorables à la croissance des cultures à faible concentration mais qui peuvent devenir toxiques au-delà d'un certain seuil (Marschner 1995).

Compte tenu de la forte variabilité interannuelle du rendement potentiel relatif, il est difficile de mettre en évidence une évolution significative des effets procédés (fig. 1). L'effet des procédés EV et Pailles n'évolue pas avec le temps, tandis que celui des engrais de ferme croît significativement. Cependant, ces effets restent faibles même après 34 années d'application (+4, +9 et +6 % respectivement dans Fu35, Fu70 et Li60; fig. 1).

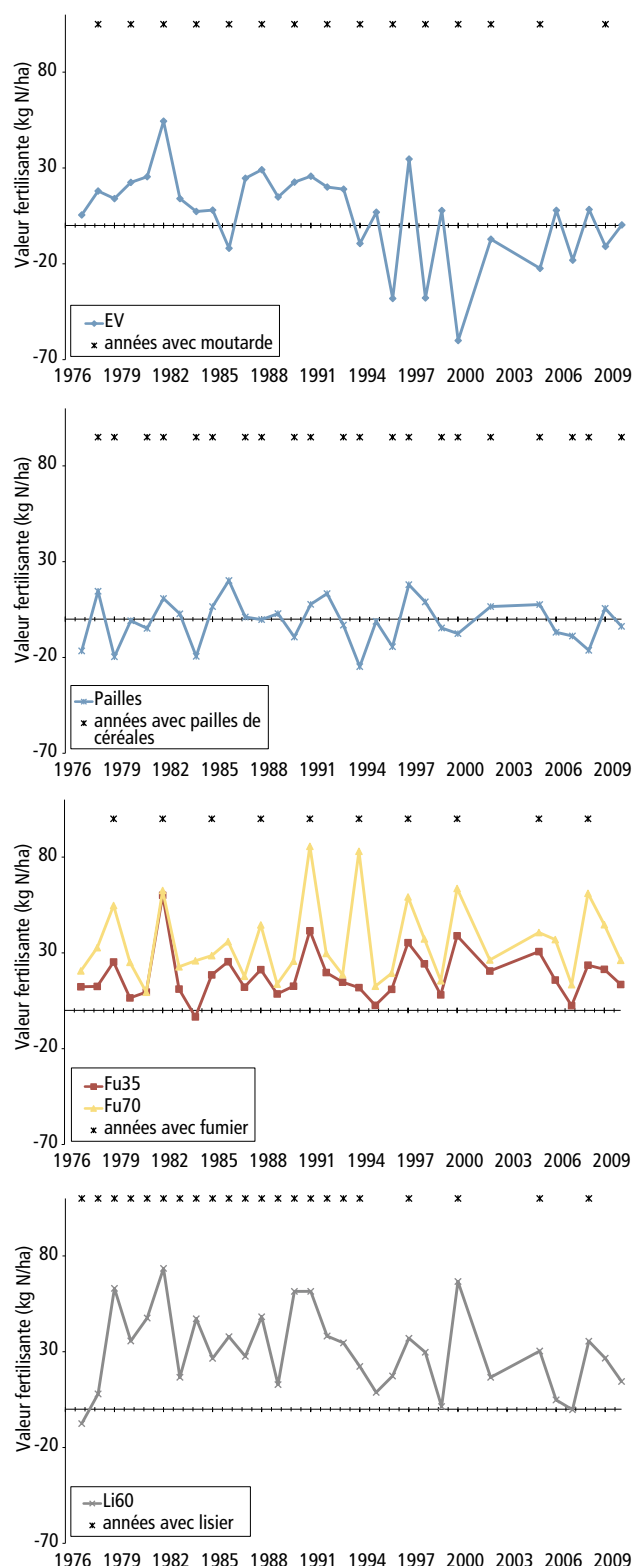


Figure 2 | Valeur fertilisante annuelle des engrais organiques de 1976 à 2009.

Tableau 2 | Arrière-effets des procédés sur les rendements en grains relatifs ($E_{\min} = 100\%$) après 27 ans d'essai. Le sous-procédé A n'a pas reçu d'azote en 2003 et 2004 et les procédés B, C, D ont reçu 30 kg N ha⁻¹ en 2003 et 40 kg N ha⁻¹ en 2004

Procédés	Moyennes 2003–2004 (% de $E_{\min}$)	
	Sous-procédé A	Sous-procédés B, C et D
Emin	100 b	100 b
EV	108 ab	100 b
Pailles	102 b	99 b
Fu35	113 ab	105 b
Fu70	128 a	117 a
Li60	113 ab	108 b

Les lettres minuscules différentes au sein d'une même colonne indiquent des moyennes significativement différentes entre procédés au seuil de 5 % selon le test de Fisher.

