

SYNTHÈSE THÉMATIQUE TS1

1

Sol et production alimentaire

Raphaël Charles Marina Wendling Stéphane Burgos



Sol et production alimentaire

Synthèse thématique TS1 du Programme national de recherche
« Utilisation durable de la ressource sol » (PNR 68)

Avant-propos

Le sol a joué un rôle essentiel tout au long de l'histoire de l'humanité en tant que base de production pour l'agriculture. Les évolutions techniques, telles que la mécanisation et l'apport de matières auxiliaires chimiques, et le commerce international ont relativisé la dépendance directe au sol comme base de l'alimentation – avec parfois de graves conséquences, telles que la surfertilisation, le tassement du sol, l'érosion du sol ou la désertification. Avec la réforme agraire des années 1990, la Suisse a amorcé un changement de cap déterminant. En vertu des exigences des prestations écologiques requises notamment, les sols sont aujourd'hui cultivés de manière mieux adaptée. Depuis, on assiste cependant à une spécialisation de l'exploitation, qui met la gestion durable du sol à rude épreuve. Les auteurs de la synthèse thématique ST1 « Sol et production alimentaire » du Programme national de recherche « Utilisation durable de la ressource sol » (PNR 68) retracent l'évolution de la production agricole et les enjeux associés pour le sol au cours des dernières décennies. Ils présentent les résultats des projets du PNR 68 traitant de nouvelles approches culturelles, qui offrent des opportunités de renforcer les fonctions du sol. Sur cette base, l'équipe d'auteurs esquisse pour l'avenir une agriculture adaptée au site, axée sur le potentiel du sol et caractérisée par une utilisation minimale de matières auxiliaires et de machines. Ce faisant, ils ne considèrent absolument pas la mise en pratique d'une agriculture plus fortement orientée vers la qualité du sol comme étant la tâche des agricultrices et agriculteurs seuls, mais au contraire comme la mission de la totalité de la chaîne de valeur. Tous les acteurs concernés – du producteur au consommateur en passant par l'industrie de la transformation et le commerce de détail – portent ici une part de responsabilité dans l'exploitation durable des sols – que ce soit en Suisse ou ailleurs. Les grands distributeurs et l'industrie de la transformation, avec leur pouvoir de marché tant vis-à-vis des fournisseurs que des clients, occupent une position particulière. Les divers systèmes de commercialisation et labels présentent un potentiel considérable de promotion d'une exploitation respectueuse du sol – pour le bien du sol et des générations futures.

Prof. Dr Emmanuel Frossard

*Président du Comité de direction du Programme national de recherche
« Utilisation durable de la ressource sol » (PNR 68)*

Table des matières

Avant-propos → 5

Table des matières → 6

Résumé → 8

1. Introduction → 10

2. De « L'affaire sol » au PNR 68 → 11

2.1 Retour sur « L'affaire sol » → 11

2.2 Évolution de l'agriculture depuis « L'affaire sol » → 12

2.3 Problématiques actuelles → 15

2.4 Qualités et fonctions du sol → 15

3. Atteintes à la qualité du sol → 17

3.1 Le tassement des sols : un phénomène sournois → 17

3.2 Perte de matière organique : un effet négatif à long terme → 23

3.3 Érosion : un problème toujours irrésolu → 25

3.4 La biodiversité des sols, un trésor à conserver → 25

4. Contribution des systèmes de culture à la protection du sol → 28

4.1 Réduire le travail du sol pour le protéger → 28

4.2 Couverts végétaux : des plantes au service du sol → 29

4.3 Rotation : un facteur essentiel → 32

4.4 Le choix déterminant du système de culture → 32

5. Champignons et plantes comme substituts aux engrais → 34

5.1 Mycorhizes : travail en réseau → 34

5.2 De la CIPAN à l'engrais vert → 37

6. Luites en sous-sol → 40

6.1 Nématodes contre insectes → 41

6.2 Les armes multiples des bactéries → 45

7. Évaluation « pratique » de la qualité du sol → 49

7.1 Diagnostic → 49

7.2 Monitoring → 57

8. Développement de nouvelles stratégies → 61

8.1 Développements agricoles récents → 61

8.2 Préservation de la qualité des sols → 63

8.3 Conditions-cadres → 66

8.4 Une production alimentaire de qualité pour la valorisation de la ressource sol → 71

Annexes → 72

A1 Inventaire des essais de longue durée établis en Suisse → 72

Le Programme national de recherche « Utilisation durable
de la ressource sol » (PNR 68) → 77

Les projets de recherche du PNR 68 → 79

A2 Liste des illustrations → 83

Liste des tableaux → 84

Glossaire → 85

Liste des abréviations → 88

Noms des espèces animales et végétales → 88

Bibliographie → 89

Impressum → 97

Résumé

Le sol est l'une des bases essentielles de la production alimentaire. À l'heure actuelle, sa qualité est particulièrement menacée par le tassement du sol, la perte de matière organique (mos) et de biodiversité, et l'érosion. La synthèse thématique ST1 « Sol et production alimentaire » du Programme national de recherche « Utilisation durable de la ressource sol » (PNR 68) examine les défis que ces menaces posent à la lumière des résultats des projets de recherche du PNR 68 et aboutit à une vision de l'agriculture appropriée au site et à sa région, qui s'appuie davantage sur le fonctionnement du sol tout en réduisant l'utilisation de machines et l'apport d'intrants externes.

Le sol et les fonctions qui lui sont associées sont à la base de nombreux services écosystémiques (SES) essentiels à notre société. La synthèse thématique ST1 « Sol et production alimentaire » du PNR 68 s'est intéressée plus spécifiquement à la contribution des propriétés, processus et fonctions du sol qui s'avèrent essentiels ou utiles pour la production alimentaire.

Le sol est une ressource limitée, non renouvelable à l'échelle humaine, qui nécessite d'être protégée. Actuellement, quatre atteintes majeures à la qualité du sol menacent la production agricole : le tassement du sol, la perte de matière organique (mos), l'érosion et la perte de biodiversité.

- Le tassement du sol touche environ un tiers des sols suisses. Il résulte de l'utilisation de machines toujours plus lourdes, de facteurs tels que des travaux du sol effectués malgré des conditions trop humides ou d'une baisse de la stabilité structurale du sol. Une telle baisse peut être corrélée à une perte de mos, celle-ci jouant un rôle central dans les fonctions chimiques, physiques et biologiques du sol. Ce phénomène et ses conséquences ont été observés dans plusieurs essais de longue durée établis en Suisse qui ont été sollicités dans le cadre des projets du PNR 68.
- La perte de mos provient d'une disponibilité réduite en engrais de ferme ou en compost, de l'exportation des résidus de culture ou encore de l'absence de prairies dans la rotation.
- Par ailleurs, malgré des mesures de protection ciblées, l'érosion constitue toujours un danger pour la qualité des sols en raison des pertes irréversibles qu'elle entraîne.
- Plusieurs études préviennent également des risques liés à la perte de biodiversité du fait du rôle central que les organismes du sol jouent dans de nombreuses fonctions du sol. Jusqu'à présent, la perte de biodiversité demeure toutefois difficile à quantifier.

Plusieurs projets se sont attachés à trouver des solutions afin de préserver la qualité du sol. Certaines pratiques culturales innovantes permettent de protéger le sol. Les couverts végétaux et un travail du sol réduit limitent les pertes de mos, protègent la surface du sol et améliorent sa structure sans porter atteinte à la production. Ces systèmes de cultures entretiennent la qualité du sol, mais permettent aussi de restaurer les fonctions des sols cultivés dans des conditions exigeantes. À terme, il s'agit aussi de réduire l'utilisation de machines et le recours aux intrants externes – produits phytosanitaires, par exemple – lors de l'exploitation.

La nutrition et la protection des plantes font partie des mesures culturelles importantes, auxquelles les organismes du sol peuvent contribuer activement. Des champignons mycorhiziens, des couverts végétaux, des nématodes entomopathogènes et des bactéries *Pseudomonas* ont notamment été étudiés pour leur rôle en tant qu'auxiliaires de fertilisation ou qu'agents de biocontrôle. L'influence des pratiques agricoles sur ces différents organismes bénéfiques et l'intérêt de leur inoculation ont également été testés. Les résultats sont encourageants et les études se poursuivent en vue d'une utilisation pratique.

Des méthodes scientifiques développées ou mises en œuvre dans le cadre du PNR 68 ont conduit à dresser un inventaire des outils permettant d'évaluer la qualité du sol en termes de diagnostic et de monitoring. Ces outils s'adressent aux différents milieux concernés par la gestion des sols agricoles.

Enfin, la ST1 expose des stratégies qui contribuent à la préservation ou à l'amélioration de la qualité du sol tout en répondant aux exigences d'une production durable. Elles tiennent compte des besoins d'action prioritaires mis en évidence dans le cadre du PNR 68, de l'évolution du contexte de la production agricole suisse et des champs de tensions auxquels sont soumis les agricultrices et agriculteurs. En vue de progresser vers une utilisation durable de la ressource sol, la ST1 identifie les conditions-cadres nécessaires à différentes échelles de responsabilité : production primaire, système de connaissance, filières agroalimentaires, politique. Ces propositions aboutissent à la vision d'une agriculture qui est davantage basée sur le fonctionnement du sol, appropriée au site et à sa région, et recourt de manière réduite aux intrants externes. Ces stratégies invitent l'ensemble des acteurs à faire preuve d'innovation pour relever les défis du futur.

En 2012, le Fonds national suisse de la recherche scientifique (FNS) a lancé sur mandat du Conseil fédéral le Programme national de recherche « Utilisation durable de la ressource sol » (PNR 68). Ses objectifs étaient d'améliorer la connaissance du système sol, de développer des outils nécessaires à l'évaluation de sa qualité et d'élaborer des stratégies pour une utilisation durable du sol. La présente synthèse thématique ST1 « Sol et production alimentaire » met en exergue l'importance de ces objectifs pour la production alimentaire. S'appuyant sur les résultats du PNR 68, elle explicite comment les sols agricoles suisses doivent être cultivés pour assurer une production durable. Dans cette perspective, l'évolution des défis et problématiques – du Programme national de recherche « Utilisation du sol en Suisse » (PNR 22) au PNR 68 (chapitre 2) – vaut la peine d'être retracée. La recherche académique n'a pas pour objectif premier de délivrer des recettes pour répondre aux défis de la pratique, mais elle apporte les clés essentielles à la résolution des problématiques. Pour souligner cette perspective, la présente synthèse thématique s'est attelée à croiser les principaux résultats des projets du PNR 68 avec les problématiques actuelles de la production agricole et ali-

mentaire. Le chapitre 3 s'intéresse aux principales atteintes portées à la qualité du sol. Comme toute ressource naturelle à la disponibilité limitée, le sol nécessite protection. Celle-ci s'adresse à un ensemble de fonctions physiques, chimiques et biologiques qu'il convient de préserver. Les résultats des recherches du PNR 68 permettent de mieux appréhender deux problèmes majeurs: le tassement et la perte de matière organique (MOS).

Le chapitre 4 est consacré aux pratiques culturales contribuant à la protection du sol, en particulier à la réduction du travail du sol et aux couverts végétaux.

Les chapitres 5 et 6 reviennent sur l'importance de la biodiversité et présentent les contributions majeures des organismes du sol pour la production alimentaire. Ils concernent respectivement la nutrition et la santé des plantes.

Après les résultats des projets, des outils d'évaluation de la qualité du sol portant tant sur le diagnostic que sur le monitoring sont présentés au chapitre 7, avant qu'il soit discuté de nouvelles stratégies de gestion de la qualité du sol au chapitre 8.

2.1 Retour sur « L'affaire sol »

Intitulée « L'affaire sol – pour une politique raisonnée de l'utilisation du sol », la synthèse¹ du dernier Programme national de recherche axé sur le sol « Utilisation du sol en Suisse » (PNR 22) avait été publiée en 1991. L'agriculture de l'époque était décrite comme « exclusivement axée sur la production de biens commercialisables » et négligeait « des tâches annexes liées à l'exploitation agricole, telles que la sauvegarde des biotopes et du paysage ou la contribution à la régulation des cycles naturels ». Cette agriculture intensive était le fruit d'une politique agricole développée depuis la Deuxième Guerre mondiale et durant plusieurs générations. En 1991, les problèmes liés aux sols agricoles concernaient « le tassement et l'érosion, la concentration de polluants, la destruction de la vie du sol, l'élimination de structures paysagères, l'évincement et l'extinction de la flore et de la faune sauvage ». Le bilan de la fertilité des sols relevait que le contrôle du niveau des émissions et des apports directs de polluants constituait le seul moyen de réduire cette pollution. Par ailleurs, l'adoption d'une agriculture « douce » et diversifiée devait permettre de remplir d'autres fonctions que la seule production alimentaire, et il était souligné que la politique conduisait à tolérer et à encourager « des méthodes de production qui nuisent au sol et détruisent des surfaces proches de l'état naturel ».

La synthèse concluait qu'« un renversement de la tendance à l'intensification n'était pas en vue ». Les experts étaient également d'accord pour affirmer que de « fortes poussées d'intensification et de technicisation étaient encore imminentes », poursuivant une évolution signifiant « le passage progressif d'une utilisation multifonctionnelle du sol à une utilisation monofonctionnelle du sol ». Les auteurs de

« L'affaire sol » en appelaient donc à une agriculture multifonctionnelle basée sur un nouveau contrat social entre la collectivité et l'agriculture pour une conception plus écologique de la production. Les bases d'une production intégrée (PI; glossaire, p. 86) avaient déjà été jetées depuis longtemps – par la communauté scientifique, dont le message d'Ovronnaz de l'Organisation Internationale de Lutte Biologique (OILB) en 1977, mais aussi par les acteurs de la pratique qui avaient fondé la même année le Groupement des Arboriculteurs Lémaniques pratiquant les Techniques Intégrées (GALTI)². Il faudra néanmoins attendre jusqu'en 1993 pour que la PI soit introduite en tant que programme écologique pour l'agriculture suisse. Dès 1996, les deux tiers des exploitations y participaient, et plus de 90% trois ans plus tard. La mise en œuvre de cette politique a entraîné des modifications majeures, qui peuvent certainement être considérées comme révolutionnaires, pour l'agriculture suisse. Cette réorientation de la politique agricole a été validée par le peuple en 1996, lors d'une votation qui a ancré dans la Constitution (RS 101, art. 104 Cst.) le principe d'une production répondant à la fois aux exigences du développement durable et à celles du marché. Aujourd'hui, elle constitue toujours la base de la politique agricole, dont le programme est réexaminé tous les quatre ans par la Confédération.

Formes d'agriculture

Les différentes formes d'agriculture peuvent être positionnées, d'une part, par rapport à l'anthropisation des dynamiques naturelles et, d'autre part, par rapport à leur complexification, leur diversification et leur aggradation (par opposition à uniformisation, simplification et dégradation)³. L'échelle de différenciation peut concerner l'itinéraire culturel (la parcelle), le système de culture (la rotation), le système de production (l'exploitation agricole), ou le territoire agricole (bassins versants, régions).

L'agriculture écologiquement intensive a été plus particulièrement mise en avant ces dernières années et apparaît dans plusieurs projets du PNR 68. Elle est basée sur les fonctionnalités naturelles qu'un écosystème offre⁴. Doré et collaborateurs ont enrichi cette définition de cinq voies, que l'agronomie peut poursuivre pour consolider l'intensification écologique⁵: le recours au progrès en science des plantes, le design de systèmes de cultures inspirés d'écosystèmes naturels, l'utilisation des connaissances de la pratique pour nourrir la recherche scientifique et l'innovation, ainsi que les nouvelles approches méthodologiques que sont l'utilisation plus systématique de méta-analyses et d'analyses comparatives de systèmes.

2.2 Évolution de l'agriculture depuis «L'affaire sol»

L'agriculture actuelle s'inscrit dans une suite de révolutions agricoles qui sont caractérisées depuis le XIX^e siècle par la mécanisation lourde et le recours croissant à des intrants⁶. Depuis la mise en œuvre d'une PI en Suisse, l'intérêt de la société et de la politique pour l'agriculture et ses sols est resté particulièrement élevé. Ceci a conduit à l'élaboration d'outils législatifs – comme la loi sur l'agriculture (LAg, RS 910.1) et l'ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol, RS 814.12) – et incitatifs – comme les prestations écologiques requises (PER) – qui prônent une agriculture multifonctionnelle et une conception plus écologique de la production. Actuellement, ces outils de protection active du sol comprennent :

- les PER (bilan de fumure équilibré, assolement régulier, protection appropriée du sol, sélection et utilisation ciblée des produits phytosanitaires),
- les contributions à l'efficacité des ressources dans le cadre de l'ordonnance sur les paiements directs (OPD, RS 910.13, art. 77 à 82, dont des contributions pour les techniques culturales préservant le sol),

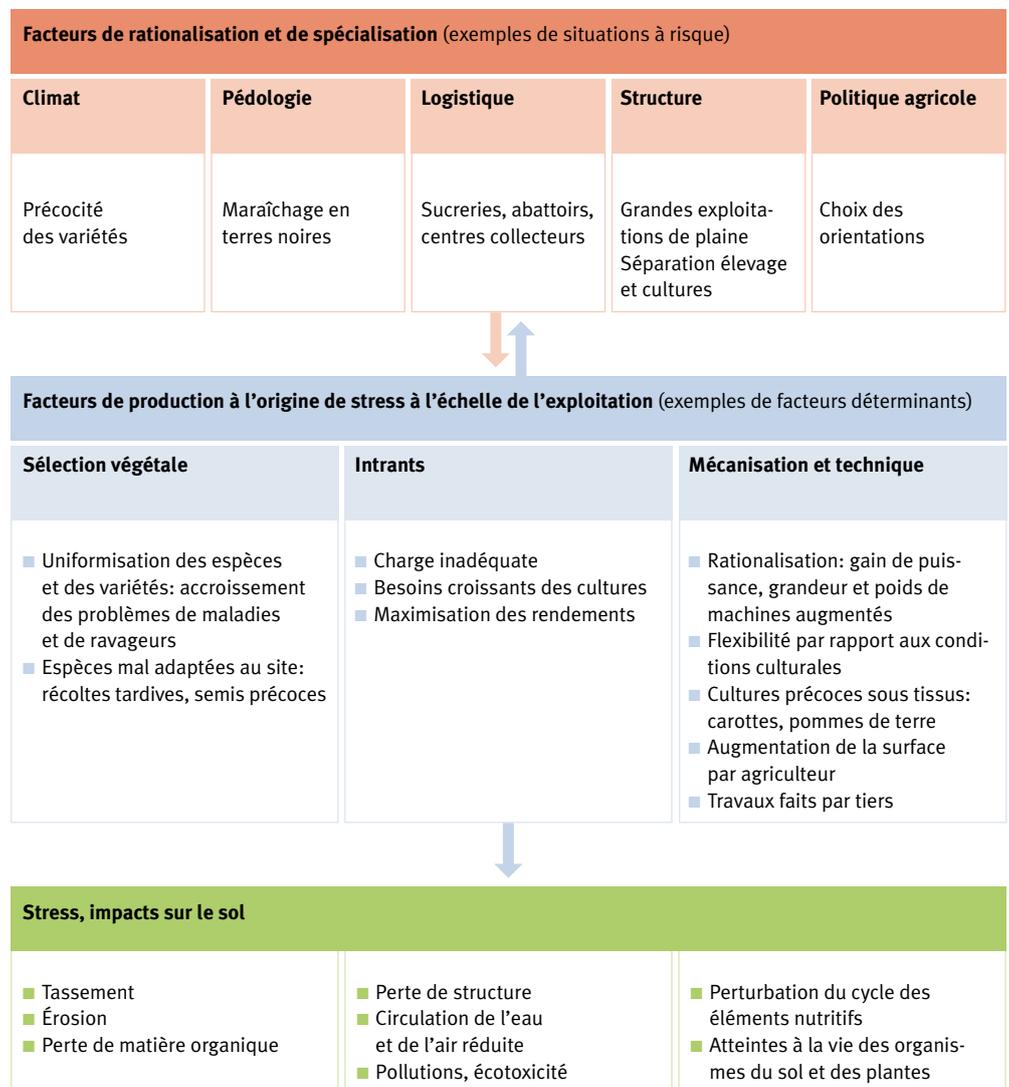
- les programmes d'utilisation durable des ressources (art. 77a et 77b LAg, dont les programmes nitrates),
- les contributions aux systèmes de production (bio, extenso, production de lait et de viande basée sur les herbages).

Cette nouvelle politique suisse, que l'on retrouve aussi à l'échelle internationale, a eu pour résultante le développement de différentes formes d'agriculture selon les contextes (encadré). Actuellement, on distingue principalement deux systèmes de production agricole en Suisse: sur 1,05 million d'hectares de surface agricole utile (SAU), la majorité concerne la PI basée sur les prestations écologiques requises et 14% sont consacrés à l'agriculture biologique (142 000 ha)⁷, l'agriculture industrielle n'étant pas viable économiquement. En ce qui concerne les systèmes de culture, il faut également mentionner des formes d'agriculture de conservation, l'exploitation extensive avec la culture extenso ou la production fourragère à base d'herbages pour certaines exploitations en production animale. Toutes ces désignations recouvrent néanmoins un très large spectre de pratiques agricoles.

Celles-ci dépendent directement de l'adoption (ou non) de développements techniques liés à la sélection végétale, l'utilisation d'intrants ou la mécanisation. Elles sont aussi déterminées par les stratégies mises en œuvre pour réguler les processus pédologiques et climatiques et pour s'affranchir en quelque sorte des contraintes correspondantes. La culture hors-sol sous

serre, qui limite les risques de pertes de récolte, constitue de ce point de vue la solution ultime. De même, les développements territoriaux et la spécialisation de l'agriculture dont ils s'accompagnent ainsi que les cultures pratiquées déterminent l'engagement des facteurs de production, ce qui exerce des conséquences positives ou négatives sur la qualité du sol.

Illustration 1
Principaux facteurs ayant contribué à l'évolution des activités agricoles des régions et des techniques de conduite des cultures, ainsi que risques de stress et impacts en résultant pour le sol.



L'illustration 1 reprend les principaux facteurs liés aux développements de l'agriculture suisse depuis le PNR 22 au début des années 90. Les exploitations et les régions se sont spécialisées en fonction de critères climatiques, topographiques, pédologiques, mais aussi logistiques, structurels ou liés aux politiques régionales. Parallèlement, les avancées réalisées en matière de sélection végétale, d'intrants, de mécanisation et de technique ont accompagné et permis ces développements. Cette évolution a conduit à la résolution de certains problèmes, mais aussi à la persistance ou à l'émergence de nouveaux défis, stress ou impacts – dont le tassement du sol, l'érosion, la perte de mos et la perte de biodiversité, que le PNR 68 a plus particulièrement étudiés.

Selon l'Office fédéral de la statistique (ofs), l'agriculture suisse a perdu 2% de sa capacité de production entre 1990 et 2015, 17 000 ha ayant été transférés à d'autres usages comme le bâti, les routes, l'afforestation, etc. Durant cette période, 40 000 exploitations et 99 000 emplois (tab. 1) ont disparu. 40 000 ha de terres ouvertes ont entre-temps été convertis en herbages ou affectés à

d'autres utilisations agricoles et non agricoles. Les véhicules agricoles immatriculés se sont diversifiés et leur nombre a augmenté de 17,3%, l'ensemble du parc des véhicules à moteur enregistrant parallèlement une progression de 55,8%. La part des tracteurs agricoles de plus de 5 tonnes a été multipliée par 60 et représente 34,8% du parc. Cette évolution du machinisme suit notamment les besoins de rationalisation et le progrès technique, mais aussi les développements voulus par les constructeurs actifs à un niveau mondial. Les apports de phosphore ont largement diminué, bien davantage que les apports d'azote ou de matières actives (produits phytosanitaires, PPS). Ces évolutions ont conduit à des intensités de production très contrastées selon les conditions pédologiques, climatiques et structurelles. Globalement, les rendements sont restés stables, alors que les exigences de qualité ont crû (paiements à la qualité). Si aucune donnée statistique sur le long terme n'est disponible pour le taux d'auto-provisionnement, le rapport agricole 2017 de l'Office fédéral de l'agriculture (OFAG)⁸ montre que la production animale est le pilier principal

Tableau 1
Évolution de l'agriculture de 1990 à 2015.

Source : Office fédéral de la statistique.

	Surface agricole utile (SAU, en 1000 ha)					Structure des exploitations (en 1000)		Apports (en 1000 t)			
	Total	Terres ouvertes	Surfaces herbagères	Cultures pérennes	Autres affectations	Nombre d'exploitations	Nombre d'emplois	Nombre de véhicules agricoles	Azote total	Phosphore total	Matières actives
1990	1067	313	725	22	7	93	254	163	291	46	2,3
2015	1050	273	739	24	14	53	155	191	250	28	2,1
Différence	-17	-40	+14	+2	+7	-40	-99	+28	-41	-18	-0,2
Évolution	-2%	-13%	+2%	+9%	+100%	-43%	-39%	+17%	-14%	-39%	-9%

de l'agriculture suisse avec une part indigène de produits d'origine animale de 99% en 2015. Sur la même période, la part des produits végétaux atteignait 42%. Le taux d'auto-provisionnement en denrées alimentaires brut total s'élevait à 59% en 2015 et le taux d'auto-provisionnement net total représentait 51% – si l'on considère l'importation d'aliments pour animaux. En revanche, aucune valeur d'auto-provisionnement ne prend en considération l'importation d'énergie, d'engrais et de PPS.

2.3 Problématiques actuelles

Les offices fédéraux publient régulièrement des rapports qui font état de l'état de l'agriculture, des défis et des dangers. Le rapport agricole 2014⁹ dresse un aperçu des principales thématiques concernant les sols agricoles :

- La pollution des sols provient de deux sources principales bien identifiées : les métaux lourds et les excédents de nutriments liés aux fourrages importés (concentrés, compléments), ainsi que les matières actives et métaux lourds des PPS.
- L'importation de fourrages continue de gagner en importance. Elle accroît les déséquilibres des cycles des éléments nutritifs (phosphore) dans les régions de production animale et les apports de métaux lourds (cuivre et zinc apportés en compléments alimentaires). Ce problème a été étudié dans le cadre du projet MISOTRAG du PNR 69.
- Les PPS et leurs résidus sont contestés pour leur (éco)toxicité. Leurs émissions et leurs impacts restent encore et toujours mal documentés sur le long terme. Une tendance nette relative à leur utilisation n'a pas été observée.
- Les excédents en phosphore à l'échelle nationale ont fortement diminué entre 1990 et 2000. Toutefois, l'évolution depuis 2004 est faible, car les importations d'aliments

pour animaux ont augmenté sans être accompagnées d'une baisse consécutive de l'utilisation des engrais minéraux. Bien qu'équilibrés à l'échelle de l'exploitation, les apports de phosphore restent trop importants au regard du pouvoir de filtration et d'épuration du sol de certaines régions spécialisées en production animale (lac de Zoug, lac de Greifen). Comme l'a démontré le projet SYSTÈME D'ALERTE PRÉCOCE du PNR 68, à l'échelle des parcelles, ce sont les alentours des bâtiments qui sont les plus chargés¹⁰. À l'inverse, les bilans en phosphore des exploitations de grandes cultures sans bétail sont plutôt négatifs. Pourtant le transfert entre les exploitations largement pourvues en nutriments vers celles qui sont déficitaires reste encore limité.

- Dans les exploitations de grandes cultures sans bétail, on constate une tendance à la perte d'humus. Cette évolution résulte de la spécialisation des exploitations, des exportations trop systématiques de résidus de récolte et du manque de transferts d'engrais organiques entre les exploitations (paille contre fumier).
- Dans ces mêmes exploitations, bien que les prescriptions requises soient respectées, la couverture du sol est modeste et atteint en moyenne 60% avec des variations selon les pratiques agricoles.

L'Office fédéral de l'environnement (OFEV) et l'Office fédéral de l'agriculture (OFAG) ont publié en 2016 un rapport sur la protection des sols¹¹ qui décrit les trois principaux dangers qui menacent actuellement la fertilité des sols en Suisse : les polluants, l'érosion et le tassement du sous-sol.

2.4 Qualités et fonctions du sol

Si certaines problématiques actuelles sont analogues à celles rencontrées à l'époque du PNR 22, l'intégration de la notion de qualité et de fonctions du sol dans l'analyse

constitue un angle d'attaque innovant apporté par le PNR 68. La qualité des sols¹², c'est-à-dire la capacité d'un sol à remplir ses fonctions dans les limites d'un écosystème, reflète tout autant leur multifonctionnalité que la variabilité induite par leur diversité et la pluralité des usages et des choix opérés par la société. Le sol remplit ce faisant des fonctions qui concernent aussi bien la production agricole et forestière que l'épuration de l'eau ou l'habitat offert à la biodiversité. L'intérêt de mieux les connaître réside dans le fait qu'elles offrent des services écosystémiques qu'il est possible de mobiliser pour résoudre entièrement ou partiellement des problèmes actuels. Des travaux effectués dans le cadre du PNR 68¹³ ont mis en évidence l'importance des contributions du sol en termes de services écosystémiques et souligné leur faible poids dans les prises de décision (synthèse thématique ST3 «Un agenda du sol pour l'aménagement du territoire»¹⁴). Afin de démontrer le rôle des fonctions du sol et d'accroître leur prise en compte dans les processus décisionnels, les projets du PNR 68 se sont attachés à analyser en profondeur les propriétés et processus sur lesquels se fondent ces fonctions et, par extension, les services à en attendre.

Dans le cadre d'une production agricole basée sur le sol comme ressource naturelle, les fonctions suivantes sont prépondérantes :

- fonction de production : par exemple produits agricoles et eau potable,
- fonction de régulation : stockage, filtration et épuration de l'eau, des éléments nutritifs, des métaux lourds ou des contaminants,
- fonction d'habitat pour les microorganismes : mycorhization, fixation symbiotique, biocontrôle et plantes.

Ces fonctions sont essentielles pour la fertilité naturelle du sol, la nutrition et la santé des plantes. Elles offrent ainsi des services qui permettent de limiter les interventions culturales – travaux du sol, épandage d'engrais, interventions phytosanitaires.

L'illustration 2 présente les quatre atteintes majeures que sont le tassement, la perte de matière organique, l'érosion et la perte de biodiversité, les facteurs responsables ainsi que les interactions. Si des projets du PNR 68 se sont intéressés en détail au tassement des sols et à la perte de MOS (voir entre autres les projets TASSEMENT DES SOLS, ENTRÉES DE CARBONE et COUVERTS VÉGÉTAUX), la perte de biodiversité des sols et l'érosion n'ont pas été étudiées à proprement parler. Ces atteintes ne sont évoquées que brièvement ici et sont plus spécifiquement présentées aux chapitres 4, 5 et 6.

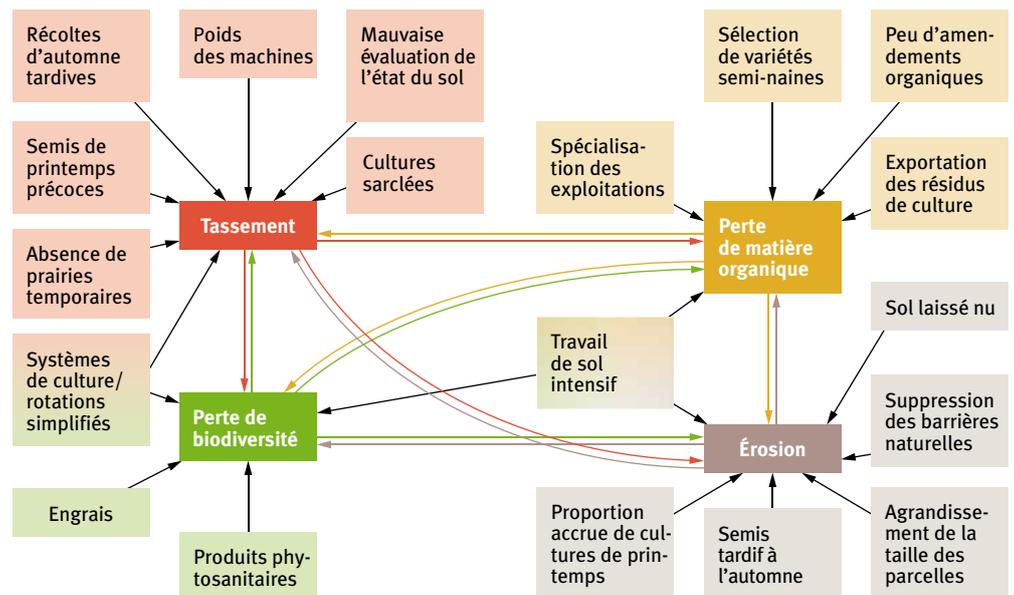
Les projets du PNR 68 n'ont pas pu aborder tous les thèmes préoccupant la recherche ou dont il est débattu dans la société, notamment en ce qui concerne les atteintes chimiques des sols (pesticides, métaux lourds, acidification). Ces problématiques apparaissent tout de même de façon sous-jacente dans différents chapitres.

