

L'essai DOC

Comparaison de systèmes de culture biologiques et conventionnels sur 45 ans





L'essai DOC étudie depuis 1978 les différences entre les grandes cultures biologiques et conventionnelles. Le présent dossier résume avec clarté et précision les principaux résultats de plus de 40 années de recherche et s'adresse ainsi aux spécialistes intéressé-es issu-es de la pratique, du conseil et de la science.

L'essai DOC vise à comparer les systèmes agricoles biodynamique (BIODYN), organo-biologique (BIOORG) et conventionnel (CONFYM). Il simule des exploitations associant grandes cultures et élevage. Le système conventionnel CONMIN, qui n'utilise que des engrais minéraux, représente une agriculture sans bétail. Pour chacun des systèmes BIODYN, BIOORG et CONFYM, deux procédés avec des intensités de fumure différentes sont étudiés.

Les résultats de l'essai portent sur cinq cultures actuellement cultivées en alternance pendant les périodes de rotation culturale de sept ans: maïs ensilage, soja, blé d'automne, pommes de terre et mélange trèfles-graminées. Ce dossier présente des résultats dans les domaines suivants: rendement, qualité des sols, approvisionnement en éléments nutritifs, biodiversité et climat.

Sommaire

Préface	3
Une recherche de pointe axée sur la pratique	4
Le site	7
L'essai	9
Rendement des cultures	17
Dynamique des éléments nutritifs	25
Qualité des sols	31
Biodiversité	37
Changement climatique	43
Remerciements	45
Publications sur l'essai DOC	46

Aide à la lecture

Complexe, ce sujet ne peut être abordé sans abréviations ni termes techniques. Pour une meilleure lisibilité, vous trouverez à la fin de ce document, en page 51, une liste des abréviations ainsi que diverses explications. Dans les tableaux et les graphiques, différentes lettres minuscules sont utilisées pour mettre en évidence les différences statistiques.

Préface

Des résultats inspirants et fiables au service d'une sécurité alimentaire durable

Rares sont les essais scientifiques conçus pour durer aussi longtemps que l'essai DOC. Or, cette continuité est particulièrement précieuse pour bon nombre de questions de recherche, car certains résultats ne deviennent pertinents que dans la durée, comme on peut le constater en observant à long terme les effets du changement climatique. Bien qu'intéressants, les résultats à court terme ne sont pas axés sur les effets à long terme de l'influence extérieure, le facteur temps est donc indispensable. Dans l'essai DOC, il existe dès la première année d'essai différentes influences extérieures dues aux procédés de culture. En outre, les questionnements des chercheuses et chercheurs évoluent au fil des années et des décennies, selon l'objet de l'étude et les questions sociétales.

Je sais que l'essai DOC existe depuis ses débuts, il y a des décennies. Tout comme je sais qu'il compare les résultats de différentes méthodes de culture en matière de rendement et de fertilité, à court et à long terme, ainsi que leur impact sur l'environnement. L'accent est mis avant tout sur la fertilité des sols, le climat, les flux d'éléments nutritifs et la biodiversité. L'essai DOC illustre parfaitement la collaboration réussie entre les stations fédérales de recherche – aujourd'hui Agroscope – et le FiBL. Que ce soit en tant que chercheur à l'EPFZ, plus tard en tant que responsable de l'élaboration des politiques à l'Office fédéral de l'agriculture ou aujourd'hui au service de la sécurité alimentaire et de l'alimentation mondiales au sein du Comité des Nations unies pour la sécurité alimentaire mondiale, j'ai toujours constaté que les résultats de l'essai DOC pointaient les différences entre les méthodes de production «biodynamique», «organo-biologique» et «conventionnelle» concernant les questions de recherche d'actualité ainsi que l'évolution des systèmes.

Si l'on examine l'essai DOC plus en détail, de nombreuses questions sur la conception de la recherche elle-même et sur l'évolution des différents procédés de production se posent. Quelles sont les dynamiques? À titre d'exemple, la «production conventionnelle» initiale a évolué vers la «production intégrée». Au sein de la production biologique, on observe également une dynamique, notamment avec de nouvelles variétés, rotations culturales, machines et méthodes de régulation biologique des ra-

vageurs. Des questions intéressantes émergent, non seulement du point de vue de la recherche, mais aussi dans la perspective d'une sécurité alimentaire durable et de la pratique. Les différents chapitres de la présente publication apportent des réponses à bon nombre de ces questions et retracent l'évolution de l'installation d'essai et des questions traitées.

Dans la perspective d'une sécurité alimentaire mondiale durable, la question se pose logiquement de savoir dans quelle mesure les méthodes de production biologique apportent leur contribution. Faut-il plus ou moins d'agriculture biologique ou que toute l'agriculture se reconvertisse au bio? En réaction à ces questions provocatrices, il n'y a que des réponses complexes. Une chose est sûre, la proportion très élevée de pertes d'aliments (après la récolte) et de déchets alimentaires (surtout dans les ménages) ainsi que la proportion importante d'aliments pour animaux sur les terres arables peuvent être réduites, et l'on peut contredire l'affirmation selon laquelle une augmentation de la population implique un besoin accru en surfaces. En d'autres termes, la pénurie est relativisée. Les réflexions dans ce sens sont légitimes si l'on compare l'impact environnemental des différentes méthodes de production et les coûts, supportés par la société, qu'elles engendrent.

Le financement à long terme de l'essai DOC constitue un défi particulier pour les deux institutions de recherche, le FiBL et Agroscope. À cet égard, il est essentiel de rappeler les deux dynamiques mentionnées: les effets à long terme, d'une part, et les méthodes de production, d'autre part. Fait impressionnant, l'obtention de nombreux fonds de tiers pour l'essai DOC auprès d'autres offices fédéraux, du Fonds national suisse et de l'UE montre que ce type de recherche à long terme a du sens pour la recherche fondamentale et appliquée. L'essai DOC est ainsi devenu une importante plateforme de recherche nationale et internationale.

Je vous invite à lire ce dossier. Stimulant, il impressionne par sa scientificité. Voilà pourquoi l'essai DOC a fait son entrée dans le «Walk of Fame» de la science: la revue *Science*. Puisse l'essai DOC continuer à nous impressionner longtemps et nous montrer la voie à suivre par des résultats fiables.



Président du conseil de fondation
Prof. Dr Bernard Lehmann

Une recherche de pointe axée sur la pratique

La question d'une agriculture respectueuse de l'environnement et productive est d'actualité depuis des décennies. Partout dans le monde, une multitude de méthodes de culture différentes sont pratiquées pour produire des denrées alimentaires et des aliments pour animaux. Des sociétés et des générations entières discutent des avantages et des inconvénients des systèmes de culture biologiques et conventionnels.

Des personnes issues de la pratique agricole, de la science et de la politique ont repris cette discussion en Suisse dès le début des années 1970 et établi l'essai DOC à Therwil, Bâle-Campagne, en 1978. **DOC** est l'acronyme de **d**ynamique, **o**rganique et **c**onventionnel. Cet essai vise à examiner les différences entre les systèmes de culture biodynamiques, organo-biologiques et conventionnels avec différentes intensités de fumure.

Des sujets d'une grande actualité tels que le changement climatique et l'adaptation à celui-ci, la perte de biodiversité, la croissance de la population mondiale et la dépendance vis-à-vis des matières premières exigent plus que jamais une réflexion scientifique sur la manière dont nous produisons les denrées alimentaires et les aliments pour animaux.

L'essai DOC compare les systèmes de production agricole depuis plus de 40 ans et sert de base pour étayer par des arguments scientifiques la discussion toujours controversée sur les perspectives de l'agriculture biologique.

Une base scientifique pour des questions politiques

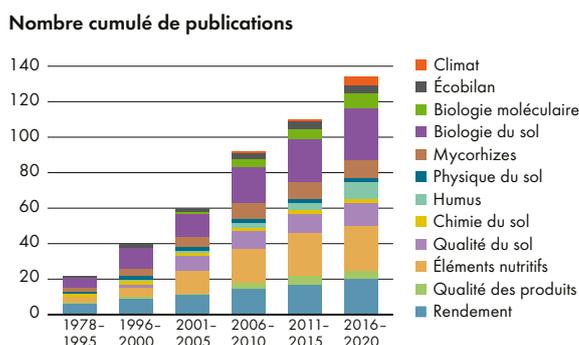
À ce jour, le point culminant de l'essai DOC a sans aucun doute été la parution en 2002 d'un article scientifique sur la fertilité des sols et la biodiversité dans l'agriculture biologique dans la revue *Science*. Cet article a eu un impact positif sur la réputation de l'agriculture biologique, et il a été reconnu qu'elle offrait des solutions aux grands problèmes environnementaux liés à la production agricole.

Les projets de recherche actuellement menés dans le cadre de l'essai DOC portent sur la qualité des sols, la biodiversité et le climat, des thèmes essentiels d'un point de vue sociétal mondial et décisifs pour notre avenir.

Importance nationale et internationale

En une quarantaine d'années, l'essai DOC a donné lieu à plus de 120 publications scientifiques ainsi qu'à des thèses de doctorat et à un grand nombre de travaux d'étudiant-es (Figure 1). D'innombrables personnes venues de nombreux pays, des agricultrices et agriculteurs, des étudiant-es, des élèves, mais aussi des scientifiques de haut niveau des meilleures universités, ont visité l'essai DOC et réalisé des projets de recherche dans le cadre de celui-ci.

Figure 1: Nombre de publications parues dans des revues scientifiques



En 2015, le Secrétariat d'État suisse à la formation, à la recherche et à l'innovation a inclus l'essai DOC dans la Feuille de route suisse pour les infrastructures de recherche. Celle-ci réunit les unités expérimentales nationales les plus importantes. L'essai DOC a donc atteint l'Olympe des sciences suisses.

L'essai s'inscrit dans une approche circulaire de recherche: des questions ouvertes issues de la pratique sont d'abord étudiées dans les champs expérimentaux à l'aide des méthodes les plus modernes. Ensuite, des études détaillées sont menées en serre et dans des exploitations partenaires. Les nouvelles connaissances sont à leur tour intégrées dans la recherche en cours sur le terrain. Par conséquent, l'essai DOC occupe souvent une place éminente en ce qui concerne les questions actuelles de recherche agricole et environnementale nationale et internationale pour les études en plein champ.

La place de choix qu'occupe l'essai DOC dans la recherche académique de pointe se traduit également par la qualité des travaux de recherche et l'actualité persistante des questions étudiées. En voici quelques exemples:

Sept projets réalisés dans le cadre du programme national suisse de recherche «Ressource sol» ont utilisé l'essai DOC comme terrain d'expérimentation. Ils ont étudié le lien entre les propriétés et fonctions des sols et la production agricole¹.

- Dans un projet européen très médiatisé sur la qualité des sols, une équipe internationale de recherche a étudié l'influence du mode de culture sur les services écosystémiques rendus par le sol. L'essai DOC constituait un pilier important de l'infrastructure d'essai².
- Dans le cadre d'un projet du Fonds national suisse (FNS), des pédologues du FiBL étudient l'impact du mode de culture dans l'essai DOC sur la qualité de l'humus et le bilan humique³.
- Depuis 2016, des groupes de recherche internationaux étudient l'influence des systèmes de culture sur la tolérance au stress hydrique des cultures et des communautés microbiennes⁴.

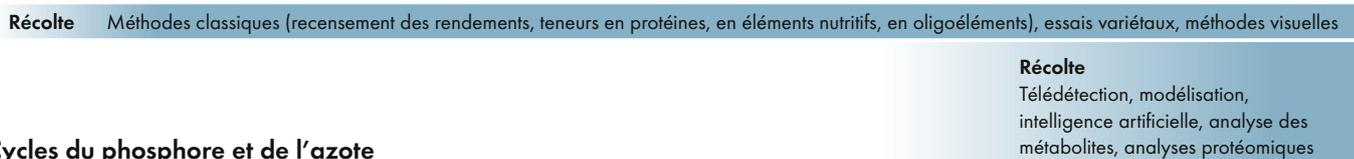
- Un projet du FNS sur la biodiversité microbienne dans le sol en relation avec le cycle de l'azote entre actuellement dans sa dernière phase.
- Un nouveau projet européen de sélection étudie les communautés microbiennes présentes sur les semences de plantes cultivées⁵. Un second projet vise à élaborer un cadre pour le suivi de la fertilité des sols⁶.

Des questions laissées en suspens ont incité des chercheuses et chercheurs à mettre en place d'autres essais à long terme sur des thèmes spécifiques. Il s'agit notamment d'un essai en plein champ sur les effets d'un travail réduit du sol, de la stratégie de fumure et des préparations biodynamiques. Les parcelles expérimentales ont été mises en place en 2002 à Frick. Les comparaisons de systèmes lancées par le FiBL en 2005 en Inde, au Kenya et en Bolivie trouvent également leur origine dans la réussite de l'essai DOC.

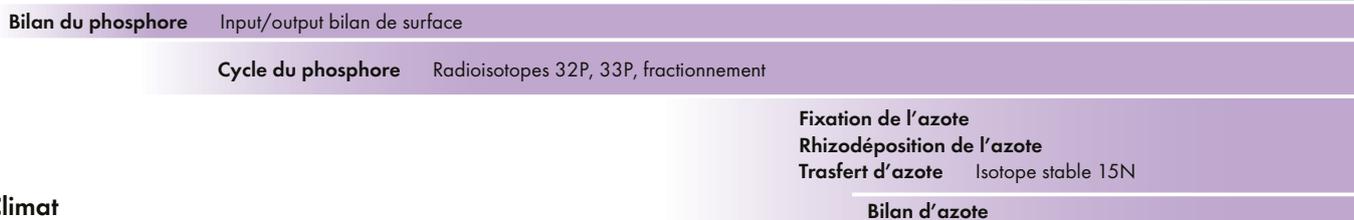
¹PNR 68, ²ISQAPER, ³DynaCarb, ⁴BiodivERsA (SOILCLIM, Biofair et Microservices), ⁵Liveseeding, ⁶Benchmarks

Figure 2: Thèmes et méthodes de recherche au fil du temps

Stabilité et qualité du rendement



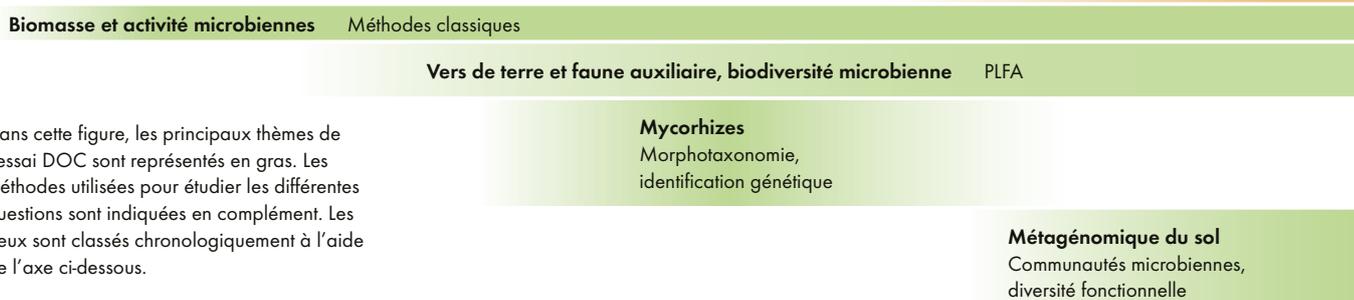
Cycles du phosphore et de l'azote



Climat



Biodiversité et biologie du sol



Dans cette figure, les principaux thèmes de l'essai DOC sont représentés en gras. Les méthodes utilisées pour étudier les différentes questions sont indiquées en complément. Les deux sont classés chronologiquement à l'aide de l'axe ci-dessous.



Des origines dans d'autres conditions

Les questions abordées par l'essai DOC font aujourd'hui partie d'un débat public. Or, les conditions auxquelles étaient confrontés les pionniers et pionnières des années 1970 étaient bien différentes: envers et contre tout, un petit groupe d'agricultrices et d'agriculteurs biologiques et leurs soutiens se sont engagés en Suisse pour que l'agriculture biologique soit étudiée scientifiquement.

Grâce à cet engagement réussi, l'Institut de recherche de l'agriculture biologique FiBL, fondé en 1973 dans ce but, a été chargé, en collaboration avec l'ancienne Station fédérale de recherches en chimie agricole et sur l'hygiène de l'environnement, de comparer les trois systèmes agricoles bio-dynamique, organo-biologique et conventionnel dans le cadre d'un essai de longue durée. Le FiBL s'occupe principalement des parcelles expérimentales biologiques, tandis qu'Agroscope, le centre de compétence suisse pour la recherche agronomique, est responsable des parcelles cultivées de manière conventionnelle.

La clé du succès: associer science et pratique

Afin de garantir l'ancrage dans la pratique, des agricultrices et agriculteurs biologiques ont été impliqués dès la planification de l'essai, mais surtout pendant sa réalisation. Leur engagement et leur intérêt soutenu pour les connaissances acquises ont encouragé les scientifiques impliqués à se surpasser. Outre les publications scientifiques, un objectif important était de rendre accessibles les connaissances, parfois complexes, aux agricultrices et agriculteurs ainsi qu'aux groupes de personnes intéressés.

Grâce à une documentation méticuleuse des mesures culturales et aux multiples analyses, le terrain de l'essai DOC est devenu l'une des surfaces agricoles les mieux décrites au monde. D'année en année, l'essai et les données collectées deviennent de plus en plus précieux en raison de la longue durée et de la cohérence des enregistrements de données.



Les scientifiques et les agricultrices et agriculteurs se rencontrent régulièrement lors de visites des parcelles de l'essai DOC (en haut en 2012, en bas en 2023).

Le site

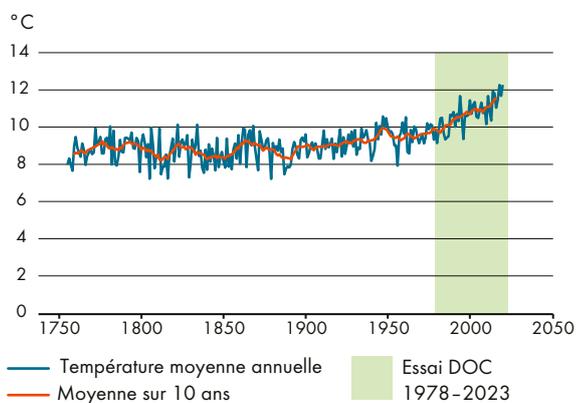


Les parcelles expérimentales sont situées dans le Leimental, au sud-ouest de Bâle, dans la plaine du Rhin supérieur.

Climat

La plaine du Rhin supérieur bénéficie d'un climat favorable en matière de chaleur et d'humidité. Jusqu'à la fin du siècle dernier, la température moyenne annuelle était de 9,7 °C. La moyenne des années 2010 à 2020 est de 11,2 °C. Les précipitations annuelles s'élèvent actuellement à 872 mm.

Figure 3: Changement de température



Moyenne annuelle et moyenne mobile de la température de l'air dans le canton de Bâle-Campagne, mesurée à 1 m d'altitude. Entre 1978 et 2010, la température a augmenté de 1,5 °C.

Sol et géologie

Le terrain expérimental se situe dans l'angle sud-est du fossé rhénan et il est entouré de collines jurassiennes. Le fossé rhénan est rempli d'énormes couches de gravier qui ont été recouvertes de matériel fin (loess) provenant des plaines alluviales des marges proglaciaires au cours de la dernière période froide. C'est ainsi que se sont formés des sols argileux fertiles dans les vallées en berceau.

Le loess du Leimental est profond. Sur ce loess se sont formés des sols bruns lessivés modérément développés, montrant par endroits une tendance à la pseudogleyification. Ces sols sont décalcifiés, mais présentent encore quelques blocs de roche du Jura proche. Ils sont brunifiés jusqu'à une profondeur de 1 m à 1,3 m et peuvent donc être facilement pénétrés par les racines.

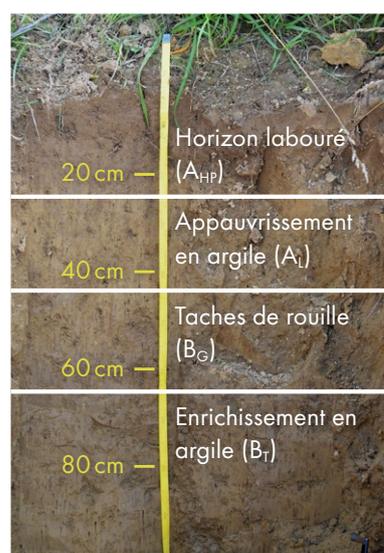
Les inondations régulières par le ruisseau voisin, le Birsig, ont entraîné, par le passé, le dépôt de sédiments de différentes granulométries. Les sols des parcelles de l'essai DOC ne contiennent qu'une faible quantité de sable, le limon prédominant avec 70 %. L'argile ayant sédimenté dans de petites accumulations d'eau, elle est répartie de manière quelque peu irrégulière.

Tableau 1: Composition granulométrique des sols de l'essai DOC par procédé: pourcentages moyens du poids et écart-type (SD)

Procédés	Argile (%)	SD	Limon (%)	SD	Sable (%)	SD
NOFERT	16,2	2,4	70,7	3,2	11,4	2,3
BIODYN 1	16,8	1,8	69,5	2,2	11,6	1,7
BIOORG 1	14,9	1,7	71,6	2,3	11,7	1,2
CONFYM 1	14,3	1,7	71,7	0,9	12,1	1,2
BIODYN 2	17,1	1,9	69,2	2,1	11,3	2,5
BIOORG 2	15,1	1,5	71,4	2,1	11,4	0,9
CONFYM 2	14,5	1,6	70,9	1,7	12,6	1,5
CONMIN	16,7	2,5	70,0	2,1	11,3	1,2

La teneur en argile des parcelles de l'essai DOC est en moyenne de 15,6 % (médian: 15,3), les valeurs les plus basses s'élèvent à 12,5 %. Toutefois, dans huit parcelles situées dans le coin nord-ouest du terrain expérimental, la teneur en argile atteint 20 à 25 %. Cette zone à forte teneur en argile se distingue nettement des parcelles voisines. L'influence de la teneur en argile est prise en compte dans les évaluations statistiques, en particulier lorsqu'il s'agit d'évaluer les effets des procédés sur le sol.

La proportion de pores grossiers étant faible, le sol se réchauffe lentement au printemps. L'eau a parfois tendance à stagner dans le sol, ce qui explique la présence de taches sombres, appelées concrétions de fer et de manganèse (pseudogley). De ce fait, le sol ne peut être travaillé que sur de courtes périodes et le sarclage mécanique au printemps et au début de l'été s'avère exigeant. Le sol permet une remontée capillaire de l'eau depuis les couches profondes, si bien que, jusqu'à présent, la sécheresse ne représente pas un gros problème en été.



Profil de sol du terrain de l'essai DOC: sont représentés les horizons (couches) du sol brun lessivé, décalcifié et profond.



Les sols des procédés de culture CONMIN (à gauche) et BIODYN 2 (à droite) après de fortes précipitations en novembre 2002. La battance à la surface du sol était beaucoup plus marquée dans le procédé CONMIN.

L'essai

L'essai DOC vise à comparer entre eux les systèmes agricoles biodynamique (**BIODYN**), organo-biologique (**BIOORG**) et conventionnel (**CONFYM**). Pour chacun de ces procédés de culture, l'essai simule des systèmes associant grandes cultures et élevage.

Les deux systèmes biologiques se conforment respectivement au cahier des charges de Bio Suisse et de Demeter. Par analogie avec les directives de Demeter, le procédé BIODYN utilise des préparations biodynamiques destinées au compost et à la terre, et tient compte des constellations. Le procédé conventionnel CONFYM correspond à la production intégrée actuelle, caractérisée par un bilan équilibré des éléments nutritifs et une protection phytosanitaire respectant des seuils économiques d'intervention.

Outre les systèmes de culture avec élevage simulé, l'essai comprend, depuis la deuxième période de rotation culturale (1985), un système conventionnel qui ne reçoit que des engrais minéraux et qui représente une agriculture sans bétail (**CONMIN**).

Pour chacun des systèmes BIODYN, BIOORG et CONFYM, deux procédés avec des intensités de fumure différentes sont étudiés. L'intensité de fumure repose sur deux densités de bétail: 1,4 unité de gros bétail-fumure (UGBF) correspond à la densité moyenne de bétail en Suisse, 0,7 UGBF à la densité de bétail en cas d'élevage réduit. Les engrais de ferme sont achetés auprès d'exploitations pratiquant le système en question. Dans les systèmes conventionnels, des engrais minéraux sont épandus, conformément aux Principes de fertilisation des cultures agricoles en Suisse (PRIF).