Valeur fertilisante des engrais organiques

Suivie de 1976 à 2010, la valeur fertilisante des cinq types d'engrais organiques (EV, Pailles, Fu35, Fu70 et Li60) montre des différences importantes (fig. 2). Compte tenu du mode de calcul de cette dernière, les valeurs présentées incluent l'effet direct dû à l'apport de N rapidement disponible et l'effet indirect dû à la minéralisation de la MO stockée dans le sol.

La valeur fertilisante des engrais organiques à long terme n'augmente pas au cours du temps (fig. 2), malgré l'enrichissement progressif du sol en MO dans les procédés avec engrais organiques (Maltas *et al.* 2011). Les valeurs fertilisantes varient, par contre, en fonction du nombre d'années écoulées depuis le dernier apport organique. Entre 1994 et 2010, la valeur fertilisante de l'engrais vert est en moyenne de -27 kg N ha⁻¹ l'année de

sa destruction et de +7 kg N ha⁻¹ l'année suivante (fig. 2). L'engrais vert absorbe de l'azote et réduit ainsi l'offre en N pour la culture suivante par rapport au témoin $E_{\min}$. Une partie de cet azote est ensuite remis à disposition l'année suivante, lors de la minéralisation des résidus d'engrais vert. Avant 1993, cet effet négatif de l'engrais vert sur l'offre en N l'année de sa destruction n'est pas observé (fig. 2). Sa valeur fertilisante est de +20 kg N ha⁻¹ l'année de sa destruction et +17 kg N ha⁻¹ l'année suivante (fig. 2a). Les 60 kg N ha⁻¹ appliqués sur les engrais verts avant 1993 ont vraisemblablement permis de compenser le N absorbé par l'engrais vert et même d'augmenter l'offre en N pour les cultures suivantes. Lorsque la moutarde est fertilisée, sa valeur fertilisante sur les deux années après sa destruction s'élève à 37 kg N ha⁻¹, alors qu'elle est de -20 kg N ha⁻¹ lorsqu'elle n'est pas fertilisée. La différence de 57 kg N ha⁻¹ correspond assez bien aux 60 kg N ha⁻¹ épandus sur la moutarde, preuve que cet azote est peu sorti du système sol-plante. Par contre, l'azote disponible dans le sol peut être moins absorbé et potentiellement perdu par lixiviation.

La valeur fertilisante des pailles de céréales est très faible (fig. 2b). Elle est en moyenne de -3 kg N ha⁻¹ l'année d'incorporation des pailles et de +3 kg N ha⁻¹ l'année suivante. Les pailles de céréales possèdent un ratio C/N élevé, ce qui provoque une immobilisation de N par la biomasse microbienne l'année de l'incorporation. L'année suivante, une partie de cet azote est remis à disposition lors de la décomposition de la biomasse microbienne. Sinaj *et al.* (2009) préconisent ainsi en Suisse un renforcement de la fertilisation N de 10 à 20 kg N ha⁻¹ selon la culture suivante lorsque des pailles de céréales sont incorporées.

La valeur fertilisante des engrais de ferme est positive et diminue avec le nombre d'années écoulées depuis le dernier apport organique. L'année de l'apport, un et deux ans après l'apport, les valeurs fertilisantes sont respectivement de +31, +15 et +10 kg N ha⁻¹ sous Fu35 (fig. 2c); +58, +28 et +21 kg N ha⁻¹ sous Fu70 (fig. 1c) et

Tableau 3 | Arrière-effets des sous-procédés B, C et D sur les rendements en grains, après 27 ans d'essai. La culture de colza a reçu 30 kg N ha⁻¹ en 2003 et la culture de blé 40 kg N ha⁻¹ en 2004.

Année/ culture	Rendements en grains (dt ha ⁻¹)		
	Sous-procédé B	Sous-procédé C	Sous-procédé D
2003 ¹ - colza	19,9 A	20,8 A	21,2 A
2004- blé	45,0 A	46,6 A	46,7 A

¹Année particulièrement sèche.

Les lettres majuscules différentes au sein d'une même ligne indiquent des moyennes significativement différentes entre sous-procédés au seuil de 5 % selon le test de Fisher.