3.1 Le tassement des sols : un phénomène sournois

Le tassement des sols représente une menace majeure pour la productivité de l'agriculture moderne et pour les autres fonctions du sol. Il apparaît lorsque la charge due aux machines est supérieure à la portance du sol. En Suisse, cette évolution ne fait actuellement l'objet d'aucun monitoring au plan national, mais il est estimé qu'en Suisse centrale, par exemple, un tiers de sols sont compactés¹⁵. Il est connu depuis longtemps que les sols sous culture maraîchère sont sensibles au tassement. On note néanmoins qu'à l'heure actuelle, de plus en plus de sols exploités pour de grandes cultures ou en tant que prairies subissent aussi des dégâts de tassement, qui résultent en premier lieu de l'augmentation constante du poids des machines. D'autres facteurs, comme la spécialisation des exploitations, la simplification des systèmes de culture ou de la rotation, augmentent le risque de tasse-

Illustration 2

Les quatre atteintes majeures du sol considérées dans cette étude, lien entre ces différentes atteintes et facteurs qui en sont à l'origine.



Conséquences du tassement des sols

Le projet TASSEMENTS DES SOLS du PNR 68 a mis en place un dispositif d'observation de la structure du sol (« Soil Structure Observatory [SSO] » à l'Agroscope de Zurich-Reckenholz)¹⁶ en 2014. Cet observatoire sert à étudier sur le long terme l'évolution des fonctions du sol suite au tassement du sol et à tester différentes pratiques de restauration de la structure du sol et de ses fonctions. Quatre traitements post-tassement sont examinés : sol nu, prairie permanente, rotation culturale avec et sans labour (triticale, maïs d'ensilage, blé et colza d'automne). Sur les parcelles en sol nu et en prairie permanente, aucun travail du sol n'est réalisé et aucun engin agricole n'est utilisé. Les parcelles en rotation culturale permettent de comparer le potentiel d'une restauration purement biologique sans labour (par les plantes et les vers de terre) à la pratique classique d'une restauration physique par le travail du sol (labour) suivi par la mise en place d'une culture (restauration biologique).

ment. À cet égard, les facteurs à risque de la rotation sont une présence importante de cultures sarclées (pommes de terre, betteraves, etc.), l'absence de prairies temporaires, une succession culturale inadaptée ou l'utilisation de variétés semées précocement au printemps, lorsque les sols sont encore humides, ou récoltées tardivement, lorsque les sols sont à nouveau saturés en eau. L'appauvrissement des sols en matière organique est un facteur aggravant sur le long terme. Il s'ajoute à cela que les effets des machines sur le sol sont encore méconnus ou que l'état du sol (humidité, portance) n'est pas correctement évalué avant les interventions culturales.

Les conséquences du tassement ont été étudiées par le projet TASSEMENT DES SOLS du PNR 68 dans le cadre d'un dispositif d'observation de la structure du sol (encadré).

Effets sur le fonctionnement du sol

Le tassement conduit à une déformation du sol et à une modification de la structure, c'est-à-dire de l'arrangement spatial des constituants et des pores. Dans les sols compactés, la proportion de macropores, assurant l'écoulement rapide de l'eau, et de mésopores est fortement réduite, ce qui

entraîne une diminution de la porosité du sol et de la connectivité des pores (ill. 3) ainsi qu'une augmentation de la densité du sol. Le dispositif d'observation de la structure du sol a montré que ces propriétés physiques étaient altérées au-delà de la profondeur du travail du sol, sur environ un demi-mètre¹⁶. Ces modifications réduisent les fonctions de transports liquides et gazeux du sol et sa capacité de rétention de l'eau. Dans l'essai de Reckenholz, la capacité d'infiltration de l'eau de surface du sol avait diminué de trois ordres de grandeur¹⁶. Cela signifie qu'après tassement, le sol est quasiment imperméable, car sa surface a été lissée par les engins agricoles. De la même manière, un seul passage de machine avait entraîné dans les 30 premiers centimètres du sol une importante augmentation de la résistance à la pénétration, qui avait approximativement été multipliée par deux par rapport à la zone non compactée (environ 2,5 MPa). Une résistance accrue (à partir de 2 MPa) réduit cependant fortement la croissance racinaire des cultures^{17,18}. Le tassement modifie en outre les réactions chimiques et la disponibilité en éléments nutritifs, car il influe sur l'aération et dégrade les conditions d'habitat pour les organismes aérobies. Par effet domino, ceci affecte toute une série de services écosystémiques

liés à la biodiversité – du cycle de l’eau (approvisionnement, stockage, filtrage) à la production alimentaire et à la régulation du climat¹⁹. La première année suivant l’évènement, le tassement réduit le rendement de 20 à 80%. L’effet du tassement s’estompe ensuite plus ou moins rapidement selon les moyens de restauration mis en œuvre.

Effets sur le système racinaire des plantes

Le tassement du sol modifie les conditions de croissance des racines, avec des conséquences sur leur taille, leur architecture et leur anatomie. Le projet TASSEMENT DES SOLS du PNR 68 a étudié pour la première fois l’effet du tassement sur le système racinaire des céréales (triticale) et du soja. Il a notamment démontré que la profondeur d’enracinement était largement réduite dans un sol compacté. Au niveau anatomique en revanche, des réponses différentes selon l’espèce ont été observées (encadré).

Effets sur les vers de terre et la biomasse microbienne

Le dispositif de Reckenholtz a par ailleurs mis en évidence que le tassement conduisait à une perte de plus de 50% de la population initiale de vers de terre deux mois après le tassement (tab. 2, p. 20)¹⁶. Il a été suggéré que cette perte était due à la mortalité accrue durant le tassement et aux conditions de vie moins favorables après l’évènement. Aucun effet immédiat n’a été observé sur la population microbienne. Des effets à plus long terme peuvent cependant être attendus en raison de modifications des propriétés physiques du sol, une étude ayant montré que les bactéries anaérobies, c’est-à-dire adaptées aux conditions de faible disponibilité en oxygène, étaient sélectionnées dans les sols compactés²⁰.

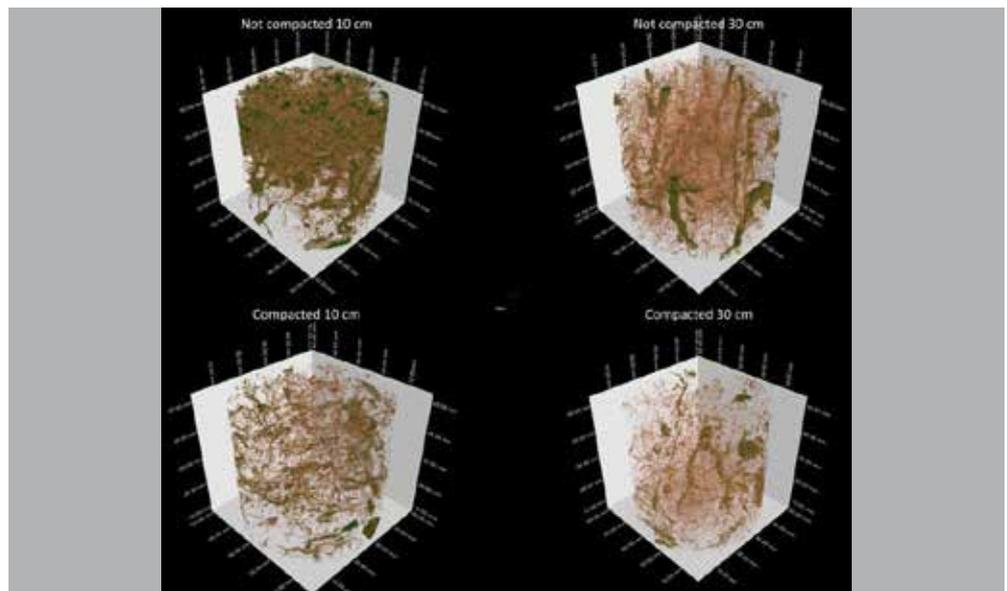
a) Mécanismes de restauration d’un sol compacté

Contrairement aux effets du tassement sur les processus du sol, les mécanismes impli-

Illustration 3

Porosité du sol observée pour un sol non compacté (en haut) et pour un sol compacté (en bas) à une profondeur de 10 cm (à gauche) et de 30 cm (à droite) deux semaines après le tassement du sol.

Projet TASSEMENT DES SOLS du PNR 68¹⁶.



qués dans la restauration des sols compactés et les coûts écologiques et économiques en découlant sont relativement peu documentés. Les coûts écologiques sont liés à la réduction des fonctions qu'un sol compacté peut remplir, alors que les coûts économiques correspondent à la perte de rendement et aux coûts indirects induits par l'augmentation des fertilisants

et de l'énergie nécessaire au travail du sol, etc. Des coûts liés à des effets se manifestant hors de la parcelle compactée – du fait d'une accumulation de sédiments liée à l'érosion ou de changements climatiques liés à la production de N₂O – doivent également être pris en compte et, ce, de la phase de tassement à la restauration complète de l'ensemble des fonctions du sol. À cette fin,

Tableau 2
Biomasse des vers de terre dans des sols compactés et non compactés deux mois après tassement.

Projet TASSEMENT DES SOLS du PNR 68¹⁶.

Catégories (point 7.1.3, p. 55)	Contrôle non compacté	Sol compacté	Sol compacté / contrôle
	kg/ha		
Épigés	115	35	0,30
Endogés	476	155	0,33
Anéciques	1484	605	0,41
Biomasse totale	2075	794	0,38

Effet du tassement sur le système racinaire des plantes

Le tassement affecte fortement l'architecture et l'anatomie des racines du triticale et du soja, mais de façon différente selon l'espèce (ill. 4)²¹. Le développement du système racinaire du triticale a considérablement été limité et la profondeur d'enracinement était plus faible qu'en conditions non compactées. Une forte réduction du nombre de racines nodales ainsi qu'une croissance plus superficielle qu'en conditions non compactées ont été observées. En outre, le tassement a entraîné une réduction de la ramification des racines et une augmentation de leur diamètre, facilitant ainsi leur pénétration dans les couches compactées. Cette augmentation de diamètre s'accompagne d'une augmentation de la surface des racines (cortex), le développement du cylindre central n'étant pas affecté par le tassement. Cette partie au centre de la racine contient les vaisseaux conducteurs. Dans le cortex, le tassement a conduit à la formation d'aérenchyme, un tissu permettant la circulation de l'air dans les racines. Cette adaptation anatomique assure la circulation de l'oxygène jusqu'à l'extrémité de la racine et ainsi le maintien de la croissance malgré la disponibilité en oxygène limitée observée dans les sols compactés.

En ce qui concerne le soja, les adaptations architecturales (augmentation du diamètre) et anatomiques (formation d'aérenchyme) du système racinaire au tassement sont apparues durant le développement initial, mais n'étaient plus visibles dans les racines matures en raison de la croissance des racines latérales. À un stade de développement avancé, le tassement du sol a principalement affecté la croissance du pivot, qui a montré un diamètre inférieur et une plus faible profondeur d'enracinement qu'en conditions non compactées. Le nombre de racines adventives du soja n'a pas été influencé par le tassement. Sur le plan anatomique, la surface du cylindre central et du cortex du pivot était réduite en conditions compactées.

il est essentiel de savoir à quelle vitesse la structure du sol se régénère. Jusqu'à présent, la majorité des études se focalisaient essentiellement sur le rendement^{22,23}. Ce n'est que récemment que quelques études se sont intéressées à la structure du sol et à ses fonctions de transport²⁴⁻²⁶.

Il convient de différencier la restauration due à des mécanismes biotiques (racines des plantes, faune du sol) et à des moyens abiotiques (travail du sol par les machines agricoles, phénomènes de retrait et de gonflement). Dans l'essai de Reckenholz, la restauration par le travail du sol dans une rotation classique est comparée à la restauration uniquement biologique. Le projet TASSEMENT DES SOLS du PNR 68 s'est intéressé en particulier à la modification de la structure du sol (bioturbation) par les racines des plantes et les vers de terre.

Restauration par un travail du sol suivi d'une culture

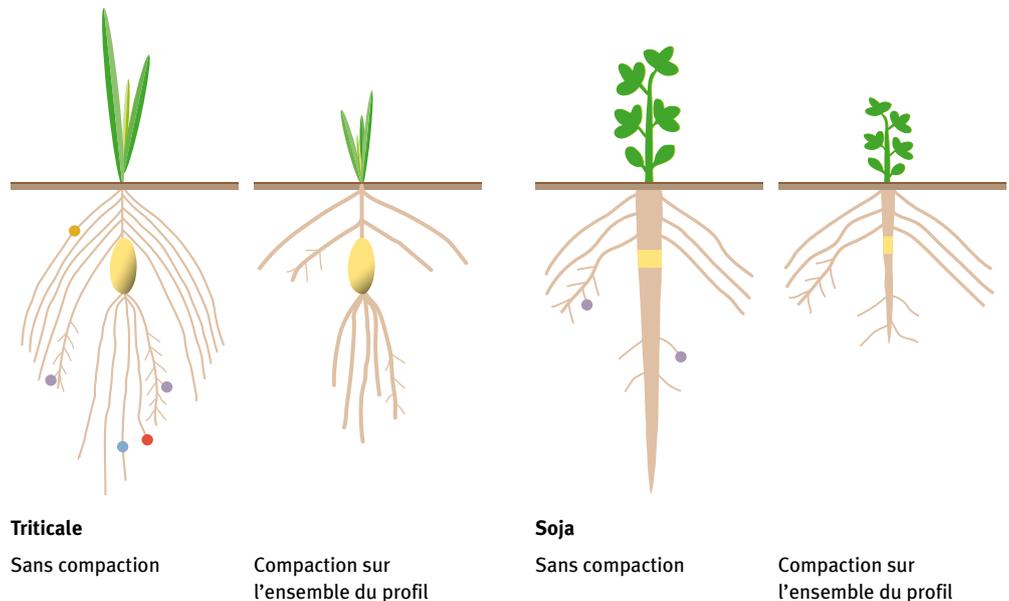
Les premiers résultats de l'essai de Reckenholz montrent que le labour permet de ramener la masse volumique apparente de la couche travaillée (0-30 cm) à un niveau proche de celui avant le tassement. Le travail du sol contribue également à restaurer partiellement la macroporosité du sol, améliorant ainsi la diffusion de l'air. Dans les horizons inférieurs, ces propriétés ne sont pas restaurées, si bien qu'un an et demi après le tassement, les fonctions de transport de l'eau et des gaz du sol ne sont pas rétablies par le travail du sol malgré des différences notables de l'état du sol. Face aux modifications de la structure fine du sol, un travail du sol intensif ne représente donc qu'une solution limitée et transitoire.

Le projet TASSEMENT DES SOLS du PNR 68 a également testé une nouvelle méthode de restauration du sol qui consiste à créer

Illustration 4
Représentation schématique du système racinaire du triticale et du soja en conditions non compactées et compactées.

(adapté de²¹)

- Racine nodale
- Racine latérale
- Racine primaire
- Racine séminale
- Pivot
- Racine adventive



des pores artificiels à l'aide de tiges métalliques (ill. 5). Ce test a montré que les racines ont la capacité de croître de façon active vers des spots de résistance physique moindre et présentant une plus haute concentration en oxygène. Un comportement différent selon l'espèce a ce faisant été mis en évidence²⁷. Alors que certaines espèces profitent de la résistance plus faible à l'intérieur des macropores pour y développer leurs racines (maïs), d'autres espèces ne font en majeure partie que les traverser et bénéficient ainsi d'une source d'oxygène supplémentaire (soja, blé). Une perforation du sol a cependant un effet bénéfique sur la biomasse aérienne et la surface foliaire, quelle que soit l'espèce²⁷. Les tests n'ont pour le moment été effectués qu'en chambre de croissance ou en champ sur une surface limitée et mériteraient d'être mis en œuvre dans la pratique, comme alternative aux tentatives de restauration par le labour ou le décompactage et comme potentielle technologie douce.

Restauration du sol par des mécanismes biotiques

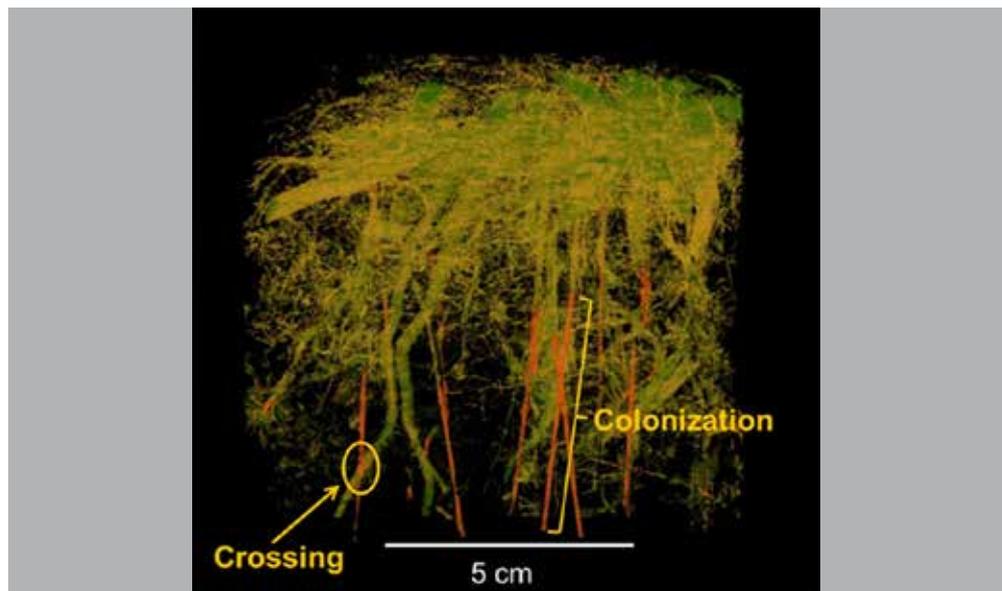
La croissance des racines des plantes et le déplacement des vers de terre contribuent à la restauration de la structure du sol. Cette restauration par voie biotique est considérée comme la voie la plus rapide : sa vitesse est vingt fois supérieure à celle d'une restauration par certains processus abiotiques (retrait, gonflement)²⁸. Elle est probablement améliorée si le sol a une teneur en eau proche ou supérieure à la capacité au champ (capacité de rétention maximale en eau du sol après écoulement de l'eau libre), étant donné que cela réduit la résistance mécanique du sol et facilite la pénétration des racines et des vers de terre.

Le projet TASSEMENT DES SOLS du PNR 68 a étudié la capacité de pénétration des racines et des vers de terre dans un sol compacté. Il a montré que les plantes possédaient une capacité de pénétration

Illustration 5

Racine traversant un macropore créé artificiellement (orange) et racine se développant dans le macropore (colonization).

Photo: Tino Colombi.



Synthèse – tassement du sol

- Le tassement du sol réduit le développement des racines et le rendement des cultures.
 - La structure du sol est l'une des propriétés les plus fragiles du sol dans la mesure où elle peut être détruite en quelques minutes et qu'elle est difficilement reconstructible en quelques années.
 - Le travail du sol ne restaure pas les transports liquides et gazeux du sol à l'échelle microscopique.
 - Les plantes et les vers de terre jouent un rôle déterminant dans la restauration de la porosité du sol.
-

supérieure à celle des vers de terre et qu'elles sont donc moins affectées par le tassement. Du fait de leur diamètre plus faible, les plantes ont en effet besoin de moins d'énergie pour pénétrer dans le sol sur une unité de longueur définie, mais de plus d'énergie par volume de vide. Par rapport aux vers de terre, la pénétration lente des plantes exige également moins d'énergie²⁸.

b) Temps de restauration

En raison du recul limité offert par l'essai de Reckenholz, le temps nécessaire à la restauration des fonctions du sol demeure difficile à évaluer. Sur la base d'une évolution linéaire des fonctions, il est estimé que le temps de restauration devrait osciller entre deux et quatre ans. Toutefois, certains processus n'évoluent pas linéairement : après une première phase d'amélioration rapide, la restauration diminue au fil du temps²⁹. Du fait de cette évolution, un temps de restauration plus long, de l'ordre d'une décennie, est à attendre. La restauration du rendement suit un processus similaire, sachant que la baisse de rendement effective dix ans après le tassement reste limitée (de l'ordre de 1,5%)³⁰. En cas de tassement du sous-sol, la restauration est plus lente et conduit à une baisse de rendement persistante²³.

3.2 Perte de matière organique : un effet négatif à long terme

La matière organique du sol (mos ; humus) est issue de la décomposition et transformation par les microorganismes du sol (débris végétaux et animaux) de la matière organique fraîche arrivant au sol. La mos joue un rôle essentiel : elle contribue à la rétention des éléments nutritifs et de l'eau, favorise la structuration du sol et alimente les organismes du sol. Bien que la teneur en mos soit considérée comme une propriété relativement stable à court terme, on observe une tendance à une diminution dans de nombreux sols agricoles. Du fait de son rôle central, toute diminution de la teneur en mos peut avoir des conséquences sur l'ensemble des fonctions du sol et mettre à long terme la production agricole en péril. Il est donc essentiel d'adopter des pratiques culturales permettant de préserver ou d'augmenter la teneur en mos et de limiter celles accélérant sa perte.

Une diminution de la teneur en mos a été rapportée dans plusieurs essais de longue durée en Suisse (tab. 3, p. 24) – un résultat confirmé par plusieurs études du PNR 68. Plusieurs facteurs à l'origine de la diminution de la teneur en matière organique des sols agricoles ont été identifiés. La spécialisation des exploitations a généralement entraîné une séparation géographique des grandes cultures et de la production animale. Couplé à l'accès facilité aux engrais de synthèse, cela a conduit de nombreuses exploitations à opter pour une fertilisation exclusivement minérale au détriment des engrais de ferme. Bien que les engrais minéraux stimulent rapidement la croissance des plantes en leur apportant certains éléments nutritifs, ils ne permettent pas de compenser les pertes de mos par minéralisation. D'autres facteurs, tels que l'exportation

tation systématique des pailles de céréales ou l'absence de prairies dans la rotation, renforcent la perte de mos. Actuellement, les exploitations ne disposent d'aucune référence concernant les risques présentés par ces pratiques. Une évaluation paraîtrait pourtant pertinente dans la mesure où il a été constaté dans le projet « Sol Vaud » que 86% des exploitations sans bétail exportaient leur paille, et que seul un tiers compensait cette perte par une reprise de fumier³⁵. À l'inverse, la moitié des exploitations avec bétail importait de la paille et les trois quarts n'exportaient pas de fumier. En outre, le travail du sol intensif accélère la minéralisation de la mos et contribue donc à long terme à la diminution de la teneur en mos.

Le projet ENTRÉES DE CARBONE du PNR 68 s'est intéressé plus particulièrement au système racinaire des plantes en grandes cultures, car 30 à 90% des entrées de carbone

proviennent des racines³⁶. De plus, le carbone des racines est réparti de manière plus homogène dans les différents horizons et apparaît plus persistant que le carbone issu des parties aériennes³⁷. Il a été montré que la répartition du carbone entre les racines et les parties aériennes variait fortement selon la culture, sachant que le carbone issu des racines représente une part plus importante pour le blé que pour le maïs ou le soja. La production de carbone dans les parties aériennes augmente par ailleurs avec la dose de fertilisation (essai ZOFÉ; annexe 1, p. 72) et elle est plus importante dans le système conventionnel que dans le système biologique de l'essai DOK (annexe 1, p. 72). À l'inverse, aucune influence n'a été observée sur les entrées de carbone par les racines et la rhizodéposition, ce qui suggère que la fertilisation et le système de culture ne sont pas un levier d'action permettant d'augmenter les entrées de carbone par les racines.

Tableau 3
Évolution de la MOS lors d'essais de longue durée en Suisse (annexe 1, p. 72).

Essai	Lieu	Argile %	Rotation (années)	Travail de sol	Fertilisation	Teneur en matière organique		Années écoulées entre les deux analyses	Publication
						initiale %	dernière analyse %		
P29C – travail de sol (sol argileux)	Changins (VD)	48	4	Labour	Minérale	4,8	3,9	44	³¹
P29C – travail de sol (sol limoneux)	Changins (VD)	25	4	Labour	Minérale	2,6	2,1	44	³¹
P24A – amendements organiques	Changins (VD)	14	5	Labour	Minérale	2,0	1,3	33	³²
DOK – système de culture	Therwil (BS)		7		Minérale	2,6	2,2	20	³³
ZOFÉ – fertilisation	Reckenholz (ZH)	14	8	Labour	Minérale	2,7	2,1	60	³⁴

Le projet ENTRÉES DE CARBONE du PNR 68 a par ailleurs montré que la sélection variétale avait progressivement entraîné une diminution de la profondeur d'enracinement et de la production de biomasse par le transfert de gènes de semi-nanisme (introggression) et contribué ainsi à une réduction des apports de mos. Un retour à des variétés plus anciennes pourrait être une piste de travail pour augmenter les apports de mos par les cultures. D'autres solutions sont exposées au chapitre 4.

3.3 Érosion : un problème toujours irrésolu

L'érosion est caractérisée par l'exportation de sol par l'eau ou le vent. L'agriculture contribue fortement à ces pertes de sol par une exploitation intensive des sols couplée à la suppression des barrières naturelles (arbres, haies). L'agrandissement de la taille des parcelles suite à des regroupements fonciers, la transformation de prairies naturelles en terres cultivées dont le sol reste nu durant une période indéterminée, les semis tardifs à l'automne, une proportion accrue de cultures d'été précoces couvrant le sol tardivement, un travail du sol intensif ou encore la perte de mos aggravent cette problématique.

L'érosion affecte la production agricole, car elle provoque des dégâts très souvent irréversibles. En effet, toute perte de sol induit une perte de mos et de nutriments et une diminution de la capacité de rétention en eau du sol. Les dégâts s'étendent également au-delà de la zone touchée par l'érosion : coulées d'eau et de sédiments dans les parcelles voisines, endommagement d'infrastructures ou pollution de cours d'eau.

En Suisse, l'érosion entraîne en moyenne une perte de sol de 2,1 tonnes par hectare et par an sur les parcelles de grandes

cultures³⁸. Sur la base d'un modèle et de paramètres locaux tels que le relief, les caractéristiques du sol et les précipitations, une carte à haute résolution du risque d'érosion a été élaborée pour l'ensemble de la surface agricole utile (SAU) de Suisse au raster $2 \times 2 \text{ m}^{39}$. Il a ainsi été établi que 44% de la SAU en zone de plaine sont menacés par l'érosion. Cette carte permet d'identifier rapidement les zones exposées et de mettre en œuvre les mesures nécessaires. Outre les surfaces cultivées, les zones d'alpage peuvent également être touchées par l'érosion, bien souvent en raison du pâturage des animaux. Au vu des dégâts irréversibles qu'occasionne l'érosion, il est essentiel de mettre en place des mesures de prévention. Un certain nombre de solutions sont présentées au chapitre 4.

3.4 La biodiversité des sols, un trésor à conserver

Dans son rapport sur l'état de la biodiversité en Suisse, l'OFEV constate qu'il n'est pas satisfaisant⁴⁰. Au-delà de la perte de surfaces naturelles ou extensives, les zones de grandes cultures n'offrent plus un habitat favorable à la biodiversité en raison de l'uniformisation de la végétation et de l'utilisation de fertilisants et de produits phytosanitaires. Ainsi, l'application régulière d'herbicides affaiblit la flore messicole dont 42% des espèces sont considérées comme menacées en 2017. Le recours à des insecticides systémiques augmente la pression sur les insectes, notamment les insectes butineurs. D'autres facteurs agricoles, tels que le tassement ou la perte de mos, peuvent avoir une influence négative plus particulièrement sur les organismes du sol. Actuellement, la perte de biodiversité du sol est mal documentée, probablement en raison de la complexité et de la diversité des communautés. Aucun projet du PNR 68 n'était consacré spécifiquement

à ce thème. En revanche, l'influence de certaines pratiques agricoles sur quelques organismes a fait l'objet d'une attention particulière.

Le sol est l'un des plus grands réservoirs de biodiversité. On estime qu'un gramme de sol contient des millions de bactéries appartenant à plusieurs milliers d'espèces différentes⁴¹. On retrouve également de nombreux champignons, collemboles, nématodes, arthropodes ou vers de terre (ill. 6)⁴². Ces organismes du sol contribuent à de nombreuses fonctions du sol. La perte en nombre et en biodiversité peut donc avoir des conséquences négatives sur les services que l'on peut attendre du sol.

La macrofaune, dont font partie les vers de terre anéciques qui construisent des galeries verticales profondes, exerce des fonctions de brassage appelées bioturbation. Ces animaux enfouissent la matière des horizons superficiels en profondeur et amènent les éléments minéraux en surface. Les ga-

leries résultant de cette activité jouent un rôle essentiel dans l'aération, la rétention de l'eau et la perméabilité du sol. Des animaux faisant partie de la mégafaune, comme les campagnols ou les taupes, creusent également des galeries plus conséquentes.

En ingérant des éléments minéraux et organiques, les vers de terre et les microarthropodes jouent un rôle essentiel dans la formation d'agrégats. L'agrégation est également favorisée par les hyphes des champignons et les fibres végétales. Les bactéries et les champignons sécrètent des polysaccharides qui servent de « colle » et enrobent les agrégats.

Par ailleurs, la minéralisation et l'humification de la matière dépendent de toute une chaîne d'organismes du sol⁴³. La macrofaune fragmente la matière organique fraîche et entame sa décomposition qui est poursuivie par les microorganismes.

Plusieurs organismes contribuent aussi directement à la nutrition des plantes par l'intermédiaire de relations symbiotiques (fixation biologique de l'azote atmosphérique, mycorhization).

Les organismes du sol interagissent les uns avec les autres par prédation ou par compétition. Ceci permet de maintenir les populations en équilibre. Ils assurent également la décomposition des cadavres. Enfin, la méso- et la macrofaune disséminent les spores et les bactéries.

Outre ces nombreuses fonctions contribuant à la production alimentaire, le sol est également connu pour être une source de maladies, de ravageurs et d'adventices. Il peut aussi devenir un réservoir de gènes de résistance aux antibiotiques, gènes qui peuvent être transférés à l'homme. Actuellement, la résistance aux antibiotiques

Illustration 6

Les myriapodes jouent un rôle important dans la formation de l'humus.

Photo: iStockphoto.



constitue un problème de santé publique majeur. Des gènes de résistance ont été retrouvés dans les engrais organiques (lisier et fumier) issus d'animaux traités aux antibiotiques⁴⁴. Hors, ces engrais sont épanchés dans les champs. Le projet **RÉSISTANCE AUX ANTIBIOTIQUES DU PNR 68** s'est intéressé à l'importance des gènes de résistance dans les sols suisses et à l'effet des pratiques agricoles sur les dynamiques

de résistance. Les résultats montrent que les sols étudiés contiennent des gènes de résistance très variés, mais en quantités très faibles. Ils ne présentent donc pas de risques pour la santé humaine. La présence de gènes de résistance augmente certes fortement suite à l'apport de lisier, mais le sol retrouve en quelques semaines le faible niveau initial⁴⁵.

Contribution des systèmes de culture à la protection du sol

4.1 Réduire le travail du sol pour le protéger

Pour pallier à la dégradation des sols causée par l'agriculture et améliorer à long terme leur fertilité, l'agriculture de conservation prône trois principes : la réduction du travail du sol, la couverture permanente du sol par la culture ou par les résidus, et une rotation diversifiée. Le labour permet de contrôler efficacement les adventices et d'incorporer les engrais de ferme, mais accélère simultanément la minéralisation de la mos. Ainsi, un travail intensif du sol entraîne à long terme une diminution de la teneur en mos. À l'heure actuelle, de plus en plus d'agricultrices et agriculteurs adoptent donc des techniques de travail réduit ou même de semis direct. Du fait de l'augmentation des résidus à la surface, les bénéfices directs ou indirects de la réduction du travail du sol sont nombreux. Elle permet de préserver la fertilité, d'améliorer la portance, de limiter l'érosion et le ruissellement et de maintenir l'activité biologique⁴⁶.

Le projet COUVERTS VÉGÉTAUX du PNR 68 a étudié l'influence du travail du sol sur différentes propriétés du sol lors de l'essai de longue durée P29C réalisé à Changins (VD). Cet essai compare quatre méthodes de travail du sol mises en place en 1969 : labour (20–25 cm), travail profond sans retournement (20–25 cm), superficiel sans retournement (10–15 cm) et travail minimum (5–8 cm). En 2007, le travail superficiel sans retournement a été converti en semis direct. Les rendements en travail réduit se sont révélés comparables à ceux du labour³¹, alors que ceux en semis directs étaient inférieurs. Pour le moment, peu de données sont néanmoins disponibles. Plusieurs études ont observé une baisse de rendement durant les premières années suivant la conversion^{47,48}. Cette baisse est principalement due au temps nécessaire à l'adap-

tation du système et à l'acquisition de nouvelles techniques par les agriculteurs^{48,49}. Après quelques années, les rendements atteignent généralement le niveau initial. Le nombre d'interventions constitue une différence majeure entre les systèmes de culture. Elles sont nettement moins fréquentes (environ trois fois moins) pour un travail minimum que pour un labour et encore plus réduites en semis direct. L'intensité des perturbations est donc nettement plus limitée en travail minimum, ce qui diminue la probabilité que le sol soit travaillé dans des conditions d'humidité inappropriées et limite les risques de dégradation.