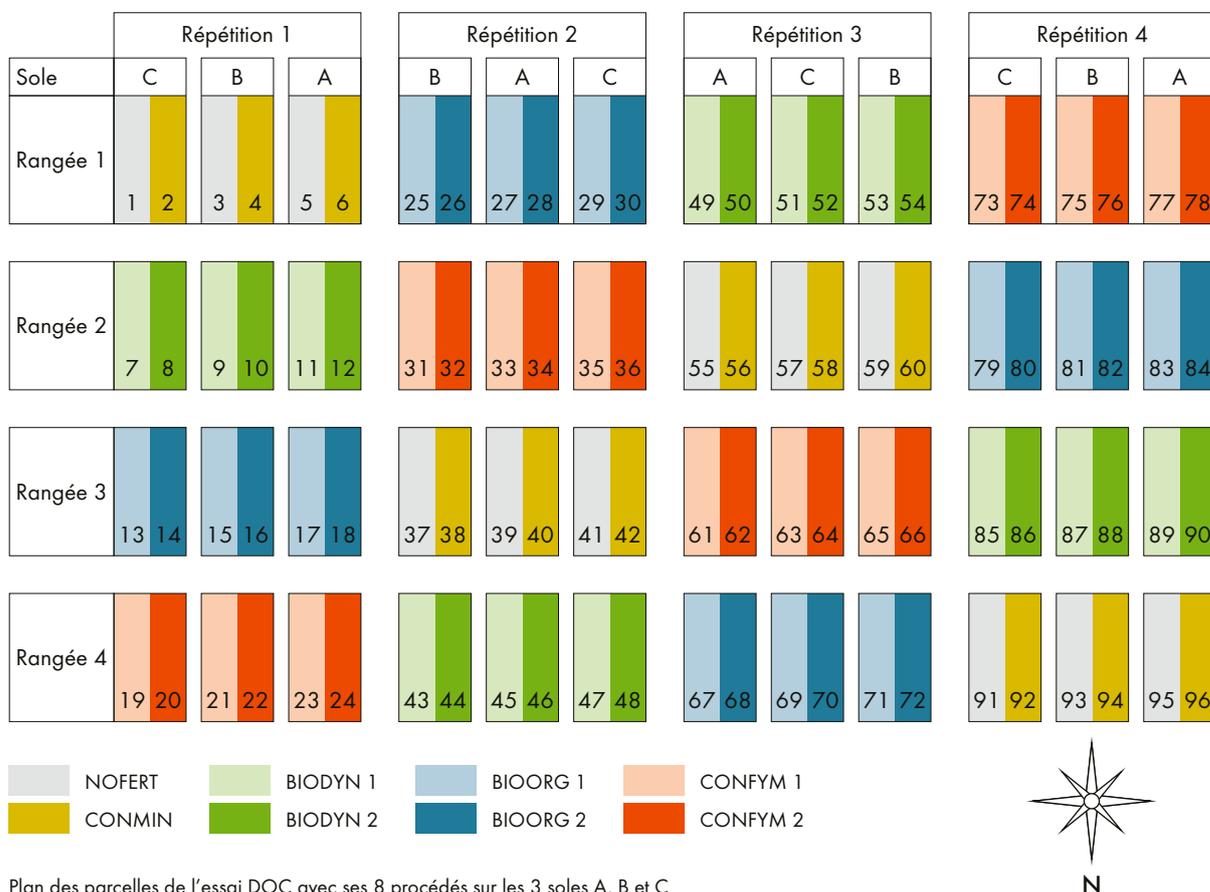
Un procédé ne recevant aucune fumure (**NOFERT**) depuis le début de l'essai sert de témoin. Dans ce procédé, les préparations biodynamiques 500 et 501 sont utilisées depuis début 1978; la protection phytosanitaire correspond aux mesures prises en BIODYN.



Vue aérienne des quatre répétitions de l'essai DOC en 2017 avec les trois soles: sole A blé d'automne 2 présentant une fenêtre en bordure destinée à un essai variétal, sole B soja, sole C blé d'automne 1. En outre, des toits de protection contre la pluie du projet SoilClim sont visibles dans certaines parcelles.

Conception de l'essai

Figure 4: Plan des parcelles



Plan des parcelles de l'essai DOC avec ses 8 procédés sur les 3 soles A, B et C subdivisés en 4 rangées et 4 répétitions.

L'essai se compose de 96 parcelles individuelles de 5 × 20 mètres. Les huit procédés sont disposés en quatre répétitions. Dans le dispositif en blocs randomisés, chaque procédé est représenté dans chaque rangée et chaque colonne. De cette manière, la variabilité du site peut être compensée et prise en compte dans les statistiques.

En outre, chaque année, trois cultures différentes de la rotation sur sept ans sont cultivées côte à côte. La rotation culturale est décalée dans le temps

sur trois soles parallèles: A, B et C. Cela permet de compenser les variations annuelles de rendement dues aux conditions météorologiques. Dans chaque période de rotation culturale, il est ainsi possible d'étudier, pour chaque culture et chaque procédé, les rendements par parcelle d'au moins 12 années de culture (3 soles × 4 répétitions). Le modèle statistique d'évaluation de la qualité du sol tient compte de la teneur en argile de chaque parcelle, facteur important de la variabilité liée au site.

Fumure

1,4 UGBF correspond à la production d'engrais de ferme d'une exploitation suisse mixte et, ci-après, au niveau de fumure 2. La quantité d'engrais de ferme réduite de moitié, soit 0,7 UGBF (niveau de fumure 1), a été introduite comme variante témoin et simule une exploitation ayant peu de bétail. Le lisier sert à la conduite de la culture actuelle, le fumier de fumure de fond à écoulement lent.

Alors que le système biodynamique n'utilise que des engrais de ferme, les parcelles organo-biologiques, quant à elles, reçoivent en plus de petites quantités de potassium minéral (Patentkali ou potasse magnésienne).

Dans le procédé CONFYM 2, de plus grandes quantités d'engrais minéraux sont épandues, conformément à la norme de fertilisation selon les PRIF. Dans le procédé CONFYM 1, aussi bien la quantité d'engrais de ferme que la quantité d'engrais minéraux sont réduites. Le système CONMIN avec fumure minérale exclusive utilise uniquement la quantité d'engrais minéraux préconisée par la norme de fertilisation; pour ce système, il n'existe pas de niveaux de fumure différents.

Dans les systèmes conventionnels, depuis l'introduction de la production intégrée en 1992, le stock d'azote minéral dans le sol est pris en compte dans le calcul de la quantité d'engrais à apporter. L'objectif est d'assurer une fertilisation adaptée aux besoins.

Les niveaux de fumure non réduits, des différents systèmes ne sont pas équivalents en matière d'éléments nutritifs. Autrement dit, les quantités totales d'engrais et les éléments nutritifs contenus dans ceux-ci varient entre les systèmes en fonction de ce qui est pratiqué habituellement. La fertilisation dans les conditions expérimentales est axée sur des éléments directeurs, définis dans un plan de fumure pour chaque période de rotation culturale. Le phosphore (P) joue un rôle décisif à cet égard. Si le plan de fumure n'a pas été respecté à la lettre l'année précédente, il est possible de le corriger l'année en cours.

Changements au cours de l'essai

Au cours de la première et de la deuxième période de rotation culturale (PRC), l'apport d'engrais s'élevait encore à 0,6 UGBF pour le niveau de fumure 1 et à 1,2 UGBF pour le niveau de fumure 2. Au début de la troisième PRC, les apports d'engrais ont été augmentés pour atteindre les valeurs susmentionnées, en raison de la proportion accrue de plantes fourragères dans la rotation culturale.

Au cours de la quatrième PRC, l'exploitation partenaire pour le système organo-biologique a changé. La nouvelle exploitation ayant un autre système de stabulation, la proportion de fumier et de lisier dans l'engrais de ferme a changé à ce moment-là.

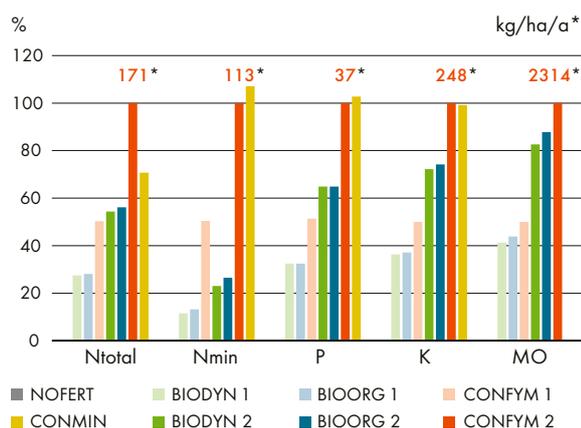
Traitement différent des engrais de ferme

Dans BIODYN, BIOORG et CONFYM, les engrais de ferme sont stockés et préparés différemment, conformément aux exigences de chaque système:

- comme fumier composté en BIODYN,
- comme fumier mûr en BIOORG,
- comme fumier en tas en CONFYM.

Le fumier en tas présente les plus faibles pertes de matière organique pendant le stockage, suivi du fumier mûr et du fumier composté.

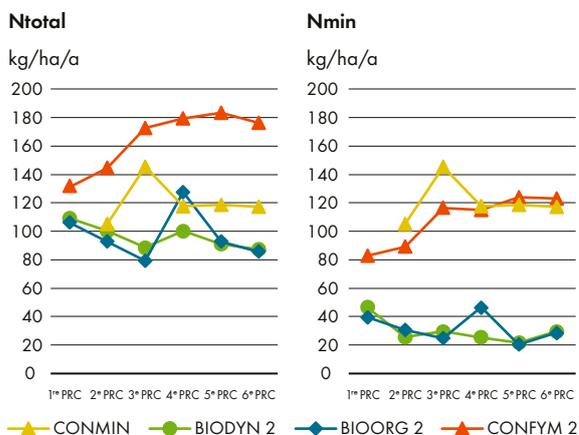
Figure 5: Quantités appliquées d'éléments nutritifs



Quantités appliquées d'azote total (Ntotal), d'azote minéral (Nmin, contenu sous forme d'ammonium et de nitrate dans les engrais de ferme et les engrais minéraux), de phosphore et de potassium provenant de sources organiques et minérales; et quantité de matière organique (MO) apportée en épandant du fumier et du lisier. Toutes les données sont des moyennes sur les PRC 2 à 6, comparées au procédé CONFYM 2, dont les quantités absolues sont indiquées en chiffres rouges.

La Figure 5 montre que, pendant les cinq périodes de rotation culturale à partir de 1985, les deux procédés biologiques ont utilisé 45 % d'azote total (Ntotal) de moins, 75 % d'azote minéral (Nmin) de moins, 35 % de phosphore de moins et 27 % de potassium (K) de moins que le procédé CONFYM 2. La quantité de matière organique apportée en épandant des engrais de ferme était inférieure de 12 % en BIOORG et de 17 % en BIODYN par rapport à CONFYM 2. Ces différences s'expliquent par l'altération des engrais de ferme due aux différentes méthodes de stockage et de préparation.

Figure 6: Fumure azotée



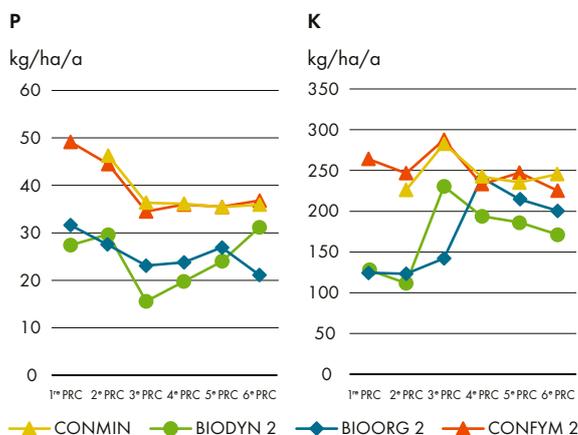
Azote total (Ntotal) et azote minéral (Nmin sous forme d'ammonium et de nitrate). L'azote que reçoivent les systèmes bio provient exclusivement du fumier et du lisier; les systèmes conventionnels utilisent en complément des engrais minéraux, jusqu'à ce que la norme de fertilisation soit atteinte.

L'apport d'azote dans le système CONFYM a nettement augmenté (Figure 6). Cela s'explique par le fait qu'à partir de la troisième PRC, des cultures fourragères (mélange trèfles-graminées, maïs) prélevant beaucoup d'azote ont été cultivées pendant trois ans et que les recommandations en matière de fumure ont été revues à la hausse, en raison d'attentes de rendement plus élevées. Étant donné qu'en CONFYM, l'azote contenu dans les engrais de ferme n'est imputé qu'à hauteur de 60 %, conformément aux PRIF, la fumure azotée totale en CONFYM (171 kg par hectare et par an) est nettement plus élevée que celle en CONMIN.

Dans le système CONMIN, qui ne reçoit que des engrais minéraux, en moyenne, 50 kg d'azote (N) de moins sont appliqués. Cette différence correspond à la quantité de N contenue dans l'engrais de ferme non prise en compte, qui peut également entraîner des problèmes environnementaux liés aux pertes gazeuses (ammoniac et protoxyde d'azote) et à la lixiviation (nitrate).

Dans les systèmes biologiques, l'apport de N s'élève en moyenne à 95 kg par hectare, dont seuls 30 kg sont minéraux et donc directement assimilables. La part organique de l'azote contenu dans les engrais de ferme ne se transforme en ammonium et en nitrate assimilables par les plantes que lors de sa minéralisation dans le sol. Dans son ensemble, l'apport de N dans les systèmes biologiques est plutôt stable.

Figure 7: Fumure phosphatée et potassique



En BIOORG, outre les engrais de ferme, des engrais potassiques homologués sont épandus.

Le **phosphore (P)** est un élément nutritif dont les gisements mondiaux tendent à s'épuiser. Les engrais phosphatés sont en conséquence coûteux. Dans l'essai DOC, la fumure phosphatée des systèmes conventionnels se conforme à la norme, tout en tenant compte des éléments nutritifs solubles présents dans le sol. Les quantités apportées ont en outre été adaptées en fonction des révisions des PRIF. L'augmentation constatée en BIODYN est probablement liée aux apports accrus de P par les engrais de ferme à partir de la troisième PRC.

Dans les systèmes conventionnels, les apports de **potassium (K)** sont élevés depuis le début de l'essai DOC, car les teneurs du sol en K soluble étaient



Engrais du commerce et produits phytosanitaires utilisés dans le système conventionnel CONMIN pour le blé d'automne.



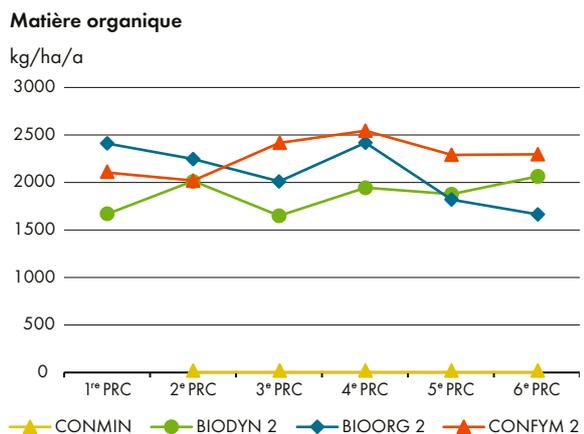
Parcelles expérimentales de blé de l'essai DOC équipées de toits de protection contre la pluie pour étudier les effets de la sécheresse sur la biodiversité du sol.

faibles. En BIOORG, un peu de potasse magnésienne est apportée, tandis qu'en BIODYN, aucun engrais potassique supplémentaire n'est utilisé. Dans les procédés biologiques, l'augmentation de K dans la troisième PRC ne s'explique qu'en partie par l'augmentation des quantités d'engrais de ferme. En principe, le lisier contient plus de potassium que le fumier.

Les pertes de matière organique liées aux différences de stockage des engrais de ferme dans les trois systèmes se reflètent également dans les quantités d'engrais épandues. Par rapport à CONFYM, la quantité de matière organique apportée était inférieure de 12 % en BIOORG et de 17 % en BIODYN. C'est surtout le compostage du fumier en BIODYN qui entraîne une perte de matière organique.

En revanche, la quantité de lisier ne différerait guère. Le changement de système de stabulation en BIOORG a entraîné une augmentation de la matière organique dans la quatrième PRC, sans que les quantités d'éléments nutritifs n'aient pour autant changé. En CONFYM, les quantités de MO ont augmenté dès la troisième PRC.

Figure 8: Apports de matière organique



Les engrais de ferme utilisés sont: le fumier et le lisier. Outre l'eau, leurs principaux composants sont la matière organique et les minéraux. Ce graphique indique la quantité de MO provenant de l'engrais produit par 1,4 unité de gros bétail apportée au sol par an et par hectare.

Rotation des cultures

La rotation sur sept ans avec deux ans de repos du sol sans labour sous prairie temporaire est typique des exploitations suisses avec bétail. Les cultures annuelles comprennent des plantes sarclées (betteraves rouges, maïs, pommes de terre, choux), des céréales (blé, orge) et une légumineuse à graines (soja). Les cultures dérobées sont utilisées soit comme engrais vert soit comme fourrage (la biomasse est évacuée). La rotation culturale (Tableau 2) constitue un compromis entre les différents systèmes de culture et a été légèrement adaptée après chaque PRC.

Dans chaque PRC, des pommes de terre, du blé d'automne et un mélange trèfles-graminées ont été cultivés. Dans la phase initiale de l'essai, l'orge et le chou blanc faisaient également partie de la ro-

tation culturale. Le chou blanc a été remplacé par la betterave rouge dès la deuxième PRC (1985) en raison de la forte intensité de travail. Au début de la troisième PRC (1992), l'orge a été remplacée par une troisième année de prairie temporaire (mélange trèfles-graminées), car la rotation chargée en céréales avait provoqué des maladies du pied dans tous les systèmes. Depuis 1999, du maïs et du soja sont cultivés, et la prairie temporaire reste à nouveau en place pendant deux ans. Depuis ce temps et jusqu'en 2013, la position des cultures a été légèrement modifiée dans chaque PRC. D'une part, ces changements visaient à assurer une utilisation optimale de l'azote dans la rotation culturale, d'autre part, ils étaient dus à l'apparition, constatée indépendamment du système, de ravageurs, notamment de vers fil de fer dans les pommes de terre.

Tableau 2: Évolution de la rotation des cultures sur sept ans depuis le début de l'essai

Année	1 ^{re} PRC 1978–1984	2 ^e PRC 1985–1991	3 ^e PRC 1992–1998	4 ^e PRC 1999–2005	5 ^e PRC 2006–2012	6 ^e PRC 2013–2019
1	Pommes de terre	Pommes de terre	Pommes de terre	Pommes de terre	Maïs ensilage	Maïs ensilage
	Engrais vert	Engrais vert	Engrais vert			Engrais vert
2	Blé d'automne 1	Blé d'automne 1	Blé d'automne 1	Blé d'automne 1	Blé d'automne 2	Soja
	Dérobée fourragère	Dérobée fourragère	Dérobée fourragère	Engrais vert	Engrais vert	
3	Chou blanc	Betteraves rouges	Betteraves rouges	Soja	Soja	Blé d'automne 1
				Engrais vert	Engrais vert	Engrais vert
4	Blé d'automne 2	Blé d'automne 2	Blé d'automne 2	Maïs ensilage	Pommes de terre	Pommes de terre
5	Orge	Orge	Prairie temporaire 1	Blé d'automne 2	Blé d'automne 2	Blé d'automne 2
6	Prairie temporaire 1	Prairie temporaire 1	Prairie temporaire 2	Prairie temporaire 1	Prairie temporaire 1	Prairie temporaire 1
7	Prairie temporaire 2	Prairie temporaire 2	Prairie temporaire 3	Prairie temporaire 2	Prairie temporaire 2	Prairie temporaire 2

Les dérobées fourragères sont récoltées, tandis que les engrais verts restent sur le champ pour être incorporés.

Protection des plantes

Jusqu'en 1992, dans les systèmes conventionnels, les pesticides étaient en grande partie appliqués selon un plan de traitement. Au début de la troisième PRC, la production intégrée (PI), qui consiste à n'utiliser de pesticides qu'une fois le seuil économique d'intervention atteint, a été introduite. L'application de pesticides dans les systèmes conventionnels a toujours reposé sur la législation et les recommandations d'utilisation en vigueur.

Dans les procédés conventionnels, chaque année, 3 kg de substance active ont été appliqués en moyenne par hectare de terres assolées (Figure 9). Les fongicides et les herbicides représentaient la majeure partie de ces produits. Les insecticides n'ont été appliqués que rarement et en petites quantités. Depuis les années 1980, les quantités de substances actives appliquées ont nettement diminué, ce qui est également dû aux produits phytosanitaires (PPS) très efficaces ne nécessitant qu'une très faible quantité de produit par application. Sur la même période, le nombre d'applications de substances actives a doublé (Figure 10).

Les systèmes biologiques utilisent les possibilités offertes par la régulation biologique des ravageurs et les mesures préventives contre les maladies. Dans le système BIODYN, seule la toxine de la bactérie *Bacillus thuringiensis* (BT), obtenue par un processus biologique, est utilisée comme insecticide contre le doryphore de la pomme de terre.

Pommes de terre

Dans la production de pommes de terre, le mildiou (*Phytophthora infestans*) et le doryphore (*Leptinotarsa decemlineata*) provoquent des dégâts considérables. Dans les systèmes conventionnels, en moyenne, quinze traitements (herbicides, insecticides et fongicides) par an se sont avérés nécessaires, contre sept applications d'insecticides plus le fongicide cuivre dans le système organo-biologique, et quatre traitements avec des produits à base de BT dans le système biodynamique.

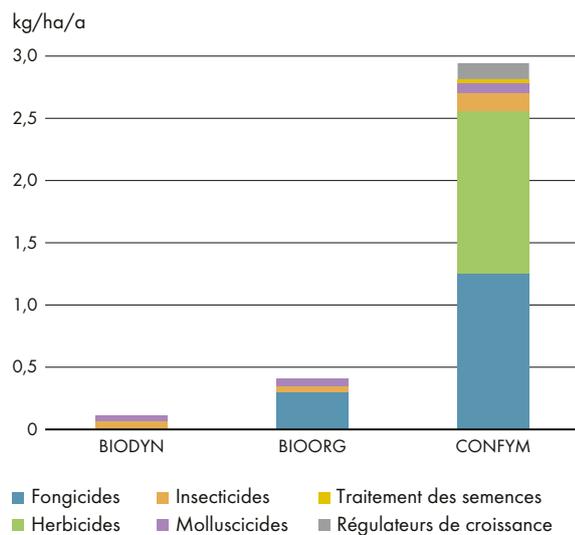
Céréales, maïs et soja

Les céréales conventionnelles sont traitées trois à quatre fois: avec des herbicides, des fongicides et un raccourcisseur de tige. Le maïs et le soja ne nécessitent généralement qu'un traitement herbicide et un traitement contre les limaces. La pyrale du maïs est régulée à l'aide de guêpes parasitoïdes du genre *Trichogramma*.

Semences

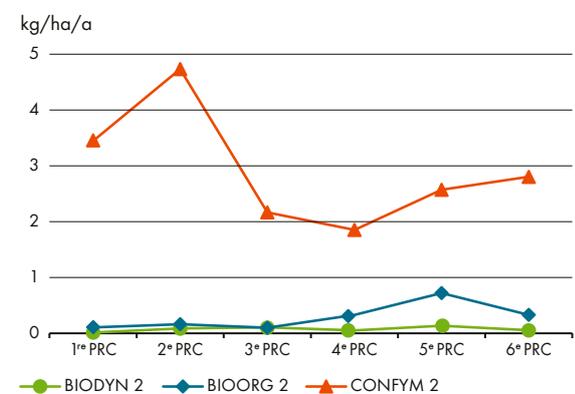
Les semences et plants utilisés dans les systèmes conventionnels ont été traités, contrairement à ceux destinés aux systèmes biologiques. Depuis 1998, les semences utilisées dans les systèmes biologiques sont obtenues par multiplication biologique.

Figure 9: Quantités de substances actives appliquées par type de produit



Quantités appliquées de substances actives en kilogrammes de substance active par hectare et par an. Il s'agit des moyennes sur toute la période de l'essai. CONMIN a reçu les mêmes quantités que CONFYM. Il convient de noter qu'aucun PPS n'a été appliqué pendant les années de prairie temporaire. Toutefois, les moyennes incluent aussi les années de prairie temporaire.

Figure 10: Évolution dans le temps des quantités de pesticides appliquées



Quantités moyennes de substances actives, tous produits phytosanitaires confondus, utilisées par période de rotation culturelle dans les trois principaux procédés de l'essai DOC. Évolution sur six périodes de rotation. CONMIN a reçu les mêmes quantités que CONFYM. Quantités exprimées en kilogrammes de substances actives par hectare et par an.

Travail du sol

La charrue est utilisée pour travailler le sol avant de cultiver des plantes sarclées ou des céréales. Au début de l'essai, la profondeur de labour était légèrement plus faible dans les systèmes biologiques (15 à 20 cm) que dans les systèmes conventionnels (20 à 25 cm). Depuis la troisième PRC, la profondeur de labour est de 20 cm pour tous les systèmes. Quant aux mesures d'entretien, les passages de sarleuse et de herse-étrille consistant à travailler le sol superficiellement sont plus fréquents dans les systèmes biologiques. Les pommes de terre et le maïs sont sarclés également dans le système conventionnel.



Dans tous les procédés de culture, la charrue a été utilisée avant de cultiver du blé ou des plantes sarclées.

Tableau 3: Caractéristiques des systèmes de culture de l'essai DOC

Système de culture	NOFERT	BIODYN		BIOORG		CONFYM		CONMIN	
Unités de gros bétail-fumure par hectare	-	0,7	1,4	0,7	1,4	0,7	1,4	-	
Fumure									
Engrais de ferme	-	Fumier composté et lisier		Fumier mûr et lisier		Fumier en tas et lisier		-	
Engrais minéraux	-	Poudre de roche		Poudre de roche, potasse magnésienne		Urée, nitrate d'ammonium, nitrate d'ammoniaque calcaire, superphosphate triple, chlorure de potassium			
Protection des plantes									
Désherbage	Mécanique: herse-étrille et sarleuse					Mécanique et chimique			
Maladies des plantes	-	Mesures indirectes		Mesures indirectes, produits cupriques sur pommes de terre		Fongicides			
Ravageurs	Biocontrôle (<i>Bacillus thuringiensis</i>), extraits de plantes, mesures préventives					Insecticides, biocontrôle, granulés anti-limaces et mesures préventives			
Particularités	Préparations biodynamiques			-		Régulateurs de croissance			

Rendement des cultures

Les graphiques et tableaux de ce chapitre présentent les rendements moyens d'une période de rotation culturale comprenant systématiquement trois années de récolte et quatre répétitions (n = 12).

Il convient de noter que les rendements sont exprimés en matière sèche (MS) absolue (100 % de MS). Dans la pratique agricole, les rendements sont parfois indiqués avec une humidité résiduelle: pour le blé, 86 % de MS et 14 % d'eau; et pour le soja, 89 % de MS et 11 % d'eau. Par conséquent, les rendements du blé représentés ici doivent être multipliés par 1,16 pour pouvoir être comparés avec les représentations de rendements issues de la pratique. S'agissant du soja, il faut multiplier les rendements par 1,12. En revanche, les rendements des prairies temporaires sont exprimés en MS même dans la pratique, tout comme le plus souvent ceux du maïs. Pour la commercialisation des pommes de terre, les rendements sont exprimés en matière fraîche.