+38, +18 et +10 kg N ha⁻¹ sous Li60 (fig. 2d). Les valeurs fertilisantes exprimées en pourcentage du N total apporté par l'engrais organique donnent une indication sur la proportion du N total assimilé par les cultures. Ainsi, avec le fumier (moyenne de Fu35 et Fu70), la proportion de N total assimilé par les cultures est de 16 % l'année d'application, 8 % un an après l'apport et 5 % deux ans après l'apport. Avec le lisier, ces valeurs atteignent respectivement 37 %, 18 % et 10 %. La MO contenue dans le lisier est généralement moins stable que celle du fumier (Lecomte 1980) et se dégrade donc plus rapidement (Su *et al.* 2006). Ceci explique les valeurs plus élevées du lisier. Dans les données de base pour la fertilisation des grandes cultures (DBF-GC), les valeurs fertilisantes proposées pour le fumier en stabulation libre sont du même ordre de grandeur que celles de cet essai (20 % du N total l'année d'application et 10 % l'année suivante; Sinaj *et al.* 2009). Le lisier de cet essai s'est dégradé un peu plus lentement que ceux proposés dans les DBF-GC (45 % du N total l'année d'application et 5 % l'année suivante (Sinaj *et al.* 2009). Les lisiers de cet essai semblent plus réfractaires à la dégradation. La qualité de leur matière organique demanderait donc à être analysée. Actuellement, la valeur fertilisante des engrais de ferme deux ans après l'apport n'est pas comptabilisée dans les normes de fumure azotée (Sinaj *et al.* 2009). Ces résultats et ceux de Maltas *et al.* (2011b) montrent que deux ans après l'apport, la valeur fertilisante du fumier comme du lisier est encore importante et devrait être comptabilisée.

Arrière-effet

En 2003 et 2004, aucun procédé n'a reçu d'apport organique, ce qui permet d'évaluer les arrière-effets des procédés. Ces effets sont analysés sur des cultures supposées carencées en azote: sur le sous-procédé A sans azote et sur la moyenne des sous-procédés B, C et D qui reçoivent chacun 30 kg N ha⁻¹ en 2003 et 40 kg N ha⁻¹ en 2004 (tabl. 2). Lorsque les cultures sont carencées en N, les procédés recevant régulièrement des engrais organiques présentent tous des rendements supérieurs à celui du témoin Emin (tabl. 2). L'arrière-effet est plus marqué sur le sous-procédé A sans azote (tabl. 2) que sur les sous-procédés B, C et D qui reçoivent 30 à 40 kg N ha⁻¹. Ainsi, plus les cultures sont carencées en N, plus l'effet résiduel des procédés est important. Cet effet résiduel est donc vraisemblablement dû à une meilleure offre en N dans les sols recevant régulièrement des engrais organiques. Ceci est cohérent avec les résultats précédents qui ont montré des valeurs fertilisantes positives, pour tous les engrais organiques, l'année suivant l'apport. L'augmentation

Tableau 4 | Effet des procédés sur les stocks d'azote minéral (N_{min}) sur 0–90 cm dans le sous-procédés C en 2009

Traitement	N-min avant semis	N-min après récolte
	kg N ha ⁻¹	
Emin	44 c	45 b
EV	28 d	47 b
Pailles	41 c	49 b
Fu35	50 bc	56 b
Fu70	76 a	75 a
Li60	58 b	61 ab

Les lettres minuscules différentes au sein d'une même colonne indiquent des moyennes significativement différentes entre sous-procédés au seuil de 5 % selon le test de Fisher.

de l'offre en N proviendrait principalement d'une plus forte minéralisation dans ces sols mieux pourvus en MO (Maltas *et al.* 2011).

L'arrière-effet des sous-procédés (B, C et D) est analysé sur la moyenne des procédés (tabl. 3) en 2003 et en 2004. Les rendements ne diffèrent pas significativement entre sous-procédés. Cependant, ils tendent à croître avec la fertilisation azotée passée (tabl. 3). L'effet positif de la dose d'engrais azoté sur la teneur en MO du sol (Maltas *et al.* 2011) explique vraisemblablement ce résultat.

Stocks d'azote minéral

Les stocks d'azote minéral dans les 90 premiers cm de sol (N_{min}) ont été mesurés en 2009, avant le semis et après la récolte de l'avoine de printemps (tabl. 4). Les pailles de la culture précédente (colza) ont été enfouies dans tous les procédés; un engrais vert de moutarde est inséré avant la culture d'avoine dans le procédé EV; et aucun engrais de ferme (fumier ou lisier) n'est épandu. Des engrais de ferme ont par contre été apportés en 2008 sur Fu35, Fu70 et Li60. Les N_{min} ont été mesurés dans les sous-procédés C qui reçoivent tous 90 kg N ha⁻¹.