Cette expérimentation de longue durée a aussi révélé que la réduction du travail du sol permettait de limiter la perte de mos. En 44 ans, si le labour a entraîné une forte baisse de la teneur en mos de la couche superficielle (0–20 cm), qui est passée de 4,8% à 3,9% pour le sol argileux (48% d'argile) et de 2,6% à 2,1% pour le sol limoneux (25% d'argile), la diminution n'était pas significative pour le travail minimum (0,5% dans le sol argileux et 0,1% dans le sol limoneux, ill. 7). La réduction du travail du sol a en outre conduit à une importante concentration de matière organique en surface (ill. 8)^{50–53}, car les résidus de récolte demeurent sur le sol au lieu d'être incorporés en profondeur par le labour. La matière organique en surface présente un plus grand intérêt que celle située en profondeur puisqu'elle contribue directement à la prévention de l'érosion et améliore l'infiltration de l'eau⁵⁴. Une stratification similaire a été observée en semis direct, ce qui suggère que sept ans de semis direct sont suffisants pour modifier favorablement l'état du sol.

Cependant, un travail du sol réduit peut également avoir des conséquences négatives, notamment une densité accrue d'adventices. Les systèmes d'exploitation correspondants

Illustration 7

Évolution de la teneur en MOS dans l'essai P29C à Changins (VD) de 1970 à 2016 selon le travail du sol et le type de sol, adapté de³¹.

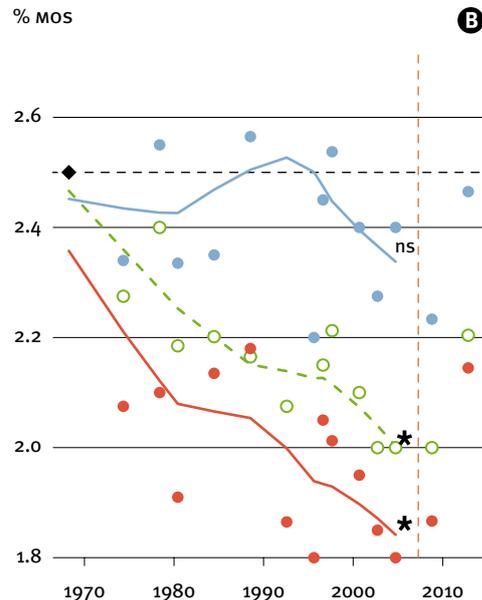
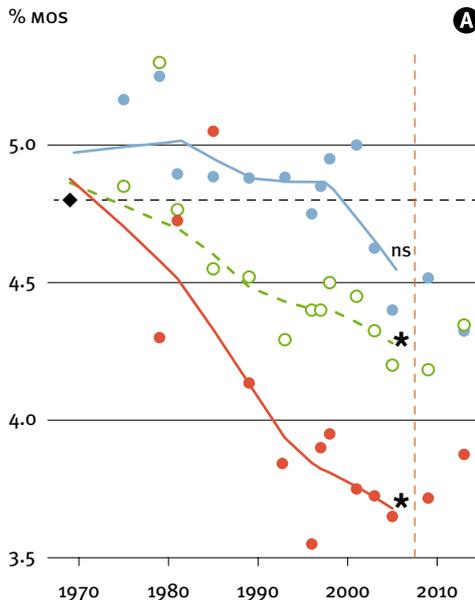
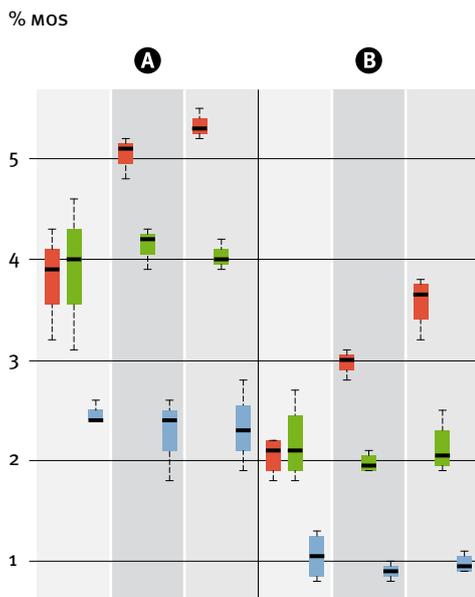
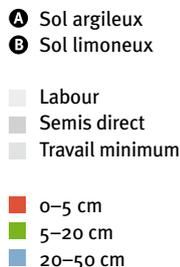


Illustration 8

Distribution de la teneur en MOS dans l'essai P29C à Changins (VD) en 2015 selon la profondeur, le type de travail du sol (labour, semis direct et travail minimum) et le type de sol, adapté de³¹.



reposent entre autre souvent sur un recours régulier aux herbicides. Un travail du sol réduit peut également favoriser la propagation de maladies ou d'infections fongiques comme la fusariose. Le labour est souvent considéré comme le meilleur moyen de limiter la transmission de maladies entre deux cultures. Il est donc essentiel de coupler un travail du sol réduit à d'autres techniques, comme l'implantation de couverts végétaux, qui permettent d'éviter la propagation d'adventices et de maladies.

4.2 Couverts végétaux : des plantes au service du sol

Les couverts végétaux sont implantés entre deux cultures principales pour une durée plus ou moins longue selon les cultures composant la rotation, allant de quelques jours à plusieurs mois. Ils n'ont pas vocation à être récoltés, mais sont implantés dans le but de fournir des services écosystémiques tels que la réduction de la lixiviation des nitrates, l'apport d'azote à

la culture suivante, la réduction de l'érosion ou le contrôle des ravageurs et des adventices. En fonction de l'objectif principal recherché, la terminologie utilisée peut varier. Ils sont appelés CIPAN (culture intermédiaire piège à nitrate) lorsque le service attendu est l'accumulation des nitrates excédentaires afin de réduire les pertes par lixiviation. Les « engrais verts » sont implantés dans le but de fournir des éléments nutritifs à la culture suivante, alors que les « couverts végétaux » ont pour objectif de protéger la surface du sol de l'érosion.

Les couverts végétaux protègent la surface du sol durant une période où le sol reste normalement nu, permettant ainsi de réduire les risques d'érosion. Pour assurer une protection efficace, une couverture minimale du sol de 30% est généralement recommandée⁵⁵. Dans le cadre du projet COUVERTS VÉGÉTAUX du PNR 68, un screening de vingt espèces de couverts végétaux a été réalisé en conditions non limitantes (travail du sol avant semis, pré-culture

luzerne) à Changins. Pour la totalité des espèces testées, la couverture du sol dépassait rapidement ce seuil, atteignant bien souvent 100% après un mois de croissance (ill. 9)⁵⁸. Même si une couverture importante a généralement été observée dans les nombreuses expérimentations conduites sur le site⁵⁶, certaines conditions de croissance ont tout de même mis en évidence l'importance de la technique d'implantation et du choix des couverts pour assurer une bonne protection du sol.

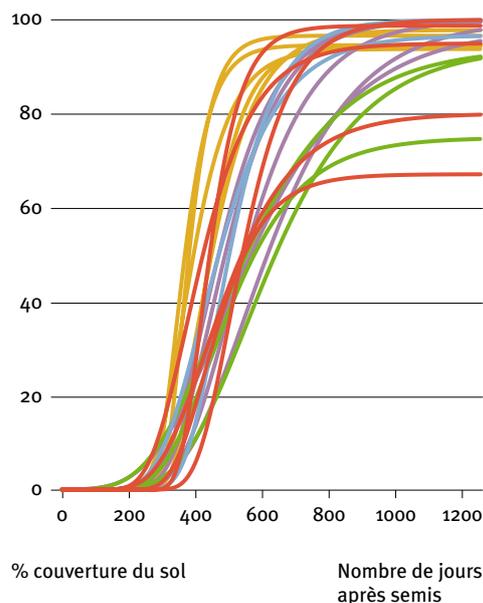
Le système racinaire des couverts végétaux est également un élément essentiel pour la protection du sol puisqu'il permet de stabiliser la surface du sol. Après la destruction du couvert, les racines laissent des macropores qui sont des canaux d'écoulement préférentiels pour l'eau et permettent ainsi de réduire considérablement le ruissellement⁵⁷.

Outre la protection de la surface du sol, il a également été mis en évidence que les couverts végétaux avaient la capacité de restaurer la structure de sols compactés et constituent une alternative au travail du sol intensif. Le radis chinois (ill. 10) est par exemple capable de pénétrer dans des horizons compactés grâce à son important pivot⁵⁹. Dans le projet COUVERTS VÉGÉTAUX du PNR 68, la caractérisation du système racinaire de vingt espèces a montré que d'autres espèces, comme le tournesol, le niger ou la féverole, présentaient des racines à large diamètre⁵⁸ et pourraient être utiles pour restaurer des sols compactés. Après la pré-culture, il a été mis en évidence que les pores créés par les racines facilitaient l'implantation et le développement de la culture principale, avec des effets bénéfiques en termes de rendement⁶⁰.

Les couverts végétaux n'étant pas récoltés, ils apportent du carbone organique

Illustration 9
Dynamique du taux de couverture du sol en fonction du temps depuis le semis, pour une sélection de cinq familles de couverts végétaux.

- Brassicaceae
- Fabaceae
- Poaceae
- Asteraceae
- Autres familles



et contribuent ainsi à la formation de mos. Un choix d'espèce judicieux couplé à une bonne gestion permet de produire plus de 6 t/ha de biomasse (matière sèche) dans des conditions de croissance favorables, et de 3 à 4 t/ha en conditions classiques⁵⁸. Un gain de production, dépassant 1 t/ha, est possible en associant plusieurs espèces⁶¹. Afin de définir des règles d'association optimales, le projet COUVERTS VÉGÉTAUX du PNR 68 a étudié les mécanismes à l'origine de ce gain. Dans des conditions de croissance relativement pauvres, il est ainsi essentiel d'associer des espèces avec des caractéristiques complémentaires telles que la phacélie et le pois. En revanche, lorsque les conditions de croissance sont favorables, la complémentarité entre les espèces a très peu d'influence sur la productivité des mélanges. Dans ces conditions, il est manifestement plus important d'associer des espèces ayant des capacités de compétition comparables comme la moutarde brune et l'avoine rude. D'après les résultats du projet COUVERTS VÉGÉTAUX, les mélanges d'espèces présentent une

meilleure adaptation aux conditions de croissance variables. En effet, un mélange composé de différentes espèces ayant des conditions de croissance idéales différentes permettra d'assurer une bonne production de biomasse et une protection du sol efficace. L'association d'espèces complémentaires est un moyen de remplir différentes fonctions : les légumineuses assurent par exemple un apport d'azote, tandis que les espèces non-légumineuses recyclent les éléments nutritifs présents dans le sol⁶².

La capacité des couverts végétaux à contrôler les adventices est liée aussi bien à l'étendue de la couverture du sol qu'à la biomasse qu'ils produisent (ill. 11, p. 32)⁵⁶. Un screening de plusieurs espèces gélives implantées avant maïs a révélé qu'un couvert végétal contrôle efficacement les adventices à l'entrée de l'hiver et permet de réduire le désherbage. Il peut ainsi notamment être renoncé à un désherbage de pré-levée, par exemple avec du glyphosate.

Les couverts végétaux contribuent également à la nutrition des plantes par le recyclage d'éléments nutritifs du sol et la fixation symbiotique (point 5.2, p. 37).

Tous ces bénéfices accroissent la productivité de la culture suivante. Le projet COUVERTS VÉGÉTAUX du PNR 68 a étudié l'influence de sept couverts végétaux sur la performance du blé durant trois ans dans un essai de longue durée. En raison de conditions de croissance relativement difficiles, d'importants écarts de rendement ont été observés selon l'espèce, en particulier durant les deux premières années. Ce résultat souligne l'importance du choix de l'espèce. Une production élevée de biomasse par le couvert a permis un contrôle efficace des adventices. En travail réduit et semis direct, le couvert a permis de maintenir un niveau d'adventices proche de celui

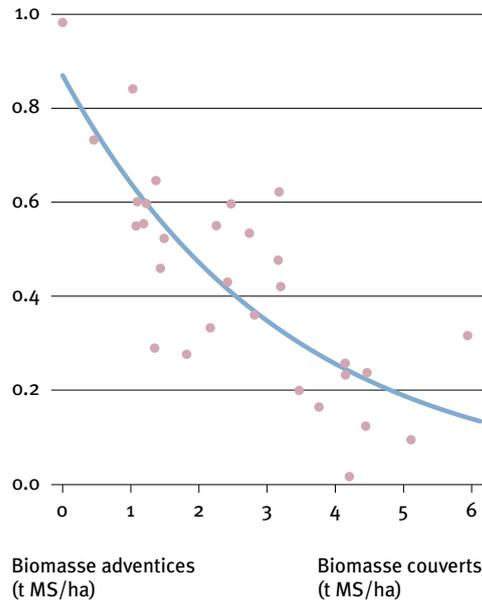
Illustration 10
Radis chinois après trois mois de croissance.

Photo : Lucie Büchi, Agroscope.



Illustration 11

Biomasse d'adventices en fonction de la biomasse des couverts végétaux (adapté de⁵⁶).



observé avec le labour. De même, en semis direct, le rendement du blé suivant un couvert productif était comparable à celui des parcelles labourées alors que des rendements très faibles ont été observés en cas d'échec du couvert.

4.3 Rotation : un facteur essentiel

Le choix des cultures de la rotation et de l'assolement repose sur les caractéristiques pédologiques et climatiques de la parcelle. Une rotation équilibrée de cultures diversifiées permet de lutter contre la transmission de maladies et les ravageurs, de réduire la présence des adventices et d'optimiser l'utilisation des ressources hydriques et des nutriments. Elle contribue donc à la qualité des sols. Même si la rotation est souvent considérée comme bénéfique par les praticiens, il est en fait difficile d'en donner la preuve. Un dispositif de longue durée, initié en 1967 à Changins, comparant une rotation classique à une monoculture de blé (P20, annexe 1, p. 72)

donne néanmoins quelques indications. L'analyse de la variance du rendement sur trois ans montre que la rotation explique jusqu'à 66% des variations. Le reste est partagé entre le travail du sol (9%), la variété (13%), la protection phytosanitaire (2%) et les interactions (10%)⁶³. Ces résultats ne sont pas simples à expliquer. Les autres facteurs du sol étant contrôlés, les organismes du sol ont probablement joué un rôle prépondérant. Ces résultats ont conduit deux projets du PNR 68 à utiliser cet essai pour évaluer les effets de la rotation sur les microorganismes bénéfiques du sol (projets BACTÉRIES DU SOL et NÉMATODES DU PNR 68).

4.4 Le choix déterminant du système de culture

Les systèmes de culture (glossaire, p. 87) varient selon le climat, le type de sol, les cultures dans la rotation et combinent les facteurs de production de différente manière. Ils peuvent également dépendre d'objectifs adoptés par l'agriculteur en termes de production, de protection du sol ou de pérennisation de certaines fonctions. Leurs effets sur la qualité du sol sont variables. Le projet SYSTÈMES DE CULTURE AMÉLIORANT LE SOL a constitué deux réseaux de 30 parcelles de blé d'automne réparties autour des sites de Changins et de Reckenholz. Ces parcelles ont été choisies pour le soin attentif porté par les agriculteurs à la qualité de leur sol et pour représenter trois catégories de systèmes de culture : agriculture conventionnelle (labour, prestations écologiques requises [PER] ; généralement avec bétail), agriculture biologique (différentes techniques de travail du sol) et semis direct (PER). L'objectif était de comprendre dans quelle mesure et sur quels critères ces différents systèmes contribuent à la protection du sol et quelles sont leurs fonctions caractéristiques. Les premiers résultats montrent

des rendements similaires en agriculture conventionnelle et en semis direct et plus faibles en agriculture biologique. À l'inverse, les entrées de carbone par les racines et celles dues à la rhizodéposition étaient globalement plus importantes dans les parcelles en agriculture biologique que dans celles cultivées conventionnellement ou en semis direct. Les propriétés physiques de ces sols issus de la pratique ont généralement confirmé les observations des essais de longue durée comparant les effets du travail du sol et des amendements

organiques (densité, résistance, perméabilité, macroagrégats). Les propriétés biologiques en semis direct et en agriculture biologique ont montré certaines analogies (biomasse microbienne, bactérienne et fongique). Les parcelles en agriculture biologique présentaient une plus grande colonisation des racines par les mycorhizes que les autres systèmes de culture. Ces résultats, à consolider encore, montrent qu'il est effectivement possible pour un praticien d'influencer grandement les propriétés du sol par le choix du système de culture.

Champignons et plantes comme substituts aux engrais

Les organismes du sol participent directement à la nutrition des plantes, par exemple par la fixation symbiotique de l'azote et la mycorhization. En outre, ils jouent un rôle essentiel dans la dégradation de la mos et augmentent ainsi la disponibilité en nutriments dans le sol. Ils y contribuent également de façon indirecte en améliorant la structure du sol et la circulation de l'air et de l'eau. Ces fonctions sont essentielles dans la mesure où elles sont à la base de la fertilité des sols. Lorsqu'elles sont mobilisées au bon moment et que la libération des éléments nutritifs est synchronisée avec les besoins de la culture, ces fonctions permettent de limiter l'usage d'intrants. La fertilisation actuelle des plantes repose en grande partie sur des engrais obtenus de ressources non renouvelables. Ceux-ci complètent les nutriments issus de la minéralisation de la mos, qui sont parfois en quantité insuffisante, ou les amendements organiques, parfois absents. Ils compensent les exportations par les cultures, mais aussi les pertes dans l'environnement (air, cours d'eau). La publication «Principes de la fertilisation des cultures agricoles en Suisse» (PRIF) résume l'ensemble des éléments contribuant à une gestion raisonnée de la nutrition des plantes⁶⁴. Ces éléments concernent la caractérisation du sol, les besoins des cultures et la mise en œuvre de la fertilisation. Ce dernier point a fait l'objet de nouveaux développements qui concernent l'effet de la nutrition des plantes sur la qualité des produits, établissant le préambule à de nouveaux développements dans la relation entre la qualité du sol et celle des aliments. En revanche, aucun chapitre de la publication «Principes de la fertilisation des cultures agricoles en Suisse» (PRIF) n'est pour l'instant consacré au rôle des organismes du sol alors que les nouvelles connaissances sur la vie du sol devraient influencer la pratique. Il existe un important besoin

de connaissances quant à savoir dans quelle mesure et de quelle façon un sol vivant contribue à la fertilité. La contribution effective des organismes du sol à la nutrition des plantes reste toutefois discrète au regard de la facilité d'accès aux fertilisants.

La TS₁ s'intéresse ci-après aux champignons mycorhiziens arbusculaires (AM) et aux engrais verts. Les champignons mycorhiziens sont des organismes capables de véhiculer les nutriments vers les plantes. Même si cette capacité est connue de longue date, sa valorisation, voire son utilisation, reste encore limitée en grandes cultures. De même, bien que fréquemment implantés, le potentiel des engrais verts dans le soutien de la nutrition des plantes nécessite d'être exploré. Dès lors, une meilleure connaissance est nécessaire pour préciser les modalités qui pourraient faire de ces deux organismes des acteurs plus affirmés et efficaces de la nutrition des plantes.

5.1 Mycorhizes : travail en réseau

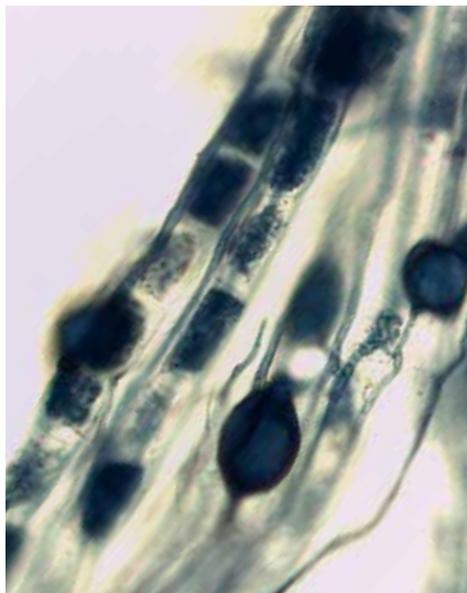
a) Description et rôles des champignons mycorhiziens

Les champignons mycorhiziens arbusculaires (AM) sont des microorganismes très répandus qui vivent en symbiose avec la majorité des plantes, y compris les plantes cultivées⁶⁵. Environ 80% des plantes terrestres sont des hôtes pour ces champignons qui créent des structures microscopiques en forme d'arbuscules à l'intérieur des racines des plantes (ill. 12). Ces structures sont le siège d'échanges entre les deux partenaires: la plante hôte fournit aux champignons jusqu'à 20% des hydrates de carbone issus de la photosynthèse qui sont essentiels à leur survie en contrepartie d'éléments nutritifs. Les champignons AM développent un réseau d'hyphes très dense et ramifié dans le sol qui leur permet d'acquérir facilement les nutriments du sol, qui sont ensuite

disponibles pour la plante hôte. Cette symbiose est particulièrement importante pour l'absorption du phosphore mais également de l'azote, du potassium ou du zinc, notamment lorsque leur disponibilité dans le sol est limitée. Il en résulte d'autres bénéfices pour la plante hôte, notamment une meilleure absorption de l'eau par le système racinaire. Outre leur capacité à augmenter considérablement la surface de contact entre le sol et les racines des plantes, les hyphes des champignons AM sont capables de pénétrer dans des pores du sol qui ne sont pas accessibles aux plantes et de prélever l'eau contenue dans ces derniers. Cette aptitude permet aux plantes de réduire leur vulnérabilité au stress hydrique⁶⁶. De nombreuses études font également état d'une meilleure résistance à certains pathogènes tels que les fusarioses, le *Phytophthora* ou le *Pythium* grâce à l'activation des mécanismes de défense de la plante hôte par les champignons AM⁶⁷. L'ensemble de ces bénéfices peut induire une amélioration de la productivité des plantes.

Illustration 12
Champignon mycorhizien arbusculaire colonisant une racine de trèfle⁷¹.

Photo : Chantal Herzog, Agroscope.



Les champignons AM ont aussi des effets bénéfiques sur l'environnement. Le réseau d'hyphes contribue à stabiliser la structure du sol permettant une meilleure protection contre l'érosion ainsi qu'une meilleure rétention de l'eau et des éléments nutritifs⁶⁸. Un essai au champ a montré que les champignons AM pouvaient également réduire les pertes d'éléments nutritifs par lixiviation⁶⁹. Il a été mis en évidence dans un essai en pots que ces champignons peuvent contribuer à réduire les émissions de protoxyde d'azote – un des principaux gaz à effet de serre – en améliorant l'accumulation d'azote par les plantes et en modifiant la composition de la communauté de bactéries dénitrifiantes⁷⁰.

b) Facteurs affectant l'abondance et la diversité des champignons mycorhiziens arbusculaires

Il existe une grande diversité de champignons AM. Celle-ci est généralement plus importante dans les prairies que dans les terres assolées⁷². En Suisse, les communautés de champignons AM naturellement présentes dans les sols cultivés sont globalement bien développées et diversifiées. Le projet MYCORHIZES du PNR 68 a identifié un total de 53 espèces différentes sur sept parcelles de grandes cultures ou de prairie permanente dans le canton d'Argovie⁷³. Les grandes cultures étaient conduites soit en agriculture conventionnelle avec labour, soit en agriculture biologique avec un travail de sol réduit, quatre de ces parcelles appartenant à l'essai de longue durée travail réduit situé à Frick (AG) (annexe 1, p. 72). Le nombre des espèces observées excède, parfois largement, ce qui est classiquement rapporté par la littérature pour des climats similaires⁷⁴⁻⁷⁶. Ceci s'explique en partie par les propriétés du sol, mais également par les pratiques agricoles mises en œuvre – rotations diversifiées incluant des prairies temporaires,

limitation des surfaces nues, apports d'engrais de ferme.

Le projet MYCORHIZES du PNR 68 a étudié l'influence du travail du sol et de la fertilisation sur l'abondance et la diversité des communautés de champignons AM dans des systèmes en agriculture biologique. Il a mis en évidence que le travail réduit avait une influence positive sur l'abondance des champignons AM dans les horizons de surface⁷³. Les parcelles labourées présentaient un nombre de spores inférieur à celui des parcelles conduites en travail minimum, qui affichaient des niveaux comparables à ceux des prairies. La diversité des champignons AM était légèrement réduite par le labour, mais dans une moindre mesure que leur abondance. La diminution du nombre et de la diversité des champignons AM liée au travail du sol intensif est largement documentée dans la littérature^{73,76,77}. Elle s'explique par la destruction périodique du réseau d'hyphes des champignons, qui leur est essentiel pour acquérir les nutriments du sol⁷⁸. Ainsi, le travail du sol intensif favorise les espèces de mycorhizes capables de coloniser rapidement les racines des plantes au détriment des espèces plus lentes.

Le projet MYCORHIZES du PNR 68 a par ailleurs testé l'influence de deux types de fertilisation organique. De faibles différences ont été mises en évidence, avec une diversité et une abondance de champignons AM légèrement plus importantes dans les parcelles fertilisées avec du fumier et du lisier que dans celles uniquement fertilisées avec du lisier⁷³. L'effet de la fertilisation sur les communautés mycorhiziennes est généralement plus marqué lorsque les fertilisations testées présentent des différences de qualité (organique/minérale) et de quantité. Une fertilisation importante réduit l'abondance des champignons AM

par rapport à une fertilisation plus modérée, car les plantes préfèrent absorber directement les nutriments du sol⁷⁹. De même, une communauté plus diversifiée a été mise en évidence dans les parcelles ayant reçues une fumure organique⁷⁹. Il est suggéré que certaines espèces, qui n'apparaissent que dans des conditions de très faible fertilisation, joueraient un rôle essentiel dans les systèmes à bas intrants et que leur disparition en cas de fertilisation importante pourrait influencer sur certaines fonctions écosystémiques.

De nombreux autres facteurs peuvent influencer l'abondance et la diversité des champignons AM. La rotation joue un facteur central puisque toutes les plantes ne sont pas des hôtes pour ces champignons. Une rotation incluant fréquemment des plantes non mycorhizables – comme le colza – pourrait aboutir à une diminution de la population de champignons et de leur diversité et à une réduction des bénéfiques de la symbiose⁸⁰. À l'inverse, les prairies temporaires associant des légumineuses et des graminées ou l'introduction de couverts végétaux dans la rotation seraient bénéfiques.

c) Inoculation avec des champignons mycorhiziens arbusculaires

Le projet MYCORHIZES du PNR 68 a testé s'il était possible de renforcer les effets des champignons AM déjà présents dans le sol en inoculant d'autres espèces. Dans un premier temps, un essai en serre a été conduit dans le but de vérifier dans quelle mesure les champignons inoculés peuvent s'établir et permettre un gain de productivité. L'inoculation de huit sols suisses avec une souche répandue et bien adaptée aux pratiques agricoles intensives a montré que les champignons inoculés étaient capables de s'établir correctement quelles que soient les conditions pédologiques⁸¹.

Si l'inoculation a permis un gain de rendement dans cinq des huit sols testés en ce qui concerne le trèfle, elle a eu un effet inverse sur le ray-grass, dont le rendement a chuté pour tous les sols étudiés. Ce résultat confirme l'existence – précédemment rapportée par la littérature – de groupes fonctionnels de plantes réagissant différemment à l'inoculation⁸². Le succès de l'inoculation en termes de colonisation par les champignons inoculés et de gain de biomasse de la culture était jusqu'à présent généralement associé à la teneur en phosphore des sols, une teneur plus faible étant plus favorable⁸³. Cependant, l'étude menée par le projet MYCORHIZES du PNR 68 a montré que le succès de l'inoculation n'était pas corrélé à la disponibilité en éléments nutritifs des sols et que d'autres facteurs, tels que l'abondance initiale de champignons AM ou la composition de la communauté, pourraient être décisifs⁸¹.

La colonisation des racines par les champignons AM, le rendement et la teneur en nutriments du maïs n'ont pas été affectés par l'inoculation. Les bénéfices à attendre de l'inoculation sont par conséquent relativement limités, ce qui est probablement dû au fait que les communautés de cham-

pignons sont déjà relativement bien développées en Suisse grâce à des pratiques agricoles favorables.

L'équipe du projet MYCORHIZES du PNR 68 travaille actuellement au développement d'une nouvelle technique d'inoculation basée sur l'identification des espèces présentes localement et des propriétés pédologiques. Cette technique part du principe qu'une inoculation ciblée, adaptée aux conditions locales, serait plus efficace qu'une inoculation avec des champignons AM standard et permettrait d'améliorer la productivité des cultures.

5.2 De la CIPAN à l'engrais vert

Les couverts végétaux jouent un rôle essentiel dans la protection du sol (point 4.2, p. 29). De nombreux autres services écosystémiques peuvent en être attendus. Les couverts végétaux participent notamment pleinement à la fertilité du sol par le biais de divers mécanismes : accumulation d'éléments nutritifs du sol, fixation symbiotique ou solubilisation de nutriments présents dans le sol sous des formes peu disponibles. Le projet COUVERTS VÉGÉTAUX du PNR 68 s'est intéressé plus particulièrement aux deux premiers aspects.

a) Accumulation de nutriments

Les couverts végétaux absorbent les nutriments présents dans le sol suite à la dernière culture ou ceux issus de la minéralisation de la matière organique. Ils limitent ainsi fortement les pertes par lessivage et lixiviation. Une méta-analyse a mis en évidence que la lixiviation de nitrate peut en moyenne être réduite de 70% sous un couvert de non-légumineuses et de 40% sous un couvert de légumineuses par rapport au sol resté nu⁸⁴. Les quantités de nutriments prélevés varient considérablement selon l'espèce, sa croissance ainsi que la

Synthèse – champignons mycorhiziens arbusculaires

- Les champignons mycorhiziens arbusculaires (AM) jouent un rôle essentiel dans l'absorption de nutriments et d'eau par les plantes, en particulier lorsque leur disponibilité est limitée dans le sol.
- Ils peuvent être bénéfiques pour l'environnement : diminution du risque d'érosion, de pertes de nutriments par lixiviation et réduction des émissions de gaz à effet de serre.
- Un travail minimum du sol et une fertilisation organique raisonnée sont à privilégier pour favoriser la communauté de champignons AM et tirer profit de leur présence.
- L'inoculation de champignons AM ne permet actuellement pas d'augmenter la productivité des cultures ni d'améliorer d'autres services écosystémiques..

quantité de nutriments disponibles dans le sol. L'avoine rude et la moutarde blanche sont connues de longue date pour leur aptitude à accumuler de grandes quantités d'azote (N) minéral. Un screening du projet COUVERTS VÉGÉTAUX du PNR 68 conduit sur 20 espèces, dont 15 non-légumineuses, en conditions de croissance non limitantes (travail du sol avant implantation des couverts végétaux, pré-culture luzerne) a mis en évidence que le tournesol, le radis chinois, le niger ou la phacélie prélevaient plus de 125 kg/ha d'azote en trois mois de végétation, réalisant ainsi des performances supérieures à celles de l'avoine rude et de la moutarde blanche⁵⁸. Les couverts végétaux sont également capables d'accumuler de grandes quantités d'autres nutriments : le radis chinois et la phacélie peuvent accumuler plus de 30 kg/ha de phosphore (P) en trois mois et le tournesol et le niger prélever plus de 250 kg/ha de potassium (K). Cependant, la capacité de prélèvement est fortement variable selon l'espèce. À partir des caractéristiques foliaires et racinaires des 20 espèces testées, cinq stratégies d'acquisition des nutriments ont été définies ; trois d'entre elles permettant une forte accumulation de l'ensemble des nutriments en conditions non limitantes⁵⁸. Ces trois stratégies sont basées sur une production importante de biomasse aérienne et souterraine et de tissus denses (tournesol) ou sur des systèmes racinaires fins avec une longueur importante et des concentrations en nutriments élevées (phacélie). La troisième stratégie (moutarde brune) présente des caractéristiques intermédiaires à celles énumérées ci-dessus. Dans les conditions favorables de l'étude, le prélèvement de nutriments s'est avéré moins efficace lorsque les plantes se distinguaient par de larges diamètres racinaires et des tissus denses (sorgho) ou par une faible production de biomasse aérienne et souterraine et une concentration élevée en N

et P (légumineuses). Ces deux stratégies devraient cependant s'avérer plus adaptées à des conditions plus limitantes. Les légumineuses, en particulier, devraient être plus performantes que les autres espèces lorsque la disponibilité en N est limitée. En effet, il a été démontré sur un même site que parmi six espèces (cinq non-légumineuses et pois) testées en conditions limitantes (semis direct, pré-culture blé), seul le pois était capable de se développer suffisamment pour fournir les services attendus d'un couvert végétal.