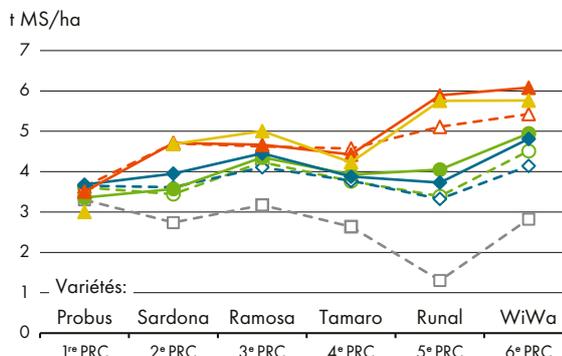
Blé d'automne

Rendement en grains

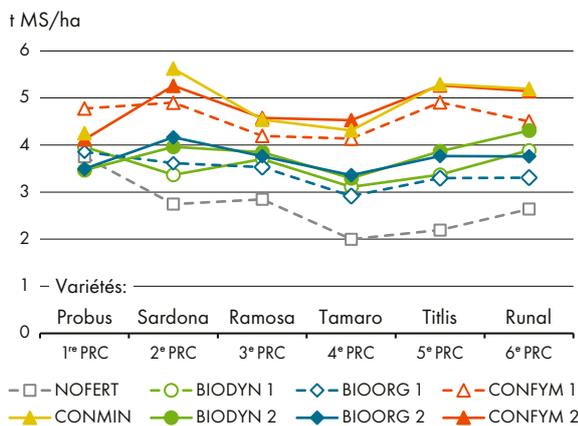
Seules des variétés de blé panifiable de très bonne qualité boulangère ont été cultivées. Dans la première PRC, tous les procédés ont atteint des rendements similaires, profitant probablement encore du mode de culture précédent. Les procédés conventionnels ont subi des dégâts de verse. Voilà pourquoi la variété à paille longue Probus n'a pas pu utiliser l'azote apporté pour produire un rendement. Les parcelles sur lesquelles le procédé CONMIN a été établi n'ont pas été fertilisées au cours de la première PRC, raison pour laquelle elles ont affiché des rendements inhabituellement faibles. Depuis 1985, les rendements du blé d'automne des procédés biologiques sont en moyenne inférieurs de 21 % par rapport à ceux du procédé conventionnel CONFYM. Dans ce qui suit, seules les différences de rendement à partir de la deuxième PRC seront discutées.

Figure 11: Évolution des rendements en grains du blé d'automne 1 et 2

Rendement blé d'automne 1



Rendement blé d'automne 2



Dans le meilleur des cas, les rendements en grains des parcelles conventionnelles ont atteint six tonnes de matière sèche par hectare. Cela correspond au niveau de rendement typique de la région de Bâle-Campagne.

Tableau 4: Rendements moyens du blé d'automne 1 et 2 (1985–2019)

	NOFERT	0,7 UGBF			1,4 UGBF			CONMIN
		BIODYN 1	BIOORG 1	CONFYM 1	BIODYN 2	BIOORG 2	CONFYM 2	
† MS/ha	2,51	3,68	3,56	4,71	4,01	3,96	5,05	5,04
0,7/1,4		92%	90%	93%	100%	100%	100%	
BIO/CON		77%		100%	79%		100%	

Les deux procédés biologiques, tout comme les deux procédés conventionnels, ne se distinguent que peu l'un de l'autre dans l'évolution de leur rendement (Figure 11). Grâce à l'utilisation de variétés modernes, les rendements de tous les systèmes de culture ont augmenté. Dans les deux dernières périodes de rotation culturale, les rendements du système biodynamique ont été plus élevés que ceux du système organo-biologique. Cela pourrait être lié aussi bien à la culture de la variété Wiwa, issue de la sélection biodynamique, qu'à la structure légèrement meilleure du sol et à l'activité biologique plus élevée en BIODYN par rapport à BIOORG. En outre, au printemps, les teneurs en Nmin en BIODYN sont toujours légèrement plus élevées que celles en BIOORG. Il est par ailleurs intéressant de noter que le procédé non fertilisé NOFERT permet toujours d'obtenir un rendement d'environ deux tonnes de grains par hectare.

Le blé d'automne 1 occupe une position plus favorable au sein de la rotation culturale que le blé d'automne 2. Au cours des quatre premières PRC, il a bénéficié de l'effet favorable des pommes de terre en tant que précédent cultural, avec ou sans engrais vert. La proximité de la prairie temporaire a sans doute également eu une influence positive sur le rendement du blé 1.

Dans les deux procédés biologiques, le rendement en grains du blé d'automne 1 et du blé d'automne 2 est en moyenne inférieur de 18 % et 23 %, respectivement, par rapport aux deux procédés conventionnels. Cette petite différence peut être liée à la position dans la rotation culturale. Depuis la 6^e PRC, la variété susmentionnée Wiwa est utilisée pour le blé d'automne 1. Pour le blé d'automne 2, c'est la variété conventionnelle Runal qui est utilisée. Jusqu'en 2015, les mêmes variétés de blé étaient cultivées aux deux positions de la rotation culturale.

Les rendements des procédés ayant un niveau de fumure réduit sont en moyenne inférieurs de 8 % à ceux obtenus avec le niveau de fumure usuel. Dans ce contexte, il convient de noter que, malgré un apport réduit d'engrais, le procédé convention-



Moisson du bord d'une parcelle de blé d'automne. Seule la partie centrale de la parcelle est utilisée pour déterminer le rendement exact.

nel CONFYM 1 permet d'obtenir un rendement plus élevé que les procédés biologiques avec fumure usuelle. Ce résultat est probablement aussi dû à la protection chimique des cultures, plus efficace, et aux engrais azotés directement disponibles pour les plantes utilisés dans les procédés conventionnels. Toutefois, en cas de fertilisation réduite, la teneur en humus et, par conséquent, les stocks d'azote dans le sol diminuent (voir chapitre «Dynamique des éléments nutritifs»).

Rendement en paille

Pour l'élevage, le rendement en paille est également important, car la paille est utilisée en litière et retourne au champ sous forme de fumier. Bien que des raccourcisseurs de tige (CCC ou Moddus) aient été utilisés dans les procédés conventionnels, le rendement en paille des systèmes biologiques est inférieur de 8 à 10 % à celui des systèmes conventionnels. La différence de rendement est moins importante pour la paille que pour le grain.

Tableau 5: Rendements moyens en paille du blé d'automne 1 et 2 (1985–2019)

		0,7 UGBF			1,4 UGBF			
	NOFERT	BIODYN 1	BIOORG 1	CONFYM 1	BIODYN 2	BIOORG 2	CONFYM 2	CONMIN
t MS/ha	4,14	6,17	5,82	6,69	7,20	6,86	8,02	7,55
0,7/1,4		86 %	85 %	83 %	100 %	100 %	100 %	
BIO/CON		92 %		100 %	90 %		100 %	

Facteurs de rendement

Dans le blé d'automne, les facteurs de rendement ont obtenu des résultats nettement meilleurs dans les procédés conventionnels que dans les procédés biologiques: le nombre de tiges portant des épis par m² était nettement plus élevé en CONFYM 2 (571 tiges) qu'en BIOORG 2 (383 tiges). Le poids de mille grains s'élevait à 42 g en CONMIN contre 39 g en BIOORG 2.

Qualité des produits

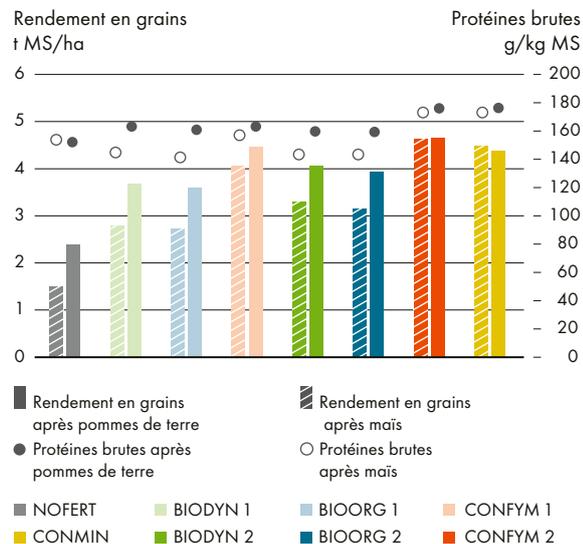
Les paramètres tels que les teneurs en minéraux, en glucides, en protéines ou en acides gras sont des caractéristiques importantes déterminant la qualité nutritionnelle du blé. En outre, des caractéristiques techniques, qui influencent par exemple la qualité boulangère, jouent un rôle central. L'essai DOC a permis d'examiner si et dans quelle mesure les systèmes de culture influencent les critères de qualité.

Les teneurs en protéines brutes du blé conventionnel étaient nettement plus élevées que celles du blé biologique (Figure 12). Fait intéressant, dans les procédés biologiques, la différence entre le niveau de fumure 1 et le niveau de fumure 2 n'entraîne pas d'amélioration significative des teneurs en protéines brutes.

Quant à l'effet du précédent cultural, dans les procédés biologiques, les pommes de terre ont eu un impact nettement plus important sur le rendement en grains que sur les teneurs en protéines brutes par rapport au maïs ensilage. En revanche, dans les procédés conventionnels, l'influence du précédent cultural n'a pas pu être démontrée. Dans les procédés bio, l'approvisionnement en azote a été plus uniforme tout au long du développement du blé lorsque celui-ci a été cultivé après des pommes de terre plutôt qu'après du maïs. Cela a également eu un impact sur la teneur en protéines brutes. Le procédé avec fumure réduite CONFYM 1 a enregistré des teneurs en protéines brutes et des rendements en grains nettement plus élevés que les systèmes biologiques avec fumure usuelle (BIOORG 2, BIODYN 2).

S'agissant des macronutriments et micronutriments, de la teneur en acides aminés et en sucres et de la qualité boulangère, aucune influence significative liée au système n'a été constatée. Le potentiel antioxydant ne différait pas non plus entre les systèmes.

Figure 12: Rendement du blé d'automne et teneurs en protéines brutes



Procédés de l'essai DOC avec du maïs et des pommes de terre comme précédents culturaux. Les données représentent les moyennes des années 2003 et 2010.



Les différents procédés n'ont aucune influence sur de nombreuses caractéristiques qualitatives du blé.

Mycotoxines

Les mycotoxines jouent un rôle important dans la qualité du blé. Il s'agit de trichothécènes qui résultent d'infections du grain par des champignons du genre *Fusarium* et peuvent nuire à la santé humaine et animale, même à de faibles concentrations. Parmi une série de mycotoxines analysées, seules le déoxynivalénol (DON) et le nivalénol (NIV) ont été détectés en faibles quantités dans tous les systèmes de culture, sans différences liées aux procédés. Le DON, la mycotoxine la plus fréquente, est environ dix fois moins toxique que le NIV.

Pommes de terre

Des pommes de terre de semence prégermées ont été plantées; dans les procédés conventionnels, elles ont généralement été traitées avec des fongicides. Depuis 2006, les pommes de terre ne sont plus cultivées après le mélange trèfles-graminées, mais après le soja ou le blé d'automne. Depuis, elles enregistrent une tendance positive en matière de rendement, quel que soit le procédé.

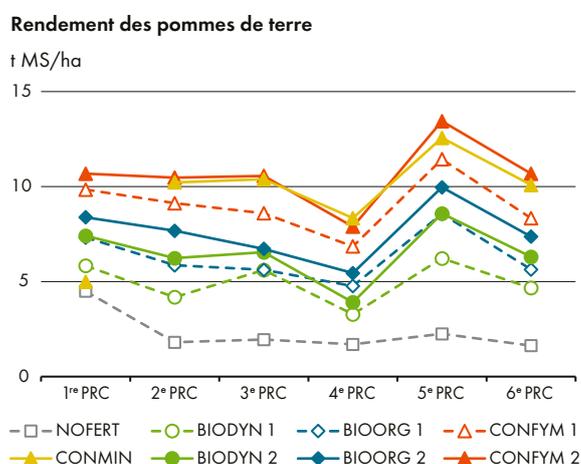
Les rendements en tubercules étaient en moyenne inférieurs de 35 % pour BIOORG 2, voire de 42 % pour BIODYN 2, par rapport à ceux de CONFYM 2. Les pommes de terre des procédés bio présentent souvent une carence en potassium et en azote. En outre, la période de végétation des pommes de terre en BIODYN est raccourcie. En effet, aucun fongicide n'étant autorisé dans ce procédé, les plantes sont attaquées plus tôt par le mildiou (*Phytophthora infestans*). Afin de protéger les tubercules, les fanes sont généralement broyées relativement tôt. Les traitements préventifs avec des pro-



Plantes de pommes de terre buttées dans l'essai DOC

duits cupriques (hydroxyde de cuivre, oxysulfate de cuivre, sulfate de cuivre) permettent aux plantes en BIOORG d'avoir une phase végétative un peu plus longue par rapport à BIODYN, où le cuivre n'est pas autorisé. En Suisse, la quantité de cuivre autorisée dans la culture de pommes de terre s'élève aujourd'hui à 4 kg par hectare, soit une quantité nettement plus faible que par le passé. Le cuivre présent dans le sol constitue un danger potentiel permanent pour les micro-organismes et les mollusques, raison pour laquelle on cherche des produits alternatifs.

Figure 13: Évolution des rendements en tubercules



Dans le procédé CONFYM 2, les pommes de terre reçoivent 37 % de la quantité de fumier de l'ensemble de la PRC, en BIOORG 2 seulement environ 25 %. Pendant la courte période de végétation des systèmes biologiques, les éléments nutritifs apportés par le fumier ne peuvent être transformés que partiellement. Voilà pourquoi les plantes des procédés conventionnels recevant des engrais minéraux sont mieux nourries.

Pour les pommes de terre aussi, les résultats du procédé CONFYM 1, particulièrement efficace, méritent d'être soulignés: malgré une fumure réduite,

Tableau 6: Rendements moyens en tubercules des pommes de terre sur 15 années de culture (1985–2019)

	NOFERT	0,7 UGBF			1,4 UGBF			
		BIODYN 1	BIOORG 1	CONFYM 1	BIODYN 2	BIOORG 2	CONFYM 2	CONMIN
t MS/ha	1,87	4,79	6,09	8,87	6,32	7,44	10,61	10,32
0,7/1,4		76 %	82 %	84 %	100 %	100 %	100 %	
BIO/CON			61 %	100 %		66 %	100 %	

ce procédé a atteint des rendements plus élevés que les procédés bio recevant la fumure usuelle.

Dans la troisième PRC, on a renoncé au cuivre en BIOORG, raison pour laquelle les rendements étaient au même niveau qu'en BIODYN. Dans les autres PRC, les rendements étaient généralement plus élevés en BIOORG qu'en BIODYN. Cela souligne l'importance de la protection phytosanitaire dans cette culture très sensible.

Prairie temporaire

Les rendements en matière sèche indiqués pour les prairies temporaires (mélange trèfles-graminées) correspondent aux sommes respectives de jusqu'à cinq coupes par an pour les deux années principales d'utilisation (Figure 14). Les coupes de nettoyage effectuées l'année de l'ensemencement ou en début d'année ne sont pas prises en compte. Le mélange trèfles-graminées est semé en septembre et la prairie temporaire n'est retournée qu'au troisième printemps après l'ensemencement, de sorte que le sol n'est pas labouré pendant deux ans et demi.

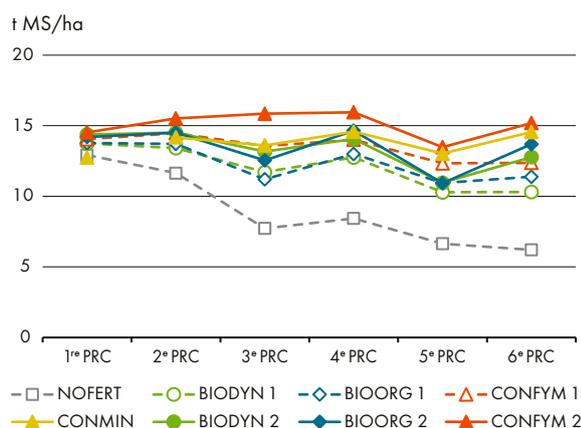
La première année principale d'utilisation, la différence de rendement entre les systèmes biologiques et conventionnels ayant le même niveau de fumure était relativement faible (10 à 11 %). CONFYM 2 présentait le rendement moyen le plus élevé. Par rapport à CONFYM 2, le rendement des deux procédés bio avec fumure réduite était inférieur de 19 %, contre 40 % pour le procédé non fertilisé (Tableau 7).

Si l'on considère la moyenne de tous les procédés, la seconde année principale d'utilisation, les rendements étaient inférieurs de 12 % à ceux de la première année. Les différences de rendement relativement faibles entre les procédés biologiques et conventionnels s'expliquent par le fait que, dans les systèmes bio, le trèfle contenu dans le mélange fixe davantage d'azote atmosphérique à l'aide de rhizobiums. En outre, la longue période de croissance du mélange trèfles-graminées et la forte pénétration des racines dans le sol y contribuent. Le trèfle

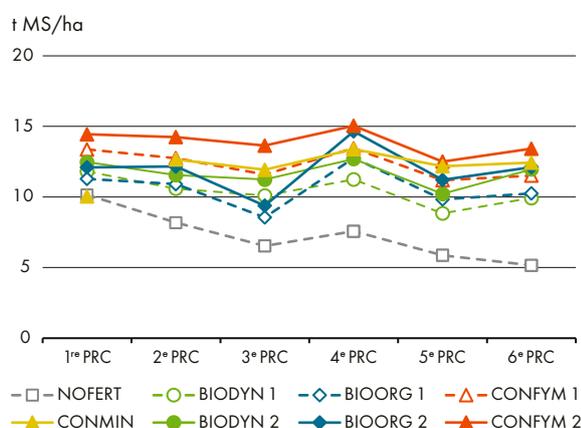
contenu dans le mélange a fixé 178 à 300 kg de N par hectare et par an. Par ailleurs, les racines du mélange trèfles-graminées étaient fortement colonisées par des champignons mycorhiziens. Ces derniers aident les plantes à absorber les éléments nutritifs.

Figure 14: Évolution du rendement des prairies temporaires

Rendement des prairies temporaires (1^{re} année principale d'utilisation)



Rendement des prairies temporaires (2^{de} année principale d'utilisation)



Évolution du rendement des prairies temporaires de la 1^{re} et la 2^{de} année principale d'utilisation (en sommes de 4 à 5 coupes par an).

Tableau 7: Rendements moyens des prairies temporaires sur 30 années de production par procédé

	0,7 UGBF				1,4 UGBF			
	NOFERT	BIODYN 1	BIOORG 1	CONFYM 1	BIODYN 2	BIOORG 2	CONFYM 2	CONMIN
t MS/ha	7,40	10,92	11,25	12,72	12,31	12,58	14,48	13,25
0,7/1,4		89%	89%	88%	100%	100%	100%	
BIO/CON			87%	100%		90%	100%	

Maïs

Le maïs a été introduit dans l'essai DOC au cours de la quatrième période de rotation culturale, car il jouait un rôle de plus en plus important dans la pratique agricole en tant que fourrage grossier destiné aux bovins.

Avec jusqu'à 20 tonnes de matière sèche par hectare, le maïs présente un rendement nettement supérieur à celui de la prairie temporaire (Figure 15), mais il constitue une source fourragère moins variée.

Avec la fumure usuelle, les rendements en maïs des procédés biologiques étaient inférieurs de 11 et 15 %, respectivement, à ceux de CONFYM 2. Pour ce qui est de la fumure réduite, la différence par rapport à CONFYM 1 était de 10 %. Sur les surfaces non fertilisées de NOFERT, la récolte était deux fois moins importante. La faible différence de rendement entre les systèmes biologiques et les systèmes conventionnels s'explique par le fait que le maïs a une longue période de croissance et peut donc absorber, jusqu'à l'automne, l'azote minéralisé à partir des réserves du sol et des engrais de ferme. À ce jour,

la pression des maladies et des ravageurs dans le maïs reste faible. Dans tous les systèmes, la pyrale du maïs est régulée à l'aide de guêpes parasitoïdes du genre *Trichogramma*.

Figure 15: Évolution des rendements en maïs ensilage

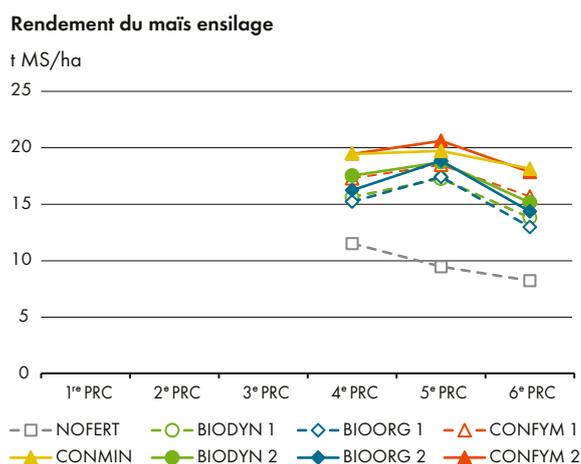


Tableau 8: Rendements moyens en maïs sur 9 années de production par procédé

	NOFERT	0,7 UGBF			1,4 UGBF			CONMIN
		BIODYN 1	BIOORG 1	CONFYM 1	BIODYN 2	BIOORG 2	CONFYM 2	
t MS/ha	9,74	15,57	15,21	17,15	17,14	16,48	19,31	19,12
0,7/1,4		91 %	92 %	89 %	100 %	100 %	100 %	
BIO/CON		90 %		100 %	87 %		100 %	



Dans les parcelles expérimentales, le maïs ensilage est récolté à la fin de l'été.

Soja

Tout comme le maïs, le soja a été introduit au cours de la quatrième période de rotation culturale. Les progrès réalisés dans la sélection ont permis de cultiver des variétés tolérantes au froid même dans des régions au climat plus septentrional. En outre, le soja est un produit très demandé, aussi bien dans l'alimentation humaine que dans l'alimentation animale. Grâce à la symbiose avec la bactérie *Bradyrhizobium japonicum*, le soja est largement autosuffisant en azote, ce qui le rend bien adapté à la rotation culturale biologique. Cette bactérie doit être apportée par inoculation lors du semis, car elle n'est pas naturellement présente dans les sols suisses. L'apport d'azote ne constitue donc pas un élément limitant pour le soja, contrairement à ce qui a été constaté pour les autres cultures de la rotation. Par ailleurs, dans le soja, la pression des ravageurs et des maladies reste encore faible.

Favorisé par ces facteurs, le soja atteint des rendements équivalents dans les systèmes biologiques et conventionnels (Figure 16). Aucun procédé de culture n'a reçu de fumure azotée. Tous les procédés recevant la fumure usuelle présentent des rendements comparables. En revanche, le procédé CONFYM 1, avec une fumure réduite, donne des rendements légèrement supérieurs à ceux des deux procédés biologiques du niveau de fumure 1 (Tableau 9). Cela laisse supposer que le phosphore et aussi le potassium constituent des éléments limitant la croissance en cas de fumure réduite. Un bon approvisionnement en phosphore est essentiel pour assurer une fixation biologique de l'azote.



Plante de soja en fleur

Figure 16: Évolution du rendement en graines du soja

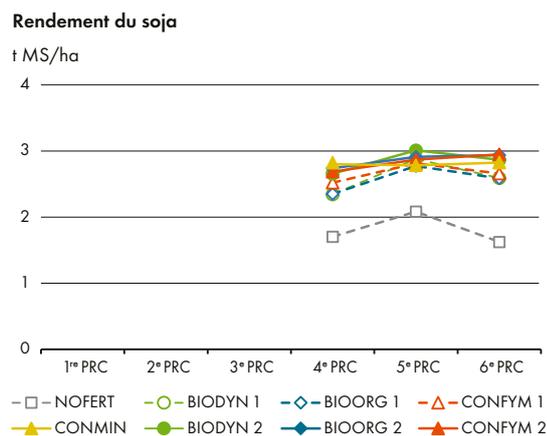


Tableau 9: Rendements moyens du soja sur 9 années de production par procédé

		0,7 UGBF			1,4 UGBF			
	NOFERT	BIODYN 1	BIOORG 1	CONFYM 1	BIODYN 2	BIOORG 2	CONFYM 2	CONMIN
t MS/ha	1,80	2,61	2,57	2,67	2,85	2,86	2,84	2,81
0,7/1,4		92%	90%	94%	100%	100%	100%	
BIO/CON		97%		100%	101%		100%	

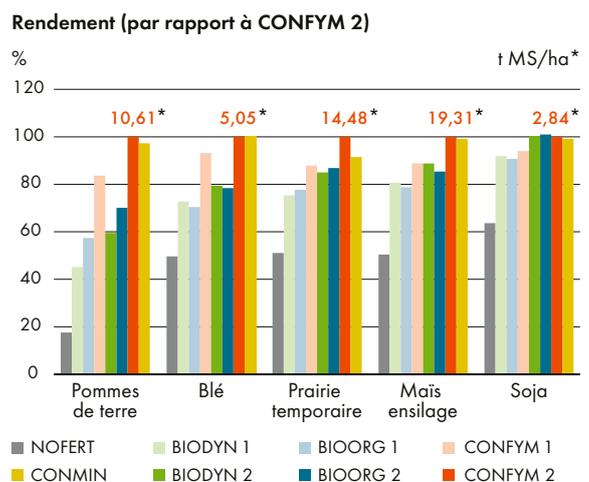


Chaque année, trois cultures sont cultivées dans l'essai DOC. En 2023, il s'agissait de maïs, de pommes de terre et de soja.

