

Préserver la durabilité des systèmes de grande culture: bilan de 50 ans d'essais à Changins

Sokrat Sinaj et Bernard Jeangros

Agroscope, 1260 Nyon, Suisse

Renseignements: Sokrat Sinaj, e-mail: sokrat.sinaj@agroscope.admin.ch



Vue d'ensemble de l'essai de longue durée de la parcelle P24A consacré aux effets des apports organiques et de la fertilisation azotée sur les propriétés du sol et le rendement des cultures.

(Photo: Carole Parodi, Agroscope)

Introduction

Dans les pays industrialisés, les pressions économiques et la facilité d'accès aux engrais de synthèse ont conduit de nombreuses exploitations agricoles à se spécialiser et à renoncer à la polyculture-élevage. Cela a conduit à la disparition des prairies dans la rotation et à l'abandon des apports d'engrais de ferme sur les grandes cultures. La durabilité des systèmes de culture repose en grande partie sur le maintien à long terme de la fertilité des sols. La notion de fertilité des sols est complexe. Pour certains, elle désigne simplement la capacité du sol à produire durablement des récoltes de qualité pour les

générations futures. Pour d'autres, il s'agit de la capacité du sol à répondre aux besoins physiques, chimiques et biologiques nécessaires à la croissance des plantes, pour leur productivité, leur reproduction et leur qualité, de manière adaptée au type de plante, au type de sol, à l'usage des sols et aux conditions climatiques (Abbott et Murphy 2003). Plus simplement, un sol est fertile s'il remplit ses fonctions conformément aux conditions locales. Enfin, dans l'esprit de l'agriculture biologique, la fertilité du sol est le résultat de processus biologiques et non de la présence d'éléments chimiques. Les sols fertiles procèdent activement à des échanges avec les plantes et sont capables de se structurer et de se régénérer eux-mêmes (Collectif 2013).

Dès les années soixante, plusieurs essais ont été mis en place sur le domaine expérimental de Changins pour évaluer les effets à long terme de différentes pratiques culturales sur la fertilité du sol et le rendement de différentes grandes cultures. Paramètre-clé pour de nombreuses propriétés chimiques, physiques et biologiques du sol, sa teneur en carbone organique (C_{org}) a fait l'objet d'une attention particulière. Il s'agissait en particulier d'observer si la réduction du travail du sol, la restitution systématique des pailles de céréales ou l'insertion d'engrais verts permettaient de compenser l'absence d'engrais de ferme et de maintenir le taux de C_{org} du sol. Cet article présente une synthèse des principaux résultats obtenus dans cinq essais traitant de cette problématique, chacun de ces essais ayant déjà fait l'objet de publications spécifiques, dans ce journal ou dans des revues scientifiques internationales.

Matériel et méthodes

Conditions climatiques à Changins (1963–2017)

De 1963 à 2017, la température annuelle moyenne (janvier-décembre) à Changins (altitude 420m) oscille entre 9,0°C (1965) et 11,5°C (2015). Elle atteint en moyenne 10,2°C et l'augmentation moyenne de température pendant ces 55 années est de +1,8°C. Les précipi-

précipitations annuelles ont beaucoup fluctué d'une année à l'autre, entre 1400 (1965) et 650 mm (1989) pour une moyenne de 1000 mm. Elles n'ont pas évolué de façon significative.

Caractéristiques des sols

Les caractéristiques principales des sols des cinq essais sont décrites dans le tableau 1. Ce sont des sols bruns assez profonds (de 70 à plus de 100 cm), plus ou moins lessivés (pH de 6,4 à 7,9) sur des moraines de fond ou de surface. La teneur en argile du sol varie beaucoup d'un essai à l'autre, de 140 à 480 g/kg de sol. Au début des essais, la teneur en C_{org} du sol de tous les essais pouvait être qualifiée de satisfaisante compte tenu de la teneur en argile du sol (Flisch *et al.* 2017). La disponibilité initiale en éléments nutritifs (P, K et Mg) était également dans l'ensemble satisfaisante.

Dispositifs expérimentaux

Trois des cinq essais ont été mis en place il y a environ 50 ans (P11A, P29C et P20) et un essai a débuté il y a plus de 40 ans (P24A; tabl. 2). Ces quatre essais se poursuivent encore aujourd'hui. Le 5^e essai n'a duré que 12 ans (P24B). Trois essais comparent différentes formes d'apports organiques et différents niveaux de fertilisation azotée (P24A, P24B et P11A). L'impact à long terme du mode de travail du sol constitue le principal objectif de l'essai P29C. Le dernier essai (P20) porte sur les effets combinés du mode de travail du sol et du type de succession culturale (rotation vs monoculture de blé). Dans chaque essai, les procédés ont été répétés au moins quatre fois sur des parcelles élémentaires de 63 à 148 m².