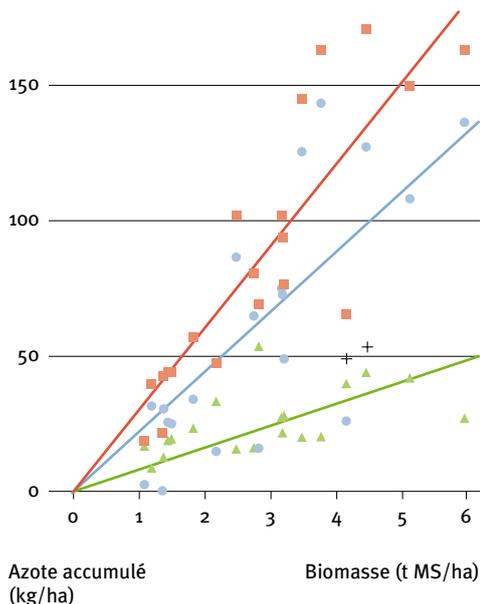
b) Fixation azotée par les légumineuses

Parallèlement à l'accumulation d'éléments nutritifs du sol, les légumineuses sont capables de fixer symbiotiquement l'azote. Une comparaison de 19 espèces de légumineuses, réalisée sur deux sites suisses dans le cadre du projet COUVERTS VÉGÉTAUX du PNR 68, a montré que la quantité totale d'azote accumulé en trois mois de végétation variait considérablement selon l'espèce, allant de 16 kg/ha pour le pois chiche à plus de 180 kg/ha pour la féverole (Ill. 13)⁸⁵. La part provenant de la fixation symbiotique était également fortement variable selon l'espèce, atteignant plus de 80% de la quantité totale fixée dans les plantes pour la féverole, la vesce de Hongrie, la vesce velue, le trèfle blanc et la gesse cultivée. Pour ces espèces, plus de 100 kg/ha d'azote provenaient de la fixation symbiotique. Outre les différences liées à la capacité de fixation des espèces, il a également été montré que la quantité d'azote minéral disponible dans le sol influençait considérablement la fixation symbiotique. Une forte disponibilité en azote minéral réduit la fixation azotée⁸⁵.

De nombreuses études montrent que la quantité d'azote disponible pour la culture suivante augmente⁸⁶. Étant donné le coût croissant des fertilisants minéraux, les agri-

Illustration 13
Azote absorbé en fonction de la biomasse des légumineuses⁸⁵.

- Quantité d'azote totale
- Quantité dérivée de l'air
- ▲ Quantité absorbée du sol
- + Quantités d'azote accumulées par la phacélie et l'avoine de printemps



cultrices et agriculteurs montrent un intérêt particulier pour ces « engrais verts ».

c) Accumulation de nutriments dans les racines

Les études portant sur la capacité des couverts végétaux à prélever les nutriments quantifient généralement les nutriments accumulés dans les parties aériennes. Très peu d'études se sont intéressées à ceux accumulés dans les racines du fait de la difficulté de récolte. Une première estimation réalisée dans le cadre du projet COUVERTS VÉGÉTAUX du PNR 68 fixe les quantités accumulées en trois mois de végétation à 65 kg/ha de N, 20 kg/ha de P et 149 kg/ha de K pour le radis chinois dans des conditions de croissance favorables⁵⁸. Même si ces quantités sont moins importantes pour d'autres espèces (en moyenne 23, 3 et 10 kg/ha de N, P et K pour 19 espèces testées), celles-ci ne sont pas négligeables et doivent être prises en compte dans le calcul de la fertilisation à apporter à la culture suivante.

d) Importance de la date de destruction des couverts végétaux

Contrairement à la majorité des fertilisants minéraux, les nutriments accumulés par les couverts végétaux sont relâchés progressivement. Pour en tirer profit et éviter d'éventuelles pertes environnementales, la minéralisation doit concorder avec les besoins de la culture suivante. Pour cela, le rapport carbone/azote (C/N) peut être utilisé comme un indicateur de la vitesse et du taux de minéralisation⁸⁷. Un ratio inférieur à 26 est globalement favorable à la minéralisation alors qu'au-delà, une immobilisation de l'azote du sol peut être observée. Le screening de 20 espèces a montré que ce ratio augmentait considérablement avec la croissance des plantes⁵⁸. Alors que la majorité des légumineuses (*Fabaceae*) testées présentaient des ratios C/N favorables à une minéralisation rapide, le ratio de certaines espèces comme le sarrasin ou la moutarde blanche excédait largement 26 à l'issue de trois mois de croissance. Pour ces espèces, une destruction plus rapide est recommandée pour éviter une « faim d'azote » consécutive. Généralement, le stade de la floraison est un bon compromis entre quantité de nutriments accumulés et ratio C/N favorable à la minéralisation.

De nombreux ravageurs et pathogènes peuvent réduire considérablement les rendements des récoltes. Selon les estimations, tous les organismes nuisibles diminuent, à eux seuls, de 30 à 40% le potentiel de rendement des cultures les plus importantes⁸⁸. L'utilisation de PPS permet de limiter l'incidence des maladies et ravageurs et ainsi d'augmenter considérablement la production agricole. Leur utilisation est cependant accompagnée de nombreux effets négatifs (résistance, résidus, [éco]toxicité), dont l'évaluation reste lacunaire, d'autant plus qu'elle concerne un milieu complexe comme le sol. D'autre part, certains organismes nuisibles peuvent rester inféodés aux terres à long terme et rendre les parcelles impropres à une culture durant plusieurs années – sclérotiniose, vers fil de fer, virose, souchet comestible – voire plusieurs décennies – pourriture racinaire du pois (*Aphanomyces*) et nématode du collet de la betterave.

L'utilisation d'organismes bénéfiques du sol est envisagée en alternative aux PPS de synthèse. Certains d'entre eux contribuent directement à la protection des plantes en contrôlant les populations de nuisibles par compétition, antibiose ou parasitisme ou en activant les mécanismes de défense des plantes. Cette capacité à contrôler des organismes spécifiques les rend particulièrement intéressants en tant qu'agents de biocontrôle. Il existe deux types de biocontrôle : le biocontrôle par conservation et le biocontrôle par augmentation (apport externe) des organismes régulateurs.

Biocontrôle par conservation

Le biocontrôle par conservation se base sur des conditions pédologiques favorisant la présence de microorganismes bénéfiques ou empêchant la prolifération d'organismes nuisibles. Ce type de contrôle biologique vise à éviter tout usage de PPS –

même biologiques. Certains organismes sont connus comme étant des agents locaux (endémiques) dont la présence en quantité suffisante permet un biocontrôle efficace. Toutefois, ce sont essentiellement des organismes aériens, comme les cochenilles ou les acariens. En raison du nombre d'organismes présents dans le sol, il est difficile d'évaluer quels organismes contribuent à une meilleure santé du sol et sont profitable aux cultures, et quelle est l'étendue exacte de cette contribution. Un inventaire des organismes clés du sol participant aux mécanismes de biocontrôle fait actuellement défaut. Dès lors, le biocontrôle par conservation se concentre sur les pratiques agricoles, comme les rotations longues et diversifiées et les apports d'engrais de ferme, qui sont favorables à la diversité des microorganismes et à l'activité biologique du sol en général.

Biocontrôle par augmentation

S'il n'y a pas suffisamment d'organismes régulateurs dans le sol, une augmentation de leur nombre peut être envisagée. Cette pratique est généralement basée sur l'identification de l'organisme cible à contrôler et des moyens de lutte correspondants. Quelques produits comportant de tels organismes sont actuellement disponibles dans le commerce. L'enjeu majeur consiste à résoudre les problèmes de maladies ou de nuisibles liés au sol d'une façon qui soit plus acceptable et moins agressive que les mesures de désinfection chimiques. Le biocontrôle par augmentation comporte toutefois un risque dans la mesure où il peut modifier l'équilibre existant entre différents organismes du sol et affecter les populations d'organismes bénéfiques.

Deux projets du PNR 68 se sont plus particulièrement intéressés à deux organismes du sol : les nématodes entomopathogènes

(projet NÉMATODES,) et les bactéries *Pseudomonas* (projet BACTÉRIES DU SOL). Ces deux projets avaient pour objectif d'améliorer les connaissances relatives à ces organismes bénéfiques et d'identifier dans quelle mesure certaines pratiques culturales sont favorables à leur développement (biocontrôle par conservation). Ces projets ont également étudié l'efficacité du biocontrôle par augmentation et développé une nouvelle méthode d'application.

6.1 Nématodes contre insectes

Les nématodes entomopathogènes sont des vers ronds microscopiques (ill. 14) vivant dans le sol, qui parasitent une grande variété d'insectes. Les nématodes entomopathogènes de la famille des *Steinernematidae* et des *Heterorhabditidae* entretiennent une relation symbiotique avec des bactéries pathogènes du genre *Photorhabdus* et *Xenorhabdus*. Cette association permet de tuer certains insectes ravageurs des cultures en deux à trois jours (encadré, p. 42).

Illustration 14
Nématodes entomopathogènes

Photo: Geoffrey Jaffuel et Neil Villard,
Université de Neuchâtel.



a) Les nématodes entomopathogènes en Suisse

Les facteurs influençant la présence des nématodes entomopathogènes dans les sols suisses et l'efficacité de ces nématodes à contrôler les insectes ravageurs du sol étaient, encore récemment, relativement mal connus. Le monitoring de vingt sols naturels (forêts et prairies) et de vingt sols agricoles répartis sur l'ensemble de la Suisse réalisé dans le cadre du projet NÉMATODES du PNR 68 a mis en évidence que les nématodes entomopathogènes sont environ quatre fois plus nombreux dans les milieux naturels que dans les sols agricoles. Le très faible nombre de nématodes observé actuellement dans les terres assolées, quelles que soient les pratiques agricoles, est insuffisant pour permettre un contrôle efficace des insectes ravageurs du sol⁸⁹⁻⁹¹. En l'absence de ravageur particulier, les nématodes entomopathogènes n'étaient en effet responsables que d'environ 5% de la mortalité des larves d'insectes^{89,91}. Cette faible présence s'explique en premier lieu par la pratique de rotations diversifiées qui limitent le nombre d'insectes hôtes essentiels à la reproduction des nématodes entomopathogènes. À cela s'ajoutent les nombreuses perturbations du sol en grandes cultures qui restreignent également l'établissement d'une population stable de nématodes par comparaison avec des sols non cultivés. En outre, une forte pression des prédateurs naturels, comme les champignons nématophages, est également responsable du faible nombre de nématodes entomopathogènes dans les sols agricoles suisses. Enfin, les nématodes entomopathogènes sont également concurrencés par les nématodes détritivores dans la recherche d'insectes hôtes, car la majorité des insectes hôtes contiennent un mélange de nématodes entomopathogènes et détritivores⁸⁹. Incapables de tuer les insectes,

les nématodes détritivores profitent de ceux tués par les nématodes entomopathogènes dont ils limitent la multiplication⁹². En revanche, les études ont montré que les nématodes détritivores n'influençaient ni l'activité de parasitisme des nématodes entomopathogènes ni la durée de leur cycle de développement.

b) Influence des pratiques agricoles

Le projet NÉMATODES du PNR 68 a également testé l'influence de différentes pratiques agricoles (travail du sol, rotation ou

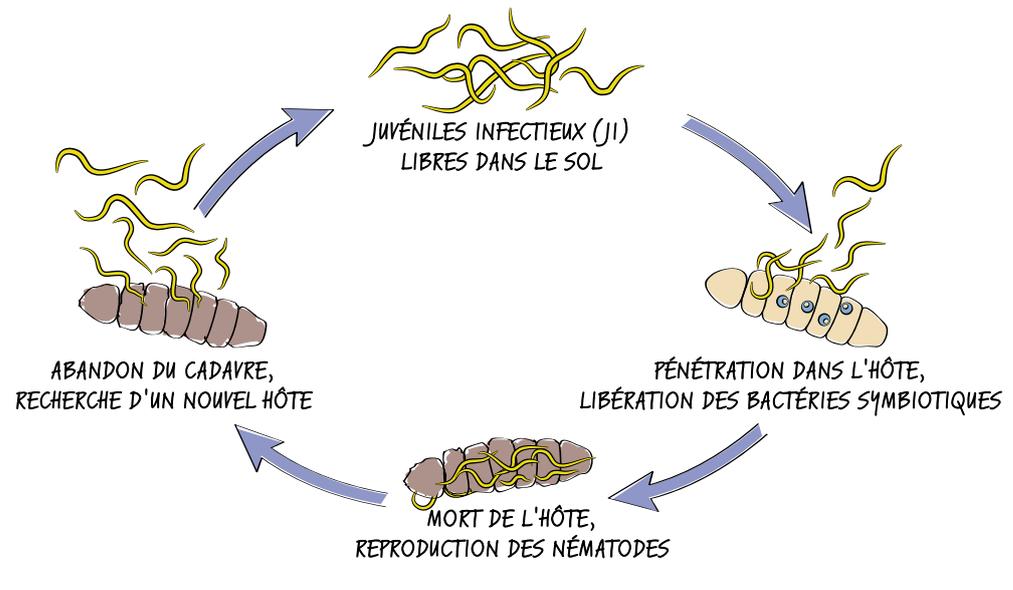
implantation de couverts végétaux) et systèmes de production (conventionnel, biologique ou biodynamique) sur l'abondance des nématodes entomopathogènes. Il a été mis en évidence que la plupart des facteurs n'affectaient ni le nombre de juvéniles infectieux ni leur activité (tab. 4)⁸⁹⁻⁹¹. Seule la saison a eu un effet significatif sur la population de nématodes entomopathogènes, sachant que le nombre de juvéniles infectieux était plus élevé au début de l'automne qu'au printemps⁸⁹. Ces études suggèrent que leur nombre est trop faible pour

Cycle de vie des nématodes entomopathogènes

Les nématodes entomopathogènes vivent en symbiose avec des bactéries. Durant le stade juvénile infectieux, ils sont libres dans le sol et recherchent activement des insectes hôtes. Ils pénètrent dans ces derniers, puis libèrent les bactéries symbiotiques dans les fluides corporels (hémolymphe). Les bactéries se multiplient et produisent des toxines, entraînant la mort de l'insecte hôte par septicémie en deux à trois jours. Les bactéries sécrètent également d'autres substances, encore inconnues, qui protègent le cadavre contre les attaques des nécrophages (vers, collemboles). Elles permettent ainsi aux nématodes entomopathogènes de se nourrir, de se développer et de se reproduire jusqu'à épuisement total des ressources. En fonction des ressources disponibles, deux ou trois générations de nématodes peuvent cohabiter dans le cadavre de l'insecte hôte. Plusieurs milliers de juvéniles infectieux quittent ensuite le cadavre et se mettent à la recherche de nouveaux hôtes dans le sol.

Illustration 15
Cycle de vie des nématodes entomopathogènes.

Illustration: Nadja Stadelmann.



pouvoir identifier d'éventuels effets liés aux pratiques agricoles. En outre, il devrait s'avérer difficile de créer dans les sols agricoles un environnement favorable au développement de populations de nématodes entomopathogènes qui permettraient un contrôle efficace des ravageurs du sol.

c) Apport de nématodes entomopathogènes

Étant donné la faible présence de nématodes entomopathogènes dans les sols suisses et les difficultés à favoriser le développement des populations natives, une stratégie d'augmentation (apports externes de nématodes) semble plus appropriée qu'une stratégie de conservation. Actuellement,

Tableau 4

Effets des pratiques agricoles sur l'abondance des nématodes entomopathogènes et sur l'abondance et l'activité des *Pseudomonas* étudiées dans les essais de longue durée suisses ou dans des essais annuels.

Projets NÉMATODES ET BACTÉRIES DU SOL du PNR 68.

– Facteurs non étudiés
DAPG : 2,4-diacetylphloroglucinol
PHZ : phénazines
PRN : pyrrolnitrine

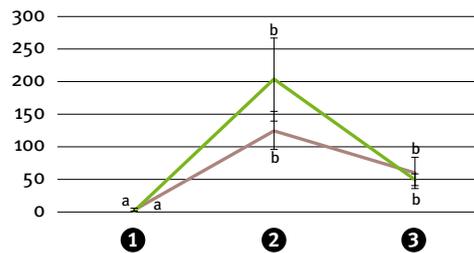
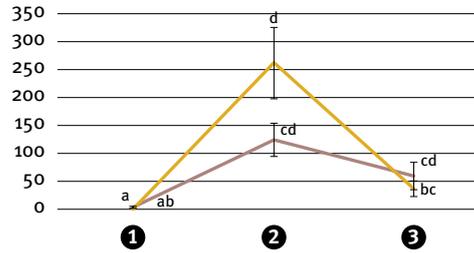
Facteur étudié	Essai de longue durée utilisé (Annexe 1)	Abondance des nématodes entomopathogènes	Abondance des <i>Pseudomonas</i> produisant des métabolites secondaires (DAPG, PRN und PHZ)	Activité des <i>Pseudomonas</i> : résistance à la fonte des semis (FS) et au piétin échaudage (PE)
Saison		Automne > printemps	–	–
Espèce cultivée		Blé > maïs et prairies	–	–
Dose de fertilisation N	DOC	Pas d'effet	–	–
Travail de sol	P29C	Pas d'effet	–	–
Rotation vs monoculture de blé	P20	Pas d'effet	–	–
Couverts végétaux		Pas d'effet	–	–
Système de production	DOC	Pas d'effet	DAPG : fertilisation > sans fertilisation PRN : fertilisation organo-minérale et minérale > sans fertilisation PHZ : fertilisation minérale et organo-minérale > organique	FS : pas d'effet PE : fertilisation organo-minérale > minérale ou organique uniquement ou sans fertilisation
Système de production	FAST	–	DAPG : conventionnel sans labour > bio sans labour PRN et PHZ : pas d'effet	FS : bio sans labour > conventionnel avec et sans labour PE : pas d'effet

Illustration 16

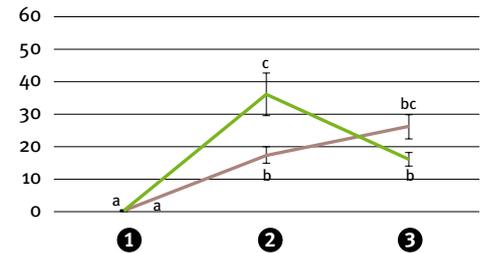
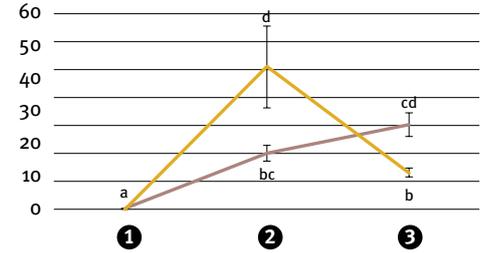
Influence des couverts végétaux (pois et moutarde) sur l'abondance des nématodes entomopathogènes selon la période et l'espèce augmentée⁹⁰.

Axe y : nombre de juvéniles infectieux / 100 g de terre sèche

- ① Novembre (peu avant l'application de nématodes entomopathogènes)
- ② Décembre
- ③ Mars
- Moutarde
- Sol nu
- Pois
- Sol nu



Application de *H. bacteriophora*



Application de *S. feltiae*

plusieurs produits contenant des nématodes entomopathogènes sont commercialisés pour lutter contre des ravageurs tels que les courtilières, les vers gris (*Carpodemus*), les larves d'Otiorhynques (*Meghinem Pro Nématodes*) ou encore les larves de Sciarides (*Traunem*). En raison de leur coût important, ces produits sont principalement utilisés dans les cultures maraîchères. Le projet NÉMATODES du PNR 68 a montré que l'apport de deux espèces présentes naturellement permettait d'augmenter significativement le nombre de juvéniles infectieux à l'entrée de l'hiver (un mois après l'apport). Bien que fortement décimés durant la saison froide, ces nématodes entomopathogènes persistaient. Leur activité, c'est-à-dire leur capacité à tuer des insectes, n'était toutefois pas corrélée avec leur nombre et variait selon l'espèce⁹¹. Une activité supérieure à celle du témoin sans apport de nématodes entomopathogènes n'a été observée que pour l'une des deux espèces testées. Le choix de l'espèce augmentée est donc particu-

lièrement important pour le biocontrôle. Pour l'espèce la plus suppressive, l'activité la plus forte a été mesurée à la sortie de l'hiver, bien que le nombre de juvéniles infectieux ait déjà fortement diminué à cette époque. Ce résultat suggère que les nématodes entomopathogènes ayant survécu étaient hautement infectieux (ill. 16).

Le projet NÉMATODES du PNR 68 a également testé l'influence des couverts végétaux sur la persistance des populations de nématodes entomopathogènes augmentées. L'hypothèse était que les couverts végétaux pourraient potentiellement augmenter la persistance de nématodes du fait d'une meilleure protection du sol durant l'hiver. Il a montré que la présence d'un couvert végétal (pois ou moutarde) permettait d'augmenter le nombre de juvéniles infectieux à l'entrée de l'hiver (un mois après l'apport), mais pas jusqu'à la fin de l'hiver (ill. 16)⁹¹. Le nombre de nématodes entomopathogènes avait fortement chuté en raison des températures négatives. Les parcelles couvertes

Synthèse – nématodes entomopathogènes

- En cas de forte infestation de ravageurs, les populations de nématodes entomopathogènes dans les sols agricoles en Suisse sont trop insuffisantes pour remplir leur rôle d'agent de biocontrôle.
- Aucune pratique agricole ne semble favoriser le développement des populations natives.
- En raison du coût élevé des produits contenant des nématodes entomopathogènes, une stratégie d'augmentation est réservée aux cultures à forte valeur ajoutée (maraîchage) et/ou en cas de forte infestation par un ravageur.

comptaient autant voire moins de juvéniles infectieux que les surfaces témoins demeurées nues. Les couverts végétaux n'ont donc qu'un effet très limité sur la persistance des populations augmentées.

6.2 Les armes multiples des bactéries

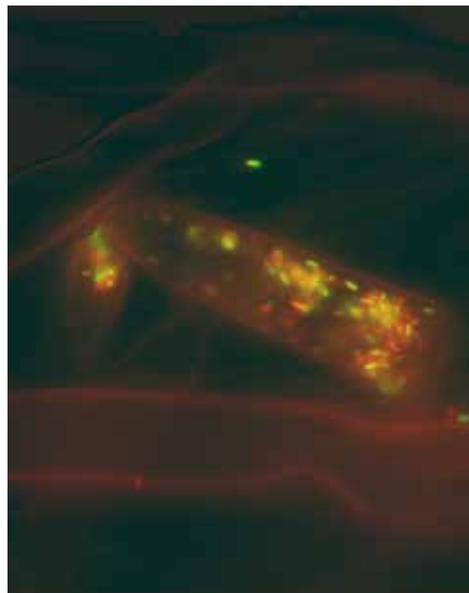
Les bactéries du genre *Pseudomonas* (ill. 17) sont omniprésentes et largement répan-

Illustration 17

Racines de blé colonisées par des *Pseudomonas protegens* (souche CHA0).

Photo : Christoph Keel, Université de Lausanne.

Les bactéries ont été colorées afin de suivre l'expression des gènes antagonistes nécessaires à la biosynthèse du 2,4-diacétylphloroglucinol (DAPG, en rouge) et de l'acide cyanhydrique (HCN, en vert).



dues dans les sols agricoles. Certaines espèces, par exemple *Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas protegens* ou *Pseudomonas chlororaphis*, entretiennent des relations mutualistes avec les plantes. Elles sont capables de stimuler la croissance des plantes et de les protéger contre les attaques de certains pathogènes et ravageurs telluriques par le biais de mécanismes de compétition ou par la production de substances antagonistes^{93,94}. Les *Pseudomonas* colonisent très rapidement le système racinaire des plantes et y maintiennent une population dense qui concurrence fortement les pathogènes pour les niches de la rhizosphère, les macro- et les micronutriments⁹⁵. Certaines sont également capables d'induire des mécanismes de résistance systémiques chez les plantes⁹⁶⁻⁹⁸. Basée sur la production de substances antagonistes, l'antibiose est toutefois le principal mécanisme de contrôle des pathogènes et ravageurs⁹⁹.

a) Contrôle des maladies et des ravageurs par antibiose

Les *Pseudomonas*, qui sont capables de produire des métabolites secondaires tels que le 2,4-diacétylphloroglucinol (DAPG), les phénazines (PHZ), la pyrrolnitrine (PRN) ou le cyanure d'hydrogène (HCN), ont souvent été associées à la capacité de certains sols à inhiber ou limiter l'incidence d'une ou de plusieurs maladies fongiques malgré la présence de pathogènes et de plantes hôtes sensibles (sols suppressifs). Sur des parcelles en monoculture de blé, une diminution progressive des symptômes de piétin échaudage (*Gaeumannomyces graminis* var. *tritica*) peut ainsi être observée dans certains sols¹⁰⁰. Il a été démontré que les *Pseudomonas fluorescens*, qui produisent du DAPG, jouaient un rôle central dans le contrôle naturel de cette maladie¹⁰¹. De même, *P. fluorescens* a été isolée dans la rhizosphère du tabac de sols

suisses naturellement résistants à la pourriture noire causée par *Thielaviopsis basicola*¹⁰². Outre leur rôle antifongique, les *Pseudomonas* permettraient également de lutter efficacement contre certains nématodes comme *Meloidogyne incognita*, responsable de la galle des racines¹⁰³. Certaines substances produites par des *Pseudomonas* (HCN et différents types de lipopeptides cycliques) ont par ailleurs des effets insecticides, par exemple sur les larves de fausse teignes *Galleria mellonella* (projet BACTÉRIES DU SOL du PNR 68)¹⁰⁴.

b) Résistance des sols aux pathogènes

telluriques et abondance de *Pseudomonas*
Pour mieux cerner la portée pratique des connaissances relatives à *Pseudomonas*, le projet BACTÉRIES DU SOL du PNR 68 a testé la résistance de dix sols agricoles suisses à deux pathogènes : *Gaeumannomyces graminis var. tritica*, causant le piétin échaudage, et *Pythium ultimum*, responsable de la fonte des semis¹⁰⁵. Il a été montré que la résistance des sols variait considérablement selon le pathogène et le sol. En effet, alors que certains sols testés étaient résistants à *P. ultimum*, ces mêmes sols se sont montrés très sensibles à *G. graminis*, et inversement. Ces résultats suggèrent que la capacité de régulation des sols est variable et spécifique au pathogène, et dépend certainement de nombreux facteurs biotiques et abiotiques. Les résultats ont également montré que l'abondance des bactéries produisant le DAPG était largement supérieure et aussi plus variable que celle des bactéries produisant la PRN ou le PHZ¹⁰⁵. D'autre part, l'expression des gènes de biosynthèse de DAPG et PHZ variait également selon le sol. En revanche, les résistances des sols à *P. ultimum* et *G. graminis* n'ayant pas pu être directement mises en relation avec l'abondance des *Pseudomonas*, il faut en conclure que l'abondance des *Pseudomonas* dans les

sols étudiés joue un rôle mineur dans leur résistance aux deux pathogènes. L'une des explications possibles est que seule la population de *Pseudomonas* produisant du DAPG excédait le seuil de densité de colonisation permettant un contrôle efficace des pathogènes, qui a été fixé à 10^5 unités formant colonie par gramme de racines^{93,101}. Bien qu'encore non appliquée, cette valeur indicatrice pourrait être utilisée pour évaluer le potentiel de contrôle des *Pseudomonas*.

c) Influence des propriétés du sol

Les variations d'abondance de *Pseudomonas*, d'expression des gènes antagonistes et de résistance à *P. ultimum* et à *G. graminis* observées ne peuvent guère s'expliquer par les propriétés physico-chimiques des sols testés dans le cadre du projet BACTÉRIES DU SOL du PNR 68¹⁰⁵. Ainsi, l'abondance des bactéries synthétisant le DAPG était significativement favorisée par une haute teneur en argile, en nitrates et en potassium, et réduite en sol limoneux. Parmi les propriétés étudiées, seule la teneur en nitrates était également positivement corrélée avec la résistance à *P. ultimum*. Il s'est donc avéré difficile de déterminer dans quelle mesure les nitrates ont influencé la résistance des sols, que ce soit par une incidence négative sur le pathogène, par la multiplication de bactéries bénéfiques, par la stimulation de la croissance des plantes ou encore par une induction de la résistance des plantes au pathogène.

d) Influence des pratiques agricoles

Le projet BACTÉRIES DU SOL du PNR 68 a également analysé dans quelle mesure certaines pratiques agricoles peuvent être privilégiées pour contrôler naturellement *P. ultimum* et *G. graminis*. Trois expérimentations de longue durée ont mis en évidence que les pratiques agricoles peuvent considérablement influencer l'abondance des

Nouvelle méthode d'inoculation

Plusieurs projets du PNR 68 ont mis en évidence l'utilité de certains organismes (nématodes entomopathogènes, bactéries *Pseudomonas*, champignons mycorhiziens) pour le contrôle des ravageurs et la nutrition des plantes. Le problème est qu'il n'existe à l'heure actuelle aucun moyen permettant d'apporter ces organismes bénéfiques à moindre coût. Le projet LUTTE BIOLOGIQUE CONTRE LES PARASITES du PNR 68 s'est donc attaché à développer une méthode consistant à les encapsuler dans des billes d'alginate (ill. 18, p. 48).

Il est également envisagé d'y intégrer des substances qui placent les nématodes dans un état de dormance et améliorent ainsi leur durée de conservation (persistance). D'autres composés doivent attirer les organismes ravageurs et les inciter à consommer ces billes. Les premiers essais effectués en laboratoire montrent des résultats très positifs qui seront consolidés par des essais en plein champ.

Pseudomonas et la résistance des sols à ces deux pathogènes (tab. 4, p. 43). La fertilisation organo-minérale en combinaison avec le non-labour favorisait le développement des populations de *Pseudomonas*, en particulier de celles capables de synthétiser le DAPG. Concernant la résistance des sols aux maladies, les effets des techniques culturales étaient variables selon le pathogène. Si les parcelles en agriculture biologique ont amélioré la résistance à *P. ultimum*, une tendance à une meilleure résistance à *G. graminis* a été observée dans un procédé conduit en agriculture conventionnelle (fumure organo-minérale). Ces résultats nécessitent d'être confirmés par d'autres essais. Ils suggèrent que les pratiques agricoles ont une influence sur la résistance des sols, mais qu'il n'est pas possible en l'état de proposer des mesures culturales spécifiques favorisant cette résistance. En outre, pour certaines opérations culturales, il s'agit de choisir entre favoriser les organismes bénéfiques ou lutter contre les organismes nuisibles. Le labour permet par exemple de contrôler les Fusarium (projet CÉRÉALES SÛRES du PNR 69), mais a une influence négative sur les *Pseudomonas*.

e) Contrôle biologique des maladies et des ravageurs avec des *Pseudomonas*
Les *Pseudomonas* possèdent des caractéristiques – vitesse de colonisation, produc-

tion de substances antagonistes – qui les rendent particulièrement adaptées à une utilisation en tant qu'agent de biocontrôle. Actuellement, plusieurs produits contenant des *Pseudomonas* sont commercialisés pour lutter contre certains pathogènes. Par exemple, *P. chlororaphis* – qui est utilisée pour le traitement des semences – agit contre les champignons parasites responsables de la septoriose (*Septoria nodorum*) ou de la caries du blé (*Tilletia caries*). Un mélange de différentes espèces de *Pseudomonas* permet de protéger les tubercules de pomme de terre contre la gale argentée (*Helminthosporium solani*), la pourriture molle (*Erwinia*), le mildiou (*Phytophthora*) et le rhizoctone brun (*Rhizoctonia*). Contrairement à d'autres bactéries comme *Bacillus thuringiensis*, les *Pseudomonas* ne sont actuellement pas utilisées en lutte biologique contre les insectes ravageurs. Pour explorer ce potentiel, le projet BACTÉRIES DU SOL du PNR 68 a testé la capacité de différentes souches de *Pseudomonas* à contrôler certains insectes ravageurs, comme les larves de hanneton ou de chrysomèle. Les résultats en pots ont montré que les *Pseudomonas* permettaient un contrôle efficace. En combinaison avec des nématodes entomopathogènes, un effet synergique a pu être observé et une mortalité supérieure à l'effet individuel a été mise en évidence.

En plein champ, différentes souches de *Pseudomonas* (*Pseudomonas protegens*, *Pseudomonas chlororaphis* et *Pseudomonas sp. Proradix*) ont été inoculées au semis de blé. Il a ainsi été possible de limiter les dégâts d'une forte attaque d'oscinies au moment du tallage, d'améliorer la survie du blé et de maintenir une densité plus im-

portante. Aucun effet bénéfique sur la culture n'a par contre été observé en l'absence de ce ravageur spécifique.