Comparaison des cultures

La comparaison des rendements dans la Figure 17 montre de manière explicite la différence de sensibilité des plantes au procédé de culture. Le soja semble plutôt indifférent au fait d'être cultivé en bio ou non, contrairement aux pommes de terre. Outre l'effet limitant de l'azote et du potassium, les maladies et les ravageurs jouent un rôle important dans le rendement des pommes de terre. Récemment introduit sous notre climat, le soja n'a encore que peu de problèmes à cet égard. Les rendements plus faibles obtenus avec la fumure réduite, y compris dans les légumineuses, montrent qu'avec 0,7 UGBF/ha, l'approvisionnement en P et en K dans les procédés bio est à peine suffisant, même dans un sol fertile, car on n'utilise pas ou que peu d'engrais complémentaires. Voilà pourquoi, à long terme, les procédés bio sont tributaires des engrais commerciaux minéraux ou organiques homologués, ou ont recours à des engrais de recyclage tels que le compost de déchets verts et les digestats solides ou liquides.

Figure 17: Rendement moyen de toutes les cultures principales



Rendement moyen comparativement au procédé CONFYM 2 de la 2^e à la 6^e PRC; maïs et soja seulement de la 4^e à la 6^e PRC.

En bref: rendement des cultures

Les systèmes bio ont enregistré des rendements inférieurs à ceux des systèmes conventionnels, tout en utilisant moins d'éléments nutritifs et de produits phytosanitaires. Le soja, qui ne dépend pas de la fourniture d'azote par le sol, constitue une exception: ses rendements étaient équivalents. La différence de rendement entre les systèmes biologiques et conventionnels était faible pour les prairies temporaires, mais très importante pour les pommes de terre. Fait intéressant, avec la fumure réduite de moitié, les rendements du système conventionnel CONFYM étaient plus élevés que ceux des systèmes bio utilisant la fumure usuelle. Cela indique l'impact de la protection phytosanitaire et des éléments nutritifs facilement solubles sur les rendements, en particulier en ce qui concerne les pommes de terre et le blé. Le précédent cultural, les engrais verts et les objectifs de sélection adaptés à l'agriculture biologique peuvent encore augmenter le potentiel de rendement de la production biologique.

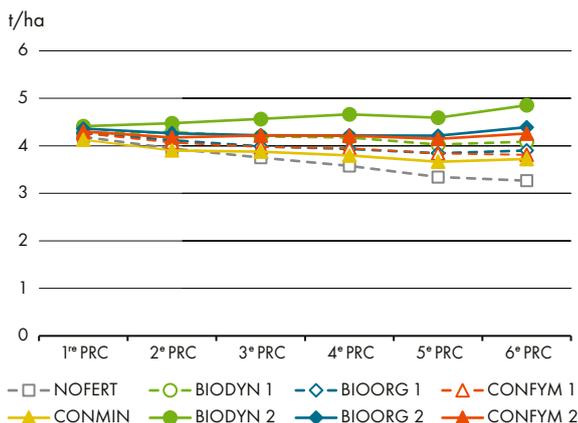
Dynamique des éléments nutritifs

Azote

La majeure partie de l'azote du sol est présente sous forme organique. L'azote minéral est très important pour la nutrition des plantes, car il est directement disponible. Si l'on considère la moyenne de tous les procédés, la teneur en Ntotal dans les 20 cm supérieurs du sol s'élevait à 1,6 g par kg de terre. Dans la couche de sol de 30 à 50 cm de profondeur, la teneur en Ntotal était environ deux fois moins élevée.

Le rapport C/N de la matière organique du sol n'a pratiquement pas changé au cours de la période d'essai DOC. La moyenne est restée constante, à $9 \pm 0,11$, et aucun effet lié aux procédés n'a pu être constaté.

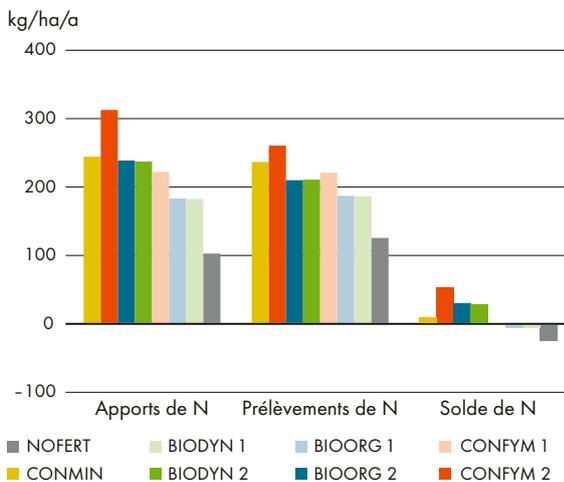
Figure 18: Stock total d'azote dans le sol



Stock d'azote dans les 20 cm supérieurs du sol. Moyenne des mesures effectuées pendant chaque PRC. Les données ont été calculées à partir des teneurs en Ntotal, en tenant compte de la densité apparente du sol, mesurée dans la première PRC.

Des stocks d'azote de 3,2 à 4,9 tonnes par hectare ont été mesurés à une profondeur de 0 à 20 cm. Dans le procédé BIODYN 2, le stock d'azote a augmenté de 9 kg par an (Figure 18). Dans les procédés BIOORG 2 et CONFYM 2, les stocks d'azote de cette couche de sol sont restés constants au fil du temps. Dans tous les autres procédés, les stocks d'azote ont diminué, diminution qui a atteint jusqu'à 20 kg par an dans le témoin non fertilisé. Ces résultats montrent que dans les procédés avec fumure réduite, les stocks d'azote dans le sol n'ont pas pu être maintenus. Autrement dit, l'utilisation de l'azote dans ces procédés n'est pas durable.

Figure 19: Charge et solde d'azote



Bilan de N comprenant les apports provenant de la fumure, de la déposition, des semences et de la fixation du N atmosphérique ainsi que les prélèvements par les produits récoltés. Moyenne de cinq PRC entre 1985 et 2019.

Des bilans de surface ont été calculés pour la période allant de 1985 à 2019. Ces bilans comparent les apports de N avec les prélèvements de N par les produits récoltés. Les apports d'azote comprennent:

- la fumure,
- la fixation symbiotique de N_2 ,
- la déposition de N,
- le N contenu dans les semences.

Dans les procédés recevant la fumure usuelle, le solde entre les apports et les prélèvements était positif, avec un excédent de 23 kg (BIODYN 2 et BIOORG 2) à 46 kg (CONFYM 2) d'azote par hectare et par an (Figure 19). Dans le système CONMIN, qui reçoit uniquement des engrais minéraux, le bilan était équilibré. Les procédés avec fumure réduite présentaient des déficits annuels compris entre 5 et 10 kg d'azote par hectare. Dans le procédé non fertilisé NOFERT, le déficit s'élevait à 31 kg par hectare et par an (Tableau 10).

Pertes d'azote par lixiviation

Les soldes d'azote négatifs en cas de fumure réduite ou d'absence de fumure montrent que la quantité de N libérée par la matière organique du sol est supérieure à celle à nouveau stockée. Toutefois, la fumure usuelle a été associée à une augmentation des stocks de N inférieure aux prévisions effectuées d'après les soldes de N. En revanche, en CONFYM 1 et en CONMIN, la diminution des stocks d'azote a été plus significative que l'on aurait pu l'imaginer en voyant les soldes négatifs.

Ces écarts s'expliquent par le fait que les pertes d'ammoniac lors de l'épandage, les pertes par dénitrification et la lixiviation des nitrates ne sont pas prises en compte dans le bilan de surface. La somme de ces pertes est comprise entre 12 et 47 kg par hectare et par an en cas de fumure usuelle.

Les variations des stocks d'azote dans les couches plus profondes du sol n'ont été étudiées que dans un second temps: en 2019 et en 2020, des échantillons de terre ont été prélevés à une profondeur de 30 à 50 cm. Les stocks de N calculés pour cette couche présentaient des différences nettement moins importantes entre les systèmes que ceux relatifs à une profondeur de 0 à 20 cm. Seul en NOFERT, l'effet de l'absence de fumure était encore observable à une profondeur de 30 à 50 cm.

Utilisation efficace de l'azote

Le bilan de surface permet également de déterminer l'efficacité d'utilisation de l'azote (NUE): celle-ci donne des indications sur la quantité de N apportée absorbée par les plantes. Une NUE supérieure à 100 % signifie que la quantité de N prélevée est

supérieure à celle apportée, et laisse donc supposer que du N est libéré de la matière organique du sol (humus). Dans les procédés recevant la fumure usuelle et en CONMIN, la NUE était comprise entre 85 et 100 % (Tableau 10). La NUE se réfère à l'ensemble des apports d'azote. Toutefois, elle montre que tant les engrais de ferme que les engrais minéraux et l'azote fixé biologiquement ont été utilisés de manière efficace dans l'essai DOC.

Fixation de l'azote atmosphérique

Les légumineuses entrent en symbiose avec des rhizobiums: dans des nodosités visibles sur les racines, ces bactéries transforment l'azote atmosphérique moléculaire (N_2) en ammonium, utilisable par les plantes pour produire des protéines. La fixation symbiotique de N_2 représentait la plus grande source de N dans tous les systèmes, sauf dans les procédés CONFYM 2 et CONMIN utilisant des engrais minéraux. La capacité de fixation des procédés avec fumure réduite était similaire à celle des procédés recevant la fumure usuelle. En revanche, en CONMIN, la capacité de fixation était nettement plus faible. C'est le trèfle des prairies temporaires qui a fixé le plus d'azote, suivi du soja et des cultures dérobées.

Pour que les rhizobiums fixent de l'azote, il faut que le sol soit bien pourvu en phosphore, en potassium et en oligo-éléments. Dans le procédé non fertilisé, la fixation de N_2 a diminué au fil du temps, ce qui est très probablement dû à la diminution des teneurs en phosphore et en potassium disponibles pour les plantes dans ces sols.

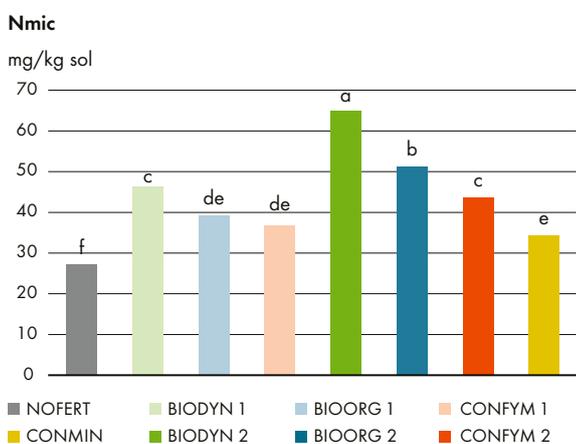
Tableau 10: Apports et prélèvements d'azote dans les procédés de l'essai DOC. Moyenne des cinq périodes de rotation culturale entre 1985 et 2019.

Quantités en kg/ha/a	Fumure	Fixation symbiotique	Déposition et semences	Prélèvements	Solde	Variation du stock du sol	Efficacité d'utilisation
NOFERT	0	75	21	128	-31,1	-26,2	133 %
BIODYN 1	47	112	21	189	-8,7	-9,1	105 %
BIOORG 1	48	111	21	190	-9,6	-10,0	106 %
CONFYM 1	85	112	21	223	-4,5	-11,2	102 %
BIODYN 2	93	122	21	214	22,9	9,3	91 %
BIOORG 2	96	119	21	213	23,7	1,2	90 %
CONFYM 2	171	117	21	264	45,9	-0,7	85 %
CONMIN	121	99	21	240	2,1	-10,0	99 %

Azote de la biomasse microbienne

Les micro-organismes du sol peuvent stocker beaucoup d'azote dans leur biomasse (Nmic). La Figure 20 indique les teneurs en Nmic du sol. Compte tenu du volume du sol et de sa densité apparente, le procédé BIODYN 2 présente jusqu'à 150 kg de Nmic par hectare. Dans le sol, la biomasse microbienne sert de réservoir temporaire de N. Après la mort des micro-organismes, causée par exemple par le gel ou le dessèchement, le N est à nouveau libéré, lorsque le sol est suffisamment humide, devenant ainsi disponible pour les plantes.

Figure 20: Biomasse microbienne



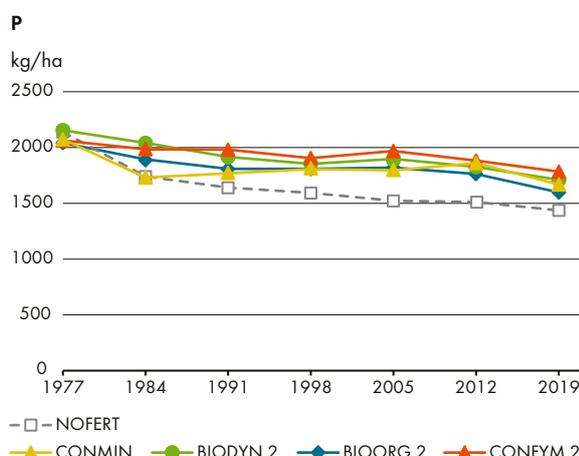
Azote microbien dans les huit procédés de l'essai DOC. Moyenne des analyses de toutes les parcelles au printemps 1998, 2006, 2012 et 2019.

Les mesures répétées de la biomasse microbienne à la fin des quatre dernières périodes de rotation culturale ont révélé que dans le procédé BIODYN 2, la quantité d'azote microbien est nettement plus importante qu'en BIOORG 2, différence qui est encore plus nette par rapport à CONFYM 2. Le procédé CONMIN affichait des valeurs similaires à celles des procédés avec fumure réduite. Le procédé NOFERT présentait les teneurs en Nmic les plus faibles.

Phosphore

Avant la mise en place de l'essai DOC en 1977, dans la sole C, les stocks de phosphore de chaque parcelle ont été relevés: à cette période, les stocks de P dans les 20 cm supérieurs du sol s'élevaient à environ 2100 kg/ha (Figure 21). Le sol était donc bien pourvu en P.

Figure 21: Stock total de phosphore jusqu'à 20 cm de profondeur



Évolution dans le temps du stock de phosphore (P) dans la couche de sol de 0 à 20 cm de profondeur dans la sole C sur six périodes de rotation culturale, en cas de gestion différenciée (n = 4).

Depuis, on observe une tendance à la baisse dans tous les systèmes de culture. Toutefois, en CONMIN (depuis sa mise en place en 1984; auparavant NOFERT), les stocks sont relativement constants. Les stocks de P en NOFERT ont diminué de près de 20 %. Les systèmes biologiques, quant à eux, présentaient des stocks de P inférieurs de 5 % en moyenne à ceux de CONFYM 2.



Dans les parcelles de l'essai DOC, le fumier est épandu manuellement.

Bilan de phosphore

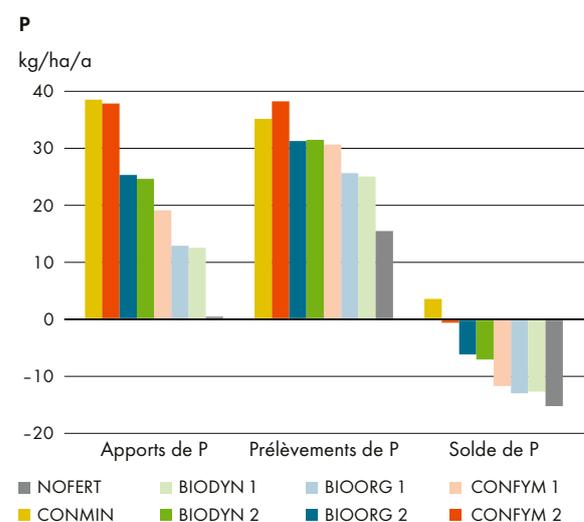
Le bilan de phosphore tient compte des apports par les engrais et les semences ainsi que des prélèvements par les produits récoltés (Figure 22). Dans le procédé CONFYM 2, les apports s'élevaient en moyenne à 40 kg de P par hectare et par an. Dans

les procédés BIODYN 2 et BIOORG 2, ils étaient inférieurs d'environ 38 %, représentant ainsi 25 à 26 kg de P par hectare et par an. Entre les procédés avec fumure réduite, les rapports étaient similaires, mais les apports se situaient à un niveau plus bas.

Avec 32 kg de P par hectare et par an, les prélèvements de P par les produits récoltés dans les procédés biologiques recevant la fumure usuelle n'étaient que 16 % plus faibles qu'en CONFYM 2 (38 kg de P). Cela indique que le P provenant de la fumure est utilisé de manière plus efficace dans les systèmes biologiques. Parallèlement, on constate toutefois une diminution continue des stocks de P dans les sols de tous les systèmes, à l'exception de CONMIN.

En raison de la faible solubilité du phosphore, ce sont surtout les cultures de la première PRC qui ont profité du stock de phosphore initialement élevé. Par ailleurs, des différences spécifiques aux systèmes en matière de disponibilité du P ont été mises en évidence dès le début de l'essai DOC (Figure 23).

Figure 22: Charge et solde de phosphore

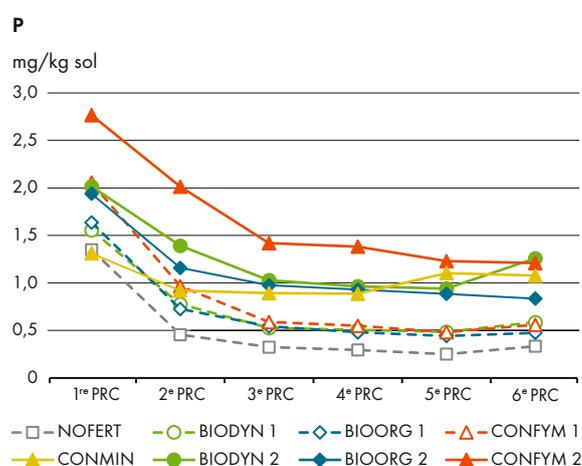


Bilan de phosphore résultant des apports par la fumure et les semences ainsi que des prélèvements par les produits récoltés. Moyenne des cinq périodes de rotation culturale entre 1985 et 2019.

Grâce à l'épandage d'engrais minéraux facilement disponibles, dans le procédé CONFYM 2, la disponibilité du P est plus élevée qu'en BIODYN 2 et en BIOORG 2. Si l'on prend pour référence les recommandations actuelles en matière de fertilisation des PRIF, la disponibilité du P dans les procédés CONFYM 2 et BIODYN 2 était encore «satisfaisante» après 42 ans (Figure 23).

Toutefois, le procédé de culture BIOORG 2 et tous les procédés utilisant la fumure réduite présentaient déjà un approvisionnement «médiocre» au plus tard depuis la quatrième PRC. Dans la pratique agricole, une éventuelle baisse de rendement est généralement compensée par une fertilisation supplémentaire. Les soldes négatifs de P, l'immobilisation rapide et la lixiviation vers les couches plus profondes du sol sont autant de causes de la diminution des teneurs en phosphore soluble.

Figure 23: Phosphore soluble



Teneurs en phosphore soluble du sol relevées dans des échantillons de terre prélevés après la récolte. Moyennes d'analyses annuelles (1978-2006, 2008-2010) et bisannuelles (2010-2018) par parcelle; méthode CO₂.

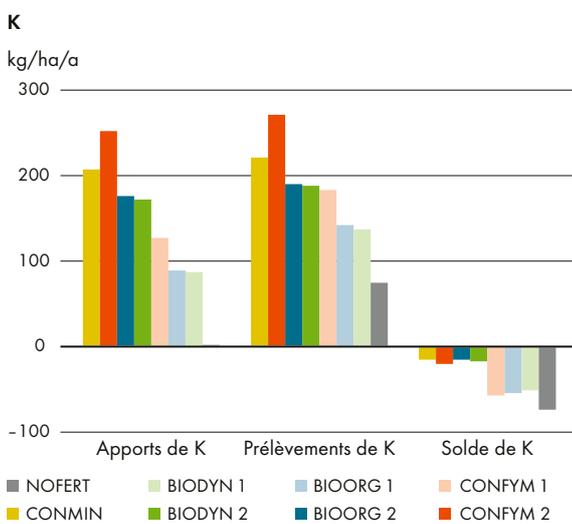


En raison du temps frais après le semis, des symptômes de carence en P étaient visibles sur le maïs dans les procédés biologiques avec fumure réduite.

Potassium

Le bilan potassique repose également sur la différence entre les apports par la fertilisation et les semences et les prélèvements par les produits récoltés. Le procédé CONFYM 2 a reçu l'apport de K le plus élevé, soit 251 kg de K par hectare et par an. Dans tous les procédés de culture, le prélèvement a été supérieur à l'apport, ce qui s'est traduit par un bilan négatif dans tous les procédés (Figure 24).

Figure 24: Charge et solde de potassium

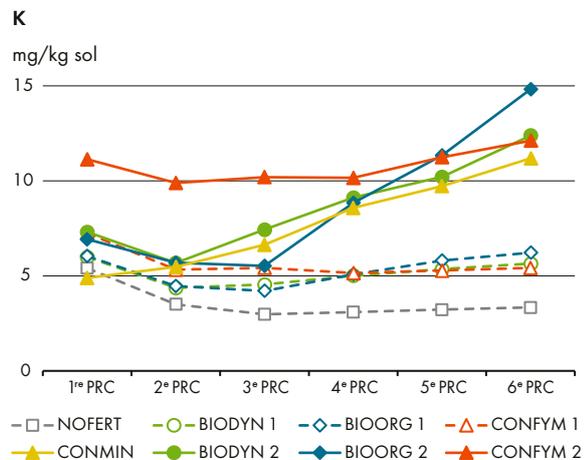


Bilan potassique résultant des apports par la fertilisation et les semences ainsi que des prélèvements par les produits récoltés. Moyenne des cinq périodes de rotation culturale entre 1985 et 2019.

La disponibilité du potassium présente une nette différenciation entre les systèmes de culture et les niveaux de fumure (Figure 25). Fait remarquable, la disponibilité du K augmente dans tous les procédés de culture recevant la fumure usuelle et dans le procédé CONMIN, dans lequel la fertilisation peut être dosée avec précision depuis les années 1990. Depuis lors, dans les procédés biologiques, l'apport de potassium a en partie sensiblement augmenté, mais le prélèvement n'a pas augmenté dans la même mesure.

Néanmoins, tous les systèmes de culture sont actuellement classés au niveau de fertilité «médiocre». Dans la pratique agricole, une fumure potassique accrue serait recommandée. Le procédé témoin non fertilisé NOFERT est classé au niveau de fertilité «pauvre» depuis le milieu des années 1980. Plusieurs études ont démontré que la disponibilité réduite du potassium limitait la croissance des plantes dans le procédé NOFERT.

Figure 25: Potassium soluble



Teneurs en potassium soluble. Moyennes d'analyses annuelles (1978-2006, 2008-2010) et bisannuelles (2010-2018) par parcelle; méthode CO₂.

Entrées d'éléments nutritifs par les racines et transfert d'azote

Les entrées de carbone et d'azote par les racines constituent la principale source pour le maintien et la formation de la matière organique du sol (MOS). Les entrées racinaires comprennent les racines et les substances libérées dans le sol par ces dernières au cours de la période de croissance de la plante. Ce phénomène, appelé rhizodéposition, comprend des substances telles que les exsudats racinaires solubles et le mucigel (substance visqueuse enrobant les racines), mais aussi les cellules racinaires détachées, les poils racinaires et les radicules, qui sont rapidement dégradés par les micro-organismes dans le sol. La somme de ces entrées est appelée «apports souterrains de carbone et d'azote».

Entrées de carbone

Les modèles scientifiques qui estiment les entrées de carbone (C) dans les sols et constituent la base des rapports internationaux sur le climat portaient jusqu'à présent du principe que les apports souterrains de C étaient proportionnels à la biomasse aérienne: plus le rendement d'une culture est élevé, plus les apports souterrains de C au sol seraient importants. Cela signifierait que dans les systèmes de culture conventionnels, les entrées de C dans le sol sont plus élevées que dans les systèmes biologiques. Des résultats de l'essai DOC ont permis de réfuter cette hypothèse pour le blé d'automne et le maïs.

Ces résultats montrent que les entrées souterraines sont dans une large mesure indépendantes de la production de biomasse aérienne et que les systèmes biologiques ont même tendance à présenter des apports souterrains de C légèrement plus élevés malgré des rendements plus faibles. La part des apports souterrains de C dans l'assimilation totale de C était comprise entre 18 et 26 %. La rhizodéposition était essentielle à cet égard: elle représentait 57 à 63 % des apports souterrains de C dans le maïs et 54 à 58 % dans le blé d'automne (Figure 26).

Transfert d'azote dans la prairie temporaire

Les apports de C et de N sont essentiels au maintien ou à la formation de la MOS. Dans l'essai DOC, le rapport C/N de la MOS est resté relativement constant, aux alentours de neuf. Autrement dit, pour chaque kg de C, environ 0,11 kg de N est lié à long terme. C'est une valeur relativement satisfaisante, les plantes disposent donc de suffisamment d'azote.

L'exemple de la prairie temporaire dans l'essai DOC permet de souligner l'impact des entrées souterraines racinaires du trèfle sur la fixation biologique de N₂ du mélange. Dans le trèfle, les apports souterrains de N étaient proportionnels à l'assimilation de N par les parties aériennes, contrairement à ce qui a été constaté pour le C dans le maïs et le blé. La première année d'utilisation, le N stocké dans les racines et la rhizodéposition de N augmentent au cours de la période de végétation. Lors de la seconde année d'utilisation, le N racinaire diminue à nouveau, mais les entrées par la rhizodéposition augmentent nettement. Cela traduit un taux de renouvellement des racines très élevé, dû à une fauche fréquente et au vieillissement du trèfle.

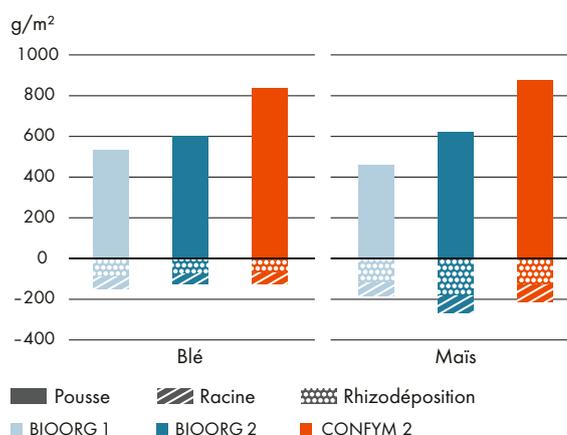
Malgré une nette différence en matière d'assimilation du N entre les procédés de l'essai DOC, la proportion de N souterrain était toujours constante et représentait environ 29 % du N total. La propor-

tion de la rhizodéposition dans le N souterrain est passée de 35 % à 75 % entre la fin de la première année principale d'utilisation et la fin de la seconde.