Le tableau 2 indique la rotation des cultures, le(s) mode(s) de travail du sol, les formes d'apport organique ainsi que le(s) niveau(x) de fertilisation azotée pratiqués dans chaque essai. Dans tous les essais, la fertilisation P, K et Mg a été effectuée selon les recommandations officielles (Sinaj *et al.* 2017). Les publications indiquées dans la bibliographie fournissent une description plus détaillée des cinq essais.

Principales observations et mesures

Dans tous les essais, les teneurs en C_{org} ainsi qu'en macro- et microéléments, la densité apparente et la porosité dans l'horizon 0–20 cm du sol ont été mesurées à plusieurs reprises. Dans certains cas, ces mesures ont été prises séparément dans les horizons 0–5 cm et 5–20 cm et parfois étendues à l'horizon 20–50 cm. Dans les essais P24A et P11A, différents paramètres supplémentaires ont permis de mieux cerner les propriétés biologiques du sol (Maltas *et al.* 2012 ; Blanchet *et al.* 2016).

Résumé

La préservation de la fertilité des sols constitue un enjeu important pour les exploitations agricoles sans bétail spécialisées dans les grandes cultures. Plusieurs essais ont été mis en place sur le domaine expérimental de Changins il y a plusieurs dizaines d'années pour étudier les effets à long terme de différentes pratiques culturales sur la fertilité du sol et le rendement des grandes cultures. Cet article donne un aperçu des principaux résultats obtenus dans ces essais. Les amendements organiques permettent de stabiliser la teneur en carbone organique du sol. Dans les conditions de Changins, seuls des apports importants de fumier ont permis d'augmenter cette teneur de façon significative. Pour préserver la fertilité du sol, les engrais de ferme sont difficiles à remplacer. Un travail réduit du sol permet de freiner la diminution de la teneur en carbone organique du sol, mais, sans apports organiques réguliers, cette pratique ne suffit généralement pas pour la maintenir. Une rotation diversifiée, une réduction du travail du sol et des apports organiques réguliers permettent ensemble de maintenir sur le long terme la fertilité du sol et le rendement des grandes cultures. Les essais de longue durée sont indispensables pour comprendre et simuler l'impact à long terme de différentes pratiques culturales sur la durabilité des systèmes de grande culture.

Le rendement des cultures a été mesuré chaque année sur chaque parcelle à l'aide d'une récolteuse pour petites parcelles. L'humidité de la récolte et les paramètres de qualité usuels ont également été déterminés. Toutes les méthodes utilisées et les paramètres observés sont précisés dans les publications indiquées dans la bibliographie.

Résultats et discussion

Carbone organique du sol

Effets des apports organiques et de la fertilisation azotée

Les apports d'engrais de ferme et/ou les résidus de culture fournissent des quantités importantes de carbone organique (C_{org}) au sol. Lorsque la fertilisation azotée est optimale, les différents procédés organiques

Tableau 1 | Caractéristiques principales des sols (0–20 cm) au début des cinq essais de longue durée à Changins.

Numéro de l'essai	P24A	P24B	P11A	P29C	P20	Moyenne
Type de sol	Sol brun lessivé	Sol brun calcaire	Sol brun lessivé	Sol brun lessivé	Sol brun lessivé	–
Profondeur (cm)	70–100	70–100	>100	>100	70–100	90–100
Argile (g/kg)	143	230	196	480 ¹ /250 ²	253	296
Sable (g/kg)	475	360	345	150 ¹ /310 ²	485	327
C _{org} (g/kg)	11,5	11,9	20,3	27,9 ¹ /14,5 ²	19,2	17,6
pH	7,2	7,9	7,3	6,4 ¹ /7,2 ²	6,4	7,0
CEC (meq/kg)	80	111	103	226 ¹ /114 ²	117	116

C_{org}: carbone organique
CEC: capacité d'échange cationique

¹zone argileuse
²zone limoneuse

(tabl. 2) apportent au sol entre 25 et 80 % de C_{org} de plus que le procédé témoin sans apport organique (essai P24A, Maltas *et al.* 2018). Cela se traduit généralement par une augmentation de la teneur en C_{org} du sol dans l'horizon 0–20 cm. Toutefois, seul l'apport important de fumier (70 t/ha tous les trois ans) conduit à une augmentation significative de la teneur en C_{org} du sol (fig. 1; Maltas *et al.*, 2018). Cet essai montre aussi qu'il faut systématiquement restituer les pailles de céréales ou apporter au moins 35 t/ha de fumier tous les trois ans pour maintenir le stock de C_{org} dans le sol (fig. 1). Le C_{org} fourni par les engrais verts n'a que peu d'effet sur la teneur en C_{org} du sol car il se dégrade très vite, plus rapidement que celui fourni par la paille ou les engrais de ferme (essai P24A, Koishi *et al.* 2019). Dans un autre

essai, douze ans n'ont pas été suffisants pour qu'un effet significatif des amendements organiques apparaisse (essai P24B, Maltas *et al.* 2013).

Les résultats de l'essai P24A mettent également en évidence l'effet positif d'une augmentation de la fertilisation azotée sur la teneur en C_{org} dans le sol (Maltas *et al.* 2018). Cela s'explique principalement par l'effet positif de l'azote sur le rendement des cultures et par conséquent sur les apports de C_{org} dans le sol.