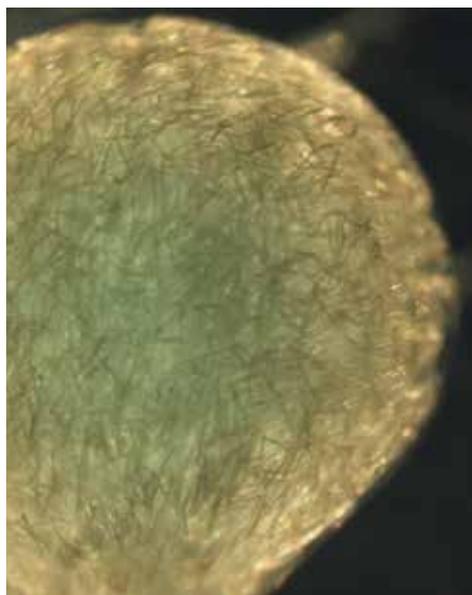
Synthèse – *Pseudomonas*

- Les bactéries *Pseudomonas* sont abondantes dans les sols suisses.
 - Les pratiques agricoles (travail du sol, fertilisation) influencent l'abondance des *Pseudomonas* et la résistance des sols à certains pathogènes, mais les recherches n'ont pas permis de définir un groupe de pratiques à privilégier pour favoriser un contrôle naturel des ravageurs et pathogènes.
 - Les premiers résultats d'inoculation de *Pseudomonas* ont mis en évidence un potentiel de protection des plantes, mais les bénéfices à attendre en termes de stimulation de la croissance des plantes sont moindres.
-

Illustration 18

Bille d'alginate contenant des nématodes entomopathogènes et des bactéries *Pseudomonas*.

Photo : Jinwon Kim,
Université de Neuchâtel.



La gestion des sols agricoles doit pouvoir se baser sur des critères d'évaluation clairement établis. Ceux-ci doivent être adaptés aux objectifs d'évaluation et aux systèmes dans lesquels ils sont utilisés (praticabilité, résultat obtenu, coûts). Selon les objectifs définis, il peut s'agir d'évaluer des propriétés, des processus ou des fonctions qui servent à caractériser un état ou une évolution du sol. Des méthodes scientifiques développées dans le cadre du PNR 68, ou testées en marge des projets, sont exposées ci-après. Quelques outils relativement accessibles pour la pratique et complétant les prestations des laboratoires de service sont aussi présentés.

7.1 Diagnostic

7.1.1 Structure du sol et autres propriétés physiques du sol

a) « Terranimo »

« Terranimo » (www.terranimo.ch) est un modèle de simulation accessible aux agricultrices et aux agriculteurs qui permet d'évaluer rapidement, et de façon simple, le risque de tassement du sol par les véhicules agricoles. Il se base sur le principe que la pression exercée par les machines est compensée par la portance du sol. Si la portance du sol excède la pression exercée, le risque de tassement du sol est faible. Au contraire, si la pression exercée dépasse la résistance du sol, il existe un risque de tassement considérable et il faut alors éviter de circuler sur la parcelle concernée. « Terranimo » est basé sur quatre paramètres : la charge à la roue, la pression de gonflage des pneus, le taux d'humidité (force de succion) et la teneur en argile du sol. La charge à la roue et la pression de gonflage des pneus correspondent à la contrainte exercée sur le sol, qui peut être décrite sous forme de nomogramme (ill. 19A, p. 50)¹⁰⁶. La résistance du

sol, quant à elle, est déterminée par la force de succion et par la teneur en argile du sol (ill. 19B, p. 50). Ces valeurs de contrainte et de résistance sont reportées sur un diagramme de décision qui définit trois types de risque de tassement : aucun risque, risque notable et risque avéré (ill. 20, p. 50). Une version plus complexe, « Terranimo expert », permet aux spécialistes de réaliser une analyse complète du risque de tassement dans des situations spécifiques.

b) Test à la bêche

Le test à la bêche est une méthode utilisée depuis longtemps qui permet d'évaluer la structure et la fertilité du sol à partir de différents critères comme la stratification, la couleur, l'odeur, la pénétration des racines ou le type d'agrégats. Des vidéos explicatives réalisées par le service de la protection des sols du canton de Berne¹⁰⁷ et l'Institut de recherche de l'agriculture biologique (FiBL)¹⁰⁸ sont disponibles pour la pratique. Une brochure d'Agri-dea décrit en détail les différentes étapes du test à la bêche¹⁰⁹. Il fournit un profil de sol à taille réduite qui a l'avantage de donner un résultat immédiat. La simplicité de mise en œuvre de cette méthode permet de réaliser le test en différents endroits afin de pallier à l'hétérogénéité des parcelles. Elle est également praticable tout au long de l'année et permet, par exemple, de détecter des problèmes dans les zones où la croissance des plantes est limitée ou d'observer les effets à long terme de certaines pratiques culturales. Le test à la bêche n'est toutefois qu'une observation ponctuelle qui est, par ailleurs, partiellement soumise à l'appréciation de l'opérateur. Malgré sa simplicité, cette méthode peut se révéler fastidieuse, en particulier lorsqu'elle est mise en œuvre pour la première fois et que les prélèvements sont, comme cela est recommandé, multi-

Illustration 19

Pression au sol et résistance du sol en fonction des contraintes et des propriétés du sol.

Source : www.terranimoch

- A** Contrainte exercée sur le sol à 35 cm de profondeur en fonction de la charge à la roue et de la pression de gonflage des pneus.
- B** Résistance du sol en fonction de la teneur en argile et de la force de succion.

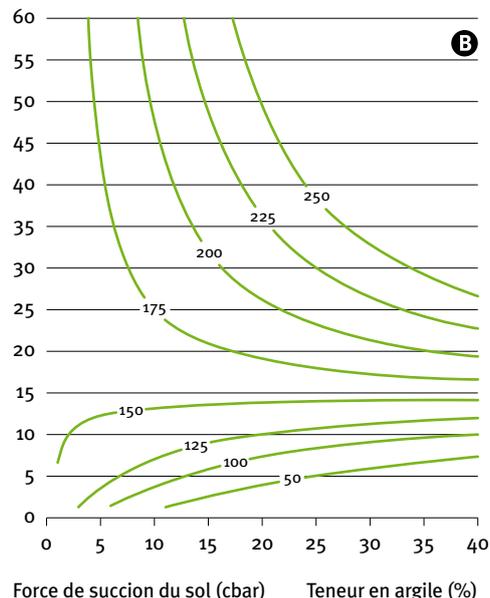
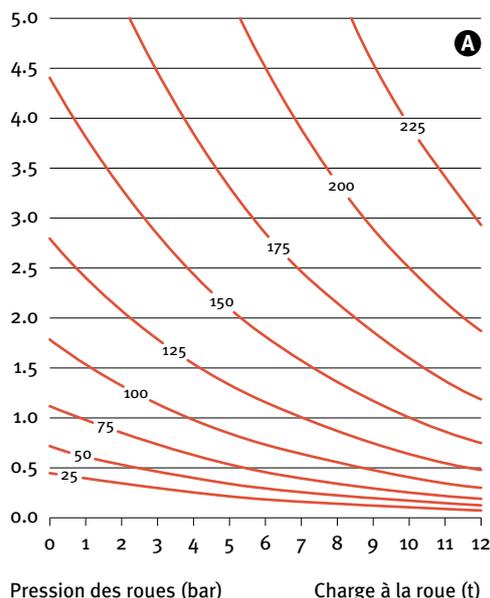
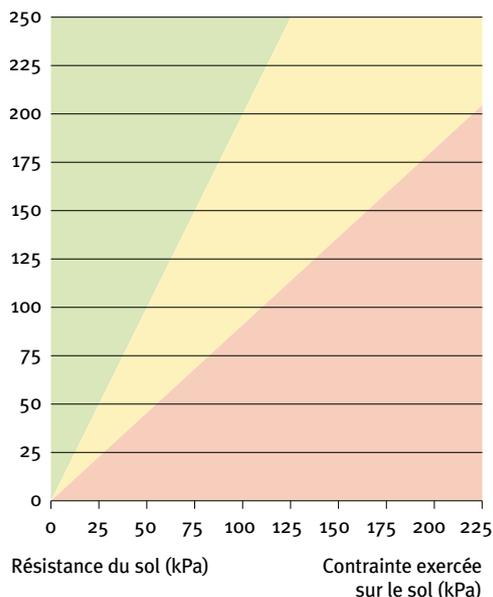


Illustration 20

Diagramme de décision de «Terranimo»® illustrant la relation entre la contrainte exercée sur le sol et la résistance du sol et classant le risque de tassement en trois niveaux.

Source : www.terranimoch

- Aucun risque
- Risque notable
- Risque avéré



pliés. De plus, ce test n'est pas réalisable en sol caillouteux, sec ou très tassé. Cette méthode est destinée aux agriculteurs. Ceux-ci doivent s'appuyer sur des instructions techniques (brochure ou vidéo) pour la mettre en pratique. Le test à la bêche renseigne sur l'état physique du sol et permet d'identifier d'éventuels problèmes (tassement du sol, manque d'air). Sur la base de ces observations, les agriculteurs peuvent prendre des mesures appropriées (utilisation de machines, fertilisation organique, adaptation de la rotation).

c) Évaluation visuelle de la structure du sol (Vess)

La méthode VESS («Évaluation visuelle de la structure du sol») ¹¹⁰ est une approche plus simple et plus rapide que le test à la bêche puisqu'elle se concentre sur la qualité des agrégats du sol et sur la porosité. L'état structural du sol est évalué selon un système de notes – allant de 1 pour un sol friable à 5 pour un sol très compact – en confrontant le prélève-

ment aux photos d'une carte. Cette méthode est relativement simple à mettre en œuvre. La méthode *vess*, qui prévoit l'évaluation des prélèvements de sol à l'aide d'une carte spéciale, est également destinée aux agriculteurs. À l'instar du test à la bêche, la méthode *vess* permet d'évaluer l'état structural du sol et d'adapter les techniques culturales si elle met en évidence des problèmes.

La méthode *vess* a également été adaptée pour être applicable en laboratoire sur des échantillons de taille réduite, tels que des carottes de sol (*Corevess*)¹¹¹. Pour cela, deux paramètres d'évaluation ont dus être écartés en raison de la petite taille des échantillons. Trois critères ont donc été retenus : la formation de fragments/agrégats, la forme des agrégats et la porosité visible. Tout comme la méthode *vess*, une note allant de 1 à 5 est donnée aux échantillons. Le test *Corevess* peut être réalisé sur un grand nombre d'échantillons et est moins soumis à l'appréciation de la personne réalisant l'évaluation. Les résultats de différents échantillons peuvent également être comparés, car l'humidité des échantillons est standardisée avant la notation. L'évaluation visuelle réalisée avec la méthode *Corevess* est par conséquent proche de l'évaluation des propriétés physiques du sol faite en laboratoire. Toutefois, la méthode *Corevess* se situant entre le laboratoire et le champ, elle nécessite plus de matériel (pompe à vide) que la méthode *vess* et ne donne pas une évaluation immédiate de la structure (délai de conditionnement). Pour faciliter la mise en œuvre de la méthode *vess*, la Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture (Hepia) a développé une application gratuite¹¹². Elle comporte une importante base de données de photos avec des contributions de nombreux pays. Cette méthode se prête au

monitoring d'un nombre important de parcelles par des chercheurs ou des conseillers. Elle permet de comparer l'impact de différentes techniques de culture sur la structure du sol et, ce faisant, de conseiller au mieux les agriculteurs en vue d'une exploitation optimale.

d) Test simplifié d'infiltrométrie de Beer Kan

Le test de Beer Kan¹¹³ permet d'évaluer l'effet de la macroporosité sur le temps d'infiltration de l'eau dans le sol. Ce test consiste à verser un volume déterminé d'eau dans un cylindre enfoncé à la surface du sol, en conditions humides mais sans excès d'eau en surface, et à mesurer le temps d'infiltration. Il est adapté à la pratique puisqu'il est simple à mettre en œuvre et ne nécessite aucun matériel spécifique¹¹³. De plus, les résultats présentés sous forme de graphiques sont facilement interprétables. Cependant, le temps de réalisation est long, car le test nécessite de nombreuses répétitions (entre 6 et 10) pour prendre en compte l'hétérogénéité du sol. Les résultats peuvent également être biaisés en présence d'une faune ou de champignons induisant une macroporosité. De plus, il ne peut être effectué que sur une surface plane et dans des conditions de sol humides. Les résultats obtenus peuvent être variables et sont difficiles à relier avec l'infiltrométrie classique, qui ne prend pas en compte la même porosité. Conçu pour les agriculteurs, ce test permet d'évaluer le temps d'infiltration de l'eau dans le sol et de détecter un éventuel tassement du sol. Si les résultats du test mettent en évidence des problèmes, les agriculteurs sont en mesure de prendre des mesures pour régénérer la structure du sol.

e) Rapport *mos*/argile

Le test à la bêche ou la méthode *vess* donnent une indication visuelle de la structure du sol. Ces tests ne se substituent pas à des ana-

lyses plus poussées en laboratoire, qu'ils ne font que compléter. Une analyse régulière de la teneur en mos – à réaliser par exemple une fois par rotation – est notamment recommandée. Lorsque la mos est liée à l'argile, elle est protégée de la dégradation par les microorganismes. Le rapport mos/argile est fortement corrélé à certaines propriétés physiques du sol comme la densité apparente¹¹⁴. Une étude réalisée sur 161 sols suisses a mis en évidence une relation entre ce rapport et la qualité de l'état structural de sol évaluée à partir de la méthode Corevess¹¹⁵. Sur la base de ces résultats, il a été défini que 17% de la masse d'argile devraient être combinés à la mos pour assurer une bonne structure du sol. En dessous de ce seuil, une dégradation de la structure est observée. Ce seuil est adapté en fonction de l'utilisation du sol (grandes cultures, herbages), mais pourrait aussi servir de valeur à atteindre. Sur la base des analyses de sol, les agriculteurs peuvent calculer le rapport mos/argile. Ils peuvent ainsi évaluer l'état des sols qu'ils exploitent et définir une valeur à atteindre sur la base de la teneur en argile du sol. La qualité de l'état structural du sol peut être améliorée à la faveur du maintien sur place des résidus de récolte, de l'apport régulier d'engrais organiques ou de l'implantation de couverts végétaux.

f) Bilan humique

La teneur en mos est relativement stable dans un système à l'équilibre, mais des évolutions à long terme liées aux pratiques agricoles peuvent être observées. Des analyses régulières – par exemple, une fois par rotation – aident à évaluer la teneur en humus et à planifier la fertilisation. Cependant, celles-ci sont généralement coûteuses. Des méthodes bon marché, comme la spectrométrie infrarouge, ont été développées par la recherche, mais elles sont encore peu accessibles à la pratique. De plus,

ces méthodes ne permettent pas d'évaluer dans quelle mesure les pratiques agricoles mises en œuvre influencent la teneur en mos, ce qui est possible avec le bilan humique. À partir de la méthode de calcul de Neyroud¹¹⁶, l'Agroscope a développé le logiciel «Bilan humique»¹¹⁷. Il est mis gratuitement à disposition des agricultrices et agriculteurs et leur permet d'évaluer si les pratiques culturales maintiennent la teneur en humus à un niveau stable, favorisent une augmentation ou s'il existe un risque de perte d'humus. Ces données sont également à disposition des scientifiques qui cartographient la teneur en humus des sols et son évolution.

Cette méthode de bilan humique compare les apports des résidus de récolte, couverts végétaux et engrais organiques aux pertes de mos par décomposition. Le calcul est réalisé à l'échelle de la parcelle et de l'exploitation pour toutes les surfaces assolées (prairies temporaires comprises). Le résultat est présenté sous forme de graphiques montrant la contribution des diverses pratiques culturales aux pertes et aux gains de matière organique (ill. 21).

Le logiciel interprète le résultat en termes de conséquences pour le sol et dresse une liste de recommandations pratiques au moyen de six classes (tab. 5, p. 54). Cependant, l'interprétation des résultats absolus est à prendre avec précaution, car le calcul du bilan humique ne prend pas en compte la teneur actuelle en mos.

D'autres méthodes de calcul du bilan humique sont utilisées dans les pays voisins de la Suisse. En Allemagne, la méthode la plus répandue est celle de l'Union des instituts de recherches et d'études agricoles allemands (VDLUFA)¹¹⁸. Elle calcule les besoins en humus des cultures pour la minéralisation des éléments nutritifs et les

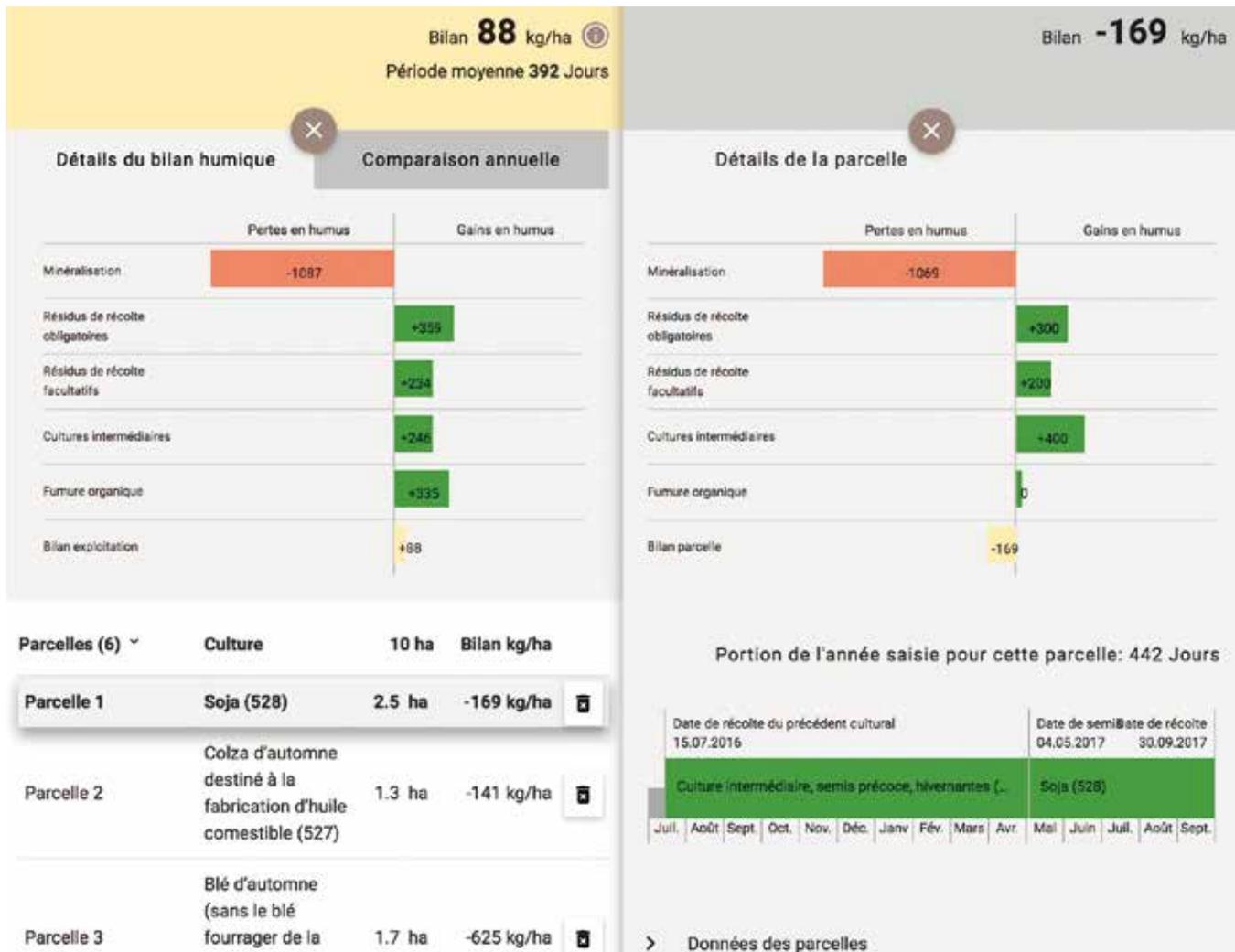


Illustration 21
Logiciel de calcul du bilan humique développé par l'Agroscope.

À gauche : bilan humique calculé pour l'exploitation à partir des bilans réalisés à la parcelle.

À droite : paramètres nécessaires au calcul du bilan humique.

compare avec l'humus apporté via les résidus de récolte et la fumure organique. En France, la méthode SIMEOS AMG¹¹⁹ permet d'évaluer les effets de l'apport des résidus de récolte, du travail du sol, de l'implantation de couverts végétaux ou de la rotation. À partir d'informations simples (teneur en argile, implantation de couverts végétaux), ces méthodes permettent de déterminer rapidement l'influence des pratiques agricoles sur la teneur en MOS. Toutefois, une

estimation plus précise de l'évolution sur le long terme, à des fins de recherche par exemple, exige de recourir à des modèles plus complexes comme RothC¹²⁰, DayCent (utilisé dans le projet CLIMATE CAFÉ de la FACCE-JPI) ou Stics (utilisé dans le projet COUVERTS VÉGÉTAUX du PNR 68). La quantité d'informations nécessitée par ces modèles quant au site et au mode d'exploitation est en revanche bien plus importante que pour les méthodes de calcul simples.

Tableau 5
Interprétation du bilan humique
tel que calculé par le logiciel
Bilan humique développé par
l'Agroscope.

www.humusbilanz.ch

Résultat du bilan humique (kg/ha)	Évaluation	Conséquences	Mesures recommandées
Moins de -400	Très bas	Des pertes de matière organique sont à attendre: la qualité et les fonctions du sol courent un risque sérieux, notamment en ce qui concerne la stabilité structurale.	Introduire ou améliorer impérativement des mesures visant à augmenter la teneur en matière organique: adaptation de la rotation, utilisation d'engrais organiques, couverts végétaux, travail de sol réduit.
Entre -400 et -200	Bas	Risque élevé de perte de matière organique: il existe un risque pour la qualité et les fonctions du sol.	Privilégier les mesures visant à augmenter la teneur en matière organique: adaptation de la rotation, utilisation d'engrais organiques, couverts végétaux, travail de sol réduit.
Entre -200 et 200	Équilibré	L'apport en matière organique devrait être suffisant pour le maintien de la teneur en matière organique.	En cas de valeurs négatives: améliorations par des mesures permettant d'augmenter la teneur en matière organique. Sinon: conserver le mode d'exploitation et poursuivre les mesures visant à maintenir la teneur en matière organique.
Plus de +200 à +400	Élevé	Il est probable que la teneur en matière organique augmente et se stabilise à un niveau élevé: des effets positifs sur la qualité et les fonctions du sol sont attendus.	Conserver le mode d'exploitation.
Plus de +400 à +800	Très élevé	Il est très probable que la teneur en matière organique augmente et se stabilise à un niveau élevé: des effets positifs sur la qualité et les fonctions du sol sont attendus.	Conserver le mode d'exploitation; adopter des mesures permettant de réduire le risque de lixiviation: apport des engrais selon les besoins des cultures (date et quantité), éviter de laisser le sol nu durant l'automne et l'hiver.
Plus de 800	Critique	L'apport élevé de matière organique augmente la teneur en matière organique du sol mais augmente en même temps le potentiel de minéralisation et donc le risque de lixiviation.	Prendre impérativement des mesures contre la lixiviation des nutriments: apport des engrais selon les besoins des cultures (date et quantité), éviter de laisser le sol nu durant l'automne et l'hiver, éviter le travail de sol profond.

7.1.2 Aptitude des sols à fournir les éléments nutritifs aux plantes

La capacité des sols à stocker et à restituer les éléments nutritifs majeurs pour la nutrition des plantes est principalement évaluée au moyen d'analyses de laboratoire. L'analyse de la capacité d'échange de cations (CEC) permet d'évaluer la capacité du sol à fixer des éléments spécifiques (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , NH_4^+). L'analyse des éléments nutritifs permet d'estimer la quantité totale et la quantité directement disponible pour les plantes. Ces estimations sont à prendre en compte pour établir un plan de fertilisation qui couvre les besoins des cultures et limite les risques que des intrants affectent l'environnement. Les «Principes de fertilisation des cultures agricoles en Suisse» (PRIF 2017)⁶⁴ contiennent des tableaux de tous les éléments majeurs qui permettent d'évaluer le niveau d'approvisionnement du sol à partir des résultats d'analyse, ainsi que des indications issues de données expérimentales sur les besoins de fertilisation

Illustration 22
Test avec des sous-vêtements pour l'évaluation visuelle et comparée de l'activité biologique du sol.

Photo : Max Fuchs (en haut),
Vincent Tauxe (en bas).



des principales cultures suisses (grandes cultures, cultures fourragères et cultures spéciales).

Des observations au champ peuvent également donner une indication de l'état de fertilité chimique du sol. Des symptômes de carences ou d'excès peuvent être observés dans les cultures, ainsi que des plantes bioindicatrices témoignant d'un état spécifique. Des tests simples comme la mesure du pH du sol à l'aide de bandelettes ou d'un pH-mètre ou l'évaluation de la quantité de calcaire avec de l'acide peuvent également être réalisés au champ.

7.1.3 Biologie du sol

a) Tea bag test

L'activité des organismes du sol peut être évaluée globalement en suivant la vitesse de décomposition de la matière organique dont ils se nourrissent. Une des méthodes pour mesurer la vitesse de décomposition consiste à enfouir un sachet contenant de la matière végétale morte dans le sol et à le peser après un certain temps, la perte de poids correspondant à la quantité de matière décomposée. Cette méthode a été standardisée récemment grâce à l'utilisation de sachets de thé en tant que matière végétale («tea bag test»)¹²¹. Sa facilité de mise en œuvre et son faible coût le rendent accessible à un large public. Ce test nécessite toutefois près de 90 jours et doit être réalisé avec soin (identification des zones d'enfouissement, pesée précise du sachet de thé). La standardisation de la méthode permet néanmoins de comparer des résultats du monde entier, car ils peuvent être mis à disposition des scientifiques en ligne¹²² et contribuent ainsi au développement des connaissances relatives à la décomposition de la mos.

D'autres sources de matière organique peuvent être utilisées pour réaliser ce test.

Illustration 23
Test du Bait-Lamina.

Photo : Alexandra Schröder, Agroscope.

À gauche :
bâtonnet en PVC permettant de
réaliser le test du Bait-Lamina.
À droite :
bâtonnets implantés dans le sol.



Un sachet nylon contenant de la litière, le LEVA bag¹²³, a été développé sur le même principe. Il a l'avantage d'être plus grand qu'un sachet de thé, si bien que la pesée est plus simple. En revanche, le temps d'enfouissement est plus long (de l'ordre de quatre mois).

Pour permettre une évaluation visuelle et comparative de l'activité biologique de sols, le conseil canadien de conservation des sols (cccs) a proposé une méthode accessible à tous, qui utilise des slips en coton comme source de matière organique (ill. 22, p. 55)¹²⁴.

b) Bait-Lamina

La méthode des Bait-Lamina¹²⁵ est une évaluation visuelle standardisée basée sur des bâtonnets en pvc perforés et remplis d'appâts (mélange de cellulose, de son de blé et de charbon actif dans les proportions 70 : 27 : 3, ill. 23). Ces bâtonnets sont introduits dans le sol et retirés après une période de 7 à 20 jours selon l'humidité du sol. Une estimation de

la proportion d'appâts consommés (perforations vides) est alors réalisée. Ce test se base sur l'hypothèse que l'appât ne se trouvant plus dans le bâtonnet a été consommé par les organismes du sol. Relativement simple, rapide et peu coûteux, il permet de comparer l'activité de décomposition au sein d'une même parcelle ou d'évaluer l'influence de différentes techniques culturales. Ce test peut être réalisé sur une longue période en remplaçant successivement les bâtonnets pour pallier aux changements d'activité de décomposition liés aux conditions climatiques. En outre, l'appât peut être adapté pour l'étude de certains organismes spécifiques. Les possibilités sont cependant limitées puisque seules des substances pulvérulentes peuvent être utilisées. En raison de leur difficulté d'interprétation, les résultats ne revêtent qu'une importance limitée pour la pratique. Ce test n'en garde pas moins une valeur didactique, car il permet une mise en évidence des différences et une comparaison ciblée, par exemple, des parcelles traitées et non traitées.

c) Observation des populations de vers de terre

Les vers de terre sont souvent utilisés comme indicateur de la vie du sol, car ils sont plus facilement quantifiables que d'autres organismes plus petits. Les populations de vers de terre peuvent être quantifiées par tamisage de la terre après une extraction de sol. D'autres méthodes consistent à faire sortir les vers de la terre à l'aide d'électricité ou d'appâts. Après le prélèvement, les vers sont classés en quatre catégories : les épigés, les endogés, les anéciques à tête rouge et les anéciques à tête noire (encadré). Cette méthode, simple à mettre en œuvre et très peu coûteuse¹²⁶, est accessible à tous. Les résultats sont valorisables grâce à une base de données en ligne¹²⁷. Celle-ci offre la possibilité de

Catégories de vers de terre

- Les **épigés** sont des vers de petite taille (de 1 à 5 cm), très colorés (rouge sombre). Ils vivent à la surface du sol, dans des amas de matière organique en décomposition. Ils ne creusent pas ou peu de galeries et se reproduisent rapidement.
 - Les **anéciques** sont des vers de grande taille (de 10 à 110 cm) qui vivent dans des galeries plus ou moins verticales et viennent se nourrir à la surface de matière organique en décomposition. Ils se reproduisent peu, mais peuvent vivre plusieurs années s'ils ne sont pas perturbés. Les anéciques à *tête rouge* sont assez communs et plus résistants aux pratiques agricoles que les anéciques à *tête noire*, qui témoignent de sols en bonne santé.
 - Les **endogés** mesurent de 1 à 20 cm et sont de couleur claire. Ils remontent peu à la surface et creusent des galeries temporaires très ramifiées plutôt horizontales.
-

suivre l'évolution du nombre de vers de terre, de comparer les résultats à d'autres situations et d'établir des référentiels pour ces macroorganismes. Toutefois, le comptage ne peut être réalisé que durant la période de pleine activité des vers, entre les mois de janvier et d'avril. En outre, une identification plus poussée des espèces est nécessaire pour la recherche.

d) Abondance et diversité des champignons mycorhiziens

La composition des communautés mycorhiziennes du sol peut être caractérisée par une analyse des spores au microscope, mais cette méthode est laborieuse et nécessite une grande expertise. Depuis les années 90, les outils moléculaires sont de plus en plus utilisés. Cependant, la résolution des méthodes appliquées jusqu'à présent était trop faible pour identifier ces champignons. Le projet «High-resolution community profiling of arbuscular mycorrhizal fungi» a par conséquent développé une nouvelle méthode permettant d'iden-

tifier et de quantifier les différentes espèces, mêmes celles étant très proches¹²⁸. Elle a ouvert la porte à de nouvelles études relatives à l'influence des systèmes de production sur l'abondance et la diversité des communautés mycorhiziennes (point 5.1, p. 34). Cette technique apparaît essentielle pour réaliser des inoculations ciblées avec des champignons mycorhiziens adaptés au sol et aux conditions locales et nécessite donc de futurs développements.

e) Activité des nématodes entomopathogènes

L'activité des nématodes entomopathogènes est généralement évaluée à l'aide d'appâts (insectes hôtes). Cette méthode est cependant peu fiable, car le taux d'infection varie en fonction des conditions environnementales (humidité, température, porosité). Par ailleurs, elle est très exigeante en main-d'œuvre et en temps. Sur la base de techniques d'analyse moléculaire, l'équipe du projet NÉMATODES du PNR 68 a développé des kits d'analyse capables de quantifier précisément différentes espèces de nématodes entomopathogènes, de champignons nématophages, une espèce de bactérie ectoparasite et des nématodes détritivores du groupe des *Acroboloides* dans un échantillon de sol⁸⁹. Cette technique est rapide, peu coûteuse et plus fiable que les méthodes classiques d'appâts¹²⁹. Elle offre donc des perspectives intéressantes pour étudier plus précisément l'écologie des nématodes entomopathogènes. Cependant, tout comme l'analyse de la communauté de champignons mycorhiziens, elle n'est actuellement accessible qu'à la recherche.

7.2 Monitoring

7.2.1 Essais de longue durée

Les essais de longue durée permettent de suivre sur le long-terme les effets de tech-

niques spécifiques ou de systèmes de production. Dans de nombreux pays, ces essais ont fortement contribué à développer les connaissances et l'application de nouvelles techniques sur la base de critères liés à l'évolution de la qualité du sol et du rendement des cultures¹⁶⁵. Même si la mise en place et la réalisation de tels essais sont relativement coûteuses, ils s'avèrent indispensables et ne peuvent être remplacés par des essais annuels, de nouvelles méthodes analytiques ou l'utilisation de modèles. Au contraire: les essais de longue durée permettent de calibrer les nouvelles méthodes analytiques. Actuellement, quinze essais de longue durée sont en place en Suisse (annexe 1, p. 72), dont cinq depuis plus de quarante ans. Ils portent principalement sur la fumure organique et minérale, le travail du sol et la rotation des cultures, mais aussi sur des systèmes de production. D'autres facteurs de production tels que l'implantation de couverts végétaux ou le choix variétal sont également étudiés sur des durées plus réduites.