Les graminées de la prairie temporaire ont bénéficié des entrées d'azote dues à la rhizodéposition du trèfle. Deux études indépendantes réalisées dans le cadre de l'essai DOC ont mis en évidence que dans les systèmes biologiques, environ 40 % du N absorbé par les graminées provenaient du trèfle et donc principalement de la fixation biologique de N₂.

La prise en compte des apports souterrains de N et du transfert de N du trèfle aux graminées a un impact important sur l'estimation de la quantité de N fixée dans les prairies temporaires. Celle-ci est en effet nettement plus basse si l'on ne prend pour base que la partie aérienne. Ainsi, en 2007, en BIOORG 2, une quantité d'azote atmosphérique fixé 1,8 fois supérieure à celle obtenue par les méthodes d'estimation traditionnelles a été déterminée.

Figure 26: Répartition des assimilats entre les pousses, les racines et la rhizodéposition dans le blé et le maïs



Comparaison des procédés BIOORG 1, BIOORG 2 et CONFYM 2.

En bref: dynamique des éléments nutritifs

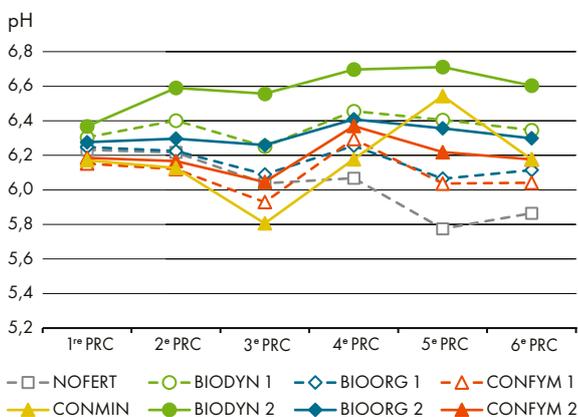
Tout comme les stocks de C org, les stocks de N dans les 20 cm supérieurs du sol n'ont augmenté que dans le procédé BIODYN 2. En BIOORG 2 et en CONFYM 2, les stocks sont restés constants. L'absence ou la réduction d'apports d'engrais de ferme ont entraîné une diminution des stocks de N. La fixation de l'azote atmosphérique par la symbiose des légumineuses avec les rhizobiums représentait une part très importante de l'approvisionnement total en azote dans tous les systèmes, mais elle était nettement réduite dans les systèmes sans engrais de ferme (CONMIN et NOFERT). Les stocks de phosphore ont diminué dans tous les systèmes et dans les systèmes biologiques plus fortement que dans les systèmes conventionnels en raison d'une fumure limitée. Jusqu'à présent, à l'exception de NOFERT, les symptômes de carence sont rares, ce qui suggère une utilisation efficace du P dans les systèmes biologiques. L'approvisionnement en potassium présente un solde négatif dans tous les procédés. Toutefois, la disponibilité du K affiche une tendance positive dans les trois dernières périodes de rotation culturale.

Qualité des sols

pH

Dans les systèmes biologiques, le pH du sol s'est maintenu à un niveau stable (entre 6,6 et 6,3) pendant toute la durée de l'essai. Dans les systèmes conventionnels, le pH a baissé au cours des 25 premières années pour atteindre des valeurs inférieures à 6, considérées comme critiques pour ce type de sol selon les PRIF. Cette évolution est due à l'effet acidifiant des engrais minéraux.

Figure 27: Évolution de la réaction du sol



Les procédés CONFYM et CONMIN ont été chaulés dans les années 1999 à 2005 (n = 12).

Le maintien d'un pH supérieur à 6 est important pour la nutrition des plantes, l'activité biologique et la structure du sol. Afin d'augmenter à nouveau le pH dans les procédés conventionnels, au début de la quatrième PRC, en 1999, les sols ont été chaulés avec cinq tonnes d'équivalents CaO, pour les assainir, et fertilisés avec du nitrate d'ammoniaque calcaire à effet basique. Le succès de cette mesure s'est traduit par une augmentation du pH dans les systèmes conventionnels (Figure 27). CONMIN a reçu un chaulage supplémentaire, car le pH y était toujours inférieur à celui en CONFYM. Toutefois, la tendance à l'acidification semble se poursuivre après le chaulage.

Structure du sol

Agrégats

Les agrégats du sol résultent de l'assemblage de particules minérales d'argile et de particules organiques. Ils sont stabilisés par des organismes du sol à l'aide de hyphes et de biofilms. C'est ainsi que se forment des structures relativement solides qui ne se dissolvent pas dans l'eau. Le taux d'agrégats est un indicateur de la stabilité structurelle du sol.

Un sol riche en agrégats stables à l'eau se caractérise par une structure grumeleuse, est moins battant et mieux protégé contre l'érosion grâce à une meilleure infiltration de l'eau. Il permet une meilleure aération et oxygénation des racines. Le sol sur loess relativement peu structuré de l'essai DOC présente une tendance à la battance. Les sols des procédés biologiques sont moins battants.

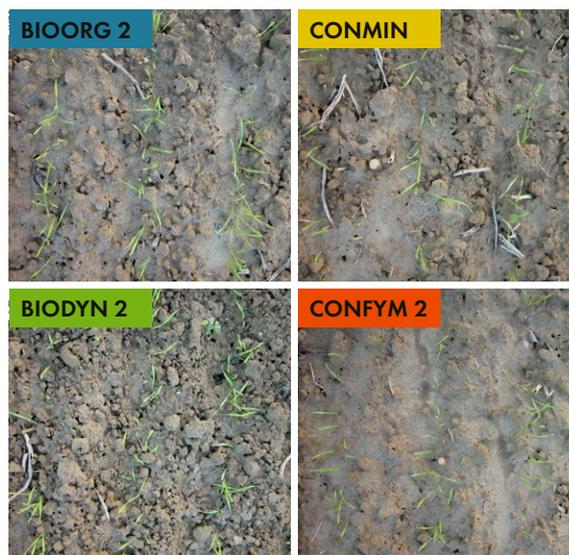
Fait intéressant, la stabilité des agrégats présente une forte saisonnalité (Tableau 11). Particulièrement en été, lorsque le sol était sec, la stabilité des agrégats dans le sol sur loess était faible dans tous les procédés. Les deux systèmes biologiques présentaient la plus grande proportion d'agrégats stables. Cela peut être dû au fait que leurs sols sont plus riches en micro-organismes et, pour ce qui est de BIODYN, également en humus, ce qui favorise la formation d'agrégats. Au printemps, les différences étaient moins importantes. Dans des conditions humides, les hyphes fongiques et les biofilms des bactéries restent efficaces en tant que «colles».

Tableau 11: Proportion d'agrégats stables à l'eau dans les sols de l'essai DOC

	Proportion d'agrégats stables	Significativité
BIODYN 2	50,1 %	a
BIOORG 2	44,2 %	ab
CONFYM 2	38,4 %	b
CONMIN	38,4 %	b
Moyenne générale de tous les procédés		
Mars 2000	55,3 %	a
Mars 2003	48,2 %	b
Juillet 2003	24,8 %	c

Densité apparente

La densité apparente du sol dans l'essai DOC est élevée, car le sol sur loess est principalement constitué de particules fines de limon. Grâce à la construction biologique, par exemple à l'aide de vers de terre et de racicelles, ce sol peut néanmoins former un système de pores fins et grossiers. Le travail du sol permet de l'ameublir temporairement. Sous l'influence de la rotation des cultures et du travail du sol, la densité apparente évolue au cours d'une période de végétation. Les densités apparentes ne diffèrent que très peu entre les systèmes de culture. Toutefois, une variation de plus d'un dixième peut déjà être significative pour ce paramètre. Finalement, en raison du matériel de départ, le sol reste pauvre en pores grossiers, a tendance à présenter des zones humides (eau stagnante) et se réchauffe lentement.



La stabilité des agrégats influence la tendance des sols à la battance.

Tableau 12: Densité apparente dans les sols de l'essai DOC en kg/dm³

Niveau	Densité apparente 1 ^{re} PRC	SD	Densité apparente 3 ^e PRC	SD
NOFERT	1,32	0,046	1,26	0,035
BIODYN 1	1,33	0,043	1,20	0,039
BIOORG 1	1,32	0,039	1,23	0,029
CONFYM 1	1,33	0,023	1,22	0,070
BIODYN 2	1,31	0,047	1,20	0,044
BIOORG 2	1,32	0,040	1,22	0,046
CONFYM 2	1,32	0,039	1,22	0,027
CONMIN	1,31	0,057	1,25	0,066
Moyenne	1,32		1,22	

Carbone du sol

Les sols contiennent, à l'échelle mondiale, plus de carbone que la biomasse végétale de la Terre et le dioxyde de carbone (CO₂) de l'atmosphère réunis. Ils jouent donc un rôle important dans le débat sur le changement climatique, car les terres assolées, souvent appauvries en humus, recèlent un grand potentiel de formation d'humus et donc de stockage du CO₂ atmosphérique.

Carbone organique

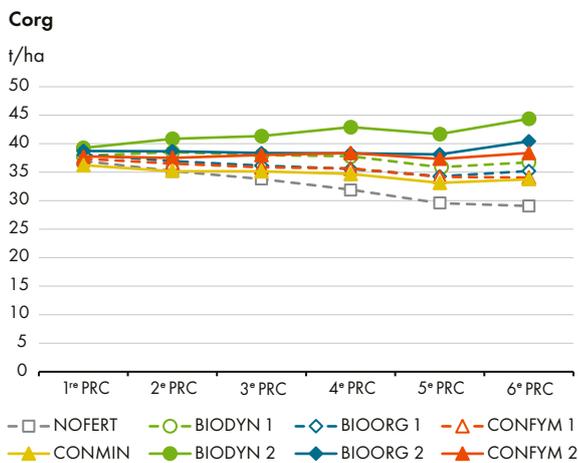
La matière organique du sol (humus) se forme à partir des résidus de la biomasse végétale et animale transformés dans le sol. Elle est composée, en

moyenne, de 58 % de C. Voilà pourquoi, pour quantifier la MOS, on mesure généralement la teneur en carbone organique (Corg; MOS = 1,725 × Corg). La MOS est l'indicateur le plus fréquemment utilisé pour analyser la qualité d'un sol en vue de son utilisation agricole.

Dans l'essai DOC, des échantillons de terre ont été prélevés chaque année après la récolte à une profondeur de 0 à 20 cm et archivés. Une grande partie de ces échantillons sur l'ensemble de la période d'essai ont été analysés de façon unitaire à la fin de la sixième PRC. Cela a permis d'exclure les facteurs d'influence liés aux changements de personnel de laboratoire, aux nouveaux appareils et aux nouvelles méthodes, et de présenter l'évolution réelle.

Ces nouvelles analyses ont mis en évidence les résultats suivants: le procédé BIODYN 2 présente la teneur en carbone organique (Corg) sensiblement la plus élevée (Figure 28). En outre, une tendance positive statistiquement confirmée a été constatée dans ce procédé. En BIOORG 2 et en CONFYM 2, les teneurs sont restées constantes; la légère augmentation observée avec ces deux procédés n'a pas pu être statistiquement confirmée. Dans tous les procédés avec fertilisation réduite et en CONMIN, les teneurs en Corg ont diminué. Sans surprise, la diminution la plus nette a été enregistrée en NOFERT.

Figure 28: Stock de carbone du sol



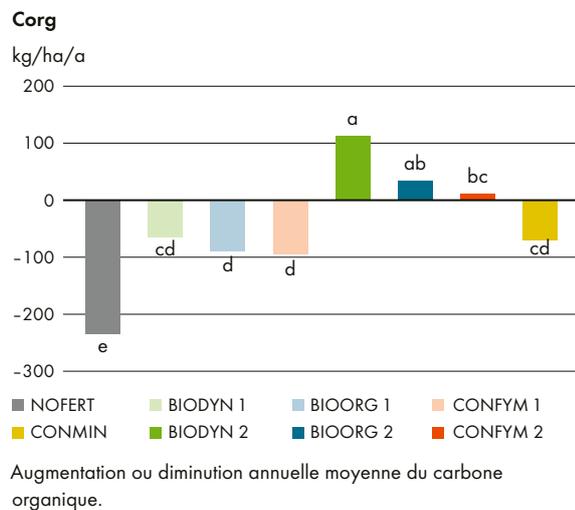
Stock de carbone dans les 20 cm supérieures du sol des huit procédés de culture (n = 12). Ces données ont été calculées à partir des teneurs en Corg et de la densité apparente du sol mesurées dans la première PRC. Pour convertir le Corg en MOS, il faut le multiplier par 1,725 (MOS = 1,725 × Corg).

Variations du stock de carbone

Le stock de carbone désigne la quantité de carbone présente dans le sol d'une surface donnée. Dans l'essai DOC, le stock de C par hectare a été calculé pour la couche supérieure du sol jusqu'à une profondeur de 20 cm (Figure 28). Pour ce faire, les scientifiques ont pris pour base la densité apparente mesurée au cours de la première PRC, lorsque ce paramètre n'était pas encore influencé par les procédés de culture.

Entre la première et la sixième PRC, les stocks de Corg en BIODYN 2 ont nettement augmenté de 12 %, tandis que ceux en BIOORG 2 et en CONFYM 2 sont restés constants. Dans cette comparaison, les procédés avec fumure réduite ont enregistré des pertes comprises entre 4 % (BIODYN 1) et 9 % (BIOORG 1, CONFYM 1 et CONMIN). Le procédé non fertilisé NOFERT a perdu 22 % par rapport au stock de carbone de la première PRC.

Figure 29: Variation du stock de carbone du sol



Augmentation ou diminution annuelle moyenne du carbone organique.

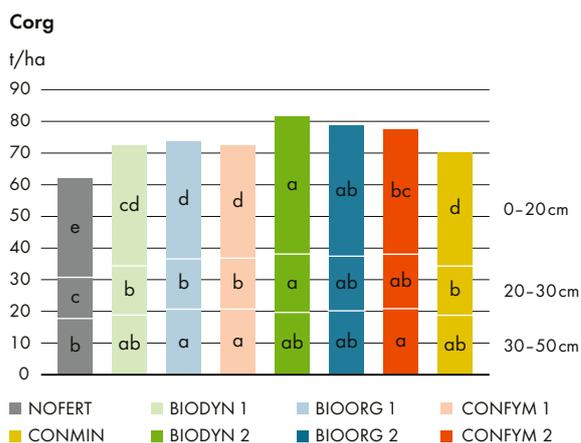
La dynamique temporelle des stocks de C permet de déduire les taux annuels moyens d'accroissement ou de perte (Figure 29). Seuls les procédés de culture recevant la fumure usuelle ont permis d'augmenter ou de maintenir le stock de Corg. Tous les procédés avec fumure réduite et CONMIN ont subi des pertes allant jusqu'à 100 kg par hectare et par an. En NOFERT, les pertes s'élevaient à 234 kg de Corg par an.

Dans la couche supérieure du sol, de 0 à 20 cm, les différences entre les procédés en ce qui concerne le Corg étaient les plus marquées. C'est dans cette couche que se trouve la principale masse racinaire et que les engrais de ferme, les engrais verts et les résidus de récolte sont incorporés. C'est là que les processus de transformation de la matière organique les plus intensifs ont lieu. Ces processus peuvent être stimulés par le travail du sol, mais aussi par les engrais minéraux et les exsudats racinaires. Une autre partie du Corg est stockée dans des couches plus profondes du sol. La teneur en Corg diminue avec la profondeur, car la matière organique fraîche apportée par les racines ou les engrais de ferme est moindre. En outre, plus la profondeur augmente, plus l'influence du procédé diminue. À une profondeur de 30 à 50 cm, elle ne reste perceptible que dans le procédé NOFERT.

Avec 81 tonnes par hectare jusqu'à 50 cm de profondeur, mesurées en 2019–20, le procédé BIODYN 2 a atteint le plus grand stock de Corg. En BIOORG 2, ce stock s'élevait à 80,25 t/ha et en CONFYM 2 à 78,9 t/ha. CONMIN présentait presque neuf tonnes de Corg de moins que CONFYM 2. Ces deux procédés ont respecté la norme de fertilisation et produit

des quantités similaires de résidus de récolte. La différence de neuf tonnes peut donc être interprétée comme l'effet de la fumure organique sur 35 ans (CONMIN n'a pas été fertilisé pendant les sept premières années).

Figure 30: Stock de carbone organique



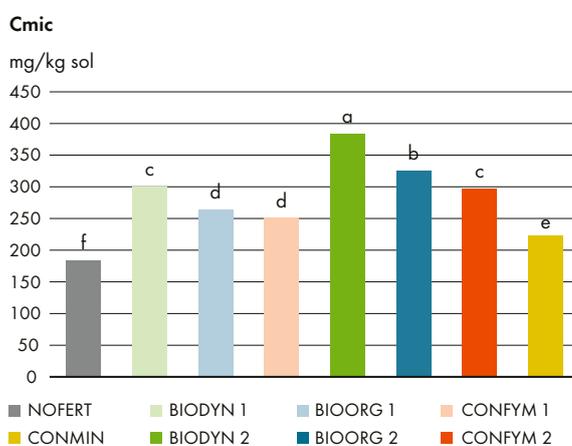
Stock de carbone dans les couches de sol jusqu'à 50 cm de profondeur après 42 ans de gestion différenciée. Les différences entre les procédés diminuent avec la profondeur. Échantillons prélevés en 2019 après le blé d'automne et sous prairie temporaire, et en 2020 après le blé d'automne; n = 12.

En résumé, seuls les procédés recevant la quantité d'engrais de ferme usuelle ont permis de maintenir la teneur en Corg (humus) dans le sol. Le compostage du fumier en BIODYN 2 a même eu pour résultat une augmentation de la teneur en humus sur 42 ans. Malgré des rendements élevés, CONMIN, le système conventionnel recevant une fumure minérale, a perdu du Corg, ce qui est remarquable, compte tenu des prairies temporaires augmentant la teneur en humus et des dérobées cultivées. Toutefois, les procédés du niveau de fumure 1 ont également perdu du Corg au fil du temps. Le travail réduit du sol et l'utilisation de compost de déchets verts constituent des mesures complémentaires favorisant la formation d'humus.

Biomasse microbienne

La biomasse microbienne est composée d'êtres vivants microscopiques présents dans le sol, dont les bactéries, les archées, les microalgues et certains champignons. Elle constitue la partie vivante de la matière organique du sol. Le carbone microbien représente 1 à 3 % du carbone du sol. Dans le présent dossier, la biomasse microbienne est représentée comme carbone microbien (Cmic) (Figure 31) et, dans le chapitre «Dynamique des éléments nutritifs», comme azote microbien (Nmic) (Figure 20).

Figure 31: Biomasse microbienne



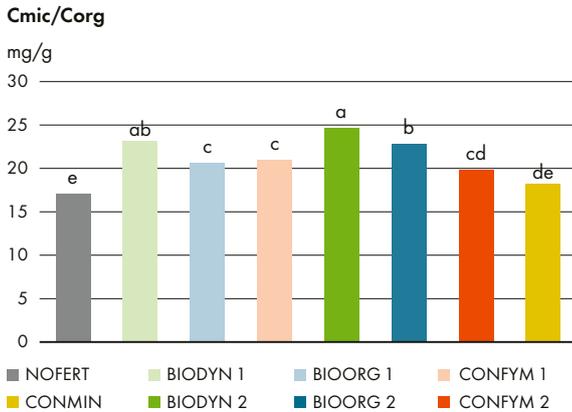
Carbon microbien dans les huit procédés de l'essai DOC. Moyenne des analyses de toutes les parcelles au printemps 1998, 2006, 2012 et 2019.

Aux deux niveaux de fumure, le système BIODYN présentait la biomasse microbienne la plus élevée. CONMIN et NOFERT avaient les teneurs en biomasse microbienne les plus faibles.

Rapport Cmic/Corg

La proportion du carbone microbien dans le carbone organique est utilisée comme valeur indicatrice de la qualité de la matière organique. Ce quotient indique la qualité des conditions de croissance microbienne dans le sol et est également considéré comme un indicateur précoce de l'augmentation de la teneur en humus après un changement de mode de culture (Figure 32).

Figure 32: Rapport Cmic/Corg

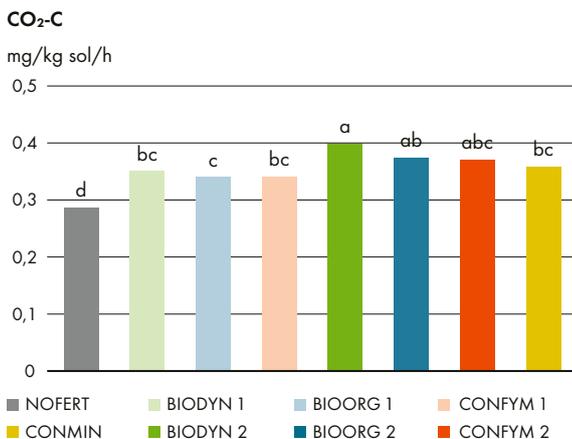


Proportion du Cmic dans le Corg. Ce quotient indique dans quelle mesure un sol à forte teneur en matière organique convient comme habitat pour les micro-organismes.

Respiration du sol

Les micro-organismes du sol se nourrissent de matière organique morte et la décomposent en ses éléments minéraux de base et en CO₂. Ce processus est d'une importance capitale pour le cycle des éléments nutritifs. La respiration du sol est, avec la biomasse microbienne, l'un des paramètres du sol les plus pertinents. Lorsqu'elle est déterminée en laboratoire dans des conditions normalisées, on parle de «respiration basale». L'évolution du CO₂ permet de mesurer l'activité des organismes du sol et dépend également de la quantité de sources de C facilement disponibles (Figure 33).

Figure 33: Respiration du sol

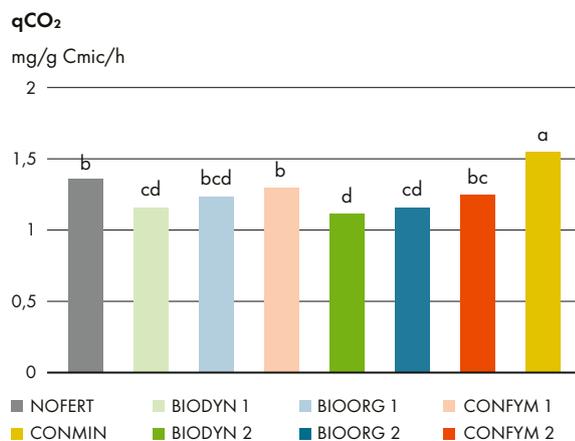


Respiration basale dans les sols de l'essai DOC. Données issues de l'analyse d'échantillons de terre prélevés en 2019. Une valeur élevée indique une activité importante des organismes du sol.

Quotient métabolique

La quantité de CO₂ nécessaire aux micro-organismes du sol pour maintenir leur biomasse donne des indications sur la qualité de leurs conditions de vie. Le quotient métabolique qCO₂ est le paramètre correspondant. Plus les micro-organismes respirent, plus ils consomment d'énergie pour maintenir leur métabolisme. Une valeur faible indique que la société microbienne convertit efficacement l'énergie disponible.

Figure 34: Quotient métabolique



Quotient métabolique du CO₂ dans les sols de l'essai DOC. Données issues de l'analyse d'échantillons de terre prélevés en 2019.

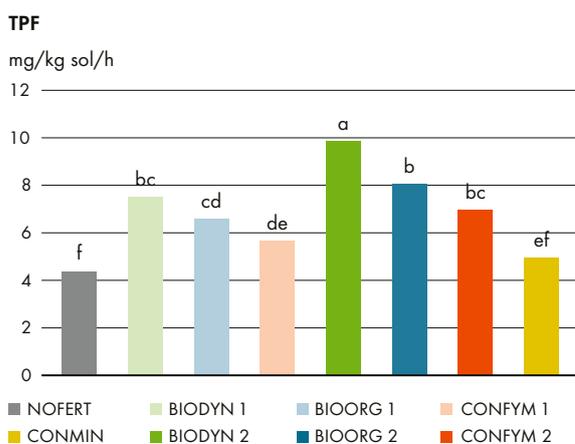
Malgré sa forte respiration basale (Figure 33), la communauté microbienne du sol en BIODYN convertit plus efficacement l'énergie disponible. Elle consomme 16 % d'énergie de moins par unité de biomasse pour couvrir ses besoins d'entretien que la communauté microbienne en CONFYM (Figure 34). Le procédé CONMIN présente le quotient métabolique le plus élevé. En d'autres termes, les micro-organismes trouvent les meilleures conditions de vie dans le système BIODYN et subissent le plus de stress en CONMIN.

Enzymes du sol

Déshydrogénases

Les enzymes du groupe des déshydrogénases jouent un rôle important dans le métabolisme énergétique des micro-organismes. Elles sont actives au sein de la cellule et servent d'indicateur de son activité métabolique.

Figure 35:
Activité des déshydrogénases



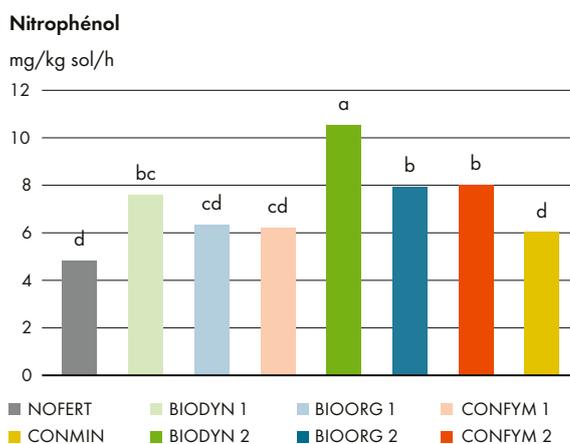
Activité des déshydrogénases dans les sols de l'essai DOC. Données issues de l'analyse d'échantillons de terre prélevés en 2016. Plus la valeur est élevée, plus le nombre d'enzymes déshydrogénases actives dans le sol est important.