Effets du travail du sol

La teneur en C_{org} du sol diminue progressivement dans tous les procédés de travail du sol de l'essai P29C (fig. 2). Avec un travail minimum du sol, cette diminution est toutefois faible et non significative, alors qu'elle est marquée en cas de labour ou de travail profond sans retournement (fig. 2; Büchi *et al.* 2017). Des simulations avec le modèle DayCent (Del Grosso *et al.* 2001) ont montré que le travail réduit du sol pourrait à plus long terme conduire à une augmentation du C_{org} dans le sol, en particulier si des cultures intermédiaires sont régulièrement mises en place (Büchi *et al.* 2018).

Dans l'essai P20, la teneur en C_{org} du sol diminue aussi dans les deux procédés de travail du sol (labour et travail réduit), surtout pendant les dix premières années. Ceci s'explique en bonne partie par le changement d'utilisation du sol qui était précédemment couvert par une prairie. Le travail réduit du sol permet néanmoins de freiner cette diminution. En moyenne sur les 50 ans d'essai, le sol des parcelles non-labourées contenait 7 % de C_{org} de plus que les parcelles labourées (Sanginés de Cárcer *et al.* 2019).

Effets de la rotation des cultures

La teneur en C_{org} du sol n'est pas influencée par la succession des cultures (essai P20, Sanginés de Cárcer *et al.* 2019). En 2016, 50 ans après le début de l'essai, la teneur en C_{org} du sol des parcelles en monoculture de blé

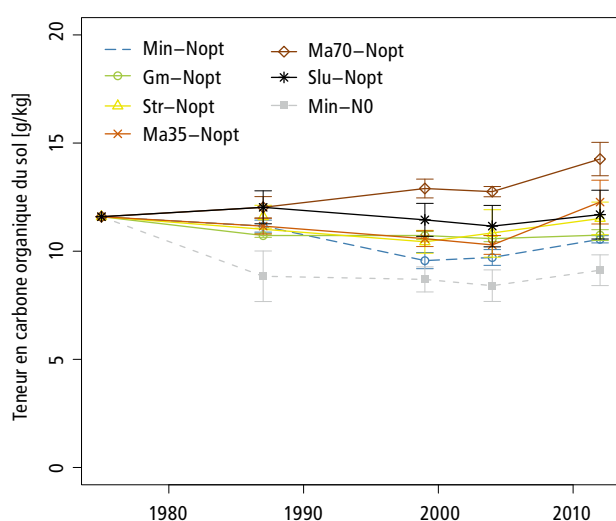


Figure 1 | Évolution de la teneur en carbone organique du sol (0–20 cm) de 1975 à 2012 selon l'amendement organique et la fertilisation azotée (essai P24A; Min: pas d'apport organique, Gm: engrais vert, Str: paille de céréales, Ma35 et Ma70: fumier à dose simple et double, Slu: lisier, Nopt: fertilisation azotée selon normes, NO: pas d'apport d'azote minéral; d'après Maltas *et al.* 2018).

Tableau 2 | Aperçu des cinq essais de longue durée à Changins.

Numéro de l'essai	P24A	P24B	P11A	P29C	P20
Début – fin de l'essai	1976–...	1997–2009	1963–...	1969–...	1967–...
Rotation des cultures	maïs – blé – orge – colza – avoine	blé – maïs – blé – colza	blé – maïs – blé – colza ⁸	blé – maïs – blé – colza	Variable (voir ci-dessous)
Travail du sol	Labour (20–25 cm)	Non labour (cultivateur)	Labour (20–25 cm)	Variable (voir ci-dessous)	Variable (voir ci-dessous)
Fertilisation azotée	Variable (voir ci-dessous)	Variable (voir ci-dessous)	Variable (voir ci-dessous)	Selon norme ⁴	Selon norme ⁴
Facteurs étudiés	1 ^{er} facteur	1. Apports organiques: 1.1. Pas d'apport 1.2. Fumier bovins 35 ¹ 1.3. Fumier bovins 70 ² 1.4. Lisier bovins 60 ³ 1.5. Paille de céréales 1.6. Engrais vert	1. Apports organiques: 1.1. Pas d'apport 1.2. Fumier bovins 12 ⁵ 1.3. Fumier bovins 36 ⁶ 1.4. Lisier bovins 22 ⁷	1. Apports organiques: 1.1. Pas d'apport 1.2. Fumier bovins 10 ⁹ 1.3. Résidus récolte	1. Travail du sol: 1.1. Labour (20–25 cm) 1.2. Profond (25–30 cm) sans retournement, semis direct depuis 2007 1.3. Cultivateur (10–15 cm) 1.4. Superficiel (5–10 cm)
	2 ^e facteur	2. Fertilisation azotée: 2.1. Pas d'azote 2.2. Norme ⁴ – 40 kg/ha 2.3. Norme ⁴ 2.4. Norme ⁴ + 40 kg/ha	2. Fertilisation azotée: 2.1. 60 % norme ⁴ 2.2. Norme ⁴	2. Fertilisation azotée ¹⁰ 2.1. 50 kg/ha/an 2.2. 120 kg/ha/an	2. Engrais vert ¹¹ : 2.1. Pas d'engrais vert 2.2. à 2.7 Six espèces pures différentes ¹² 2.8. Mélange de 11 espèces
Type de dispositif	Split-plot	Split-plot	Split-plot	Blocs randomisés ¹³	Blocs randomisés
Nombre de répétitions	4	4	4	3 ¹⁴ /4 ¹⁵	4
Dimensions parcelles (m)	20 × 4,5	10,5 × 6	11 × 5	18,5 × 8	18,5 × 8