Dans le cadre du PNR 68, les essais de longue durée ont largement été mis à contribution et ont permis de développer les connaissances relatives à l'influence des pratiques agricoles sur les populations d'organismes du sol – nématodes entomopathogènes, bactéries *Pseudomonas*, champignons mycorhiziens. Ils ont également participé au développement de systèmes de culture plus respectueux du sol (projet COUVERTS VÉGÉTAUX du PNR 68, essai travail du sol P29C). Le PNR 68 a aussi montré la nécessité de dispositifs spécifiques pouvant faire l'objet de suivis sur le long terme, à l'image de l'observatoire de surveillance de la structure des sols de Reckenholz.

7.2.2 Réseaux d'exploitations

Les réseaux d'exploitations constituent un autre outil essentiel pour le suivi de l'influence réelle de techniques culturales ou de systèmes de production spécifiques. Dans la pratique, ils contribuent également à l'acceptation de techniques plus respectueuses du sol. Dans le cadre du projet SYSTÈMES DE CULTURE AMÉLIORANT LE SOL du PNR 68, deux réseaux comptant chacun trente exploitations ont été établis (point 4.4, p. 32). L'objectif était d'évaluer la contribution de différents systèmes à la protection des fonctions du sol. Les premiers résultats confirment l'importance de ce type de réseaux en tant qu'objet d'étude scientifique, mais également pour enrichir l'étude des contextes et des savoirs issus de la pratique.

7.2.3 Systèmes d'information

a) Stations de mesure

Force de succion

La force de succion, ou potentiel hydrique, est la force d'attraction exercée par le sol sur l'eau contenue dans les pores. Elle dépend de la texture du sol, de la teneur en mos, de la taille des pores et de l'humidité du sol. Plus le sol est humide, plus la force de succion est faible. Une force de succion importante permet de stabiliser les éléments solides du sol. Dans ces conditions, la portance du sol est élevée et les risques de tassement sont faibles.

Un réseau de 38 stations de mesure a été mis en place dans huit cantons suisses (Soleure, Bâle-Campagne, Genève, Zoug, Fribourg, Berne, Vaud et d'Argovie)¹³⁰ afin d'observer la force de succion du sol, les précipitations, la température du sol et de l'air sur l'ensemble de l'année. La force de succion indique l'état d'humidité du sol en temps réel et permet d'évaluer la portance

d'un sol et donc sa sensibilité au tassement. Ces données sont en libre accès et interprétées en fonction de paramètres liés à la mécanisation (charge, pression des pneus). Elles constituent un critère de décision essentiel pour l'engagement de machines de chantier.

Ce réseau offre des perspectives intéressantes pour l'agriculture, car il permet d'évaluer la traficabilité en fonction de l'humidité du sol et de réduire ainsi les risques de tassement. Les données peuvent également servir d'aide à la décision afin de déterminer s'il est nécessaire de recourir à l'irrigation en période sèche. Les informations en ligne permettent de suivre facilement l'évolution de l'humidité du sol et renseignent sur les pratiques à adopter en conséquence pour éviter les dommages. Afin de mieux évaluer les risques, les valeurs de force de succion peuvent également être utilisées dans un modèle de simulation tel que «Terranimo» (point 7.1.1, p. 49).

Carte de risque d'érosion

Une carte du risque d'érosion, accessible en ligne, a été développée pour les surfaces agricoles utiles (SAU) de la Suisse¹³¹. Ce risque a été modélisé sur la base des paramètres locaux tels que l'inclinaison et la longueur de la pente, les précipitations ou les propriétés du sol et classé en trois catégories distinguées par différentes couleurs³⁹. La carte fournit un aperçu rapide de la situation et constitue un bon moyen de prévention pour élaborer des mesures de protection appropriées sur le long terme. Cependant, le calcul du risque ne prend en compte ni l'utilisation du sol ni le mode d'exploitation. Dans certains cas, la réalité peut différer fortement des prédictions du modèle. Des zones classées sans risque peuvent ainsi subir des dégâts d'érosion dus à des arrivées d'eau ex-

térieures au périmètre (routes, drainages défectueux). À l'inverse, il est également possible que des mesures de protection (prairies, travail du sol réduit) aient déjà permis de maîtriser le risque d'érosion dans certaines zones classées à risque.

b) Observatoire national des sols (NABO)

L'observatoire national des sols (NABO; www.nabo.ch) est constitué de 103 sites répartis sur l'ensemble de la Suisse et représentatifs des diverses utilisations. Depuis 1985, des échantillons sont prélevés tous les cinq ans dans les différents sites et analysés pour suivre les évolutions temporelles de la pollution aux métaux lourds, des teneurs en mos, carbone organique et éléments nutritifs (azote, phosphore et potassium). Outre l'analyse directe, une partie des échantillons issus des différentes campagnes de prélèvement sont stockés pour permettre d'éventuelles futures analyses de sol. L'un des objectifs du NABO est de détecter rapidement les évolutions indésirables et de mettre en évidence l'impact des mesures politiques de protection des sols. Sur la période 1985–2004, aucune augmentation notable des polluants anorganiques n'a été détectée dans la couche supérieure du sol¹³².

c) Le réseau fribourgeois d'observation des sols (FRIBO)

Le réseau fribourgeois d'observation des sols (FRIBO) a été mis en place entre 1987 et 1991. Ce réseau a pour objectif premier de récolter des informations d'ordre pédologique, agronomique et environnemental sur les sols agricoles du canton de Fribourg. L'analyse des données permet de suivre l'évolution à long terme de la fertilité des sols et de mettre en évidence les modifications que subissent les différents sols, naturellement ou sous l'influence des pratiques agricoles. Le réseau comporte 250 sites classés selon trois types d'utilisation

du sol: terres assolées, prairies permanentes et alpages. Au total 37 paramètres physiques, chimiques et biologiques sont relevés tous les 5 ans. Les résultats recueillis de 1987 à 2011¹³³ montrent une stabilité de la qualité des sols quant à la teneur en mos et au pH, une diminution de la concentration en métaux lourds (cadmium et zinc) et une stabilité de la concentration en oligoéléments. Parmi les éléments nutritifs, le phosphore disponible à court terme a diminué, tandis que les réserves en phosphore sont demeurées stables. L'augmentation de la teneur en potassium et la diminution de la biomasse microbienne indiquent que des mesures doivent être adoptées.

d) Système d'alerte précoce

Les apports de fertilisants (engrais de ferme et engrais minéraux) et de produits phytosanitaires contribuent fortement à l'accumulation de substances polluantes (pesticides, cuivre, zinc, cadmium) dans le sol, ce qui altère ses fonctions. Les mesures prises par l'agriculture suisse pour réduire les excédents de nutriments ont principalement porté sur la réduction du phos-

phore. Le projet SYSTÈME D'ALERTE PRÉCOCE du PNR 68 a développé un outil régional de monitoring qui permet d'établir un bilan des entrées et des sorties des éléments nutritifs et des éléments traces dans les sols agricoles. Il inclut des outils de monitoring déjà existants ainsi que des composantes de modèles: données géoréférencées sur les exploitations issues de recensements, carte d'utilisation des sols, directives de fertilisation, données pédologiques et climatiques ou indicateurs socio-économiques. Il sert de support de décision pour la gestion du sol au niveau de l'exploitation. À l'aide de modèles et de différents scénarios, ce monitoring des sols permet également d'identifier précocement les évolutions non durables observées dans une région et de planifier des mesures de prévention. Enfin, il fournit des informations utiles pour la modélisation de l'érosion des sols ou le bilan humique, ainsi que des données sur la biodiversité du sol ou les émissions de gaz à effet de serre. Ce système est présenté plus en détail dans la synthèse thématique ST4 « Plateforme d'information des sols suisse (PIS-CH) »¹³⁴.

Le présent chapitre vise à donner une image plus globale des défis actuels et à esquisser des éléments stratégiques pour le futur. Il s'agit de trouver des solutions aux problèmes prioritaires et de poursuivre les développements entrepris afin de parvenir à une production agricole de haute qualité, qui soit adaptée aux conditions locales et valorise la ressource sol.

Les objectifs prioritaires pour préserver la qualité des sols sont :

- la réduction des atteintes physiques (érosion, tassement),
- la réduction des atteintes chimiques et
- le maintien de conditions permettant le développement d'un sol vivant, une diversité des organismes du sol, un équilibre du cycle des éléments nutritifs et du carbone, une capacité de régénération du sol offrant une résilience élevée.

Les moyens et les mesures permettant d'atteindre ces objectifs peuvent être dérivés des propositions formulées dans le cadre des projets du PNR 68 et des réflexions prospectives qui ont émergé des échanges menés avec les acteurs des projets de recherche, le comité de direction du PNR 68 et le groupe de suivi de la présente synthèse. Les thèmes et propositions présentés ci-après ont été sélectionnés jusqu'à un certain degré selon des critères subjectifs par les auteurs et ne sauraient être considérés comme exhaustifs.

8.1 Développements agricoles récents

Les problématiques agricoles d'aujourd'hui sont un héritage de l'histoire récente de l'agriculture. Suite à l'industrialisation intervenue au XIX^e siècle, et particulièrement à la crise d'approvisionnement rencontrée durant la Première Guerre mondiale, l'agriculture suisse s'était fixé pour objectif de maximiser les rendements afin

de faire face aux besoins alimentaires de la population. En 1940, le plan Wahlen – qui était destiné à assurer l'autoapprovisionnement du pays – a conduit à une extension massive des surfaces agricoles. La reprise économique d'après-guerre a ensuite favorisé une agriculture intensive et fortement augmenté les capacités de production. En 1971, ce même Friedrich T. Wahlen en a appelé à « l'abandon vital du fétichisme lié à la croissance économique et à la production » en argumentant qu'il était nécessaire de « fixer une limite supérieure à l'intensité de production [...] dans l'intérêt du maintien à long terme de bases de production saines »¹³⁶. À l'époque, les cartes d'aptitude des sols et les cartes climatiques étaient publiées par les offices fédéraux de l'aménagement du territoire, de l'agriculture et des forêts¹³¹. Vingt ans plus tard, la production intégrée (PI) a posé des limites à une productivité toujours plus élevée.

Aujourd'hui, l'agriculture est confrontée à plusieurs défis d'ampleur variable en relation avec le sol : divers problèmes liés à une utilisation intensive persistent, de nouveaux enjeux relatifs à l'affectation des sols demandent clarification et il est urgent d'innover afin de maintenir la compétitivité de la production agricole tout en préservant simultanément la qualité du sol.

Les principales menaces pour la qualité des sols analysées dans le cadre de la présente synthèse concernent les terres ouvertes. Celles-ci contribuent à une part importante à l'approvisionnement en produits alimentaires d'origine végétale. Même si le taux d'auto-approvisionnement correspondant n'atteint que 42%⁸, cette contribution n'en demeure pas moins nécessaire dans la mesure où les surfaces agricoles sont menacées par les mêmes problématiques au niveau global. La libéralisation actuelle

Illustration 24

Indice des prix à la production de produits agricoles de 1994 à 2016¹³⁵.

Indice décembre 2015 = 100.

- Produits agricoles, total
- Céréales
- Lait cru
- Pommes de terre
- Fruits
- Légumes frais

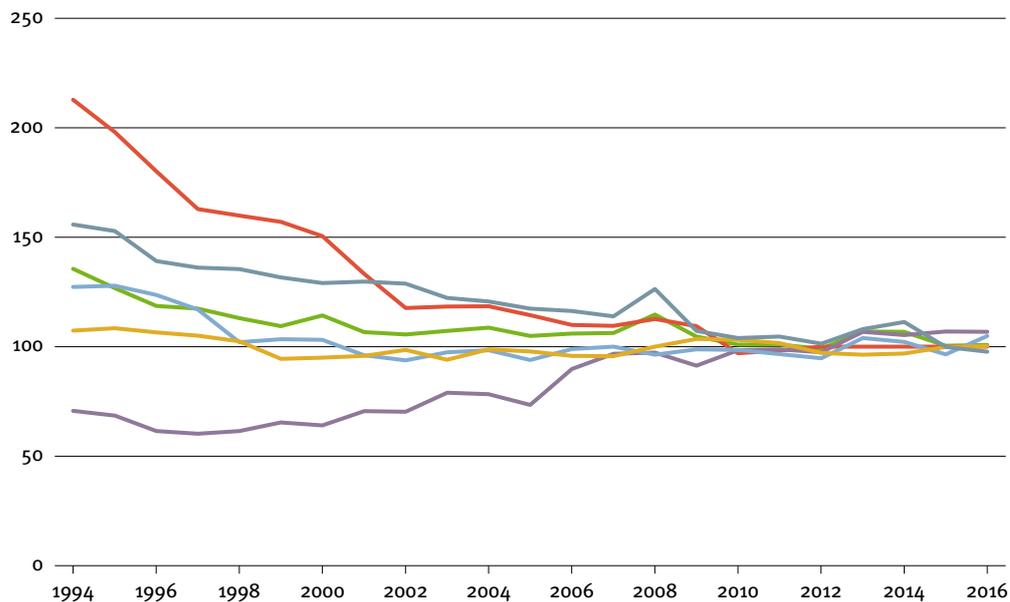


Illustration 25

Surface de culture de plantes sarclées en 2016 par district⁷.

Part de la surface agricole utile, en % :

- ≥ 9,0
- 6,0 – 8,9
- 3,0 – 5,9
- 1,5 – 2,9
- 0,5 – 1,4
- < 0,5

Surface de culture de plantes sarclées en hectares :

- 3124
- 1500
- 500
- ≤ 100

Plantes sarclées :

- Betteraves fourragères
- Betteraves sucrières
- Pommes de terre

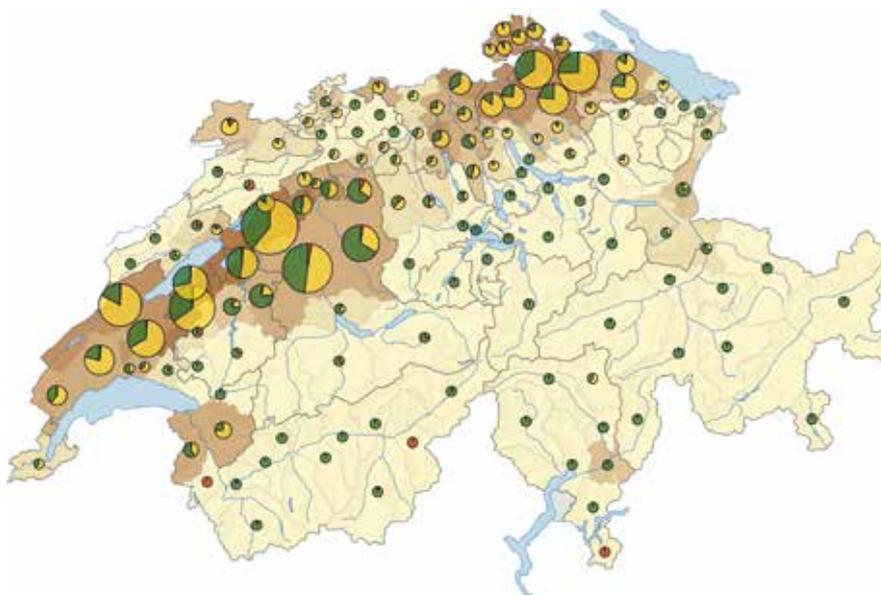
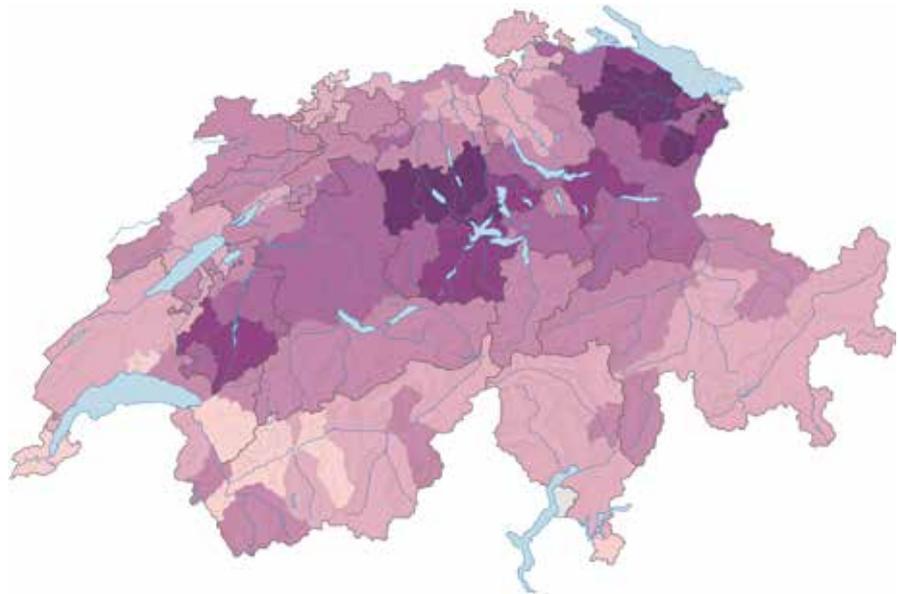


Illustration 26
Unités gros bétail par hectare
en 2016 par district⁷.

Unités de gros bétail par hectare :

- $\geq 1,9$
- 1,6 – 1,8
- 1,3 – 1,5
- 1,0 – 1,2
- 0,7 – 0,9
- $< 0,7$



de l'agriculture suisse induit de nouveaux champs de tension : nouvelle organisation des marchés, mondialisation, pression sur les prix, pression sur les sols. Par rapport aux autres secteurs de production, les grandes cultures ont ainsi accusé une baisse particulièrement marquée de l'indice des prix à la production au cours des vingt dernières années (ill. 24). Cette évolution a conduit à une rationalisation et à une spécialisation supplémentaires du travail, à un agrandissement des exploitations et, par extension, à une uniformisation des systèmes agricoles et des territoires. Les cultures exigeantes par rapport à certaines propriétés du sol, notamment les cultures sarclées, se concentrent aujourd'hui principalement dans les régions de plaine du Plateau suisse (ill. 25). Les secteurs avals rationalisent leurs structures (centres collecteurs, moulins, abattoirs, usines de transformation). La complémentarité entre production végétale et animale se traduit par la disparition du bétail en plaine et sa concentration dans certaines régions (ill. 26).

Les menaces pour le sol sont aujourd'hui partiellement contrôlées par la politique agricole – grâce entre autres aux prestations écologiques requises (PER) – et aussi par la structure encore familiale des exploitations agricoles, qui perpétuent une forme d'agriculture appropriée au site. Toutefois la rationalisation croissante de la production, des structures agricoles et de la transformation exige une attention accrue.

8.2 Préservation de la qualité des sols

La nature des moyens à disposition et leur intensité potentielle d'utilisation font que les sols d'aujourd'hui n'ont probablement jamais été exposés à autant de facteurs de stress. Les machines agricoles, les produits de traitement et les engrais constituent aussi bien des facteurs de progrès qu'une source de risques pour le fonctionnement du sol. Ils figurent en première ligne des causes de tassement, de perte de mos, d'érosion, de perte de biodiversité et d'atteintes chimiques. En revanche, la pro-

gression des connaissances et des techniques permet de développer des systèmes de culture plus respectueux du sol et de ses fonctionnalités. Le développement d'une agriculture faisant appel aux nouvelles technologies d'information et de communication (smart farming) peut soutenir la résolution de divers problèmes. L'apparition de nouvelles menaces, comme le tassement, témoigne de nouvelles tendances agricoles, mais reflète aussi de nouvelles connaissances qu'il s'agit de mieux appréhender et de mieux intégrer.

8.2.1 Réduction des atteintes portées au sol

Pour que les mesures de protection du sol soient efficaces et rencontrent l'acceptation des milieux concernés, il est nécessaire qu'elles soient adaptées aux problématiques détectées. Le poids croissant des machines augmente les risques que le sol subisse des atteintes physiques extrêmement importantes voire irrémédiables, en particulier en ce qui concerne le tassement des couches profondes et certaines formes d'érosion. Face aux risques irréversibles encourus, il convient d'établir en priorité comment contrôler le poids des machines, la pression s'exerçant sur le sol et les conditions d'utilisation. Une démarche similaire à celle appliquée à la surveillance des chantiers, où l'engagement des engins lourds est réglementé en fonction de l'état d'humidité du sol, peut être envisagée¹³⁶. Dans certaines grandes cultures, la perte de *mos* témoigne également d'un système de culture déséquilibré menaçant à moyen terme de dégrader la structure du sol. La perte de biodiversité reste encore mal quantifiée⁴⁴. Les mesures visant à préserver et à améliorer un milieu favorable aux organismes et donc à promouvoir un sol vivant ont montré que la valorisation du sol par l'agriculture offre un potentiel d'amélioration. Il convient de

définir des objectifs généraux afin de limiter les atteintes portées au sol par les polluants, en particulier les PPS, mais aussi celles induites par le déséquilibre des éléments nutritifs résultant de l'importation d'aliments concentrés sur les exploitations spécialisées.

La persistance de certaines atteintes (érosion, pollution) malgré un cadre légal suffisant témoigne des pesées d'intérêts qui englobent des facteurs contraignants (rentabilité, accès au marché) et changeants (conditions météorologiques, charge de travail, marché) comme des difficultés rencontrées lors de l'application des outils existants.

Globalement, la spécialisation des filières et leur concentration régionale conduisent à une généralisation des cultures exigeantes pour le sol et à une prise de risques pour répondre aux besoins de rentabilité. Pour préserver la qualité du sol, la rotation se doit néanmoins d'alterner les cultures exigeantes et les cultures régénératives. L'itinéraire technique doit par ailleurs maintenir une cohérence entre la durée de végétation et les conditions pédoclimatiques. La rentabilité des cultures exige des semis précoces et des récoltes tardives, si bien que l'exploitation s'effectue souvent dans des conditions d'humidité excessives et requiert de recourir à un ensemble de mesures techniques supplémentaires (travail du sol, fumure, protection des plantes).

Les labels de commercialisation en main des producteurs ont en partie intégré le sol et sa qualité dans leurs cahiers des charges. IP-Suisse¹³⁷ rappelle qu'un sol sain est la base d'une production végétale optimale. À cette fin, il émet des directives spécifiques à chaque production comprenant des exigences relatives au choix des parcelles, à la rotation, à la fumure et à certaines

interventions phytosanitaires. Bio Suisse¹³⁸ stipule qu'un sol sain est la première des conditions nécessaires à la croissance de plantes et d'animaux sains, et donc à la production d'aliments sains. Les mesures recommandées concernent surtout une gestion ciblée de l'humus visant à compenser les pertes par décomposition – minimum 20% de prairie dans la rotation – et l'interdiction de tout intrant de synthèse. Ces directives étant élaborées par les producteurs eux-mêmes, elles reflètent également leurs priorités et sont mises en œuvre. Leur développement ultérieur se devra de relever les défis que pose l'intégration des nouvelles problématiques en lien avec les atteintes portées au sol. Les modèles participatifs à l'image de ceux proposés par IP-Suisse et Bio Suisse méritent d'être intégrés de façon renforcée aux filières de production et de transformation, car ils assurent leur pérennité.

La répartition et la mutualisation des risques au sein et entre les filières passent par des solutions innovantes. Il s'agit de compenser les écarts de prix entre les cultures profitables et les cultures régénératives, écarts qui sont jusqu'à présent principalement assumés par les agricultrices et agriculteurs. Une extension de la couverture des risques climatiques aux risques inhérents au travail du sol pourrait contribuer à la protection du sol en englobant certains risques d'exploitation.

8.2.2 Développement de systèmes de culture tenant compte des fonctionnalités du sol

Les projets du PNR 68 ont démontré l'importance de certains organismes du sol et mis en lumière des possibilités qui permettraient de prévenir certains risques et de mobiliser les fonctionnalités positives liées aux organismes du sol.

Un sol vivant permet d'assurer les conditions de base nécessaires à la croissance des cultures et dispose d'une capacité de régénération (résilience) grâce à laquelle ses fonctions peuvent être restaurées suite aux effets préjudiciables des cultures et de leur exploitation. Les enjeux actuels visent à garantir une teneur en MOS suffisante sur les exploitations de grandes cultures, à préserver une structure du sol favorable malgré les multiples interventions culturales et à éliminer les polluants (éco)toxiques.

La ST1 a montré la pertinence de systèmes de culture cohérents (rotation des cultures, y compris prairies et légumineuses, travail du sol réduit, biocontrôle) et de méthodes innovantes (agriculture de conservation, plantes ou organismes auxiliaires) pour assurer la protection du sol et surtout mobiliser les fonctions du sol servant directement à la production agricole. Ce sont les stratégies d'utilisation du sol qui permettent de les valoriser au mieux et celles-ci doivent par conséquent être appliquées aux différentes échelles du système sol-plantes⁷⁰. L'illustration 27 (p. 66) présente les différents niveaux du système et quelques leviers d'action permettant de tirer avantage d'une telle gestion écosystémique. Le fait de favoriser l'activité biologique et la diversité renforce les fonctions du sol et constitue une base permettant d'éviter les impacts négatifs et de remédier à d'éventuelles atteintes grâce à la capacité de régénération du sol. L'objectif de cette stratégie est que l'augmentation de la productivité soit basée sur des processus naturels remplaçant en partie les machines et les intrants externes et que l'efficacité écologique du système aboutisse à un accroissement de la production. Le cadre économique et légal doit aussi permettre cette évolution et favoriser l'innovation pour soutenir le développement de nouvelles idées allant en ce sens.

8.3 Conditions-cadres

Le PNR 68 a placé la qualité du sol au cœur de ses projets. Dans une vision stratégique pour l'agriculture, il s'agit désormais non seulement de préserver les surfaces culti-

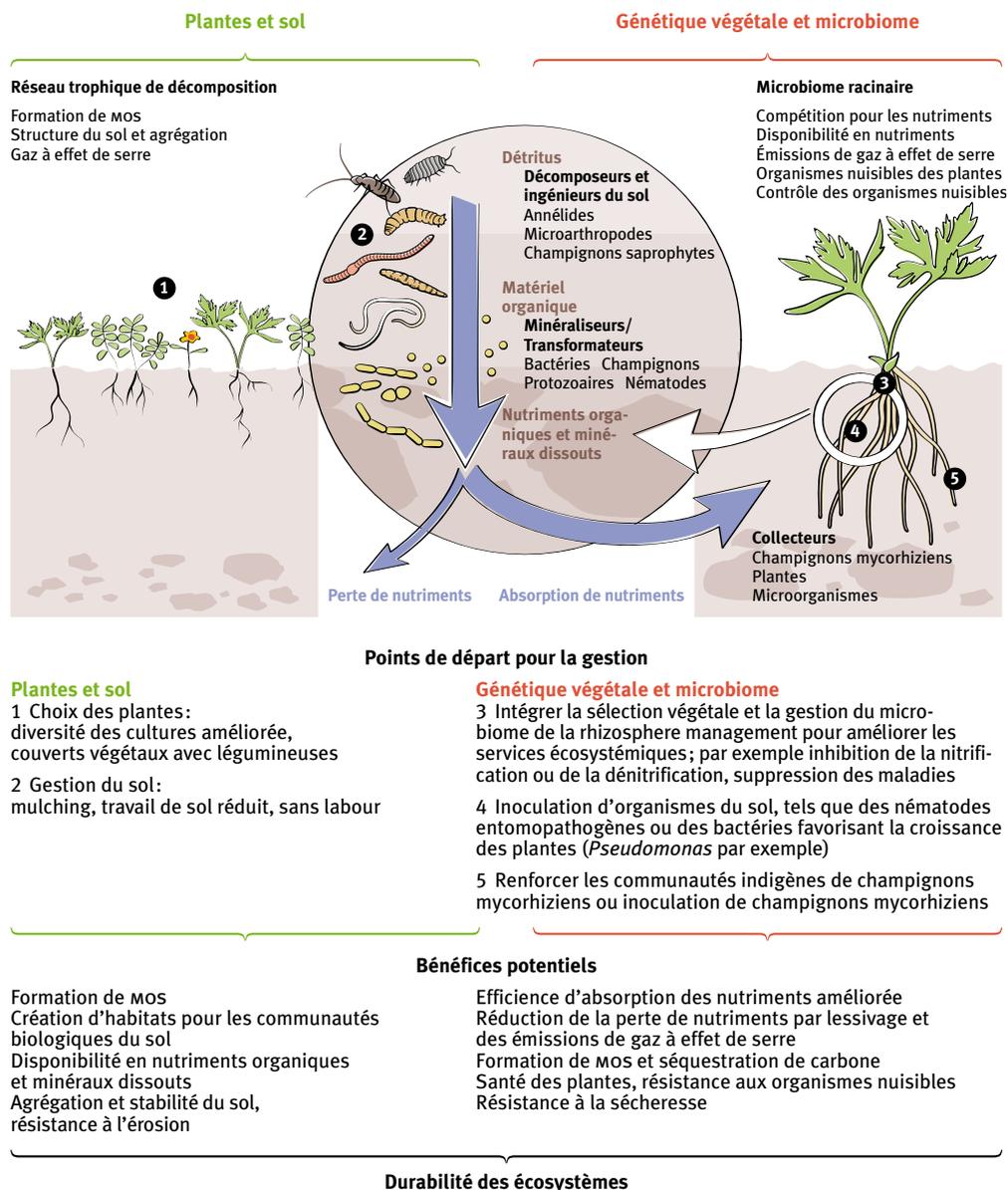
vables, mais aussi de maintenir voire de restaurer leur qualité. Dans cette optique, certaines adaptations des conditions-cadres sont requises.

Illustration 27

Résumé de différentes approches pour une gestion locale de l'écosystème du point de vue de l'écologie du sol.

Illustration : Nadja Stadelmann, adaptée de⁷⁰.

Récoltes, sol et microbiome constituent les différents niveaux de cette gestion écosystémique, les chiffres des cercles orange indiquent les leviers d'action potentiels⁷⁰.



8.3.1 Informations et mesures

La résolution des problèmes de tassement, de perte de matière organique, d'érosion et de perte de biodiversité peut être analysée à différentes échelles. La recherche de solutions s'effectue généralement au niveau de la parcelle ou de l'exploitation. Au final, il est néanmoins nécessaire que des efforts soient entrepris dans le cadre d'une filière et du producteur au consommateur. Pour l'agriculteur, la stratégie d'exploitation définit les actions (annuelles) à échelle de la parcelle, et les informations relatives à celle-ci permettent d'ajuster la stratégie d'exploitation (pluriannuelle). Afin d'exercer une action optimale, les solutions doivent désormais être formulées à l'échelle la plus pertinente et les objectifs et les mesures définis se rapporter à un même niveau fonctionnel.

L'importance des échelles – spatiale, temporelle, de planification, d'action – paraît pertinente en ce qui concerne la préservation de la fertilité du sol. La gestion des cycles des éléments nutritifs à travers les PER est opérée par le Suisse-Bilanz¹³⁹ à l'échelle de l'exploitation et par des analyses de sol à l'échelle de la parcelle. Cette confusion d'échelles ne permet de piloter ni la nutrition des plantes, ni l'état de fertilité du sol, ni les cycles des éléments fertilisants, que seul un plan de fumure à la parcelle permet de gérer dans le temps aux différentes échelles. Une cohérence est requise entre les objectifs et le choix des méthodes d'analyse : détermination de la teneur en humus et en argile par analyse de laboratoire ou par appréciation, méthode d'extraction du phosphore facilement disponible ou de réserve⁶⁴.

Aujourd'hui, d'autres indicateurs du sol (humus, activité biologique, couverture du sol) et du système de culture (indices

phytosanitaires) doivent par ailleurs être pris en compte afin de déterminer la fertilité du sol. Les projets du PNR 68 ont non seulement présenté de nouvelles connaissances et technologies qui permettent de renforcer le diagnostic, le conseil et l'engagement de mesures de façon circonstanciée, mais aussi mis en évidence les liens existants entre les différents secteurs d'activités (production, écologie, aménagement du territoire). Ces outils offrent également une gestion plus autonome des défis par l'agriculteur. Si la consultation en ligne de la météo sur un téléphone mobile fait partie des pratiques quotidiennes, il devrait en aller de même pour les principaux paramètres du sol et la gestion des risques culturels. Dans cette perspective, les documents existant pourraient continuer d'être développés sur le modèle de «Terranimo» (point 7.1.1., p. 49).