La forte activité des déshydrogénases dans les procédés BIODYN montre que le sol présente nettement plus de micro-organismes que les autres procédés. Toutefois, elle peut aussi signifier que l'activité par unité de micro-organismes est, elle aussi, plus élevée.

Phosphatases

Les enzymes de la classe des phosphatases sont produites par les plantes et les micro-organismes pour décomposer les composés organiques de phosphore. Comme la concentration de P dissous dans l'eau du sol est très faible, la décomposition enzymatique des composés organiques de P peut contribuer à la nutrition des plantes.

Figure 36: Activité des phosphomonoestérases alcalines



Activité des phosphomonoestérases alcalines dans l'essai DOC. Données issues de l'analyse d'échantillons de terre prélevés en 2019. Plus la valeur est élevée, plus le nombre d'enzymes phosphatases actives dans le sol est important.

L'activité des phosphatases dépend fortement des systèmes de culture. La forte activité des phosphatases dans le système BIODYN témoigne d'un fort potentiel de décomposition des composés organiques de phosphore, ce qui permet aux plantes de disposer de P libéré.

En bref: qualité des sols

Après 20 ans d'exploitation conventionnelle, le pH des sols avait tellement baissé qu'il fallait le corriger par un chaulage. Les sols des systèmes biologiques présentaient une moindre tendance à la battance et une meilleure stabilité structurale que ceux des systèmes conventionnels. Dans les procédés utilisant la fumure usuelle, y compris des engrais de ferme, les teneurs en carbone organique et les stocks de carbone organique étaient constants. Sans engrais organiques ou avec une fumure réduite, les sols ont perdu du carbone organique. Grâce à l'épandage de fumier composté, le procédé BIODYN 2 a atteint des teneurs en carbone organique significativement plus élevées que tous les autres procédés. La biomasse microbienne, son activité et son efficacité étaient nettement plus élevées dans les systèmes biologiques que dans les systèmes conventionnels. Tous les indicateurs de fertilité des sols ont atteint de meilleures valeurs dans les systèmes biologiques, en particulier en BIODYN. La fertilité du sol du procédé BIODYN avec fumure réduite était égale ou supérieure à celle du procédé CONFYM recevant la fumure usuelle.

Biodiversité

Dans plusieurs domaines, les activités humaines et l'économie ont conduit à un dépassement des limites planétaires. C'est notamment le cas de la perte de biodiversité.

L'essai DOC, avec ses parcelles de 100 m², ne permet de tirer des conclusions que sur la fréquence et l'activité des espèces qui se trouvent sur cette surface. Selon leur taille et leur mobilité, les organismes ont un rayon d'action plus large que les dimensions d'une seule parcelle.

Voilà pourquoi l'essai DOC s'est concentré notamment sur les vers de terre, les micro-organismes et la flore adventice. Or, fait étonnant, les procédés ont également eu un impact important sur les animaux terricoles vivant principalement à la surface du sol (arthropodes épigés), bien que ces organismes puissent parcourir quotidiennement des distances considérables.

Quant à l'analyse de la flore adventice, une influence sur les parcelles voisines est à prévoir en raison de la dissémination des graines.

Flore adventice

La population de la flore adventice a changé en raison de la gestion spécifique des procédés de l'essai DOC. Chaque culture a sa flore adventice caractéristique et chaque saison voit apparaître d'autres plantes dans les champs. Voilà pourquoi l'analyse du stock de graines constitue une méthode intéressante qui donne des informations sur le développement de la flore adventice, même sur de longues périodes.

Tableau 13: Nombre de graines et d'espèces de plantes

	Stock de graines			
	Espèces		Graines/m ²	
BIODYN 2	42	114 %	14 413	233 %
BIOORG 2	40	108 %	19 622	317 %
CONFYM 2	37	100 %	6 195	100 %
CONMIN	33	89 %	8 404	136 %
NOFERT	44	119 %	69 468	1121 %

La flore adventice remplit des fonctions importantes dans l'écosystème: elle offre un abri et de la nourriture aux auxiliaires, protège le sol de la battance et de l'érosion, et sert aussi à absorber l'azote minéralisé après la récolte et à éviter ainsi sa lixiviation. En outre, des composés de carbone se retrouvent dans le sol par le biais des racines des adventices et de leurs exsudats racinaires.



Coquelicots dans les parcelles de blé d'automne de l'essai DOC

Les adventices constituent un élément essentiel de la biodiversité dans les paysages agricoles souvent monotones et des hôtes intermédiaires importants pour les champignons mycorhiziens, qui entrent en symbiose avec les racines.

Toutefois, le stock élevé de graines représente également un risque considérable d'invasion des cultures par les adventices. Dans le cadre de la rotation culturale, qui étouffe de nombreuses adventices grâce à deux années de prairie temporaire, la sarcluse et la herse-étrille ont permis de limiter la concurrence de la flore adventice dans les systèmes biologiques. Le soja constitue une exception: dans les parcelles bio, on procède régulièrement à un désherbage manuel (environ 25 h/ha).

En raison du renoncement à l'utilisation d'herbicides et d'une moindre densité des peuplements, les parcelles biologiques étaient plus riches en espèces que les parcelles conventionnelles. Si l'on se réfère au nombre de graines capables de germer par unité de surface, les parcelles bio présentent un stock deux à trois fois plus important que les parcelles conventionnelles. Dans les systèmes biologiques, un stock de graines s'est donc constitué sur lequel il faut garder un œil.

Animaux terricoles

Vers de terre

Ce sont les animaux les plus connus parmi les invertébrés qui vivent dans le sol. Dans les sols profonds sur loess de l'essai DOC, l'habitat des espèces anéciques s'étend jusqu'à environ un mètre de profondeur. À ce niveau se trouvent des cavités dans lesquelles les vers se retirent lorsqu'il fait trop sec ou trop froid à la surface.

Les vers de terre peuvent être classés en groupes écologiques en fonction de leur habitat préféré:

- Les espèces épigées vivent sous la surface du sol, où elles se nourrissent principalement d'excréments d'animaux et de matières végétales mortes. Leur couleur sombre les protège contre les rayons UV.
- Les espèces endogées vivent dans la partie supérieure du sol minéral. Elles sont pâles et presque transparentes, car elles remontent rarement à la surface.
- Les espèces anéciques creusent des galeries verticales et pénètrent également dans des couches de sol pouvant atteindre un mètre de profondeur ou plus. Ces espèces favorisent le mélange de la terre minérale avec l'humus et tirent des résidus de plantes et du fumier dans le sol.



Le recensement des vers de terre par récolte manuelle ou expulsion est laborieux et n'a de sens qu'au printemps ou à l'automne en raison de l'activité des vers.

Dans l'essai DOC, la biomasse des vers de terre est dominée par les espèces anéciques, relativement grandes et donc moins nombreuses en individus que les espèces endogées, relativement petites.

La méthodologie de collecte de données par expulsion, récolte manuelle et détermination des animaux, est très complexe. En outre, cette intervention constitue une forte perturbation pour les parcelles de l'essai DOC. Voilà pourquoi ces études n'ont pu être réalisées que pour une partie des procédés. Le nombre de vers de terre présents varie considérablement au cours de l'année et de la journée, et dépend fortement de l'humidité et de la température.

Tableau 14: Nombre et biomasse de vers de terre dans les parcelles de l'essai DOC entre 1990 et 1991 ainsi qu'entre 2001 et 2005

	Vers de terre entre 1990 et 1991				Vers de terre entre 2001 et 2005			
	Nombre (ind./m ²)		Biomasse (g/m ²)		Nombre (ind./m ²)		Biomasse (g/m ²)	
BIODYN 2	302	138 %	192	124 %	234	90 %	183	89 %
BIOORG 2	463	211 %	228	148 %	247	95 %	180	88 %
CONFYM 2	219	100 %	154	100 %	259	100 %	205	100 %
CONMIN	145	66 %	118	77 %	190	73 %	166	81 %
NOFERT	208	95 %	137	89 %	164	63 %	142	69 %

Les études sur les vers de terre de 2001-2005 ont été réalisées, après une période de rotation avec 3 ans de trèfle, à l'aide d'une méthode simplifiée qui capture moins bien les vers de terre fouisseurs (anéciques). Les études de 2024, menées avec la méthode précédente et 2 ans de trèfle, confirment à nouveau les données de 1990-1991: nettement plus de vers dans les sols organiques que dans les sols conventionnels.

Jusqu'en 1998, dans les systèmes conventionnels, des produits phytosanitaires très toxiques pour les vers de terre (carbendazime, dinosébe, méthiocarbe) ont été utilisés. Voilà pourquoi les premières études ont mis en évidence un nombre et une biomasse de vers de terre nettement inférieurs dans ces procédés. Le passage à la production intégrée au début de la troisième rotation culturale et le renoncement à

de nombreux anciens produits très toxiques constitue l'explication la plus probable du rétablissement des populations de vers de terre en CONFYM et en CONMIN. Par ailleurs, le chaulage entre 1999 et 2005 et le passage à des engrais azotés à effet basique ont peut-être eu une influence positive sur l'habitat des vers de terre.

Carabidés et staphylinidés

Les familles des carabidés et des staphylinidés font partie des coléoptères. De nombreuses espèces n'ont pas encore été étudiées en détail. Le niveau de connaissances en matière d'autoécologie est plus élevé pour les carabidés que pour les staphylinidés. La densité d'activité de ces animaux est déterminée à l'aide de pièges enterrés capturant les animaux vivants. Comme ces coléoptères sont très mobiles, on ne peut pas les attribuer directement à une petite surface. Toutefois, la fréquence à laquelle ils se rendent dans une parcelle peut être estimée à partir du nombre de captures.



La quantité de nourriture dévorée par jour par les grands carabes voraces peut atteindre jusqu'à 2,5 fois leur propre poids.

Tableau 15: Nombre de carabidés et de staphylinidés rencontrés dans les parcelles de blé d'automne

	Carabidés: nombre d'individus					Staphylinidés: nombre d'individus						
	1988		1990		1991		1988		1990		1991	
BIODYN 2	208	a	72	a	60	a	42	a	58	a	20	a
BIOORG 2	156	ab	75	a	57	a	44	a	50	a	17	a
CONFYM 2	89	b	46	b	31	a	20	b	33	b	15	a

Pour ces deux groupes d'animaux, le nombre d'individus rencontrés était environ deux fois plus élevé dans les parcelles bio que dans les parcelles conventionnelles, si l'on se base sur la moyenne des différentes années. Les carabidés qui aiment la chaleur et la sécheresse et ceux qui se nourrissent principalement de graines ont été identifiés plus fréquemment dans les surfaces bio. Dans les champs, les coléoptères prédateurs jouent un rôle important dans la régulation des ravageurs tels que les pucerons. Au printemps, lorsque les températures sont encore basses, les coléoptères sont déjà actifs, alors que la régulation des ravageurs par les coccinelles est encore peu efficace.

Tableau 16: Densité d'araignées en individus par m²

	Araignées à toile		Araignées prédatrices	
BIODYN 2	2,5	a	7,4	a
BIOORG 2	1,8	ab	7,3	a
CONFYM 2	1,2	b	3,4	b
CONMIN	1,0	b	4,5	b



Une araignée à toile dans une parcelle de blé de l'essai DOC

Les systèmes biologiques présentent une densité d'araignées significativement plus élevée. Les araignées prédatrices sont presque deux fois plus fréquentes dans les parcelles bio que dans les parcelles conventionnelles.

Nématodes

Les nématodes représentent l'un des embranchements les plus riches en espèces et les plus répandus. Les spécialisations morphologiques de certaines espèces permettent aux nématodes d'occuper les niches écologiques les plus diverses. Ils jouent un rôle clé dans la régularisation des cycles biogéochimiques et des processus écosystémiques. La minéralisation et la formation de la matière organique du sol en sont des exemples.

Certaines espèces peuvent toutefois causer des dégâts aux plantes cultivées, notamment en raison de leur mode de vie parasitaire. De par sa grande diversité, la composition de la communauté de nématodes peut être utilisée comme un indicateur important des conditions écologiques du milieu.



Les nématodes sont facilement identifiables au microscope.

Tableau 17: Nombre de nématodes en individus par m²

	Bactérovores		Herbivores		Fongivores		Omnivores	
BIODYN 2	17,5	a	27,2	a	0,4	b	4,5	a
BIOORG 2	16,2	ab	28,1	a	0,5	ab	5,2	a
CONFYM 2	19,3	a	24,8	a	0,9	a	4,8	a
CONMIN	9,5	bc	16,8	b	0,9	a	2,3	b

Des études menées dans le cadre de l'essai DOC montrent que le nombre d'espèces comme la biomasse des nématodes dépendent fortement de la fumure organique. Les nématodes dont les sources de nourriture préférentielles sont les bactéries et les résidus de plantes sont nettement plus fréquents dans les procédés utilisant des engrais organiques. En revanche, les nématodes qui se nourrissent de champignons sont plus présents dans les procédés fertilisés avec des engrais minéraux. Enfin, peu de différences ont été constatées entre les procédés utilisant des engrais organiques.

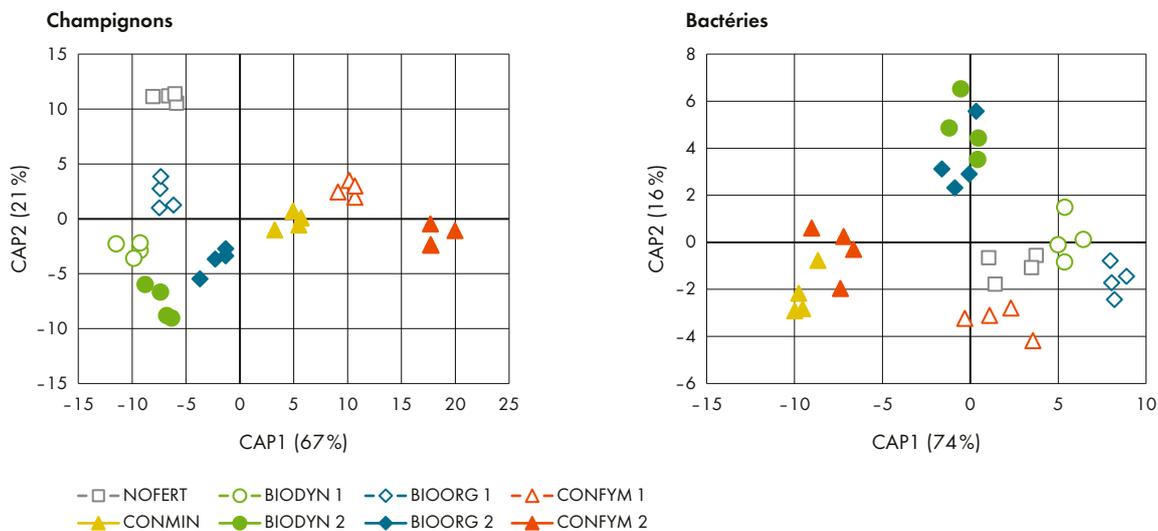
Diversité microbienne

Les bactéries et champignons du sol sont dotés d'un immense potentiel d'adaptation. Ils présentent une grande diversité et colonisent les habitats les plus petits dans l'espace poreux du sol. Ces organismes peuvent être décrits sur la base de leur génétique, de leur apparence ainsi que de leur fonctionnalité.

Bon nombre de champignons et de bactéries vivent en interaction avec d'autres micro-organismes, formant des communautés dans lesquelles les différentes voies métaboliques et modes de vie se soutiennent mutuellement.

Le pH, le taux de carbone et la texture du sol sont autant de propriétés importantes ayant un impact sur la diversité microbienne dans le sol. Dans l'essai DOC, on observe pour chaque procédé une structure communautaire individuelle de champignons du sol et de bactéries (Figure 37). Les champignons du sol montrent une plus grande sensibilité aux systèmes de culture. Cela se traduit par le groupement étroit des procédés des deux niveaux de fumure (total et réduit de moitié) des trois systèmes BIODYN, BIOORG et CONFYM (Figure 37). En revanche, les bactéries sont surtout impactées par l'intensité de la fertilisation, comme le montre le regroupement étroit des procédés utilisant la fumure réduite de moitié avec le témoin non fertilisé.

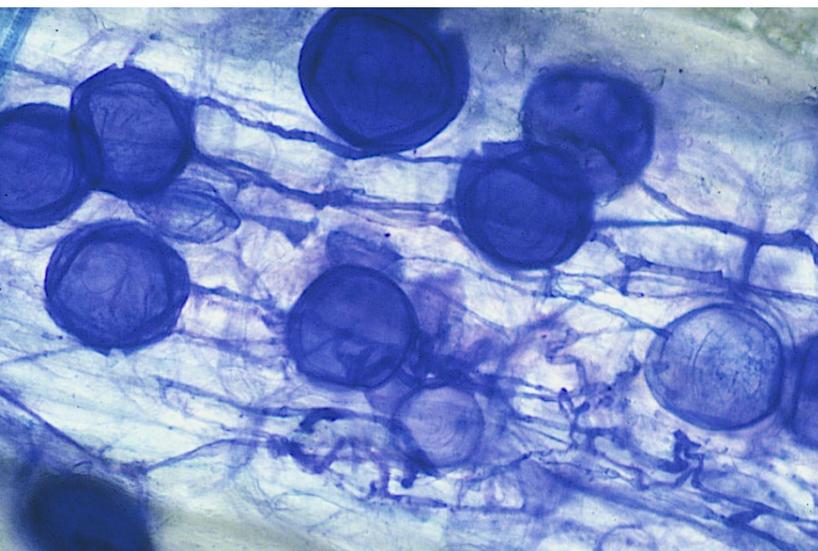
Figure 37: Structure communautaire des champignons et bactéries du sol



Structure communautaire des champignons du sol (à gauche) et des bactéries du sol (à droite) dans les procédés de l'essai DOC. Le graphique met en évidence les similitudes entre les microbes du sol identifiées à l'aide de gènes marqueurs. Chaque point correspond à la structure communautaire d'une parcelle (sole C). Plus les points sont proches, plus la structure est similaire. Plus les points sont éloignés, plus la structure communautaire est différente.



Dans les parcelles de blé, les plantes messicoles peuvent protéger le sol contre la lixiviation.



Symbiose entre un champignon mycorhizien et une légumineuse: on voit des organes de réserve du champignon (vésicules) et des hyphes à l'intérieur du cortex racinaire.

L'activité métabolique des champignons et des bactéries est décisive pour de nombreux services écosystémiques rendus par le sol. Par conséquent, les champignons et les bactéries permettent d'avoir des sols fertiles avec une grande capacité de stockage.

Grâce à la symbiose avec les champignons mycorhiziens, les plantes cultivées peuvent multiplier le rayon dans lequel elles puisent les éléments nutritifs et l'eau dans le sol, assurant ainsi leur approvisionnement. L'endomycorhize, qui se développe dans les cellules du cortex racinaire, est relativement peu spécifique et peut coloniser plusieurs familles

et genres de plantes. De ce fait, les champignons mycorhiziens jettent des ponts entre les réseaux racinaires de différentes espèces de plantes; même les plantes herbacées et ligneuses sont reliées par des filaments fongiques (hyphes) et échangent ainsi des glucides et des minéraux.

Dans l'essai DOC, c'est surtout dans les procédés biologiques et le procédé non fertilisé qu'a été démontrée une forte colonisation des plantes cultivées par des champignons mycorhiziens. Les procédés utilisant des engrais minéraux ont enregistré une nette diminution de l'activité symbiotique entre les champignons et les plantes cultivées, probablement en raison de la diminution de la diversité des communautés mycorhiziennes.

Dans le cadre de l'essai DOC, une expérience de simulation de la sécheresse a mis en évidence une augmentation du nombre de mycorhizes dans un système biologique par rapport à un système conventionnel, alors que d'autres indicateurs biologiques dans le sol n'ont pas été affectés. Dans le système BIODYN, les champignons mycorhiziens étaient trois fois plus fréquents en cas de sécheresse que dans le système conventionnel CONMIN. Les répercussions sur le régime hydrique des plantes font l'objet d'un projet en cours. Toutes les plantes cultivées ne dépendent pas des champignons symbiotiques. Toutefois, sans mycorhizes, la dépendance de la culture aux engrais solubles et aux produits phytosanitaires s'accroît. À long terme, la diminution de l'activité des micro-organismes du sol entraîne une perte de structure et de qualité du sol.

En bref: biodiversité

La taille des parcelles expérimentales de l'essai DOC limite le choix des espèces et des indicateurs de biodiversité. Les systèmes biologiques présentaient davantage d'espèces végétales et deux à trois fois plus de graines capables de germer que les systèmes conventionnels. Les carabidés, les staphylinidés et les araignées étaient environ deux fois plus fréquents dans les parcelles bio que dans les parcelles conventionnelles. La fumure organique a un impact positif sur le nombre et la composition en espèces des nématodes qui se nourrissent de bactéries et de plantes. Les nématodes qui se nourrissent principalement de champignons étaient plus nombreux dans le système CONMIN. Les compositions en espèces des champignons et bactéries du sol varient fortement entre les procédés: les bactéries ont été davantage influencées par l'intensité de la fertilisation, les champignons davantage par les différences liées au système. Le nombre de champignons mycorhiziens détectés sur les plantes cultivées était plus élevé dans les procédés biologiques et le procédé non fertilisé. Leur masse a augmenté en cas de stress hydrique, le plus fortement en BIODYN.

Changement climatique

Le secteur agricole est responsable d'environ 14 % des émissions de gaz à effet de serre en Suisse et contribue donc de manière significative au changement climatique. Dans le même temps, l'agriculture est fortement touchée par le changement climatique. Les émissions mondiales de gaz à effet de serre augmentent et, selon les prévisions, les sécheresses estivales associées à de violentes intempéries deviendront nettement plus probables, y compris en Europe centrale. L'agriculture doit donc développer à la fois des stratégies d'atténuation du changement climatique visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre et des stratégies d'adaptation au changement climatique visant à augmenter la résistance aux conditions climatiques instables.

Adaptation au changement climatique grâce à la formation d'humus

Les mesures permettant une meilleure adaptation de l'agriculture aux conséquences du changement climatique servent souvent aussi à améliorer la qualité des sols et la biodiversité.

Les méthodes favorisant la formation d'humus en sont un exemple. La formation et la stabilisation de l'humus permettent de retirer du carbone de l'atmosphère et d'améliorer la qualité du sol. Dans l'essai DOC, l'évolution des teneurs en humus est observée depuis plus de 40 ans. Il a été constaté que seule la fumure organique permettait de maintenir

ou d'augmenter la teneur en humus. La formation d'humus est particulièrement marquée dans le procédé biodynamique, bien que la quantité d'engrais organique apportée sous forme de fumier composté soit la plus faible (voir chapitre «L'essai»). Malgré les pertes de carbone et d'azote au cours du processus de compostage, la qualité de l'engrais épandu semble être un facteur décisif pour stabiliser le carbone dans le sol. Grâce à l'augmentation du stock de carbone dans le sol, l'utilisation de systèmes biologiques peut constituer une stratégie d'atténuation des effets du changement climatique et d'adaptation à ce dernier. Toutefois, l'augmentation du taux de carbone du sol est très lente.

Comparaison des émissions de gaz à effet de serre

Les principaux gaz à effet de serre émis par l'agriculture sont le dioxyde de carbone (CO_2), le protoxyde d'azote (N_2O) et le méthane (CH_4). Ces gaz sont convertis en équivalents CO_2 afin d'évaluer leur impact sur le climat: le protoxyde d'azote doit être multiplié par 300 et le méthane par 28. En effet, le protoxyde d'azote reste plus longtemps dans l'atmosphère et il a un pouvoir de réchauffement 300 fois supérieur à celui du CO_2 .

En raison du fort impact du N_2O sur le réchauffement climatique, les émissions de gaz à effet de serre liées à l'azote jouent un rôle décisif en vue de



Dégâts de grêle dans les parcelles de maïs de l'essai DOC en 2022

l'évaluation de l'impact sur le climat des grandes cultures présentant des sols bien aérés. À partir de 2012, les émissions de N₂O et de CH₄ ont été mesurées pendant 571 jours sous prairie temporaire, maïs et engrais vert et comparées au taux moyen de variation des stocks de carbone du sol (Figure 38). Les émissions de N₂O les plus élevées ont été mesurées dans le procédé conventionnel utilisant des engrais de ferme et des engrais minéraux. L'apport conséquent d'azote dans le maïs a probablement été le principal facteur responsable du fort impact sur le climat de ce procédé pendant la période de mesure. Le renoncement à l'utilisation d'azote minéral, un pH stable et une bonne structure du sol sont des facteurs importants qui contribuent à réduire les émissions de N₂O dans les systèmes biologiques.

Il convient de noter que l'augmentation des stocks de carbone dans le procédé biodynamique a été observée en même temps que les émissions de N₂O les plus faibles. Ce résultat montre que l'augmentation de la teneur en carbone du sol n'entraîne pas nécessairement une augmentation des émissions de N₂O, à condition que la stratégie de fertilisation soit adaptée. Par rapport à la surface, les émissions de gaz à effet de serre étaient inférieures de 44 % en BIOORG 2 et de 63 % en BIODYN 2 par rapport au procédé conventionnel, dans les deux cas avec la fumure usuelle.