¹ 35 t/ha de fumier tous les 3 ans² 70 t/ha de fumier tous les 3 ans³ 60 m³/ha de lisier dilué 1:1, chaque année de 1976 à 1994, puis tous les 3 ans⁴ selon Sinaj et al. (2017)⁵ 12 t/ha de fumier chaque année⁶ 36 t/ha de fumier tous les 3 ans⁷ 22 m³/ha de lisier dilué 1:1 chaque année⁸ blé – maïs – blé de 1963 à 1972, blé – maïs – blé – betterave de 1972 à 2008⁹ 10 t/ha de fumier chaque année¹⁰ depuis 1971¹¹ de 2013 à 2016 uniquement¹² moutarde brune, radis chinois, pois fourrager, avoine rude, nyger, phacélie¹³ split-plot de 2013 à 2016¹⁴ zone argileuse¹⁵ zone limoneuse

(14,8 g/kg) est proche de celle des parcelles avec une rotation des cultures (14,2 g/kg). L'absence d'effet bénéfique de la rotation, qui a fourni davantage de C_{org} au sol grâce à des rendements plus élevés, peut s'expliquer par une minéralisation plus importante du C_{org} dans le procédé avec une rotation des cultures (Sanginés de Cárcer et al. 2019).

Propriétés physiques du sol

Effets des apports organiques et de la fertilisation azotée

Comparativement au procédé sans apport organique, les amendements organiques ont tendance à augmenter la porosité totale et par conséquent à diminuer la densité apparente (essai P24A, Maltas et al. 2018). Sinon, aucune propriété physique du sol n'a été modifiée de façon significative par le type d'amendement organique (essai P24A, Maltas et al. 2018). Blanchet et al. (2016) signalent une amélioration des propriétés physiques du sol en cas d'apport de fumier alors que les autres apports organiques n'exercent pas d'effet significatif (essai P11A).

Selon Maltas et al. (2018) la fertilisation azotée conduit à une légère baisse de la porosité totale du sol, mais n'influence pas sa densité apparente de façon significative (essai P24A).

Effets du travail du sol

La porosité totale du sol et la densité apparente n'ont guère été influencées par le travail du sol (essai P29C, Vullioud et al. 2006). La macroporosité est parfois tombée en dessous du seuil critique de 10 % dans les procédés non labourés. La stabilité structurale et la résistance à la pénétration est systématiquement meilleure en non-labour. En préservant mieux la teneur en C_{org} du sol, le travail réduit conduit à un rapport carbone/argile plus élevé dans l'horizon superficiel comparativement au labour, ce qui tend à améliorer la stabilité structurale (essai P29C, Büchi et al. 2017). Dans l'essai P20, la densité apparente du sol est plus faible avec un travail réduit du sol qu'avec un labour, indiquant un sol moins compacté et moins sensible à l'érosion et au ruissellement de surface (Sanginés de Cárcer et al. 2019).

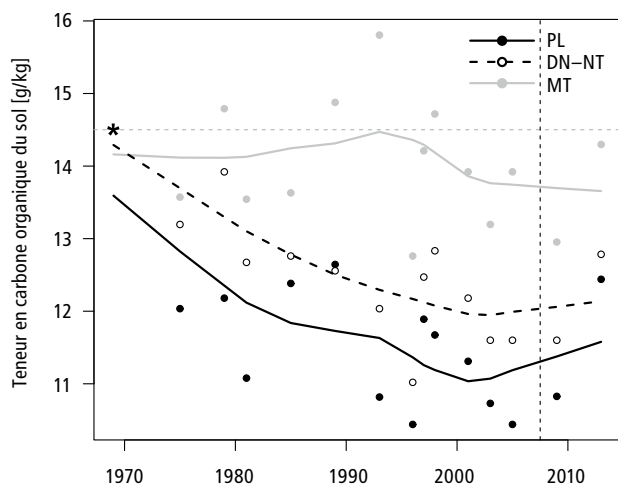


Figure 2 | Évolution de la teneur en carbone organique du sol (0–20 cm) de 1969 à 2013 selon le mode de travail du sol (essai P29C, zone limoneuse; PL: labour traditionnel, DN-NT: travail du sol en profondeur sans retournement jusqu'en 2006, semis direct depuis 2007, MT: travail minimum du sol; d'après Büchi *et al.* 2017).