8.3.2 Système de connaissance agricole

Les défis complexes exigent une concertation et une large mise en réseau de tous les intéressés, de manière à mieux réunir les forces nécessaires et à les concentrer sur une utilisation maximale des synergies. Seul un système de connaissance agricole travaillant avec souplesse et en réseau peut répondre aux attentes parfois contradictoires des différentes parties prenantes¹⁴⁰. Il s'agit de faire en sorte que les enjeux liés au sol soient compréhensibles et que les exigences qui en résultent soient applicables pour tous. Il convient également d'instaurer un transfert d'informations continu entre les moteurs du progrès (recherche, formation et vulgarisation) et les prestataires de services (laboratoires, fournisseurs de produits), mais aussi un transfert des savoirs issus de la pratique et entre les acteurs des différentes filières de production. Une transversalité des connaissances est éga-

lement nécessaire entre les domaines de la pédologie, de la science des plantes et de la phytopathologie. À cet égard, des sociétés savantes, comme la Société suisse d'agronomie (ssa), la Société suisse de pédologie (ssp) ou la Société suisse de phytiatrie (ssp), peuvent jouer un rôle important en termes de transdisciplinarité. Et enfin, la répartition des rôles et la coordination entre les services étatiques en charge de l'agriculture, de la protection du sol et de l'aménagement du territoire est importante. Une pesée des intérêts et une démarche d'application sont nécessaires lors de l'élaboration de toute nouvelle politique afin d'assurer une minimisation des conséquences négatives, une convergence des objectifs et surtout une mise en œuvre effective par les paysans.

Dans toutes les questions concernant le sol, il apparaît essentiel que la recherche et la politique s'orientent vers le long terme. Comme en témoignent les près de trois décennies qui se sont écoulées entre le PNR 22 et le PNR 68 et le fait que de nombreux projets du PNR 68 aient recouru à des essais de longue durée et à des réseaux d'observation. Les projets ont montré que ces outils permettent de relever des défis sur le long terme (évolution) comme de réagir à la situation actuelle (état transitoire) et ouvrent une fenêtre sur les problèmes futurs. Ces observations s'avèrent indispensables, car les effets des mesures culturales sont lents et que les rotations de cultures couvrent souvent plus de cinq ans. Les dispositifs d'essai et les installations de monitoring correspondants impliquent des investissements considérables et continus. Par ailleurs, les contextes, les motivations, les objectifs et les approches méthodologiques peuvent varier fortement, si bien que les réflexions sur la pertinence de la stratégie expérimentale revêtent une importance cruciale. Cela vaut d'autant plus que la Suisse dis-

pose d'essais particulièrement anciens à l'échelle européenne¹⁴¹. Plusieurs dispositifs de longue durée ayant été abandonnés ces dernières années, un redéploiement des ressources et une consolidation sur le long terme des unités restantes ou à venir apparaissent nécessaires.

L'utilisation des connaissances de la pratique doit être encouragée pour nourrir la recherche scientifique et l'innovation, et pour poursuivre le développement d'une agriculture intégrée et écologiquement intensive⁵. Elle revêt une importance prioritaire dans la mesure où les enjeux liés au sol nécessitent une anticipation et une action ciblée. La diminution du nombre d'exploitations, mais aussi l'implication de la société dans le développement de l'agriculture (au travers d'initiatives populaires), accroît l'importance de certains acteurs de la pratique. Le chef de culture devient une personne clé dans l'adaptation des systèmes de production et la mise en œuvre de toute nouvelle politique. Certaines agricultrices et agriculteurs pionniers jouent un rôle moteur dans la diffusion de nouvelles connaissances et techniques, ainsi que dans l'accompagnement de leurs pairs. L'Association suisse pour une agriculture respectueuse du sol (SWISS NO-TILL) a montré que la pratique peut prendre en charge une stratégie d'utilisation du sol pour répondre à des défis, notamment liés à la conduite durable d'exploitations sans bétail. Seule la mise en commun de ressources permet de faire face à des défis particulièrement complexes. Il s'agit de créer et de favoriser de nouvelles formes de travail comme les communautés d'exploitation ou les cercles de travail¹⁴². Une reconnaissance officielle du rôle prépondérant de certains acteurs et organisations, un soutien financier de leurs prestations et de leur implication dans l'élaboration de politiques sont des

instruments à envisager pour renforcer leurs actions favorables à la prise en compte de la qualité du sol dans la production. Cette stratégie permettrait également de compenser le manque de moyens dont souffre le conseil technique. La rentabilité de l'agriculture est très probablement proportionnelle à la connaissance par hectare.

8.3.3 Sol et alimentation

Les surfaces de sol disponibles restent le facteur prépondérant pour assurer des volumes de production suffisants par rapport au taux d'approvisionnement actuel¹⁴. Dorénavant, la qualité des sols doit faire partie intégrante de toute considération agricole, agro-économique et territoriale. À cela s'ajoute qu'une attention croissante est portée à la qualité des produits agricoles, aussi bien par l'ensemble de la chaîne agroalimentaire que par les consommatrices et consommateurs.

Paradoxalement, certains segments de la production alimentaire n'accordent plus aucune importance au rôle du sol. Depuis 2017, la provenance des légumes frais et des baies fraîches cultivés sous serre et hors-sol n'a ainsi plus à être signalée, alors que deux tiers de la production de tomates sous serre s'effectue hors sol¹⁴³. Le développement de ces infrastructures occupe un espace grandissant de la surface agricole de plaine. Si cette évolution remet en question l'importance du sol pour la production et la qualité des biens alimentaires, elle questionne également les exigences des consommateurs quant aux liens existants entre le sol et leur alimentation.

Dans la dernière actualisation des recommandations relatives à la fertilisation des cultures, un accent particulier a été mis sur la possibilité de piloter les paramètres de qualité déterminant la transforma-

tion et la commercialisation des produits agricoles⁶⁴. Un approfondissement de ces connaissances reste prioritaire, d'une part, parce que la qualité primaire des aliments dépend du sol via ses fonctions de régulation de l'eau, des éléments nutritifs, des métaux lourds ou des contaminants et, d'autre part, parce que les interactions entre le sol et la plante dans les systèmes extensifs de production sont à l'origine de la présence dans les plantes de métabolites secondaires qui sont intéressants sur le plan de la nutrition humaine¹⁴⁴.

En 2014, la part du budget des ménages consacrée aux produits alimentaires était de 5,8%¹³⁵. Cette portion congrue contraste avec la pression sur les prix subie par les agricultrices et agriculteurs et avec les risques d'atteintes à la qualité du sol. Les attentes élevées des filières et des consommatrices et consommateurs offrent l'opportunité de préciser le rôle du sol dans la production alimentaire, les coûts en lien avec sa protection et le juste prix des aliments.

8.3.4 Leviers pour une nouvelle politique tenant compte de la qualité du sol

L'agriculture inscrit ses actions dans le cadre fixé par les outils législatifs et incitatifs et les directives des filières et labels. Ces conditions définissent des enjeux prioritaires qui ont déjà été largement mentionnés. Les leviers d'action sont multiples et les paiements directs constituent un outil puissant de la politique agricole.

Toute politique axée sur les objectifs doit pouvoir s'appuyer sur les circonstances rencontrées. Depuis l'introduction des PER, les défis ont en partie évolué et il convient aujourd'hui de réexaminer les priorités (chapitre 3, p. 17 ss. et point 8.2, p. 63) et les moyens à mettre en œuvre à la lumière des projets du PNR 68. La stratégie de résolution

Le Programme national de recherche «Alimentation saine et production alimentaire durable» (PNR 69)

Le programme national de recherche « Alimentation saine et production alimentaire durable » (PNR 69) étudie comment promouvoir une alimentation saine en Suisse et comment produire des aliments sûrs et de qualité en veillant à une utilisation des ressources aussi efficace que possible et à un impact environnemental réduit.

Dans certains projets, les travaux du PNR 68 seront poursuivis jusqu'à ce qu'ils aient intégré la production agricole dans le domaine d'étude concerné.

Le projet CHARGE EN MÉTAUX du PNR 69 a pour but d'identifier les sources de métaux lourds les plus importantes afin de réduire la pollution des sols par le cadmium, le cuivre, le zinc et l'uranium, autant de polluants qui entrent dans le sol par le biais des apports d'engrais chimiques et de fumier de ferme.

Le projet CÉRÉALES SÛRES du PNR 69 consiste à réduire le risque des charges en mycotoxines contenues dans de nouvelles variétés de blé, d'avoine et d'orge à forte teneur en composants bénéfiques pour la santé. Pour ce faire, les facteurs environnementaux et agricoles ayant une incidence sur le sol sont notamment analysés.

Le projet PORCS EN SANTÉ du PNR 69 a pour objectif de diminuer le recours aux antibiotiques dans toute la chaîne de production de viande de porc et de réduire les effets de la production de viande sur l'environnement. Il livre des informations essentielles sur l'utilisation des excréments d'animaux dans l'agriculture et sur l'importance des gènes de résistances aux antibiotiques présents dans les sols de Suisse (Projet RÉSISTANCE AUX ANTIBIOTIQUES du PNR 68).

Le projet PERTES DE NOURRITURE du PNR 69 analyse les pertes de pommes de terre tout au long de la chaîne de transformation. D'une part, les dommages causés par les taupins – un ravageur présent dans le sol – augmentent la part de pommes de terre ne pouvant être vendues pour la consommation humaine. D'autre part, les consommatrices et les consommateurs s'opposent au recours aux insecticides. De nouvelles solutions biologiques de protection des cultures élaborées dans le cadre du projet BACTÉRIES DU SOL du PNR 68 pourraient contribuer de manière déterminante à la protection des tubercules de pommes de terre.

de problèmes prescrite par la politique doit notamment permettre aux agriculteurs d'orienter leurs actions de manière à prendre en compte la complexité du système et les spécificités de l'utilisation du sol. Il s'agit également de leur garantir une flexibilité dans l'adoption de nouvelles connaissances ou techniques, ou du moins de leur permettre d'écarter rapidement les obstacles techniques, réglementaires et financiers liés à l'innovation. Il convient de s'assurer que tout nouvel objectif proposé n'entraîne pas de conséquences négatives. Tout système complexe demande une analyse circonstanciée (audit). En résumé :

les mesures proposées ne peuvent être ni simples ni directives.

Dans le domaine de la protection du sol, un changement de l'approche politique mériterait d'être analysé dans la mesure où il apparaît que, face à la complexité des enjeux en lien avec le sol, un engagement de mesures prescrites à appliquer reste délicat et peu efficace au regard d'incitations financières s'appuyant sur l'atteinte de résultats¹⁴⁵. Une démarche innovante, qui mesure et rémunère la qualité du sol sur la base des relations entre mos, argile et fonctions physiques du sol, apparaît pro-

metteuse¹⁴⁶. Ces indicateurs ne couvrent pas l'ensemble des fonctions, mais constituent une source d'inspiration quant à la manière dont les politiques d'incitation et de sanction et bien entendu l'éducation, la formation et le conseil pourraient être complétés. Un système de récompense, c'est-à-dire une rémunération au résultat, implique néanmoins de disposer d'indicateurs fiables qui permettent de mettre objectivement en évidence la préservation ou l'amélioration attendue, sans nuire à la motivation des productrices et producteurs.

8.4 Une production alimentaire de qualité pour la valorisation de la ressource sol

L'agriculture suisse est largement inspirée de la production intégrée (PI). Ce système est parvenu à intégrer la protection des végétaux dont il est issu et les principes d'une utilisation durable du sol à la production alimentaire. Afin de contribuer à la résolution des problèmes actuels et d'envisager de nouveaux défis, les discussions autour du PNR 68 ont régulièrement fait appel à de nouveaux termes et concepts. Ceux-ci ont servi à consolider l'intérêt manifesté pour une agriculture qui respecte le contexte environnemental et valorise la ressource sol, mais aussi à souligner la nécessité de faire évoluer les principes de la PI.

Le premier concept fait appel à la nécessité de respecter «le potentiel de production de la parcelle». Il souligne l'intérêt des cartes d'aptitude culturale et apparaît dans les exigences des PER au niveau des apports autorisés en phosphore et en azote conjointement aux besoins des plantes (OPD; RS 910.13). Notons qu'à l'heure actuelle, aucune information de ce type n'est disponible à une échelle parcellaire.

Le deuxième concept évoque «une agriculture appropriée au site». Il apparaît dans différents contextes en lien avec l'utilisation agricole du sol et les risques de pollution des eaux¹⁴⁷ et comme élément de la stratégie climatique¹⁴⁸ et sert entre autres de justification à la cartographie des sols ou de vision dans de nombreux plaidoyers des filières et des ONG relatifs au développement de l'agriculture suisse. Ce terme trouve son origine dans le développement de petites exploitations tropicales, dont le but est d'atteindre une productivité élevée et durable, appropriée au site et sous des conditions de faibles intrants externes et, par là même, de conserver ou de restaurer un écosystème équilibré¹⁴⁹.

Le troisième concept est celui de l'«agriculture écologiquement intensive». Il reprend le contexte du PNR 68 qui s'est attaché au principe de la qualité du sol et à la promotion des fonctionnalités du sol. La FAO la décrit comme un processus à forte intensité de connaissances qui requiert une gestion optimale des fonctions écologiques et de la biodiversité pour améliorer la performance des systèmes agricoles, l'efficacité et la subsistance des agriculteurs⁴. En Suisse, ce concept demeure flou et il a pour l'instant surtout été retenu de sa considération qu'il convient d'accroître la valeur de la production agricole malgré la raréfaction des réserves foncières tout en minimisant les impacts environnementaux négatifs¹⁵⁰. Pourtant, les projets du PNR 68 ont clairement montré les opportunités liées à ce concept, qu'il s'agira d'intégrer pour pouvoir en valoriser les nouvelles connaissances et faire progresser la production agricole. Toutes ces mesures doivent permettre de limiter les intrants et leurs externalités négatives, mais nécessitent une innovation dans la technique et la pensée ainsi qu'un cadre général porteur.

Annexes

Annexe 1

Inventaire des essais de longue durée établis en Suisse

Nom Lieu Responsable	Date de mise en place	Nombre de procédés	Culture	Procédé	
Travail du sol					
P29C Changins (VD) Agroscope	1969	4	Grandes cultures	4 procédés travail du sol : 1 Labour (20–25 cm) 2 Chisel (20–25 cm), semis direct depuis 2007 3 Cultivateur (10–15 cm) 4 Rototiller (5–8 cm)	31
Oberacker Zollikofen (BE) Inforama Rütti	1994	12	Grandes cultures	2 procédés travail du sol : L Labour CD Semis direct 6 soles contiguës : Maïs d'ensilage Féverole Pois protéagineux Orge d'automne Blé d'automne Betterave sucrière	47,51
Fertilisation					
ZOFE Reckenholz (ZH) Agroscope	1949	12	Grandes cultures	12 procédés type et dose de fertilisation : Nulle aucune fertilisation 4 procédés fertilisation minérale : NoP2K2 : aucune fertilisation N; P et K selon normes N1P1K1 : 1/2 normes N, P et K N1P2K2 : 1/2 norme de N; P et K selon normes N2P2K2Mg : N, P, K et Mg selon normes 3 procédés fertilisation organique : Fumier Boues d'épuration Compost 4 procédés fertilisation organique et minérale : Fumier, P et K selon normes Boues d'épuration, P et K selon normes Compost, P et K selon normes Tourbe, P et K selon normes	34

Annexe 1

Eggenalp (BE) KALI AG INFORAMA Berner Oberland	1956	8	Prairie	8 procédés fertilisation minérale et organique : 1 NPK 5 Aucune fertilisation 2 Lisier 6 NP 3 N 7 PK 4 P + lisier 8 PK + lisier	
P11 Changins (VD) Agroscope	1963	24	Grandes cultures	3 procédés fertilisation organique : FYM Fumier RES Résidus de culture MIN Aucune fertilisation organique 2 sous-procédés dose de N minéral : 1 sous-optimale 2 optimale	151
P24A Changins (VD) Agroscope	1976	24	Grandes cultures	6 procédés fertilisation organique : 1 aucune fertilisation organique 2 engrais verts tous les 2 ans 3 pailles et résidus non exportés 4 35 t de fumier tous les 3 ans 5 70 t de fumier tous les 3 ans 6 60 m ³ de lisier tous les 3 ans 4 sous-procédés dose de N minéral : A Nulle B Norme corrigée – 40 C Norme D Norme corrigée + 40	32
Rümlang (ZH) Agroscope	1989	6	Grandes cultures	6 procédés dose de P, K, Mg et Ca : 1 Nulle 2 1/3 normes P et K, 1/2 norme Mg et 10 t CaO/an 3 2/3 normes P et K, Mg selon norme et 20 t CaO/an 4 P et K selon normes, 3/2 norme Mg et 40 t CaO/an 5 4/3 normes P et K, Mg nulle et 20 t CaO/2 ans 6 5/3 normes P et K, Mg nulle et 40 t CaO/2 ans	152
Reckenholz (ZH) Agroscope	1989	6	Grandes cultures	6 procédés dose de P, K, Mg et Ca : 1 Nulle 2 1/3 normes P et K, 1/2 norme Mg et 10 t CaO/an 3 2/3 normes P et K, Mg selon norme et 20 t CaO/an 4 P et K selon normes, 3/2 norme Mg et 40 t CaO/an	152

Annexe 1

				<p>5 4/3 normes P et K, Mg nulle et 20 t CaO/2 ans</p> <p>6 5/3 normes P et K, Mg nulle et 40 t CaO/2 ans</p>	
<p>Ellighausen (TG) Agroscope</p>	1989	6	Grandes cultures	<p>6 procédés dose de P, K, Mg et Ca :</p> <p>1 Nulle</p> <p>2 1/3 normes P et K, 1/2 norme Mg et 10 t CaO/an</p> <p>3 2/3 normes P et K, Mg selon norme et 20 t CaO/an</p> <p>4 P et K selon normes, 3/2 norme Mg et 40 t CaO/an</p> <p>5 4/3 normes P et K, Mg nulle et 20 t CaO/2 an</p> <p>6 5/3 normes P et K, Mg nulle et 40 t CaO/2 ans</p>	152
<p>Oensingen (AG) Agroscope</p>	1989	6	Grandes cultures	<p>6 procédés dose de P, K, Mg et Ca :</p> <p>1 Nulle</p> <p>2 1/3 normes P et K, 1/2 norme Mg et 10 t CaO/an</p> <p>3 2/3 normes P et K, Mg selon norme et 20 t CaO/an</p> <p>4 P et K selon normes, 3/2 norme Mg et 40 t CaO/an</p> <p>5 4/3 normes P et K, Mg nulle et 20 t CaO/2 ans</p> <p>6 5/3 normes P et K, Mg nulle et 40 t CaO/2 ans</p>	152
<p>Cadenazzo (TI) Agroscope</p>	1989	6	Grandes cultures	<p>6 procédés dose de P, K, Mg et Ca :</p> <p>1 Nulle</p> <p>2 1/3 normes P et K, 1/2 norme Mg et 10 t CaO/an</p> <p>3 2/3 normes P et K, Mg selon norme et 20 t CaO/an</p> <p>4 P et K selon normes, 3/2 norme Mg et 40 t CaO/an</p> <p>5 4/3 normes P et K, Mg nulle et 20 t CaO/2 ans</p> <p>6 5/3 normes P et K, Mg nulle et 40 t CaO/2 ans</p>	152
<p>Vaz Muldain (GR) Agroscope</p>	1989	4	Prairie	<p>4 procédés dose de P et K :</p> <p>1 Nulle</p> <p>2 1/2 normes</p> <p>3 selon normes</p> <p>4 3/2 normes</p>	152

Fertilisation, travail du sol					
Frick (BS) Institut de recherche de l'agriculture biologique (FiBL)	2002	8	Grandes cultures	2 procédés apport de préparation biodynamiques : Avec apport Sans apport 2 sous-procédés travail du sol : Labour Chisel 2 sous procédés fertilisation : Compost Lisier	153
Fauche et fertilisation					
Bremgarten (SO) Association pour le développement de la culture fourragère (ADCF)	1982	8	Prairie	2 procédés fréquence de coupe : 2 coupes/an 3 coupes/an 4 sous-procédés fertilisation : Aucune P et K selon normes N, P et K selon normes 2/1 norme N, P et K selon normes	154
La Rosière (VS) KALI AG Office de l'écono- mie animale (OEA), canton du Valais	1984	10	Prairie	2 procédés fréquence de coupe : 2 coupes/an 3 coupes/an 5 sous-procédés fertilisation : Aucune N selon norme N et P selon normes P et K selon normes N, P et K selon normes	155
Système de production					
DOC Therwil (BS) Institut de recherche de l'agriculture biologique (FiBL) Agroscope	1978	8	Grandes cultures	Fertilisation 6 procédés type de fertilisation D Biodynamique O Organo-biologique C Conventionnelle M Minérale N Aucune 2 sous-procédés dose de N (procédés D, O et C) : 1 0,7 UGBF/ha 2 1,4 UGBF/ha	156

Annexe 1

				<p>Gestion des adventices : Mécanique (procédés D, O et N) Mécanique et chimique (procédés C et M)</p> <p>Gestion des maladies : Mesures préventives (procédés D, O et N) Protection chimique selon seuils (procédés C et M)</p> <p>Gestion des ravageurs : Extraits de plantes, antagonistes (procédés D, O et N) Protection chimique selon seuils (procédés C et M)</p> <p>Autres spécificités : Préparations biodynamiques (D et N) Raccourcisseurs de tige (procédés C et M)</p>	
Système de production, travail du sol, couverts végétaux					
<p>FAST Reckenholz (ZH) Agroscope</p>	2009	16	Grandes cultures	<p>4 procédés système de production : C-IT Conventionnel, labour C-NL Conventionnel, semis direct O-IT Biologique, labour O-NL Biologique, semis direct</p> <p>4 sous-procédés couverts végétaux C Contrôle sans couvert L Légumineuse NL Non légumineuse M Mélange</p>	157
Rotation, travail du sol					
<p>Pzo Changins (VD) Agroscope</p>	1967	4	Grandes cultures	<p>2 procédés : M Monoculture R Rotation</p> <p>2 sous-procédés travail du sol : L Labour TCS Travail simplifié</p>	158, 159

Le Programme national de recherche « Utilisation durable de la ressource sol » (PNR 68)

Les programmes nationaux de recherche (PNR) doivent apporter une contribution à la résolution de problèmes actuels d'importance nationale. Le Fonds national suisse (FNS) veille à leur exécution sur mandat du Conseil fédéral.

Le Programme national de recherche « Utilisation durable de la ressource sol » (PNR 68) établit les bases pour une exploitation durable des sols en Suisse. À cette fin, il convient de prendre en compte les services écologiques et économiques que fournit le sol. Le concept des services écosystémiques permet de mettre en valeur les fonctions des sols et leur contribution au bien-être humain.

Le PNR 68 poursuit trois objectifs principaux: i) approfondissement de la connaissance systémique du sol; ii) mise au point d'instruments pour évaluer le sol en tant que ressource; iii) élaboration de stratégies favorisant un usage durable des sols.

Sélection et durée des projets de recherche

Le PNR 68 disposait d'une enveloppe de 13 millions de franc et les recherches réparties en deux phases ont duré de 2013 à 2017. Les projets ont été sélectionnés parmi un grand nombre de propositions selon des critères de qualité scientifique et de pertinence pour le PNR 68 dans le contexte suisse. Après une procédure de sélection en deux étapes ayant fait appel à une expertise internationale, le FNS a retenu 19 projets pour la première phase de recherche (2013–2015). Deux projets supplémentaires ont été encouragés dans le cadre d'une seconde mise au concours. Lors de la seconde phase de recherche (2016–2017), le FNS a lancé quatre projets complémentaires. Au total, ce sont donc 25 projets de recherche qui ont été menés à bien dans le cadre du PNR 68. Par ailleurs, 4 millions de francs supplémentaires ont été mis à disposition du PNR 68 et du PNR 69 « Alimentation saine et production alimentaire durable » afin d'encourager des projets s'inscrivant dans les mises aux concours des initiatives européennes de programmation conjointe (European Joint Programming Initiatives – JPI) « Agriculture, sécurité alimentaire et changement climatique » (FACCE-JPI) et « Une alimentation saine pour une vie saine » (HDHL-JPI). Ces fonds ont permis d'intégrer au PNR 68 douze projets supplémentaires d'un rayonnement international (www.nfp68.ch/fr/ → Projets).

Faute de propositions d'une qualité suffisamment élevée, le PNR 68 ne comprend aucun projet de recherche sur les thèmes de la propriété du sol, des conditions-cadres juridiques et de la valorisation économique et sociale des services écosystémiques fournis par le sol.

Un dialogue constant

Au regard des buts poursuivis par le PNR 68, l'établissement d'un dialogue ouvert et transparent au sein du programme ainsi qu'avec les représentantes et représentants des parties prenantes revêtait une grande importance. À cette fin, les scientifiques se sont rencontrés à l'occasion de trois conférences internes. Des chercheuses et chercheurs ainsi que des membres du comité de direction ont en outre régulièrement participé à des manifestations

réunissant des partenaires de la pratique et à des symposiums publics. Le principal objectif était ce faisant de promouvoir l'échange entre les scientifiques et les acteurs de la pratique afin d'aborder les thématiques centrales du PNR 68 : « environnement », « agriculture » et « aménagement du territoire ».

Suivi largement étayé des synthèses thématiques

En préalable à l'élaboration des synthèses thématiques, le PNR 68 a organisé début 2016 trois ateliers destinés aux parties prenantes qui ont regroupé des spécialistes issus des administrations fédérales et cantonales, des associations économiques et environnementales et du secteur privé afin de discuter des résultats provisoires des projets. Ces ateliers ont fourni d'importantes impulsions pour la conception et la structuration des synthèses thématiques du PNR 68 dont l'objectif est de replacer les résultats scientifiques dans un contexte élargi adapté aux groupes-cibles et de développer des instruments, des concepts et des stratégies spécifiques destinés à la pratique comme à l'administration. Elles apportent ce faisant une contribution décisive à l'atteinte des buts du programme.

En s'appuyant sur les impulsions fournies par ces ateliers et en concertation avec les scientifiques, le comité de direction du PNR 68 a décidé à l'automne 2016 de lancer cinq synthèses thématiques.

Les responsables des synthèses thématiques ont respectivement présenté leurs concepts et leurs ébauches aux membres des groupes de suivi à l'occasion de deux ou trois ateliers participatifs. Ces rencontres visaient à soumettre les concepts élaborés à un examen critique et à combler d'éventuelles lacunes. Il incombait aux auteures et auteurs des synthèses thématiques d'évaluer ces suggestions et de décider quels étaient les aspects pouvant être pris en compte dans les travaux à venir. Enfin, les synthèses thématiques ont été validées par le comité de direction du PNR 68.

Les projets de recherche du PNR 68

* Projets ayant contribué à la présente synthèse thématique.

Phase de recherche 1

- A ACCAPAREMENT DES TERRES: L'accaparement des terres (« land grabbing ») avec une participation suisse (Rist S., Cottier T., Mann S.)
- B * BACTÉRIES DU SOL: Des sols sains grâce aux bactéries du sol (Maurhofer Bringolf M., Keel C.)
- C CARTES DES SOLS: Cartographie des propriétés du sol pour une évaluation des fonctions du sol à l'échelle régionale (Papritz A.J., Baltensweiler A., Keller A., Presler J., Schaepman M.E., Walthert L., Zimmermann S.)
- COMPENSATION DES PLUS-VALUES ET MOINS-VALUES FONCIÈRES: Gestion durable des sols par la compensation des plus-values et moins-values économiques et écologiques (Nahrath S., Gmünder M., Grêt-Regamey A., Joerin F., Pflieger G.)
- COMPENSATION MULTICRITÈRE: Prendre en compte la qualité des sols dans les mécanismes de compensation appliqués en aménagement du territoire (Joerin F., Boivin P., Ruegg J.)
- * COUVERTS VÉGÉTAUX: Préserver l'environnement par les couverts végétaux et l'agriculture de conservation du sol (Streit B., Charles R., Walter A.)
- D DYNAMIQUE DU CARBONE: Influence du changement climatique et de l'utilisation des sols sur le carbone contenu dans les sols suisses (Abiven S., Niklaus P.A.)
- E * ENTRÉES DE CARBONE: Entrées de carbone dans le sol par les cultures (Mayer J., Abiven S., Hund A., Leifeld J.)
- G GAZ HILARANT: Influences de l'exploitation du sol sur les micro-organismes du sol qui émettent et décomposent le gaz hilarant (Gattinger A., Mäder P., Thonar C.)
- I INDICATEURS DE VULNÉRABILITÉ: Indicateurs de la vulnérabilité du carbone contenu dans les sols (Eglington T.)
- INSTRUMENTS POLITIQUES: Instruments politiques pour une utilisation durable des sols (Walter F., Grêt-Regamey A., Sager F., Vatter A.)
- M MITAGE: Contrôler le mitage du territoire – Réduire l'utilisation du sol (Kienast F., Hersperger A.M., Schulz T., Seidl I.)
- * MYCORHIZES: Restauration des fonctions du sol à l'aide de mycorhizes arbusculaires (Van der Heijden M., Oehl F., Wagg C.)

Annexe 1

- N * NÉMATODES: Utilisation des filaires dans la lutte contre les insectes nuisibles du sol (Turlings T., Mascher F.)
- P PLATE-FORME DE DÉCISION: Plate-forme de décision pour une utilisation durable du sol (Grêt-Regamey A., Diggelmann H., Huber R., Keller A., Kübler D., Siegrist D., Zimmermann S.)
- R * RÉSISTANCE AUX ANTIBIOTIQUES: Le rôle de l'utilisation des sols dans les résistances aux antibiotiques (Duffy B., Smits T.)
- S SOLS FORESTIERS: Stocks de carbone dans les sols forestiers suisses (Hagedorn F., Gimmi U., Thürig E., Walthert L.)
- SOLS MARÉCAGEUX: Gestion durable des sols organiques (Leifeld J., Engel S., Müller M.)
- STABILITÉ DES SOLS: Stabilité des sols et risques naturels: de la connaissance à l'action (Graf F., Bebi P., Frei M., Rickli C., Rixen C., Springman S.M.)
- SYSTÈME D'ALERTE PRÉCOCE: Outil régional de monitoring des sols pour des cycles durables des substances dans les sols agricoles (Keller A., Mann S., Schaepman M.E., Schulin R.)
- T * TASSEMENT DES SOLS: Restauration naturelle de la structure des sols tassés (Keller T., Or D., Schymanski S., Walter A., Weisskopf P.)

Phase de recherche 2

- D DÉCISIONS QUANT À L'EXPLOITATION DES SOLS: Meilleure gestion des achats transnationaux de terrains (Rist S., Mann S., Messerli P.)
- L * LUTTE BIOLOGIQUE CONTRE LES PARASITES: Des nématodes et des bactéries contre les organismes nuisibles du sol (Turlings T., Keel C., Maurhofer Bringolf M.)
- M MODÈLE D'EXPLOITATION DU SOL: Modèle d'exploitation du sol sur le Plateau suisse (Keller A., Schaepman M.E., Schulin R.)
- S * SYSTÈMES DE CULTURE AMÉLIORANT LE SOL: Pôles d'innovation pour des systèmes de culture améliorant le sol (Charles R., Keller T., Mayer J., Six J., Van der Heijden M.)

FACCE-JPI

Les équipes de projet des initiatives européennes de programmation conjointe «Agriculture, sécurité alimentaire et changement climatique» (FACCE-JPI) et «Une alimentation saine pour une vie saine» (HDHL-JPI) sont composées de scientifiques issus d'au moins trois pays partenaires. Par souci de simplification, seuls les chefs de projet sis en Suisse sont mentionnés.

- A AFGROLAND: Dynamique du système alimentaire en Afrique (Messerli P.)
- B BASIL: Biodiversité dans les systèmes agricoles (Olschewski R., Frey B., Gessler A., Hagedorn F., Seidl I.)
- C CLIMATE-CAFÉ: Adaptabilité des systèmes agricoles au changement climatique en Europe (Six J., Charles R.)

COMET-GLOBAL: Comptabilité des gaz à effet de serre (Six J.)
- D DEVIL: Sécurité alimentaire sur des territoires limités (Buchmann N.)
- E ECO-SERVE: Pérennité des services écosystémiques multiples dans les systèmes agricoles (Mäder P., Gattinger A.)
- G GREEN RICE: Produire du riz en ménageant les ressources (Six J.)
- M MAGNET: Gaz à effet de serre issus de l'agriculture (Leifeld J.)

MODELS4PASTURES: Gaz hilarant d'origine agricole (Merbold L., Buchmann N.)
- P PROMESSING: Maintien des services écosystémiques dans les vignobles d'Europe centrale (Bacher S.)
- S STACCATO: Services écosystémiques dans les paysages agricoles (Zimmermann N., Kienast F.)
- T TALE: Pour des paysages agricoles multifonctionnels en Europe (Holzkämper A., Charles R.)

Synthèses thématiques

Synthèse thématique ST1: Sol et production alimentaire (Charles R., Wendling M., Burgos S.)

Synthèse thématique ST2: Sol et environnement (Hagedorn F., Krause H.-M., Studer M., Schellenberger A., Gattinger A.)