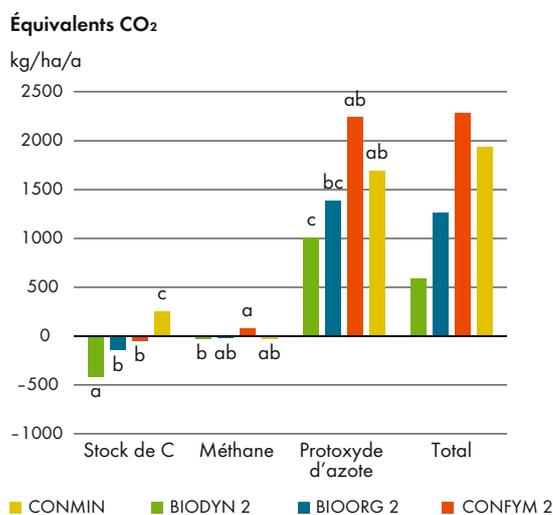
Résilience au stress hydrique

La manière dont les systèmes de culture réagissent en cas de stress hydrique est une question importante en ce qui concerne la capacité d'adaptation au changement climatique. Dans la comparaison expérimentale, dû à la diversité plus élevée de la communauté bactérienne dans le sol en BIOORG 2, le stress hydrique a eu un moindre impact sur l'activité des protéases et la minéralisation du N qu'en CONMIN. Par conséquent, en BIOORG 2, les plantes se sont nettement mieux développées sous stress hydrique.

En bref: changement climatique

Parmi les différents systèmes de culture, seul le procédé biodynamique utilisant la fumure usuelle a permis de stocker du carbone organique supplémentaire dans le sol. En outre, c'est dans le système BIODYN que les émissions de protoxyde d'azote les plus faibles ont été enregistrées. Les taux d'émission élevés enregistrés en CONFYM 2 et en CONMIN sont dus à une fumure azotée importante. Au total, les émissions de gaz à effet de serre par unité de surface étaient inférieures de 63 % en BIODYN et de 44 % en BIOORG par rapport à celles de CONFYM, dans les deux cas avec la fumure usuelle. En période de sécheresse, la communauté bactérienne plus diversifiée des parcelles biologiques reste active plus longtemps, ce qui peut avoir un impact positif sur la minéralisation de l'azote et, par conséquent, sur la croissance des plantes.

Figure 38: Impact sur le climat des sols de l'essai DOC



Équivalents CO₂ émis par les systèmes de culture utilisant la fumure totale; représentation portant sur les variations du carbone organique du sol (MOS, humus) sur l'ensemble des 42 ans et les émissions de protoxyde d'azote et de méthane relevées lors d'une campagne de mesure de près de deux ans sous prairie temporaire, maïs et engrais vert dans la sixième PRC.

Des études récentes menées dans le cadre de l'essai DOC montrent qu'il n'existe pratiquement pas de différence entre les systèmes de culture en ce qui concerne l'évaporation directe du sol et la profondeur à laquelle les plantes puisent leur eau. Toutefois, l'humidité du sol dans la zone racinaire était nettement plus élevée dans les systèmes biologiques, où les plantes ont en outre utilisé l'eau plus efficacement. Ces résultats suggèrent que les systèmes de culture biologiques présentent des avantages en matière d'efficacité d'utilisation de l'eau et sont plus résilients au stress hydrique. Cette question fait l'objet d'une étude approfondie dans le cadre de deux grands projets en cours.

Remerciements

C'est grâce au soutien financier à long terme de l'Office fédéral suisse de l'agriculture (OFAG), à l'engagement sans faille des responsables de l'essai au sein du FiBL et d'Agroscope, au dynamisme des équipes de terrain ainsi qu'à la fidélité du groupe de conseillers paysans que l'essai DOC a survécu à six périodes de rotation culturale de sept ans et continue de fournir des réponses et de nouvelles questions pour des projets de recherche agricole et environnementale. Des scientifiques utilisent de manière intensive l'essai pour mener des projets financés par le Fonds national suisse, la Commission européenne, l'Office fédéral de l'environnement et de nombreuses autres institutions.

Merci pour votre aimable soutien financier

- Office fédéral de l'agriculture (OFAG)
- Office fédéral de l'environnement (OFEV)
- Fonds national suisse (FNS)
- Fonds Coop pour le développement durable
- Commission européenne

Merci pour votre partenariat

- Agroscope
- EPF Zurich
- université de Bâle

Merci pour la location des précieuses surfaces agricoles expérimentales

- Société coopérative Agrico, Birsmattehof, Therwil
- Famille Stamm, Oberwil

Merci aux collaboratrices et collaborateurs d'Agroscope et du FiBL

Responsables de l'essai DOC, Agroscope

- Jean-Marc Besson[†]
- David Dubois
- Padruot Fried
- Jochen Mayer

Équipe de terrain et gestion des données, Agroscope

- Ernst Brack
- Shiva Ghiasi
- Lucie Gunst
- Werner Jossi
- Victor Lehmann
- Ernst Spiess
- Werner Stauffer
- Hansueli Zbinden

Responsables de l'essai DOC, FiBL

- Paul Mäder
- Urs Niggli
- Henri Suter[†]
- Hartmut Vogtmann

Équipe de terrain et gestion des données, FiBL

- Thomas Alföldi
- Franz Augstburger
- Robert Frei
- Adrian Lustenberger
- Paul Mäder
- Frédéric Perrochet
- Moritz Sauter
- Andreas Schmutz
- Roland Widmer
- Marcel Züllig

Merci aux agriculteurs conseillers, membres du groupe de suivi de l'essai DOC

- Fritz Baumgartner[†], fondateur
- Daniel Böhler
- Ruedi Frey[†], fondateur
- Matthias Hünerfauth
- Andreas Ineichen
- Herman Lutke Schipholt
- Emil Meier[†]
- Hans Miesch[†]
- Christian Müller
- Hans Oswald[†]
- Benno Otter
- Rainer Sax
- Werner Scheidegger
- Urs Sprecher
- Niklaus Steiner
- Ruedi Ulrich
- Samuel Vogel
- Andreas Würsch
- Niklaus Wynistorf[†]

Merci à toutes les personnes qui ont apporté leur soutien

- Vittorio Delucchi[†]
- Günter Kahnt
- Susanna Küffer Heer
- Philippe Matile[†]
- Michael Rist[†]
- Hans-Rudolf Roth[†]

Merci aux scientifiques et autres collaboratrices et collaborateurs impliqués pour leur précieux travail de recherche sur le terrain et en laboratoire

[†] décédé-e entre-temps

Publications sur l'essai DOC (évaluées par des pairs)

Publications scientifiques

1. Arncken, C. M., Mäder, P., Mayer, J., & Weibel, F. P. (2012). Sensory, yield and quality differences between organically and conventionally grown winter wheat. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 92, 2819-2825.
2. Autret, B., Mary, B., Strullu, L., Chlebowski, F., Mäder, P., Mayer, J., Olesen, J. E., & Beaudoin, N. (2020). Long-term modelling of crop yield, nitrogen losses and GHG balance in organic cropping systems. *Science of the Total Environment* 710, 134597.
3. Bai, Z., Caspari, T., Gonzalez, M. R., Batjes, N. H., Mäder, P., Bünemann, E. K., De Goede, R., Brussaard, L., Xu, M., Ferreira, C. S. S., Reintam, E., Fan, H., Mihelič, R., Glavan, M., & Tóth, Z. (2018). Effects of agricultural management practices on soil quality: A review of long-term experiments for Europe and China. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 265, 1-7.
4. Berchtold, A., Besson, J. M., & Feller, U. (1993). Effects of fertilization levels in two farming systems on senescence and nutrient contents in potato leaves. *Plant and Soil* 154(1), 81-88.
5. Besson, J. M., Spiess, E., & Niggli, U. (1995). N uptake in relation to N application during two crop rotations in the DOC field trial. *Biological agriculture & horticulture* 11(1-4), 69-75.
6. Birkhofer, K., Bezemer, T. M., Bloem, J., Bonkowski, M., Christensen, S., Dubois, D., Ekelund, F., Fliessbach, A., Gunst, L., Hedlund, K., Mader, P., Mikola, J., Robin, C., Setälä, H., Tatin-Froux, F., Van Der Putten, W. H., & Scheu, S. (2008). Long-term organic farming fosters below and aboveground biota: Implications for soil quality, biological control and productivity. *Soil Biology & Biochemistry* 40(9), 2297-2308.
7. Birkhofer, K., Fliessbach, A., Wise, D. H., & Scheu, S. (2008). Generalist predators in organically and conventionally managed grass-clover fields: implications for conservation biological control. *Annals of Applied Biology* 153(2), 271-280.
8. Birkhofer, K., Fliessbach, A., Wise, D. H., & Scheu, S. (2011). Arthropod food webs in organic and conventional wheat farming systems of an agricultural long-term experiment: a stable isotope approach. *Agricultural and Forest Entomology* 13(2), 197-204.
9. Birkhofer, K., Fliessbach, A., Gavín-Centol, M. P., Hedlund, K., Ingimarsdóttir, M., Jørgensen, H. B., Kozjek, K., Meyer, S., Montserrat, M., Moreno, S. S., Laraño, J. M., Scheu, S., Serrano-Carnero, D., Truu, J., & Kundel, D. (2021). Conventional agriculture and not drought alters relationships between soil biota and functions. *Scientific Reports* 11(1), 23975.
10. Bongiorno, G., Bünemann, E. K., Oguejiolor, C. U., Meier, J., Gort, G., Comans, R., Mäder, P., Brussaard, L., & De Goede, R. (2019). Sensitivity of labile carbon fractions to tillage and organic matter management and their potential as comprehensive soil quality indicators across pedoclimatic conditions in Europe. *Ecological Indicators* 99, 38-50.
11. Bongiorno, G., Postma, J., Bünemann, E. K., Brussaard, L., De Goede, R. G. M., Mäder, P., Tamm, L., & Thuerig, B. (2019). Soil suppressiveness to *Pythium ultimum* in ten European long-term field experiments and its relation with soil parameters. *Soil Biology & Biochemistry* 133, 174-187.
12. Bongiorno, G., Bodenhausen, N., Bünemann, E. K., Brussaard, L., Geisen, S., Mäder, P., Quist, C. W., Walser, J.-C., & De Goede, R. G. M. (2019). Reduced tillage, but not organic matter input, increased nematode diversity and food web stability in European long-term field experiments. *Molecular Ecology* 28(22), 4987-5005.
13. Bongiorno, G., Bünemann, E. K., Brussaard, L., Mäder, P., Oguejiolor, C. U., & De Goede, R. G. M. (2020). Soil management intensity shifts microbial catabolic profiles across a range of European long-term field experiments. *Applied Soil Ecology* 154, 103596.
14. Bonte, A., Neuweiger, H., Goesmann, A., Thonar, C., Mäder, P., Langenkämper, G., & Niehaus, K. (2014). Metabolite profiling on wheat grain to enable a distinction of samples from organic and conventional farming systems. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 94(13), 2605-2612.
15. Bosshard, C., Frossard, E., Dubois, D., Mäder, P., Manolov, I., & Oberson, A. (2008). Incorporation of nitrogen-15-labeled amendments into physically separated soil organic matter fractions. *Soil Science Society of America Journal* 72(4), 949-959.
16. Bosshard, C., Sørensen, P., Frossard, E., Dubois, D., Mäder, P., Nanzer, S., & Oberson, A. (2009). Nitrogen use efficiency of 15 N-labelled sheep manure and mineral fertiliser applied to microplots in long-term organic and conventional cropping systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 83(3), 271-287.
17. Brock, C., Fliessbach, A., Oberholzer, H.-R., Schulz, F., Wiesinger, K., Reinicke, F., Koch, W., Pallutt, B., Dittman, B., Zimmer, J., Hülsbergen, K.-J., & Leithold, G. (2011). Relation between soil organic matter and yield levels of nonlegume crops in organic and conventional farming systems. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 174(4), 568-575.
18. Brock, C., Hoyer, U., Leithold, G., & Hülsbergen, K.-J. (2012). The humus balance model (HU-MOD): a simple tool for the assessment of management change impact on soil organic matter levels in arable soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 92(3), 239-254.
19. Chalker-Scott, L. (2013). The science behind biodynamic preparations: A literature review. *Horttechnology* 23(6), 814-819.
20. Chowdhury, S. P., Babin, D., Sandmann, M., Jacquiod, S., Sommermann, L., Sørensen, S. J., Fliessbach, A., Mäder, P., Geistlinger, J., Smalla, K., Rothballer, M., & Grosch, R. (2019). Effect of long-term organic and mineral fertilization strategies on rhizosphere microbiota assemblage and performance of lettuce. *Environmental Microbiology*.
21. Dubois, D., Scherrer, C., Gunst, L., Jossi, W., & Stauffer, W. (1998). Effect of different farming systems on the weed seed bank in the long term-trials Chaiblen and DOK. *Journal of Plant Diseases and Protection (Special issue XVI)*, 67-74.
22. Dos Reis Martins, M., Necpalova, M., Ammann, C., Buchmann, N., Calanca, P., Flechard, C. R., Hartman, M. D., Krauss, M., Le Roy, P., Mäder, P., Maier, R., Morvan, T., Nicolardot, B., Skinner, C., Six, J., & Keel, S. G. (2022). Modeling N₂O emissions of complex cropland management in Western Europe using DayCent: Performance and scope for improvement. *European Journal of Agronomy* 141, 126613.
23. Esperschütz, J., Gattinger, A., Mäder, P., Schloter, M., & Fliessbach, A. (2007). Response of soil microbial biomass and community structures to conventional and organic farming systems under identical crop rotations. *FEMS Microbiology Ecology* 61(1), 26-37.
24. Fliessbach, A., & Mäder, P. (2000). Microbial biomass and size-density fractions differ between soils of organic and conventional agricultural systems. *Soil Biology & Biochemistry* 32(6), 757-768.

25. Fliessbach, A., & Mäder, P. (2004). Short- and long-term effects on soil microorganisms of two potato pesticide spraying sequences with either glufosinate or dinoseb as defoliant. *Biology and Fertility of Soils* 40(4), 268-276.
26. Fliessbach, A., Imhof, D., Brunner, T., & Wüthrich, C. (1999). Tiefenverteilung und zeitliche Dynamik der mikrobiellen Biomasse in biologisch und konventionell bewirtschafteten Böden. *Regio Basiliensis* 3(40), 253-263.
27. Fliessbach, A., Mäder, P., & Niggli, U. (2000). Mineralization and microbial assimilation of 14 C-labeled straw in soils of organic and conventional agricultural systems. *Soil Biology & Biochemistry* 32(8-9), 1131-1139.
28. Fliessbach, A., Messmer, M., Nietlisbach, B., Infante, V., & Mäder, P. (2012). Effects of conventionally bred and *Bacillus thuringiensis* (Bt) maize varieties on soil microbial biomass and activity. *Biology and Fertility of Soils* 48(3), 315-324.
29. Fliessbach, A., Nietlisbach, B., Messmer, M., Rodríguez-Romero, A.-S., & Mäder, P. (2013). Microbial response of soils with organic and conventional management history to the cultivation of *Bacillus thuringiensis* (Bt)-maize under climate chamber conditions. *Biology and Fertility of Soils* 49(7), 829-837.
30. Fliessbach, A., Oberholzer, H.-R., Gunst, L., & Mäder, P. (2007). Soil organic matter and biological soil quality indicators after 21 years of organic and conventional farming. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 118, 273-284.
31. Fliessbach, A., Winkler, M., Lutz, M. P., Oberholzer, H.-R., & Mäder, P. (2009). Soil amendment with *Pseudomonas fluorescens* CHA0: lasting effects on soil biological properties in soils low in microbial biomass and activity. *Microbial Ecology* 57(4), 611-623.
32. Frossard, E., Buchmann, N., Bünemann, E. K., Kiba, D. I., Lompo, F., Oberson, A., Tamburini, F., Traore, O.Y.A. (2016). Soil properties and not inputs control carbon : nitrogen : phosphorus ratios in cropped soils in the long term. *SOIL* 2, 83-99
33. Fuchs, J. G., Fliessbach, A., Mäder, P., Weibel, F. P., Tamm, L., Mayer, J., & Schleiss, K. (2014). Effects of compost on soil fertility parameters in short-, mid- and long-term field experiments. *Acta Horticulturae* 1018, 39-46.
34. García-Palacios, P., Gattinger, A., Bracht-Jørgensen, H., Brussaard, L., Carvalho, F., Castro, H., Clément, J.-C., De Deyn, G., D'Hertefeldt, T., Foulquier, A., Hedlund, K., Lavorel, S., Legay, N., Lori, M., Mäder, P., Martínez-García, L. B., Martins Da Silva, P., Muller, A., Nascimento, E., Reis, F., Symanczik, S., Paulo Sousa, J., & Milla, R. (2018). Crop traits drive soil carbon sequestration under organic farming. *Journal of Applied Ecology* 55(5), 2496-2505.
35. Gasser, M., Hammelehle, A., Oberson, A., Frossard, E., & Mayer, J. (2015). Quantitative evidence of overestimated rhizodeposition using N-15 leaf-labelling. *Soil Biology & Biochemistry* 85, 10-20.
36. Gattinger, A., Muller, A., Haeni, M., Skinner, C., Fliessbach, A., Buchmann, N., Mäder, P., Stolze, M., Smith, P., Scialabba, N. E.-H., & Niggli, U. (2012). Enhanced top soil carbon stocks under organic farming. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109(44), 18226-18231.
37. Grüter, R., Costerousse, B., Mayer, J., Mäder, P., Thonar, C., Frossard, E., Schulin, R., & Tandy, S. (2019). Long-term organic matter application reduces cadmium but not zinc concentrations in wheat. *Science of the Total Environment* 669, 608-620.
38. Hammelehle, A., Oberson, A., Lüscher, A., Mäder, P., & Mayer, J. (2018). Above- and belowground nitrogen distribution of a red clover-perennial ryegrass sward along a soil nutrient availability gradient established by organic and conventional cropping systems. *Plant and Soil* 425(1), 507-525.
39. Hartmann, M., & Widmer, F. (2006). Community structure analyses are more sensitive to differences in soil bacterial communities than anonymous diversity indices. *Applied and Environmental Microbiology* 72(12), 7804-7812.
40. Hartmann, M., Fliessbach, A., Oberholzer, H.-R., & Widmer, F. (2006). Ranking the magnitude of crop and farming system effects on soil microbial biomass and genetic structure of bacterial communities. *FEMS Microbiology Ecology* 57, 378-388.
41. Hartmann, M., Frey, B., Kölliker, R., & Widmer, F. (2005). Semi-automated genetic analyses of soil microbial communities: comparison of T-RFLP and RISA based on descriptive and discriminative statistical approaches. *Journal of Microbiological Methods* 61, 349-360.
42. Hartmann, M., Frey, B., Mayer, J., Mäder, P., & Widmer, F. (2015). Distinct soil microbial diversity under long-term organic and conventional farming. *The ISME Journal* 9, 1177.
43. Haubert, D., Birkhofer, K., Fliessbach, A., Gehre, M., Scheu, S., & Russ, L. (2009). Trophic structure and major trophic links in conventional versus organic farming systems as indicated by carbon stable isotope ratios of fatty acids. *Oikos* 118(10), 1579-1589.
44. Heger, T. J., Straub, F., & Mitchell, E. A. D. (2012). Impact of farming practices on soil diatoms and testate amoebae: A pilot study in the DOK-trial at Therwil, Switzerland. *European Journal of Soil Biology* 49(0), 31-36.
45. Hijri, I., Sykorova, Z., Oehl, F., Ineichen, K., Mäder, P., Wiemken, A., & Redecker, D. (2006). Communities of arbuscular mycorrhizal fungi in arable soils are not necessarily low in diversity. *Molecular Ecology* 15, 2277-2289.
46. Hildermann, I., Messmer, M., Dubois, D., Boller, T., Wiemken, A., & Mäder, P. (2010). Nutrient use efficiency and arbuscular mycorrhizal root colonisation of winter wheat cultivars in different farming systems of the DOK long-term trial. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 90(12), 2027-2038.
47. Hildermann, I., Thommen, A., Dubois, D., Boller, T., Wiemken, A., & Mäder, P. (2009). Yield and baking quality of winter wheat cultivars in different farming systems of the DOK long-term trial. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 89(14), 2477-2491.
48. Hirte, J., Leifeld, J., Abiven, S., & Mayer, J. (2018). Maize and wheat root biomass, vertical distribution, and size class as affected by fertilization intensity in two long-term field trials. *Field Crops Research* 216, 197-208.
49. Hirte, J., Leifeld, J., Abiven, S., Oberholzer, H.-R., Hammelehle, A., & Mayer, J. (2017). Overestimation of crop root biomass in field experiments due to extraneous organic matter. *Frontiers in Plant Science* 8(284).
50. Jaffuel, G., Mäder, P., Blanco-Perez, R., Chiriboga, X., Fliessbach, A., Turlings, T. C. J., & Campos-Herrera, R. (2016). Prevalence and activity of entomopathogenic nematodes and their antagonists in soils that are subject to different agricultural practices. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 230, 329-340.
51. Joergensen, R., Mäder, P., & Fliessbach, A. (2010). Long-term effects of organic farming on fungal and bacterial residues in relation to microbial energy metabolism. *Biology and Fertility of Soils* 46, 303-307.
52. Kahl, J., Busscher, N., Mergardt, G., Mäder, P., Torp, T., & Ploeger, A. (2015). Differentiation of organic and non-organic winter wheat cultivars from a controlled field trial by crystallization patterns. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 95(1), 53-58.

53. Keel, S. G., Anken, T., Büchi, L., Chervet, A., Fliessbach, A., Flisch, R., Huguenin-Elie, O., Mäder, P., Mayer, J., Sinaj, S., Sturny, W., Wüst-Galley, C., Zihlmann, U., & Leifeld, J. (2019). Loss of soil organic carbon in Swiss long-term agricultural experiments over a wide range of management practices. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 286, 106654.
54. Keller, M., Oberson, A., Annaheim, K. E., Tamburini, F., Mäder, P., Mayer, J., Frossard, E., & Bünemann, E. K. (2012). Phosphorus forms and enzymatic hydrolyzability of organic phosphorus in soils after 30 years of organic and conventional farming. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 175(3), 385-393.
55. Kessler, N., Bonte, A., Albaum, S. P., Mäder, P., Messmer, M., Goesmann, A., Niehaus, K., Langenkämper, G., & Nattkemper, T. W. (2015). Learning to classify organic and conventional wheat – a machine learning driven approach using the MeltDB 2.0 metabolomics analysis platform. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 3, 35.
56. Knapp, S., Gunst, L., Mäder, P., Ghiasi, S., & Mayer, J. (2023). Organic cropping systems maintain yields but have lower yield levels and yield stability than conventional systems – Results from the DOK trial in Switzerland. *Field Crops Research* 302, 109072.
57. Kozjek, K., Kundel, D., Kushwaha, S. K., Olsson, P. A., Ahrén, D., Fliessbach, A., Birkhofer, K., & Hedlund, K. (2021). Long-term agricultural management impacts arbuscular mycorrhizal fungi more than short-term experimental drought. *Applied Soil Ecology* 168, 104140.
58. Krause, H. M., Thonar, C., Eschenbach, W., Well, R., Mader, P., Behrens, S., Kappler, A., & Gättinger, A. (2017). Long term farming systems affect soils potential for N₂O production and reduction processes under denitrifying conditions. *Soil Biology & Biochemistry* 114, 31-41.
59. Krause, H.-M., Stehle, B., Mayer, J., Mayer, M., Steffens, M., Mäder, P., & Fliessbach, A. (2022). Biological soil quality and soil organic carbon change in biodynamic, organic, and conventional farming systems after 42 years. *Agronomy for Sustainable Development* 42(6), 117.
60. Krause, H.-M., Stehle, B., Mayer, J., Mayer, M., Steffens, M., Mäder, P., & Fliessbach, A. (2022). Soil organic carbon over 42 years of organic and conventional farming and biological soil quality in year 42 of the DOK long-term field experiment. *PANGAEA*. DOI 10.1594/PANGAEA.948567
61. Kundel, D., Bodenhausen, N., Jørgensen, H. B., Truu, J., Birkhofer, K., Hedlund, K., Mäder, P., & Fliessbach, A. (2020). Effects of simulated drought on biological soil quality, microbial diversity and yields under long-term conventional and organic agriculture. *FEMS Microbiology Ecology* 96(12).
62. Kundel, D., Lori, M., Fliessbach, A., Van Kleunen, M., Meyer, S., & Mäder, P. (2021). Drought Effects on Nitrogen Provisioning in Different Agricultural Systems: Insights Gained and Lessons Learned from a Field Experiment. *Nitrogen* 2(1), 1-17.
63. Kundel, D., Meyer, S., Birkhofer, H., Fliessbach, A., Mäder, P., Scheu, S., Van Kleunen, M., & Birkhofer, K. (2018). Design and manual to construct rainout-shelters for climate change experiments in agroecosystems. *Frontiers in Environmental Science* 6(14).
64. Langenkämper, G., Zörb, C., Seifert, M., Mäder, P., Fretzdorff, B., & Betsche, T. (2006). Nutritional quality of organic and conventional wheat. *Journal of Applied Botany and Food Quality* 80, 150-154.
65. Langmeier, M., Frossard, E., Kreuzer, M., Mäder, P., Dubois, D., & Oberson, A. (2002). Nitrogen fertilizer value of cattle manure applied on soils originating from organic and conventional farming systems. *Agronomie* 22, 789-800.
66. Leifeld, J., Reiser, R., & Oberholzer, H. R. (2009). Consequences of conventional versus organic farming on soil carbon: Results from a 27-year field experiment. *Agronomy Journal* 101(5), 1204-1218.
67. Lori, M., Piton, G., Symanczik, S., Legay, N., Brussaard, L., Jaenicke, S., Nascimento, E., Reis, F., Sousa, J. P., Mäder, P., Gättinger, A., Clément, J.-C., & Foulquier, A. (2020). Compared to conventional, ecological intensive management promotes beneficial proteolytic soil microbial communities for agro-ecosystem functioning under climate change-induced rain regimes. *Scientific Reports* 10(1), 7296.
68. Lori, M., Symanczik, S., Mäder, P., Efosa, N., Jaenicke, S., Buegger, F., Tresch, S., Goesmann, A., & Gättinger, A. (2018). Distinct nitrogen provisioning from organic amendments in soil as influenced by farming system and water regime. *Frontiers in Environmental Science* 6(40).
69. Lori, M., Symanczik, S., Mäder, P., De Deyn, G., & Gättinger, A. (2017). Organic farming enhances soil microbial abundance and activity – A meta-analysis and meta-regression. *PLOS ONE* 12(7), e0180442.
70. Lori, M., Hartmann, M., Kundel, D., Mayer, J., Mueller, R.C., Mäder, P., Krause H.-M. (2023). Soil microbial communities are sensitive to differences in fertilization intensity in organic and conventional farming systems. *FEMS Microbiology Ecology* 99 (6).
71. Mäder, P., & Berner, A. (2012). Development of reduced tillage systems in organic farming in Europe. *Renewable Agriculture and Food Systems* 27(Special Issue 01), 7-11.
72. Mäder, P., Alfvöldi, T., Niggli, U., Besson, J.-M., & Dubois, D. (1997). Der Wert des DOK-Versuches unter den Aspekten moderner agrarwissenschaftlicher Forschung. *Archiv für Acker-, Pflanzenbau und Bodenkunde* 42, 279-301.
73. Mäder, P., Edenhofer, S., Boller, T., Wiemken, A., & Niggli, U. (2000). Arbuscular mycorrhizae in a long-term field trial comparing low-input (organic, biological) and high-input (conventional) farming systems in a crop rotation. *Biology and Fertility of Soils* 31, 150-156.
74. Mäder, P., Fliessbach, A., Dubois, D., Gunst, L., Fried, P., & Niggli, U. (2002). Soil fertility and biodiversity in organic farming. *Science* 296, 1694-1697.
75. Mäder, P., Hahn, D., Dubois, D., Gunst, L., Alfvöldi, T., Bergmann, H., Oehme, M., Amadó, R., Schneider, H., Graf, U., Velimirov, A., Fliessbach, A., & Niggli, U. (2007). Wheat quality in organic and conventional farming: Results of a 21-year old field experiment. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 87(10), 1826-1835.
76. Mäder, P., Kaiser, F., Adholeya, A., Singh, R., Uppal, H. S., Sharma, A. K., Srivastava, R., Sahai, V., Aragno, M., Wiemken, A., Johri, B. N., & Fried, P. M. (2011). Inoculation of root microorganisms for sustainable wheat-rice and wheat-black gram rotations in India. *Soil Biology and Biochemistry* 43(3), 609-619.
77. Mäder, P., Pfiffner, L., Niggli, U., Balzer, U., Balzer, F., Plochberger, K., Velimirov, A., & Besson, J.-M. (1993). Effect of three farming systems (bio-dynamic, bio-organic, conventional) on yield and quality of beetroot (*Beta vulgaris L. var. esculenta L.*) in a seven year crop rotation. *Acta Horticulturae* 339, 11-31.
78. Mäder, P., Fliessbach, A., Dubois, D., Gunst, L., Fried, P., & Niggli, U. (2002). The Ins and Outs of Organic Farming. FiBL response to the letter of Goklany in *Science* Vol 298. *Science* 298(5600), 1889-1890.
79. Mäder, P., Fliessbach, A., Dubois, D., Gunst, L., Fried, P., & Niggli, U. (2002). Organic Farming and Energy Efficiency. FiBL response to the letter of Zoehl in *Science* Vol 298. *Science* 298(5600), 1891-1891.