Propriétés chimiques du sol

Effets des apports organiques

Comparativement à des apports d'engrais minéraux, les amendements organiques ne modifient pas les propriétés chimiques du sol si les apports d'éléments nutritifs sont comparables. Les propriétés chimiques du sol n'ont pas non plus été influencées de façon significative par le type d'amendement organique (essai P24A, Maltas *et al.* 2018; essai P24B, Maltas *et al.* 2013). Blanchet *et al.* (2016) signalent une légère amélioration des propriétés chimiques du sol en cas d'apport de fumier (essai P11A).

Effets du travail du sol

Dans plusieurs essais, le travail du sol a peu influencé les teneurs moyennes en éléments nutritifs dans l'horizon 0–20 cm. En cas de travail du sol réduit ou de semis direct, une concentration de certains éléments dans l'horizon superficiel a par contre été observée. Une nette stratification a été observée pour les différentes formes du phosphore ainsi que pour les formes disponibles du potassium et du magnésium par exemple (essai P29C, Büchi *et al.* 2017; essai P20, Sanginés de Cárcer *et al.* 2019). Cette stratification apparaît déjà après quelques années suite à l'introduction du semis direct (essai P29C, Büchi *et al.* 2017).

Effets de la rotation des cultures

Comparativement à une monoculture de blé, une rotation des cultures modifie légèrement la concentration dans le sol de certains éléments nutritifs (Sanginés de

Cárcer *et al.* 2019). Cet effet s'explique surtout par des différences dans les quantités d'éléments exportés par les récoltes.

Propriétés biologiques du sol

Effets des apports organiques et de la fertilisation azotée

L'essai P11A met en évidence plusieurs effets positifs des apports organiques sur l'activité biologique du sol. La biomasse microbienne et les teneurs en acides gras dérivés des phospholipides augmentent par exemple suite aux amendements organiques (Blanchet *et al.* 2016). Dans l'essai P24A, la respiration du sol n'est pas influencée de façon significative par le type d'apport organique, mais elle tend à être un peu plus élevée en cas d'apport de fumier (Maltas *et al.* 2018).

En l'absence d'apport organique, la fertilisation azotée stimule l'activité microbienne mesurée par la respiration du sol (essai P24A, Maltas *et al.* 2018). La biomasse des vers de terre ainsi que la proportion des vers épigés et endogés sont également favorisées par la fertilisation azotée (essai P11A, Blanchet *et al.* 2016).

Rendement des cultures

Effets des apports organiques et de la fertilisation azotée

Maltas *et al.* (2013) observent une augmentation du rendement des cultures de 2 à 13 % dans les procédés avec engrais de ferme comparativement au procédé avec uniquement des engrais minéraux, le lisier ayant un effet plus marqué que le fumier (essai P24B). Les

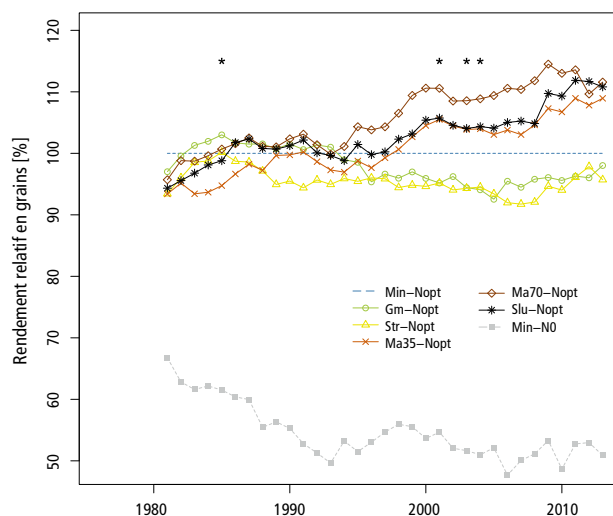


Figure 3 | Évolution du rendement relatif en grains selon l'amendement organique (essai P24A; voir fig. 1 pour la légende des abréviations, Min-Nopt = 100%; d'après Maltas *et al.* 2018).