Avant semis et après récolte, les N_{min} du procédé Pailles diffèrent peu de ceux du procédé Emin (tabl. 4), ce qui est cohérent avec la faible valeur fertilisante des pailles de céréales observée l'année suivant leur incorporation (fig. 2a).

Le procédé EV affecte négativement le N_{min} avant semis (tabl. 4). La moutarde non fertilisée absorbe donc bien de l'azote qui n'est plus disponible pour la culture suivante.

Les N_{min} avant semis les plus élevés sont observés dans les procédés avec engrais de ferme (Fu35, Fu70 et Li60; tabl. 4). Vraisemblablement, la forte minéralisa-

tion de la MO du sol (Maltas *et al.* 2012) combinée à la minéralisation de la MO fraîche apportée l'année précédente serait à l'origine de ces valeurs. Cependant, la forte minéralisation dans ces procédés occasionne également des N-min après récolte supérieurs. Le risque de lixiviation du N après récolte est donc accru dans les procédés avec fumier et lisier lorsque leurs arrière-effets ne sont pas pris en compte dans le calcul de la fertilisation N.

Conclusions

- Lorsque la fertilisation azotée est non limitante, les engrais organiques ont des effets contrastés sur le rendement en grains des cultures. L'année de l'apport et les années suivantes, l'apport d'engrais de ferme, fumier ou lisier, accroît le rendement (+0,4 à +2,2 % en moyenne), tandis que l'insertion d'engrais verts à base de moutarde et la restitution systématique des pailles de céréales le diminue (-3,6 et -4,7 % respectivement).
- Lorsque les cultures sont carencées en N, les engrais organiques ont tous un arrière-effet positif sur le rendement des cultures. Ceci serait dû à une meilleure offre en azote dans ces sols plus riches en MO.

- L'engrais vert de moutarde non fertilisé en N accroît les besoins en engrais N de l'année de sa destruction (de 27 kg N ha⁻¹) et les réduit l'année suivante (de 7 kg N ha⁻¹). Lorsque l'engrais vert reçoit 60 kg de N ha⁻¹, les besoins des cultures suivantes diminuent l'année de sa destruction et l'année suivante (respectivement de 20 et 17 kg N ha⁻¹).
- La valeur fertilisante des pailles de céréales est négligeable l'année de leur incorporation (-3 kg N ha⁻¹) comme l'année suivante (+3 kg N ha⁻¹).
- Le fumier et le lisier présentent des valeurs fertilisantes positives et non négligeables les trois années suivant l'apport. L'azote apporté par le fumier représente 16 % du N total apporté l'année de l'apport, 8 % un an plus tard et 5 % deux ans après. Pour le lisier, ces valeurs atteignent 37, 18 et 10 %. La non prise en compte de ces valeurs fertilisantes dans le calcul de la fertilisation azotée accroît les stocks d'azote minéral du sol à la récolte et donc les risques de lixiviation. ■

Bibliographie

- Charles R., Cholley E., Frei P. & Mascher F., 2011. Maladies et rendement du blé d'automne: influence du système de culture. *Recherche Agronomique Suisse* 2 (6), 264–271.
- COMIFER, 2011. Calcul de la fertilisation azotée. Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales. Cultures annuelles et prairies. Comifer. 91 p.
- Duval J., 1996. Effet des crucifères sur les cultures qui suivent. Accès: <http://eap.mcgill.ca/agrobio/ab340-04.htm>.
- Lal R., 2009. Challenges and opportunities in soil organic matter research. *European Journal of Soil Sciences* 60, 158–169.
- Lecomte R., 1980. The influence of agronomic application of slurry on the yield and composition of arable crops and grassland and on changes in soils properties. In: *Effluents from Livestock*. (Ed. J. Gasser). Applied Science Publishers, London, 139–183.
- Maltas A., Charles R. & Sinaj S., 2011. Fertilité du sol et productivité des cultures: effets des apports organiques et du labour. *Recherche Agronomique Suisse* 2 (3), 120–127.
- Maltas A., Oberholzer H., Charles R. & Sinaj S., 2012. Effets à long terme des engrais organiques sur les propriétés du sol. *Recherche Agronomique Suisse* 3 (3), 148–155.
- Marschner H., 1995. Mineral nutrition of higher plants. (Ed. Academic press). Harcourt Brace & company Publishers, London. 889 p.
- Sinaj S., Richner W., Flisch R. & Charles R., 2009. Données de base pour la fumure des grandes cultures et des herbages (DBF-GCH). *Revue suisse d'Agriculture* 41 (1), 1–98.
- Stations de recherche ART & ACW, ed. 2011. Méthodes de référence des stations de recherche Agroscope. Agroscope. Zurich-Reckenholz. Vol. 1 | 30 p.
- Su Y. Z., Wang F., Suo D. R., Zhang Z. H. & Du M. W., 2006. Long term effect of fertilizer and manure application on soil carbon sequestration and soil fertility under wheat-wheat-maize cropping system in Northwest China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 75, 285–295.
- Zhang H., Xu M. & Zhang F., 2009. Long-term effects of manure application on grain yield under different cropping systems and ecological conditions in China. *J. Agri. Sci.* 147, 31–42.