80. Marinari, S., Liburdi, K., Fliessbach, A., & Kalbitz, K. (2010). Effects of organic management on water-extractable organic matter and C mineralization in European arable soils. *Soil & Tillage Research* 106(2), 211-217.
81. Mayer, J., Gunst, L., Mäder, P., Samson, M.-F., Carcea, M., Narducci, V., Thomsen, I. K., & Dubois, D. (2015). Productivity, quality and sustainability of winter wheat under long-term conventional and organic management in Switzerland. *European Journal of Agronomy* 65(0), 27-39.
82. Mayer, M., Krause, H.-M., Fliessbach, A., Mäder, P., & Steffens, M. (2022). Fertilizer quality and labile soil organic matter fractions are vital for organic carbon sequestration in temperate arable soils within a long-term trial in Switzerland. *Geoderma* 426, 116080.
83. Mosimann, C., Oberhansli, T., Ziegler, D., Nassal, D., Kandler, E., Boller, T., Mader, P., & Thonar, C. (2017). Tracing of two *Pseudomonas* strains in the root and rhizoplane of maize, as related to their plant growth-promoting effect in contrasting soils. *Frontiers in Microbiology* 7, 14.
84. Necpalova, M., Lee, J., Skinner, C., Büchi, L., Wittwer, R., Gättinger, A., Van Der Heijden, M., Mäder, P., Charles, R., Berner, A., Mayer, J., & Six, J. (2018). Potentials to mitigate greenhouse gas emissions from Swiss agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 265, 84-102.
85. Nemecek, T., Dubois, D., Huguenin-Elie, O., & Gaillard, G. (2006). Life cycle assessment of Swiss organic farming systems. *Aspects of Applied Biology* 79, 15-18.
86. Nemecek, T., Dubois, D., Huguenin-Elie, O., & Gaillard, G. (2011). Life cycle assessment of Swiss farming systems: I. Integrated and organic farming. *Agricultural Systems* 104(3), 217-232.
87. Nemecek, T., Huguenin-Elie, O., Dubois, D., Gaillard, G., Schaller, B., & Chervet, A. (2011). Life cycle assessment of Swiss farming systems: II. Extensive and intensive production. *Agricultural Systems* 104(3), 233-245.
88. Oberson, A., Besson, J. M., Maire, N., & Sticher, H. (1996). Microbiological processes in soil organic phosphorus transformations in conventional and biological cropping systems. *Biology and Fertility of Soils* 21(3), 138-148.
89. Oberson, A., Fardeau, J.-C., Besson, J.-M., & Sticher, H. (1993). Soil phosphorus dynamics in cropping systems managed according to conventional and biological methods. *Biology and Fertility of Soils* 16, 111-117.
90. Oberson, A., Frossard, E., Bühlmann, C., Mayer, J., Mäder, P., & Lüscher, A. (2013). Nitrogen fixation and transfer in grass-clover leys under organic and conventional cropping systems. *Plant and Soil* 371(1), 237-255.
91. Oberson, A., Nanzer, S., Bosshard, C., Dubois, D., Mäder, P., & Frossard, E. (2007). Symbiotic N-2 fixation by soybean in organic and conventional cropping systems estimated by N-15 dilution and N-15 natural abundance. *Plant and Soil* 290(1-2), 69-83.
92. Oberson, A., Tagmann, H., Langmeier, M., Dubois, D., Mäder, P., & Frossard, E. (2010). Fresh and residual phosphorus uptake by ryegrass from soils with different fertilization histories. *Plant and Soil* 334(1), 391-407.
93. Oberson, A., Jarosch, K. A., Frossard, E., Hammelehle, A., Fliessbach, A., Mäder, P., Mayer, J. (2024): Higher than expected: Nitrogen flows, budgets, and use efficiencies over 35 years of organic and conventional cropping. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 362,108802.
94. Oehl, F., Frossard, E., Fliessbach, A., Dubois, D., & Oberson, A. (2004). Basal organic phosphorus mineralization in soils under different farming systems. *Soil Biology & Biochemistry* 36, 667-675.
95. Oehl, F., Oberson, A., Probst, M., Fliessbach, A., Roth, H. R., & Frossard, E. (2001). Kinetics of microbial phosphorus uptake in cultivated soils. *Biology and Fertility of Soils* 34(1), 31-41.
96. Oehl, F., Oberson, A., Sinaj, S., & Frossard, E. (2001). Organic phosphorus mineralization studies using isotopic dilution techniques. *Soil Science Society of America Journal* 65, 780-787.
97. Oehl, F., Oberson, A., Tagmann, H. U., Besson, J.-M., Dubois, D., Mäder, P., Roth, H.-R., & Frossard, E. (2002). Phosphorus budget and phosphorus availability in soils under organic and conventional farming. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 62, 25-35.
98. Oehl, F., Sieverding, E., Ineichen, K., Mäder, P., Boller, T., & Wiemken, A. (2003). Impact of land use intensity on the species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in agroecosystems of central Europe. *Applied and Environmental Microbiology* 69(5), 2816-2824.
99. Oehl, F., Sieverding, E., Ineichen, K., Mäder, P., Wiemken, A., & Boller, T. (2009). Distinct sporulation dynamics of arbuscular mycorrhizal fungal communities from different agroecosystems in long-term microcosms. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 134, 257-268.
100. Oehl, F., Sieverding, E., Mäder, P., Dubois, D., Ineichen, K., Boller, T., & Wiemken, A. (2004). Impact of long-term conventional and organic farming on the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi. *Oecologia* 138, 574-583.
101. Pesaro, M., & Widmer, F. (2006). Identification and specific detection of a novel Pseudomonadaceae cluster associated with soils from winter wheat plots of a long-term agricultural field experiment. *Applied and Environmental Microbiology* 72(1), 37-43.
102. Pfiffner, L., & Luka, H. (2007). Earthworm populations in two low-input cereal farming systems. *Applied Soil Ecology* 37(3), 184-191.
103. Pfiffner, L., & Luka, H. (2000). Overwintering of arthropods in soils of arable fields and adjacent semi-natural habitats. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 78, 215-222.
104. Pfiffner, L., & Mäder, P. (1997). Effects of biodynamic, organic and conventional production systems on earthworm populations. *Biological Agriculture and Horticulture – Entomological Research in Organic Agriculture* 15, 3-10.
105. Pfiffner, L., Besson, J., & Niggli, U. (1995). DOK-Versuch: Vergleichende Langzeituntersuchungen in den drei Anbausystemen biologisch-dynamisch, organisch-biologisch und konventionell. III. Boden: Untersuchungen über die epigäische Nutzarthropoden, insbesondere auf die Laufkäfer (Col. Carabidae), in Winterweizenparzellen. *Schweiz. Landw. Forsch. Sonderheft* 1: 1-15.
106. Pfiffner, L., & Niggli, U. (1996). Effects of bio-dynamic, organic and conventional farming on ground beetles (Col. Carabidae) and other epigeic arthropods in winter wheat. *Biological Agriculture and Horticulture* 12: 353-364.
107. Pfiffner, L. (1993). Long-term effects of biological and conventional farming on earthworm populations. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 156(3), 259-265.
108. Rotches-Ribalta, R., Armengot, L., Mäder, P., Mayer, J., & Sans, F. X. (2017). Long-term management affects the community composition of arable soil seedbanks. *Weed Science* 65(1), 73-82.
109. Schärer, M.-L., Dietrich, L., Kundel, D., Mäder, P., & Kahmen, A. (2022). Reduced plant water use can explain higher soil moisture in organic compared to conventional farming systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 332, 107915.
110. Scheifele, M., Hobi, A., Buegger, F., Gättinger, A., Schulin, R., Boller, T., & Mäder, P. (2017). Impact of pyrochar and hydrochar on soybean (*Glycine max* L.) root nodulation and biological nitrogen fixation. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 180(2), 199-211.

111. Schneider, S., Hartmann, M., Enkerli, J., & Widmer, F. (2010). Fungal community structure in soils of conventional and organic farming systems. *Fungal Ecology* 3(3), 215-224.
112. Siegrist, S., Schaub, D., Pfiffner, L., & Mäder, P. (1998). Does organic agriculture reduce soil erodibility? The results of a long-term field study on loess in Switzerland. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 69, 253-264.
113. Simpson, R.J., Oberson, A., Culvenor, R.A., Ryan, M.H., Veneklaas, E.J., Lambers, H., Lynch, J.P., Ryan, P.R., Delhaize, E., Smith, F.A., Smith, S.E., Harvey, P.R., Richardson, A.E. 2011. Strategies and agronomic interventions to improve the phosphorus-use efficiency of farming systems. *Plant Soil* 349, 89-120.
114. Skinner, C., Gattinger, A., Krauss, M., Krause, H.-M., Mayer, J., Van Der Heijden, M. G. A., & Mäder, P. (2019). The impact of long-term organic farming on soil-derived greenhouse gas emissions. *Scientific Reports* 9(1), 1702.
115. Skinner, C., Gattinger, A., Muller, A., Mäder, P., Fliessbach, A., Stolze, M., Ruser, R., & Niggli, U. (2014). Greenhouse gas fluxes from agricultural soils under organic and non-organic management - A global meta-analysis. *Science of The Total Environment* 468-469, 553-563.
116. Stracke, B. A., Eitel, J., Watzl, B., Mäder, P., & Rüfer, C. E. (2009). Influence of the production method on phytochemical concentrations in whole wheat (*Triticum aestivum* L.): A comparative study. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 57(21), 10116-10121.
117. Schwalb, S. A., Li, S., Hemkemeyer, M., Heinze, S., Joergensen, R. G., Mayer, J., Mäder, P., & Wichern, F. (2023). Long-term differences in fertilisation type change the bacteria:archaea:fungi ratios and reveal a heterogeneous response of the soil microbial ionome in a Haplic Luvisol. *Soil Biology and Biochemistry* 177, 108892.
118. Tamm, L., Thürig, B., Bruns, C., Fuchs, J. G., Köpke, U., Laustela, M., Leifert, C., Mahlberg, N., Nietlispach, B., Schmidt, C., Weber, F., & Fliessbach, A. (2010). Soil type, management history, and soil amendments influence the development of soil-borne (*Rhizoctonia solani*, *Pythium ultimum*) and air-borne (*Phytophthora infestans*, *Hyaloperonospora parasitica*) diseases. *European Journal of Plant Pathology* 127(4), 465-481.
119. Tamm, L., Thürig, B., Fliessbach, A., Goltlieb, A. E., Karavani, S., & Cohen, Y. (2011). Elicitors and soil management to induce resistance against fungal plant diseases. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences* 58(3-4), 131-137.
120. Thuerig, B., Fliessbach, A., Berger, N., Fuchs, J. G., Kraus, N., Mahlberg, N., Nietlispach, B., & Tamm, L. (2009). Re-establishment of suppressiveness to soil- and air-borne diseases by re-inoculation of soil microbial communities. *Soil Biology and Biochemistry* 41(10), 2153-2161.
121. Widmer, F., Rasche, F., Hartmann, M., & Fliessbach, A. (2006). Community structures and substrate utilization of bacteria in soils from organic and conventional farming systems of the DOK long-term field experiment. *Applied Soil Ecology* 33(3), 294-307.
122. Woese, K., Lange, D., Boess, C., & Bogl, K. W. (1997). A comparison of organically and conventionally grown foods - Results of a review of the relevant literature. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 74(3), 281-293.
123. Zörb, C., Langenkämper, G., Betsche, T., Neehaus, K., & Barsch, A. (2006). Metabolite profiling of wheat grains (*Triticum aestivum* L.) from organic and conventional agriculture. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 54(21), 8301-8306.
124. Zörb, C., Niehaus, K., Barsch, A., Betsche, T., & Langenkämper, G. (2009). Levels of compounds and metabolites in wheat ears and grains in organic and conventional agriculture. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 57(20), 9555-9562.

Chapitres de livres

1. FAC, & FiBL, (Eds) (1995). DOK-Versuch: vergleichende Langzeit-Untersuchungen in den drei Anbausystemen biologisch-Dynamisch, Organisch-biologisch und Konventionell. Bern: Bundesamt für Landwirtschaft (BLW).
2. Fliessbach, A., Eyhorn, F., Mäder, P., Rentsch, D., & Hany, R. (2001). DOK long-term farming systems trial: Microbial biomass, activity and diversity affect the decomposition of plant residues. In *Sustainable Management of Soil Organic Matter* Eds R. M. Rees, B. C. Ball, C. D. Campbell & C. A. Watson, pp. 363-369. London: CABI.
3. Fliessbach, A., & Mäder, P. (1997). Carbon source utilization by microbial communities in soils under organic and conventional farming practice. In *Microbial Communities – Functional versus Structural Approaches* Eds H. Insam & A. Rangger, pp. 109-120. Berlin: Springer.
4. Frey, B., Brunner, I., Christie, P., Wiemken, A., & Mäder, P. (1998). The use of polytetrafluoroethylene (PTFE) hydrophobic membranes to study transport of ¹⁵N by mycorrhizal hyphae. In *Mycorrhiza Manual* (Ed A. Varma), pp. 151-158. Heidelberg: Springer.
5. Frossard, E., Bünemann, E.K., Gunst, L., Oberson, A., Schärer, M., Tamburini, F. (2016). Fate of fertilizer P in soils the organic pathway. In: Schnug, E., De Kok, L.J. (Eds.), *Phosphorus in agriculture: 100% zero*. Springer Dordrecht, pp. 41-61.
6. Fuchs, J. G., Fliessbach, A., Mäder, P., Weibel, F. P., Tamm, L., Mayer, J., & Schleiss, K. (2014). Effects of compost on soil fertility parameters in short-, mid- and long-term field experiments. In *International Symposium on Organic Matter Management and Compost Use in Horticulture* Eds J. Biala, R. Prange & M. Raviv, pp. 39-46.
7. Krause, H.-M., Fliessbach, A., Mayer, J., & Mäder, P. (2020). Chapter 2 - Implementation and management of the DOK long-term system comparison trial. In *Long-Term Farming Systems Research* Eds G. S. Bhullar & A. Riar, pp. 37-51. Academic Press.
8. Mayer, J., & Mäder, P. (2016). Langzeitversuche - Eine Analyse der Ertragsentwicklung. In *Forschung im Ökologischen Landbau* Eds B. Freyer pp.421-445 Stuttgart VTB.
9. Mäder, P. (1997). Erhöhte bodenmikrobiologische Aktivität durch ökologischen Landbau. In *Naturschutz durch ökologischen Landbau. Ökologische Konzepte* 95 Eds H. Weiger & H. Willer, pp. 49-72. Bad Dürkheim: Deukalion, Stiftung Ökologie und Landbau.
10. Mäder, P., Alföldi, T., Fliessbach, A., Pfiffner, L., & Niggli, U. (1999). Agricultural and ecological performance of cropping systems compared in a long-term field trial. In *Nutrient Disequilibria in Agroecosystems* Eds E. M. A. Smaling, O. Oenema & L. O. Fesco, pp. 247-264. London, Amsterdam: CABI.
11. Mäder, P., Fliessbach, A., Dubois, D., Gunst, L., Jossi, W., Widmer, F., Oberson, A., Frossard, E., Oehl, F., Wiemken, A., Gattinger, A., & Niggli, U. (2006). The DOK experiment (Switzerland). In *Long-term field experiments in organic farming* Eds J. Raupp, C. Pekrun, M. Oltmanns & U. Köpke, pp. 41-58. Bonn: Koester.
12. Oberson, A., Pypers, P., Bünemann, E., Frossard, E. (2011). Management impacts on biological phosphorus cycling in cropped soils In: Bünemann, E., Oberson, A., Frossard, E. (Eds.), *Phosphorus in action - Biological processes in soil phosphorus cycling*. Springer Soil Biology Series, pp. 431-458.
13. Pfiffner, L., & Armengot L. (2019). Biodiversity as a prerequisite of sustainable organic farming. In : Köpke, U. (Ed.), *Improving organic crop cultivation* , Chapter 16 : 401-433. Burleigh Dodds Science Publishing, Cambridge, UK (ISBN: 978-1-78676-184-2; www.bdsublishing.com).

Abréviations et explications

a	an	NIV	nivalénol, une mycotoxine
arthropode	invertébrés à pattes articulées: insectes, myriapodes, crustacés, arachnides	Nmic	azote microbien
bactériovore	qui se nourrit de bactéries	Nmin	azote minéral sous forme d'ammonium et de nitrate
BIODYN	procédé de l'essai DOC respectant les principes de la biodynamie	NMR	nuclear magnetic resonance = spectroscopie de résonance magnétique nucléaire
BIOORG	procédé de l'essai DOC respectant les principes de l'agriculture organo-biologique	Ntotal	azote total
BT	<i>Bacillus thuringiensis</i> ; les préparations à base de BT contiennent des spores ou des toxines de la bactérie	NOFERT	procédé de l'essai DOC sans fumure
C	carbone	NUE	efficacité d'utilisation de l'azote
CaO	formule chimique de l'oxyde de calcium, chaux vive	omnivore	qui se nourrit indifféremment d'aliments d'origine animale ou végétale
CH ₄	méthane	P	phosphore
Cmic	carbone microbien	P ₂ O ₅	pentoxyde de phosphore
Cmic/Corg	rapport entre le carbone microbien et le carbone organique	parcelle	dans l'essai DOC, surface individuelle cultivée selon un procédé
C/N	rapport entre le carbone et l'azote	PI	production intégrée
CO ₂	dioxyde de carbone	PLFA	acides gras phospholipidiques et étherlipides
Corg	carbone organique	PNR	Programme national suisse de recherche
CONFYM	procédé conventionnel de l'essai DOC utilisant des engrais de ferme (<i>conventional with farm yard manure</i>)	PPS	produit phytosanitaire
CONMIN	procédé conventionnel de l'essai DOC utilisant uniquement des engrais minéraux	PRC	période de rotation culturale, dans l'essai DOC PRC 1: 1978-84; PRC 2: 1985-91; PRC 3: 1992-98; PRC 4: 1999-2005; PRC 5: 2006-12; PRC 6: 2013-19
déshydrogénase	groupe d'enzymes dans la chaîne respiratoire des micro-organismes	PRIF	Principes de fertilisation des cultures agricoles en Suisse (2017)
DOC	dynamique, organique, conventionnel; l'essai DOC comprend des systèmes de culture biodynamiques, organo-biologiques et conventionnels	qCO ₂	quotient métabolique: une valeur faible indique que la société des micro-organismes convertit efficacement l'énergie disponible
DON	déoxinivalénol, une mycotoxine	répétition	répétition des unités expérimentales
FNS	Fonds national suisse	respiration basale	respiration du sol dans des conditions normalisées
fongivore	qui se nourrit de champignons	respiration du sol	CO ₂ émis par les micro-organismes
fumure	engrais de ferme dans l'essai DOC réduite = 1 = 0,7 UGBF usuelle = 2 = 1,4 UGBF	RFLP	polymorphisme de longueur des fragments de restriction
herbivore	qui se nourrit de plantes	rhizodéposition	entrées racinaires comprenant les racines et les substances libérées dans le sol par ces dernières
K	potassium	SD	écart-type
métabolite	produit de la réaction catalysée par une enzyme	SIMS	spectrométrie de masse des ions secondaires
métagénomique	extraction, séquençage et analyse du matériel génétique contenu dans des échantillons de l'environnement	sole	dans l'essai DOC, les cultures sont cultivées de manière décalée dans le temps sur trois soles: A, B, C
MO	matière organique	t	tonnes
MOS	matière organique du sol = humus = 1,725 × Corg	TPF	triphénylformazane, indicateur coloré
MS	matière sèche	UGBF	unité de gros bétail-fumure. 1 UGBF correspond à l'excrétion annuelle de 105 kg de N et de 15 kg de P ₂ O ₅
n	grandeur de l'échantillon	15N	isotope stable de l'azote
N	azote	32P, 33P	isotopes radioactifs du phosphore
N ₂	azote moléculaire		
N ₂ O	protoxyde d'azote		
NIR	spectroscopie dans le proche infrarouge		



Impressum

Institution éditrice

Institut de recherche de l'agriculture biologique FiBL
Ackerstrasse 113, case postale 219, CH-5070 Frick, Suisse
Tél. +41 (0)62 865 72 72
info.suisse@fibl.org, www.fibl.org

En collaboration avec Agroscope et l'EPF Zurich

Auteur-es: Andreas Fliessbach, Hans-Martin Krause (tous deux du FiBL Suisse), Klaus Jarosch, Jochen Mayer (tous deux d'Agroscope), Astrid Oberson (EPF Zurich), Paul Mäder (FiBL Suisse)

Relecture: Lukas Pfiffner, Else Bünemann-König (tous deux du FiBL Suisse)

Rédaction: Vanessa Gabel, Simona Moosmann (toutes deux du FiBL Suisse)

Traduction: Sonja Wopfner

Maquette: Brigitta Maurer (FiBL)

Photos: Thomas Alföldi (FiBL Suisse): p. 16, 22, 32; Andreas Fliessbach (FiBL Suisse): p. 1, 2, 6, 8, 12, 18, 24, 37, 39 (2); Tibor Fuchs: photo de couverture, p. 9; Dominika Kundel (FiBL Suisse): p. 13, 19, 41; Adrian Lustenberger: p. 27, 43; Paul Mäder (FiBL Suisse) p. 42; Simona Moosmann (FiBL Suisse): p. 8, 23, 38; Lukas Pfiffner (FiBL Suisse): p. 39 (1); FiBL: p. 20, 28, 52; Wikimedia (CSIRO, CC BY 3.0): p. 40; plateforme de géoinformation de la Confédération suisse: p. 7

Permalink: <https://orgprints.org/id/eprint/53649/>

N° d'article du FiBL: 1261

Pour citer ce dossier: Fliessbach, A., Krause, H.-M., Jarosch, K., Mayer, J., Oberson, A., & Mäder, P. (2024). L'essai DOC: Comparaison de systèmes de culture biologiques et conventionnels sur 45 ans. Institut de recherche de l'agriculture biologique FiBL, Frick. En ligne sur: boutique.fibl.org > 1261

Cette publication peut être téléchargée gratuitement depuis la boutique en ligne du FiBL: boutique.fibl.org

Toutes les informations contenues dans le présent dossier reposent sur les meilleures connaissances et sur l'expérience des auteur-es. Malgré tout le soin apporté, des erreurs et des imprécisions ne peuvent être exclues. Ni les auteur-es ni l'éditeur ne sauraient donc être tenus responsables de quelque inexactitude dans le contenu ou d'éventuels dommages consécutifs au suivi des recommandations.

La traduction et l'impression ont été réalisées avec le soutien financier du projet Klimacrops. Nous remercions les bailleurs de fonds pour leur aimable soutien.



2024 © FiBL

Pour des informations détaillées sur les droits d'auteur, voir: fibl.org/fr/copyright