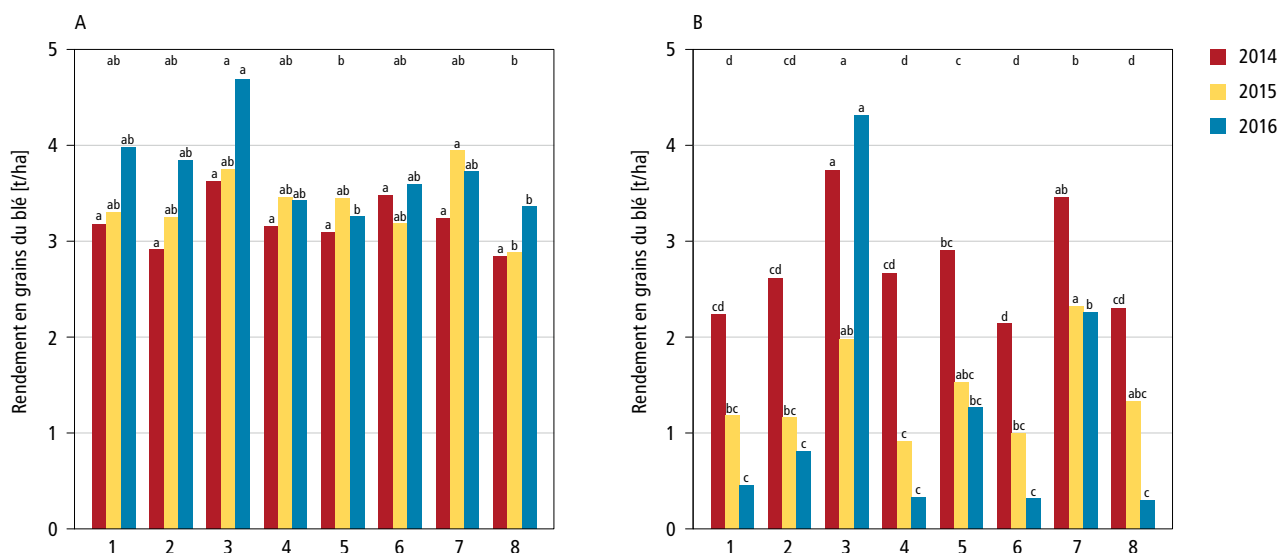


Figure 4 | Rendement en grains du blé en 2014, 2015 et 2016 selon le mode de travail du sol (A: travail minimum, B: semis direct) et l'engrais vert précédant la culture de blé (1: moutarde brune, 2: radis chinois, 3: pois fourrager, 4: avoine rude, 5: nyger, 6: phacélie, 7: mélange de 11 espèces, 8: témoin sans engrais vert; essai P29C, d'après Büchi *et al.* 2018).

apports d'engrais de ferme conduisent également à une augmentation de rendement dans l'essai P24A, alors que la restitution des pailles et la mise en place d'un engrais vert provoquent une baisse de rendement de 5 et 2 % respectivement (fig. 3; Maltas *et al.* 2018). Cela s'explique par une diminution de la disponibilité en azote pour les cultures en raison de l'immobilisation de cet élément par les microorganismes du sol qui dégradent la matière organique (Maltas *et al.* 2018). L'essai P11A confirme l'effet positif du fumier, mais pas l'effet négatif de la restitution des pailles. Dans cet essai, le rendement du procédé avec restitution des pailles n'est pas significativement différent de celui observé dans le procédé recevant uniquement des engrais minéraux (Blanchet *et al.* 2016).

Les apports organiques peuvent influencer le rendement de deux façons. D'une part, ils peuvent modifier les quantités d'éléments nutritifs disponibles pour la culture, surtout en azote. Les apports organiques avec un rapport C/N élevé, comme la paille par exemple, auront tendance à diminuer la disponibilité en azote, alors que ceux qui ont un rapport C/N faible, comme les engrais verts à base de légumineuses, vont au contraire fournir de l'azote aux cultures (Büchi *et al.* 2018). D'autre part, les apports organiques peuvent améliorer les propriétés physiques et biologiques du sol et favoriser la croissance des plantes et par conséquent le rendement des cultures en augmentant indirectement la disponibilité en éléments nutritifs (Blanchet *et al.* 2016).

Dans l'essai P24B, la réduction de la norme de fertilisation azotée de 40 % conduit à une diminution moyenne de rendement de 14 %, celle-ci variant de 9 % en cas de fertilisation uniquement minérale à 16 % en cas d'apport de lisier (Maltas *et al.* 2013). Blanchet *et al.* (2016)

observent une diminution moyenne de rendement d'environ 10 % pour la plupart des cultures lorsque l'apport d'azote minéral passe de 120 à 50 kg N/ha. Dans cet essai, la différenciation des deux procédés de fertilisation azotée n'est apparue qu'après une dizaine d'années. Ces résultats montrent que le recours à des amendements organiques permet de réduire sensiblement la fertilisation azotée sans trop péjorer le rendement des cultures.

Effets du travail du sol

Büchi *et al.* (2017) constatent que tous les procédés de travail du sol conduisent sur le long terme (1967–2013) à des rendements similaires pour le blé, le colza et le maïs (essai P29C). Comparativement au labour, le travail minimum et le semis direct présentent en moyenne une stabilité légèrement supérieure (Vulliod et Mercier 2004). En cas de semis direct, un engrais vert riche