Riassunto

Effetti a lungo termine dei fertilizzanti organici sulla resa e la concimazione azotata delle colture

Dal 1976 a Changins sono testate le conseguenze dell'uso di diversi fertilizzanti organici (senape da sovescio, paglia di cereali, 35 e 70 t ha⁻¹ di letame ogni 3 anni e 60 m³ ha⁻¹ di liquame ogni 3 anni). Questo studio analizza i loro effetti a lungo termine (34 anni) sulla resa delle colture, il bisogno di concimazione azotata e lo stock d'azoto (N) minerale nel suolo.

Quando N non è limitante, i fertilizzanti organici producono degli effetti contrastati sulla resa in semi delle colture. Nell'anno dell'apporto organico e negli anni successivi, letame e liquame aumentano la resa delle colture rispetto al testimone senza fertilizzante organico, mentre l'inclusione di sovescio e la restituzione sistematica di paglia di cereali la diminuisce.

Tuttavia, questi effetti, sulla media di questi 34 anni di prove, restano deboli.

Per contro, quando l'azoto è limitante, i concimi organici raggiungono tutti un effetto retroattivo positivo sulla resa delle colture. L'effetto diretto (nell'anno dell'apporto) di fertilizzanti organici può essere positivo o negativo.

Il sovescio senza apporto di concimi accresce i bisogni di fertilizzanti azotati nell'anno della sua distruzione, ma li riduce l'anno seguente. Quando è concimato con 60 kg di N ha⁻¹, riduce i propri bisogni sia nell'anno della sua distruzione fino all'anno successivo. Il valore fertilizzante della paglia da cereali è insignificante. Nei tre anni successivi al loro apporto, letame e liquame riducono le esigenze in fertilizzante N in modo significativo.

Quando il valore fertilizzante del letame non è preso in considerazione, lo stock di azoto minerale presente al raccolto risulta più elevato nei procedimenti con letame rispetto al controllo senza fertilizzanti organici.

Summary

Long-term effect of organic fertilizers on crop yield and nitrogen fertilization

Consequences of the use of different organic fertilizers (green manure, cereal straw, manure at 35 and 70 t ha⁻¹ every 3 years and cattle slurry at 60 m³ ha⁻¹ every 3 years) and mineral fertilizer (four doses nitrogen) are tested in Changins since 1976. This study analyses the long-term effect (34 years) on crop yield, the need for nitrogen fertilizer and the stock of mineral nitrogen (N) in the soil. When N is not limiting, organic fertilizers have different effects on grain yield. The year of organic input and the subsequent years, manure and slurry increase yields compared to the control without organic fertilizer, while green manure and systematic restitution of the cereal straw decrease it. However, on average over the past 34 years, these effects remain weak. On the contrary, when nitrogen is limiting, all forms of organic fertilizers have a positive long term effect on crop yields.

The direct effect of organic fertilizer (first year of field application) may be positive or negative. The non fertilized green manure increases the need for nitrogen fertilizer during the year of its destruction but reduces it the following year. When fertilized with 60 kg N ha⁻¹, it decreases the need for nitrogen fertilizer the year of its destruction as well as the following year. The fertilizing value of the cereal straw is negligible. Manure and slurry reduce significantly the need for N fertilizer on the three years following the application. When the fertilizer value of manure is not taken into account, the stock of mineral N in the soil present at harvest was higher in treatments with manure than in the control without organic fertilizer.

Key words: crop yield, organic fertilizers, nitrogen fertilization, long-term field experiment.