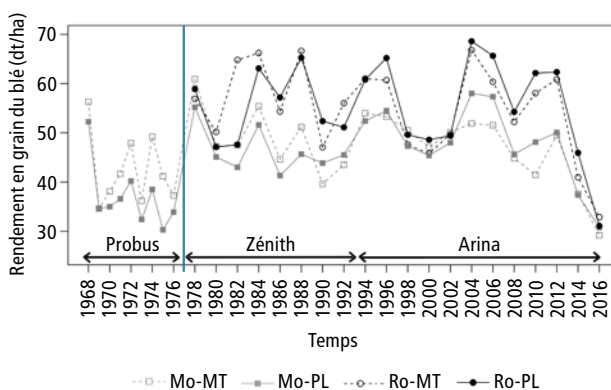


Figure 5 | Évolution du rendement en grains du blé de 1967 à 2016 selon le mode de travail du sol et la succession des cultures (essai P20; Mo-MT: monoculture et travail minimum du sol, Mo-PL: monoculture et labour, Ro-MT: rotation des cultures et travail minimum, Ro-PL: rotation et labour; essai P20 d'après Sanginés de Cárcer *et al.* 2019).

en légumineuses est nécessaire avant du blé pour que le rendement de cette culture puisse rivaliser avec celui obtenu avec un labour ou un travail réduit du sol (fig. 4; essai P29C, Büchi *et al.* 2018). Deux autres essais (P24B et P20, voir fig. 5) confirment que, sur le long terme, le rendement des cultures conduites avec un travail du sol réduit n'est pas significativement différent de celui obtenu avec un labour systématique (Maltas *et al.* 2013; Vullioud 2007; Sanginés de Cárcer *et al.* 2019). Maltas *et al.* (2013) soulignent que ce constat est valable si la fertilisation azotée n'est pas limitante.

Effets de la rotation des cultures

De 1978 à 2016, le rendement du blé en monoculture est inférieur en moyenne de 16 % à celui obtenu avec le blé en rotation (fig. 5; Sanginés de Cárcer *et al.* 2019). Différents modes de gestion du déchaumage, des résidus de récolte, du choix variétal, de la fumure azotée ou de la protection fongicide n'ont pas permis d'atténuer les effets négatifs de la monoculture (Vullioud 2007; Charles *et al.* 2011).

Conclusions

- Les amendements organiques sont utiles pour stabiliser la teneur en C_{org} du sol. Dans les conditions de Changins, des apports importants de fumier (70t/ha

tous les trois ans) sont nécessaires pour que cette teneur augmente de façon significative. Le C_{org} fourni par les engrais verts se dégrade très vite, plus rapidement que celui fourni par la paille et les engrais de ferme, et n'a souvent que peu d'effet sur la teneur en C_{org} du sol.

- Pour préserver la fertilité du sol (teneur en C_{org} et activité biologique), les engrais de ferme semblent présenter le meilleur compromis sur l'ensemble des paramètres étudiés et sont difficiles à remplacer.
- La réduction du travail du sol permet de freiner la diminution du C_{org} du sol dans les systèmes de grande culture. Sans apports organiques réguliers, un travail du sol réduit ne suffit toutefois généralement pas pour maintenir cette teneur.
- Une rotation diversifiée, une réduction du travail du sol et des apports organiques réguliers permettent ensemble de maintenir sur le long terme la fertilité du sol et le rendement des grandes cultures. Les besoins en azote peuvent augmenter, mais cela peut être compensé par un recours accru aux légumineuses dans la rotation, comme culture principale et/ou intermédiaire (engrais vert).
- Des essais de longue durée sont indispensables pour comprendre et simuler l'impact à long terme de différentes pratiques culturales sur la durabilité des systèmes de grande culture. ■

Bibliographie

- Abbott L. K. & Murphy D. V., 2003. Soil biological fertility - A key to sustainable land use in agriculture, Kluwer Academic Publishers.
- Blanchet G., Gavazov K., Bragazza L. & Sinaj S. 2016. Responses of soil properties and crop yields to different inorganic and organic amendments in a Swiss conventional farming system. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **230**, 116–126.
- Büchi L., Wendling M., Amossé C., Jeangros B., Sinaj S. & Charles R., 2017. Long and short term changes in crop yield and soil properties induced by the reduction of soil tillage in a long term experiment in Switzerland. *Soil & Tillage Research* **174**, 120-129.
- Büchi L., Wendling M., Amossé C., Necpalova M. & Charles R., 2018. Importance of cover crops in alleviating negative effects of reduced soil tillage and promoting soil fertility in a winter wheat cropping system. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **256**, 92-104.
- Charles R., Cholley E. & Frei P., 2011. Assolement, travail du sol, variété et protection fongicide en production céréalière. *Recherche Agronomique Suisse* **2** (5), 212–219.
- Collectif, 2013. Les principes de la fertilité des sols. 1^{re} édition FiBL, BioSuisse, 32 p.
- Del Grosso S. J., Parton W. J., Mosier A. R., Hartman M. D., Brenner J., Ojima D. S. & Schimel D. S., 2001. Simulated interaction of carbon dynamics and nitrogen trace gas fluxes using the DAYCENT model. In: Hansen, S., Shaffer, M. J., Liwang, M. (Eds.), *Modeling Carbon and Nitrogen Dynamics for Soil Management*. CRC Press.
- Flisch R., Neuweiler R., Kuster T., Oberholzer H., Huguenin-Elie O. & Richner W., 2017. 2/Caractéristiques et analyses du sol. In: *Principes de fertilisation des cultures agricoles en Suisse (PRIF 2017)* (Ed. S. Sinaj & W. Richner). *Recherche Agronomique Suisse* **8** (6), Publication spéciale, 2/1–2/33.

Riassunto**Salvaguardia della sostenibilità dei sistemi basati su seminativi: bilancio di 50 anni di prove a Changins**

La salvaguardia della fertilità dei suoli è un punto di fondamentale importanza per le aziende agricole prive di bestiame e specializzate in seminativi. Diverse decine di anni fa, nell'azienda sperimentale di Agroscope a Changins, sono iniziate numerose prove volte a studiare gli effetti, a lungo termine, di differenti pratiche agricole sulla fertilità del suolo e sulla resa delle colture da pieno campo. Questo articolo riassume i principali risultati evidenziati da queste sperimentazioni. Nelle condizioni di Changins, gli ammendamenti organici sono risultati utili per stabilizzare il tenore in carbonio organico del suolo, mentre apporti importanti di letame ne hanno consentito un aumento significativo. Per preservare la fertilità del suolo, i concimi aziendali sono difficili da sostituire. Una lavorazione ridotta del suolo permette di ridurre la diminuzione del tenore in carbonio organico del suolo, ma, senza apporti organici regolari, questa pratica non è sufficiente per stabilizzarne il contenuto. Combinando apporti organici regolari, riduzione delle lavorazioni del suolo e rotazione colturale diversificata, è possibile mantenere, sul lungo periodo, sia la fertilità del suolo sia la resa delle colture da pieno campo. Le prove di lunga durata sono essenziali per comprendere e simulare l'impatto, a lungo termine, delle differenti pratiche agricole sulla sostenibilità dei sistemi basati su seminativi.

Summary**Preserving the sustainability of field crop systems: overview of 50 years of trials in Changins**

Preserving soil fertility is a major challenge for farms without livestock specialised in field crops. Several decades ago, several trials were set up at the Agroscope experimental station in Changins to study the long-term effects of different cultural practices on soil fertility and crop yields. This article summarises the main results obtained in these trials. In the conditions at Changins, organic amendments have been useful for stabilising soil organic carbon content, and only high manure inputs have enabled its significant increase. To preserve soil fertility, farm manures are difficult to replace. Without regular organic amendments, reducing tillage is generally not enough to maintain soil organic carbon content, but can slow its decrease. By combining a diversified crop rotation, reduced tillage and regular organic inputs, it is possible to maintain soil fertility and crop yields on the long term. Long-term trials are indispensable for understanding and simulating the long-term impact of different cultural practices on the sustainability of field crop systems.

Key words: soil fertility, organic amendment, nitrogen fertilisation, soil tillage, crop rotation, crop yield.

- Koishi A., Maltas A., Bragazza L., Pfeifer H.-R. & Sinaj S., 2019. Long-term effects of organic amendments on soil organic matter quality in a Swiss conventional farming system. En préparation.
- Maltas A., Oberholzer H., Charles R., Bovet V. et Sinaj S., 2012. Effet à long terme des engrais organiques sur les propriétés du sol. *Recherche Agronomique Suisse* 3 (3), 148–155.
- Maltas A., Charles R., Jeangros B. & Sinaj S., 2013. Effect of organic fertilizers and reduced-tillage on soil properties, crop nitrogen response and crop yield: Results of a 12-year experiment in Changins, Switzerland. *Soil & Tillage Research* 126, 11–18.
- Maltas A., Kebli H., Oberholzer HR., Weisskopf P. & Sinaj S., 2018. The effects of organic and mineral fertilizers on carbon sequestration, soil properties and crop yields from a long-term field experiment under a Swiss conventional farming system. *Land Degradation and Development* 29, 926–938.
- Sanginés de Cárcer P., Sinaj S., Santonja M., Fossati D. & Jeangros B., 2019. Long-Term Effects of Crop Succession and Soil Tillage on Wheat Yield and Soil Properties. *Soil & Tillage Research*, sous presse.
- Sinaj S., Charles R., Baux A., Dupuis B., Hiltbrunner J., Levy L., Pellet D., Blanchet G. & Jeangros B., 2017. 8/Fertilisation des grandes cultures. In: Principes de fertilisation des cultures agricoles en Suisse (PRIF 2017) (Ed. S. Sinaj & W. Richner). *Recherche Agronomique Suisse* 8 (6), Publication spéciale, 8/1–8/46.
- Vullioud P. & Mercier E., 2004. Résultats de 34 ans de culture sans labour à Changins. I. Evolution des rendements. *Revue suisse Agric.* 36 (5), 201–212.
- Vullioud P., 2007. Rotations de cultures chargées en blé : est-il possible d'en diminuer les inconvénients? *Revue suisse Agric.* 39 (1), 15–23.
- Vullioud P., Neyroud J.-A. & Mercier E., 2006. Résultats de 35 ans de culture sans labour à Changins. II. Évolution des propriétés du sol. *Revue suisse Agric.* 38 (1), 1–16.