Annexe 1

Synthèse thématique ST₃: Un agenda du sol pour l'aménagement du territoire
(Grêt-Regamey A., Kool S., Bühlmann L., Kissling S.)

Synthèse thématique ST₄: Plateforme d'information des sols suisse (PIS-CH) (Keller A., Franzen J., Knüsel P., Papritz A.J., Zürrer M.)

Synthèse thématique ST₅: Vers une politique durable des sols (Walter F., Hänni E.)

Études focalisées

- B BILAN GAZ À EFFET DE SERRE: Émissions de gaz à effet de serre des sols agricoles en Suisse (Gattinger A., Bretscher D., Schellenberger A.)
- I INDICATEURS DU SOL: Indicateurs du sol pour un aménagement durable du territoire (Grêt-Regamey A., Bühlmann L.)
- M MARCHÉ DU SOL AGRICOLE: Le marché du sol agricole pris en étau dans les régions en expansion urbaine (Giuliani G., Flury C.)
- S SYSTÈMES D'INFORMATION DU SOL: Systèmes d'information du sol et cartographie (digitale) du sol (Papritz A.J., Burgos S., Carizzoni M., Keller A., Wegmann F.)

Annexe 2

Liste des illustrations

Illustration 1	Principaux facteurs ayant contribué à l'évolution des activités agricoles des régions et des techniques de conduite des cultures	13
Illustration 2	Les quatre atteintes majeures du sol considérées dans cette étude	17
Illustration 3	Porosité du sol observée pour un sol non compacté et pour un sol compacté	19
Illustration 4	Représentation schématique du système racinaire du triticale et du soja en conditions non compactées et compactées	21
Illustration 5	Croissance des racines vers un macropore créé artificiellement	22
Illustration 6	Les myriapodes jouent un rôle important dans la formation de l'humus	26
Illustration 7	Évolution de la teneur en mos dans l'essai P29C à Changins (VD) de 1970 à 2016 selon le travail du sol et le type de sol	29
Illustration 8	Distribution de la teneur en mos dans l'essai P29C à Changins (VD) en 2015 selon la profondeur, le type de travail du sol et le type de sol	29
Illustration 9	Dynamique du taux de couverture du sol en fonction du temps depuis le semis, pour une sélection de six espèces	30
Illustration 10	Radis chinois après trois mois de croissance	31
Illustration 11	Biomasse d'adventices en fonction de la biomasse des couverts végétaux	32
Illustration 12	Champignon mycorhizien arbusculaire colonisant une racine de trèfle	35
Illustration 13	Azote absorbé en fonction de la biomasse des légumineuses	39
Illustration 14	Nématodes entomopathogènes	41
Illustration 15	Cycle de vie des nématodes entomopathogènes	42
Illustration 16	Influence des couverts végétaux (pois et moutarde) sur l'abondance des nématodes entomopathogènes selon la période et l'espèce augmentée	44
Illustration 17	Racines de blé colonisées par des <i>Pseudomonas protegens</i> (souche CHAo)	45
Illustration 18	Bille d'alginate contenant des nématodes entomopathogènes et des bactéries <i>Pseudomonas</i> .	48
Illustration 19	Pression au sol et résistance du sol en fonction des contraintes et des propriétés du sol	50
Illustration 20	Diagramme de décision de «Terranimo»®	50
Illustration 21	Logiciel de calcul du bilan humique développé par l'Agroscope	53
Illustration 22	Test avec des sous-vêtements pour l'évaluation visuelle et comparée de l'activité biologique du sol	55
Illustration 23	Test du Bait-Lamina	56
Illustration 24	Indice des prix à la production de produits agricoles de 1994 à 2016	62
Illustration 25	Surface de culture de plantes sarclées en 2016 par district	62
Illustration 26	Unité gros bétail par hectare en 2016 par district	63
Illustration 27	Résumé de différentes approches pour une gestion locale de l'écosystème du point de vue de l'écologie du sol	66

Annexe 2

Liste des tableaux

Tableau 1	Évolution de l'agriculture de 1990 à 2015	14
Tableau 2	Biomasse des vers de terre dans des sols compactés et non compactés deux mois après tassement.	20
Tableau 3	Évolution de la mos lors d'essais de longue durée en Suisse	24
Tableau 4	Effets des pratiques agricoles sur l'abondance des nématodes entomopathogènes et sur l'abondance et l'activité des <i>Pseudomonas</i>	43
Tableau 5	Interprétation du bilan humique tel que calculé par le logiciel Bilan humique développé par l'Agroscope	54

Glossaire

A **Abondance**

Nombre d'individus d'une espèce donnée en termes absolus, ou au sens de densité de population dans une unité d'espace.

Agriculture extensive

Voir Agriculture intensive (†)

Agriculture intensive

Expression fréquemment employée afin de désigner une forme d'exploitation agricole qui – contrairement à l'agriculture extensive – se distingue par le fait qu'elle vise à atteindre des rendements par unité de surface/animal aussi élevés que possibles à travers une technique agraire exigeante et hautement développée, et en particulier des apports d'intrants élevés. Il n'existe pas de limites définies caractérisant le passage d'une agriculture extensive à une agriculture intensive, si bien que l'emploi de ces notions diverge. Ce qui est considéré en Suisse comme une agriculture intensive correspond à l'échelle européenne à un faible niveau d'exploitation.

[adapté de Dictionnaire de la géographie, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2001]

Antibiose

Interaction entre organismes exerçant une influence sur certains d'entre eux. Ce mécanisme peut être induit par des substances émises dans l'environnement (antibiotiques).

B **Biocontrôle**

Système de protection des plantes basé sur la simulation des mécanismes naturels (du sol) ou l'apport d'organismes vivants ou de substances naturelles¹⁶⁴.

E **Érosion**

Exportation de matière du sol par la pluie et le vent.

Expression

Terme désignant le processus par lequel l'information génétique s'exprime et déclenche des processus biochimiques.

F **Fertilité du sol**

Terme désignant tous les processus et propriétés minéralogiques, physiques, chimiques et biologiques du sol ayant une influence sur la croissance des végétaux et la production de biomasse¹⁹.

Le sol est considéré comme fertile :

- a. s'il présente, pour sa station, une biocénose biologiquement active, une structure, une succession et une épaisseur typiques et qu'il dispose d'une capacité de décomposition intacte;*
- b. s'il permet aux plantes et aux associations végétales naturelles ou cultivées de croître et de se développer normalement et ne nuit pas à leurs propriétés;*

c. si les fourrages et les denrées végétales qu'il fournit sont de bonne qualité et ne menacent pas la santé de l'homme et des animaux;

d. si son ingestion ou inhalation ne menace pas la santé de l'homme et des animaux.

Fixation de l'azote

Processus biochimique qui permet à des organismes du sol de produire des composés azotés disponibles pour les plantes à partir d'azote élémentaire (N₂). La symbiose entre les bactéries du sol et les légumineuses qui en découle constitue l'une des principales fonctions du sol.

Fonctions du sol

Services résultant des propriétés du sol et des processus à l'oeuvre dans le sol qui contribuent à l'équilibre naturel et revêtent une importance centrale pour la société humaine. Contrairement aux services écosystémiques (†), les fonctions remplies par un sol n'ont aucune incidence directe sur la valeur du sol pour le bien-être humain. A cet égard, l'on distingue selon la loi fédérale allemande sur la protection du sol¹²⁵ :

Fonctions naturelles

– Base vitale et espace vital pour les êtres humains, les animaux, les plantes et les microorganismes vivant dans le sol

– Élément de l'équilibre naturel, en particulier dans les cycles de l'eau et de la matière

– Milieu de dégradation, d'ajustement et de développement des substances grâce à ses propriétés tampon et capacités de filtration de transformation, en particulier dans l'optique de la protection des eaux souterraines

Fonctions d'archivage

– Conservation de l'histoire naturelle et culturelle

Fonctions d'utilisation

– Gisements de ressources naturelles

– Surface d'urbanisation et de détente

– Espace pour l'exploitation agricole et forestière

– Espace pour d'autres utilisations économiques et publiques, notamment le transport, l'approvisionnement, l'élimination

P Prestations écologiques requises

Exigences à satisfaire pour que des contributions agricoles soient versées conformément à l'ordonnance sur les paiements directs (art. 11 ss OPD; RS 910.13).

Production intégrée

Système d'exploitation agricole visant à produire des aliments et des matières premières de haute qualité qui utilise des moyens et des mécanismes naturels afin d'éviter l'emploi d'intrants nocifs pour l'environnement et d'assurer une agriculture durable.¹⁶⁴

Q Qualité des sols

Capacité des sols à remplir leurs fonctions dans les écosystèmes^{12,164}.

R Régénération du sol

Reconstitution de ses fonctions suite à des modifications dues au climat ou aux interventions culturales.

S Services écosystémiques (SES)

Services fournis aux Hommes par les écosystèmes ou aspects des écosystèmes utilisés – activement ou passivement – pour le bien-être humain. Le concept de services écosystémiques contribue à la reconnaissance de la valeur du sol pour le bien-être humain et à la prise en compte des sols dans les processus de décision¹³. À l'inverse, les fonctions du sol sont des fonctions que le sol remplit sans qu'il existe de relation directe entre la valeur du sol et le bien-être humain.

Système de culture

Ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles cultivées de manière identique. Chaque système se définit par la nature des cultures et leur ordre de succession, les itinéraires techniques appliqués à ces différentes cultures, ce qui inclut le choix des variétés¹⁶⁰.

Système de production

Ensemble des systèmes de culture mis à en œuvre à l'échelle d'une exploitation. Il fait appel en particulier aux stratégies de gestion de cette complexité qui dépend des conditions locales de production, mais aussi du contexte économique, social et environnemental: production intégrée, production biologique.

U Utilisation des terres

Ensemble d'activités effectuées afin de produire un ou plusieurs biens ou services qui entretiennent un lien direct avec le sol, qui utilisent ses ressources ou ont des conséquences pour le sol. Une forme particulière d'utilisation ou d'exploitation des terres peut s'effectuer sur une ou plusieurs surfaces, de la même manière qu'une surface peut être affectée à plusieurs utilisations.

Le terme «utilisation des terres» ne doit pas être confondu avec le terme «utilisation (†)/couverture du sol» au sens de la Statistique suisse de la superficie.

[adapté de: wocat, Glossary <https://www.wocat.net/en/sitefunctions/glossary.html>, accès: 15.3.2017]

Utilisation du sol

Selon la Statistique suisse de la superficie, utilisation socioéconomique d'une surface et par voie de conséquence utilisation des terres (†).

[www.bfs.ch → Statistique suisse de la superficie → Nomenclature]

Annexe 2

Acronymes

LAgr	Loi sur l'agriculture
OFAG	Office fédéral de l'agriculture
OFEV	Office fédéral de l'environnement
OFS	Office fédéral de la statistique
OPD	Ordonnance sur les paiements directs
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
PER	Prestations écologiques requises
PPS	Produits phytosanitaires
OSOL	Ordonnance sur les atteintes portées aux sols
VDLUFA	Vereinigung der deutschen landwirtschaftlichen Untersuchungs- und Forschungsanstalten

Noms des espèces animales et végétales

Avoine rude	<i>Avena strigosa</i>
Féverole	<i>Vicia faba</i>
Moutarde blanche	<i>Sinapis alba</i>
Moutarde brune	<i>Brassica juncea</i>
Niger	<i>Guizotia abyssinica</i>
Oscinie, mouche de frit	<i>Oscinella frit</i>
Phacélie	<i>Phacelia tanacetifolia</i>
Pois fourrager	<i>Pisum sativum</i>
Radis chinois	<i>Raphanus sativus longipinnatus</i>
Sarrasin	<i>Fagopyrum esculentum</i>
Sorgho du Soudan	<i>Sorghum sudanense</i>
Tournesol	<i>Helianthus annuus</i>
Trèfle blanc	<i>Trifolium repens</i>
Vesce de Hongrie	<i>Vicia Pannonica</i>
Vesce velue	<i>Vicia villosa</i>

Bibliographie

- 1 Häberli R., Lüscher C., Chastonay B.P., Wyss C. (1991) : *L'affaire sol – Pour une utilisation raisonnée du sol*. Rapport final du Programme national de recherche « Utilisation du sol en Suisse » (PNR 22). Zurich : vdf.
- 2 Baggiolini M. (1990) : Production intégrée en Suisse. I. *Aperçu historique de la « production agricole intégrée »*. Bulletin de la société entomologique suisse 63, 493–500.
- 3 Griffon, M. (2013) : *Qu'est-ce que l'agriculture écologiquement intensive ?* Ed. : Quae, Versailles.
- 4 Pandey S., Rai M., Reeves T.G., Collette L. (2011) : *Save and Grow: A Policymaker's Guide to the Sustainable Intensification of Smallholder Crop Production*. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), Rome.
- 5 Doré T., Makowski D., Malézieux E., Munier-Jolain N., Tchamitchian M., Titonell P. (2011) : *Facing up to the paradigm of ecological intensification in agronomy: Revisiting methods, concepts and knowledge*. European Journal of Agronomy 34, 197–210. doi:10.1016/j.eja.2011.02.006
- 6 Mazoyer M., Roudart L. (2002) : *Histoire des agricultures du monde du néolithique à la crise contemporaine*. Points.
- 7 Office fédéral de la statistique (OFS) (2017) : *Relevé des structures agricoles 2016*. Communiqué de presse du 11.05.2017, Neuchâtel.
- 8 Office fédéral de l'agriculture (OFAG) (2017) : *Rapport agricole 2017*. www.agrarbericht.ch
- 9 Office fédéral de l'agriculture (OFAG) (2014) : *Rapport agricole 2014*. www.agrarbericht.ch
- 10 Della Peruta R., Keller A. (2016) : *A regional modelling tool to assess the risk of accumulation of nutrients, trace metals and pesticides in agricultural soils (iMSoil)*. Bulletin 37 de la SSP.
- 11 Office fédéral de l'environnement (OFEV), Office fédéral de l'agriculture (OFAG) (2013) : *Protection des sols dans l'agriculture. Un module de l'aide à l'exécution pour la protection de l'environnement dans l'agriculture*. L'environnement pratique 1313, éd. : OFEV, Berne.
- 12 Karlen D.L., Mausbach M.J., Doran J.W., Cline R.G., Harris R.F., Schuman G.E. (1997) : *Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (A Guest Editorial)*. Soil Science Society of America Journal 61, 4–10. doi:10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x
- 13 Grêt-Regamey A., Drobnik T., Greiner L., Keller A., Papritz A. (2016) : *Soils and their contribution to ecosystem services*. Fiche d'information du PNR 68. www.nfp68.ch
- 14 Grêt-Regamey A., Kool S., Bühlmann L., Kissling S. (2018) : *Un agenda du sol pour l'aménagement du territoire*. Synthèse thématique ST₃ du Programme national de recherche « Utilisation durable de la ressource sol » (PNR 68), Berne.
- 15 Presler J., Carizzoni M., Widmer D. (2013) : *Gemeinsame Bodenüberwachung der Zentralschweizer Kantone*.
- 16 Keller T., Colombi T., Ruiz S., Manalili M.P., Rek J., Stadelmann V., Wunderli H., Breitenstein D., Reiser R., Oberholzer H., Schymanski S., Romero-Ruiz A., Linde N., Weisskopf P., Walter A., Or D. (2017) : *Long-Term Soil Structure Observatory for Monitoring Post-Compaction Evolution of Soil Structure*. Vadose Zone Journal 16. doi:10.2136/vzj2016.11.0118
- 17 da Silva P.A., Kay B.D., Perfect E. (1994) : *Characterization of the Least Limiting Water Range of Soils*. Soil Science Society of America Journal 58, 1775–1781. doi:10.2136/sssaj1994.03615995005800060028x
- 18 Dexter A.R. (1987) : *Mechanics of root growth*. Plant Soil 98, 303–312. doi:10.1007/BF02378351
- 19 Zhang W., Ricketts T.H., Kremen C., Carney K., Swinton S.M. (2007) : *Ecosystem services and disservices to agriculture*. Ecological Economics 64, 253–260. doi: https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.02.024
- 20 Hartmann M., Niklaus P.A., Zimmermann S., Schmutz S., Kremer J., Abarenkov K., Lüscher P., Widmer F., Frey B. (2014) : *Resistance and resilience of the forest soil microbiome to logging-associated compaction*. ISME Journal 8, 226–244. doi:10.1038/ismej.2013.141
- 21 Colombi T., Walter A. (2016) : *Root responses of triticale and soybean to soil compaction in the field are reproducible under controlled conditions*. Functional Plant Biology 43, 114–128. doi:10.1071/FP15194

- 22 Culley J.L.B., Dow B.K., Presant E.W., MacLean A.J. (1982) : *Recovery of Productivity of Ontario Soils Disturbed by an Oil Pipeline Installation*. Canadian Journal of Soil Science 62, 267–279. doi:10.4141/cjss82-031
- 23 Håkansson I., Reeder R.C. (1994) : *Subsoil compaction by vehicles with high axle load – extent, persistence and crop response*. Soil and Tillage Research 29, 277–304. doi:10.1016/0167-1987(94)90065-5
- 24 Berisso F.E., Schjønning P., Keller T., Lamandé M., Etana A., de Jonge L.W., Iversen B.V., Arvidsson J., Forkman J. (2012) : *Persistent effects of subsoil compaction on pore size distribution and gas transport in a loamy soil*. Soil and Tillage Research 122, 42–51. doi:10.1016/j.still.2012.02.005
- 25 Besson A., Séger M., Giot G., Cousin I. (2013) : *Identifying the characteristic scales of soil structural recovery after compaction from three in-field methods of monitoring*. Geoderma 204, 130–139. doi:10.1016/j.geoderma.2013.04.010
- 26 Peng X., Horn R. (2008) : *Time-dependent, anisotropic pore structure and soil strength in a 10-year period after intensive tractor wheeling under conservation and conventional tillage*. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 171, 936–944. doi:10.1002/jpln.200700084
- 27 Colombi T., Braun S., Keller T., Walter A. (2017) : *Artificial macropores attract crop roots and enhance plant productivity on compacted soils*. Science of the Total Environment 574, 1283–1293.
- 28 Ruiz S., Or D., Schymanski S.J. (2015) : *Soil Penetration by Earthworms and Plant Roots – Mechanical Energetics of Bioturbation of Compacted Soils*. PLOS ONE 10, e0128914. doi:10.1371/journal.pone.0128914
- 29 Webb R.H. (2002) : *Recovery of severely compacted soils in the Mojave Desert, California, USA*. Arid Land Research and Management 16, 15. doi:10.1080/153249802760284829
- 30 Håkansson I., Voorhees W.B., Elonen P., Raghavan G.S.V., Lowery B., Van Wijk A.L.M., Rasmussen K., Riley H. (1987) : *Effect of high axle-load traffic on subsoil compaction and crop yield in humid regions with annual freezing*. Soil and Tillage Research 10, 259–268. doi:10.1016/0167-1987(87)90032-8
- 31 Büchi L., Wendling M., Amossé C., Jeangros B., Sinaj S., Charles R. (2017) : *Long and short term changes in crop yield and soil properties induced by the reduction of soil tillage in a long term experiment in Switzerland*. Soil and Tillage Research 174, 120–129. doi:10.1016/j.still.2017.07.002
- 32 Maltas A., Oberholzer H., Charles R., Bovet V. (2012) : *Effet à long terme des engrais organiques sur les propriétés du sol*. Recherche Agronomique Suisse 3(3), 148–155.
- 33 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. doi:10.1016/j.agee.2006.05.022
- 34 Oberholzer H.R., Leifeld J., Mayer J. (2014) : *Changes in soil carbon and crop yield over 60 years in the Zurich Organic Fertilization Experiment, following land-use change from grassland to cropland*. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 177, 696–704. doi:10.1002/jpln.201300385
- 35 Programme de maintien de la fertilité des sols du canton de Vaud. www.prometerre.ch/sols
- 36 Kätterer T., Bolinder M.A., Andrén O., Kirchmann H., Menichetti L. (2011) : *Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues, as revealed by a long-term field experiment*. Agriculture, Ecosystems & Environment 141, 184–192. doi:10.1016/j.agee.2011.02.029
- 37 Ghafoor A., Poeplau C., Kätterer T. (2017) : *Fate of straw- and root-derived carbon in a Swedish agricultural soil*. Biology and Fertility of Soils 53, 257–267. doi:10.1007/s00374-016-1168-7
- 38 Prasuhn V., Liniger H.P., Hurni H., Friedli S. (2007) : *Carte du risque d'érosion du sol en Suisse*. Recherche Agronomique Suisse 3 (14), 120–127.
- 39 Gisler S., Liniger H.P., Prasuhn V. (2011) : *Carte à haute résolution du risque d'érosion au raster 2x2 m (CRE2)*. Recherche Agronomique Suisse 2 (4), 148–155.
- 40 Gattlen N., Klaus G., Litsios G. (2017) : *Biodiversité en Suisse: état et évolution. Synthèse des résultats de la surveillance de la biodiversité. État: 2016*. État de l'environnement 1630. Éd.: Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne.
- 41 Bardgett R.D., van der Putten W.H. (2014) : *Belowground biodiversity and ecosystem functioning*. Nature 515, 505–511. doi:10.1038/nature13855

- 42 Office fédéral de l'environnement (OFEV; éd.) (2016) : *Le sol est vivant. Reflets d'un monde méconnu*. Série de cartes postales. Les miscellanées de l'environnement, OFEV, Berne.
- 43 Moore J.C., Berlow E.L., Coleman D.C., de Ruiter P.C., Dong Q., Hasting, A., Johnson N.C., McCann K.S., Melville K., Morin P.J., Nadelhoffer K., Rosemond A.D., Post D.M., Sabo J.L., Scow K.M., Vanni M.J., Wall D.H. (2004) : *Detritus, trophic dynamics and biodiversity*. Ecology Letters 7, 584–600. doi:10.1111/j.1461-0248.2004.00606.x
- 44 Udikovic-Kolic N., Wichmann F., Broderick N.A., Handelsman J. (2014) : *Bloom of resident antibiotic-resistant bacteria in soil following manure fertilization*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 111, 15202–15207. doi: 10.1073/pnas.1409836111
- 45 Gomez-Sanz E., Jaenicke S., Wittwer R., Goesmann A., Van der Heijden M.G.A., Duffy B., Smits T.H.M. (2016) : *Poster*. Réunion annuelle sgm/ssm, Berne.
- 46 Palm C., Blanco-Canqui H., DeClerck F., Gatere L., Grace P. (2014) : *Conservation agriculture and ecosystem services: An overview*. Agriculture, Ecosystems & Environment 187, 87–105. doi:10.1016/j.agee.2013.10.010
- 47 Martinez I., Chervet A., Weisskopf P., Sturny W.G., Etana A., Stettler M., Forkman J., Keller T. (2016a) : *Two decades of no-till in the Oberacker long-term field experiment: Part I. Crop yield, soil organic carbon and nutrient distribution in the soil profile*. Soil and Tillage Research 163, 141–151. doi:10.1016/j.still.2016.05.021
- 48 Pittelkow C.M., Liang X., Linquist B.A., van Groenigen K.J., Lee J., Lundy M.E., van Gestel N., Six J., Venterea R.T., van Kessel C. (2015) : *Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture*. Nature 517, 365–368. doi:10.1038/nature13809
- 49 Derpsch R., Franzluebbers A.J., Duiker S.W., Reicosky D.C., Koeller K., Friedrich T., Sturny W.G., Sá J.C.M., Weiss K. (2014) : *Why do we need to standardize no-tillage research?* Soil and Tillage Research 137, 16–22. doi:10.1016/j.still.2013.10.002
- 50 Luo Z., Wang E., Sun O.J. (2010) : *Can no-tillage stimulate carbon sequestration in agricultural soils? A meta-analysis of paired experiments*. Agriculture Ecosystems & Environment 139, 224–231. doi:10.1016/j.agee.2010.08.006
- 51 Martinez I., Chervet A., Weisskopf P., Sturny W.G., Rek J., Keller T. (2016) : *Two decades of no-till in the Oberacker long-term field experiment: Part II. Soil porosity and gas transport parameters*. Soil and Tillage Research 163, 130–140. doi:10.1016/j.still.2016.05.020
- 52 Soane B.D., Ball B.C., Arvidsson J., Basch G., Moreno F., Roger-Estrade J. (2012) : *No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment*. Soil and Tillage Research 118, 66–87. doi:10.1016/j.still.2011.10.015
- 53 Valboa G., Lagomarsino A., Brandi G., Agnelli A.E., Simoncini S., Papini R., Vignozzi N., Pellegrini S. (2015) : *Long-term variations in soil organic matter under different tillage intensities*. Soil and Tillage Research 154, 126–135.
- 54 Franzluebbers A.J. (2002) : *Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality*. Soil and Tillage Research 66, 95–106. doi:10.1016/S0167-1987(02)00018-1
- 55 Quinton J.N., Edwards G.M., Morgan R.P.C. (1997) : *The influence of vegetation species and plant properties on runoff and soil erosion: results from a rainfall simulation study in south east Spain*. Soil Use and Management 13, 143–148. doi:10.1111/j.1475-2743.1997.tb00575.x
- 56 Gebhard C.-A., Büchi L., Liebisch F., Sinaj S., Ramseier H., Charles R. (2013) : *Screening de légumineuses pour couverts végétaux: azote et adventices*. Research Agronomique Suisse 4, 384–393.
- 57 Yu Y., Loiskandl W., Kaul H.-P., Himmelbauer M., Wei W., Chen L., Bodner G. (2016) : *Estimation of runoff mitigation by morphologically different cover crop root systems*. Journal of Hydrology 538, 667–676. doi:10.1016/j.jhydrol.2016.04.060
- 58 Wendling M., Büchi L., Amossé C., Sinaj S., Walter A., Charles R. (2016) : *Influence of root and leaf traits on the uptake of nutrients in cover crops*. Plant and Soil 409, 419–434. doi:10.1007/s11104-016-2974-2
- 59 Weil R., Kremen A. (2007) : *Thinking across and beyond disciplines to make cover crops pay*. Journal of the Science of Food and Agriculture 87, 551–557. doi:10.1002/jsfa.2742
- 60 Chen G., Weil R.R. (2010) : *Penetration of cover crop roots through compacted soils*. Plant and Soil 331, 31–43. doi:10.1007/s11104-009-0223-7
- 61 Wendling M., Büchi L., Amossé C., Jeangros B., Walter A., Charles R. (2017) : *Specific interactions leading to transgressive overyielding in cover crop mixtures*. Agriculture, Ecosystems & Environment 241, 88–99. doi:10.1016/j.agee.2017.03.003

- 62 Tribouillois H., Cohan J.-P., Justes E. (2016) : *Cover crop mixtures including legume produce ecosystem services of nitrate capture and green manuring: assessment combining experimentation and modelling*. Plant and Soil 401, 347–364. doi:10.1007/s11104-015-2734-8
- 63 Charles R., Amossé C., Cholley E., Frei P., Mascher F. (2015) : *How far can we simplify cereal based crop rotation: results from a long-term experiment in Switzerland*. Aspects of Applied Biology 128, 43–48.
- 64 Sinaj S., Richner W. (2017) : *Principes de la fertilisation des cultures agricoles en Suisse* (PRIF 2017). Recherche Agronomique Suisse – Publication spéciale.
- 65 Smith S.E., Read D. (2008) : *Mycorrhizal Symbiosis*, 3^e éd. Academic Press, Londres.
- 66 Augé R.M., Stodola A.J.W., Tims J.E., Saxton A.M. (2001) : *Moisture retention properties of a mycorrhizal soil*. Plant and Soil 230, 87–97. doi:10.1023/A:1004891210871
- 67 Whipps J.M. (2004) : *Prospects and limitations for mycorrhizas in biocontrol of root pathogens*. Canadian Journal of Botany 82, 1198–1227.
- 68 Rillig M.C., Mummey D.L. (2006) : *Mycorrhizas and soil structure*. New Phytologist 171, 41–53. doi:10.1111/j.1469-8137.2006.01750.x
- 69 van der Heijden M.G.A. (2010) : *Mycorrhizal fungi reduce nutrient loss from model grassland ecosystems*. Ecology 91, 1163–1171. doi:10.1890/09-0336.1
- 70 Bender S.F., Plantenga F., Neftel A., Jocher M., Oberholzer H.-R., Köhl L., Giles M., Daniell T.J., van der Heijden M.G.A. (2014) : *Symbiotic relationships between soil fungi and plants reduce N₂O emissions from soil*. ISME Journal 8, 1336–1345. doi:10.1038/ismej.2013.224
- 71 van der Heijden M.G.A., Martin F.M., Selosse M.-A., Sanders I.R. (2015) : *Mycorrhizal ecology and evolution: the past, the present, and the future*. New Phytologist 205, 1406–1423. doi: 10.1111/nph.13288
- 72 Verbruggen E., Rölling W.F.M., Gamper H.A., Kowalchuk G.A., Verhoef H.A., van der Heijden M.G.A. (2010) : *Positive effects of organic farming on below-ground mutualists: large-scale comparison of mycorrhizal fungal communities in agricultural soils*. New Phytologist 186, 968–979. doi:10.1111/j.1469-8137.2010.03230.x
- 73 Säle V., Aguilera P., Laczko E., Mäder P., Berner A., Zihlmann U., van der Heijden M.G.A., Oehl F. (2015) : *Impact of conservation tillage and organic farming on the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi*. Soil Biology and Biochemistry 84, 38–52. doi:10.1016/j.soilbio.2015.02.005
- 74 Jansa J., Mozafar A., Anken T., Ruh R., Sanders I.R., Frossard E. (2002) : *Diversity and structure of AMF communities as affected by tillage in a temperate soil*. Mycorrhiza 12, 225–234. doi:10.1007/s00572-002-0163-z
- 75 Maurer C., Rüdy M., Chervet A., Sturny W., Flisch R., Oehl F. (2014) : *Diversité des champignons mycorrhiziens arbusculaires sous semis direct et sous labour*. Recherche Agronomique Suisse 5 (10), 398–405.
- 76 Wetzel K., Silva G., Matczinski U., Oehl F., Fester T. (2014) : *Superior differentiation of arbuscular mycorrhizal fungal communities from till and no-till plots by morphological spore identification when compared to T-RFLP*. Soil Biology and Biochemistry 72, 88–96. doi:10.1016/j.soilbio.2014.01.033
- 77 Brito I., Goss M.J., de Carvalho M., Chatagnier O., van Tuinen D. (2012) : *Impact of tillage system on arbuscular mycorrhiza fungal communities in the soil under Mediterranean conditions*. Soil and Tillage Research 121, 63–67. doi:10.1016/j.still.2012.01.012
- 78 Kabir Z. (2005) : *Tillage or no-tillage: Impact on mycorrhizae*. Canadian Journal of Botany 85, 23–29.
- 79 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. doi:10.1007/s00442-003-1458-2
- 80 Mathimaran N., Ruh R., Vulliod P., Frossard E., Jansa J. (2005) : *Glomus intraradices dominates arbuscular mycorrhizal communities in a heavy textured agricultural soil*. Mycorrhiza 16, 61–66. doi:10.1007/s00572-005-0014-9
- 81 Köhl L., Lukaszewicz C.E., van der Heijden M.G.A. (2016) : *Establishment and effectiveness of inoculated arbuscular mycorrhizal fungi in agricultural soils*. Plant, Cell & Environment 39, 136–146. doi:10.1111/pce.12600
- 82 Hoeksema J.D., Chaudhary V.B., Gehring C.A., Johnson N.C., Karst J., Koide R.T., Pringle A., Zabinski C., Bever J.D., Moore J.C., Wilson G.W.T., Klironomos J.N., Umbanhowar J. (2010) : *A meta-analysis of context-dependency in plant response to inoculation with mycorrhizal fungi*. Ecology Letters 13, 394–407. doi:10.1111/j.1461-0248.2009.01430.x

- 83 Marschner H., Dell B. (1994) : *Nutrient uptake in mycorrhizal symbiosis*. Plant and Soil 159, 89–102. doi:10.1007/BF00000098
- 84 Tonitto C., David M.B., Drinkwater L.E. (2006) : *Replacing bare fallows with cover crops in fertilizer-intensive cropping systems: A meta-analysis of crop yield and N dynamics*. Agriculture, Ecosystems & Environment 112, 58–72. doi:10.1016/j.agee.2005.07.003
- 85 Büchi L., Gebhard C.-A., Liebisch F., Sinaj S., Ramseier H., Charles R. (2015) : *Accumulation of biologically fixed nitrogen by legumes cultivated as cover crops in Switzerland*. Plant and Soil 393, 163–175. doi:10.1007/s11104-015-2476-7
- 86 Thorup-Kristensen K., Magid J., Jensen L.S. (2003) : *Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones*. Advances in Agronomy 79, 227–302. doi:10.1016/S0065-2113(02)79005-6
- 87 Justes E., Mary B., Nicolardot B. (2009) : *Quantifying and modelling C and N mineralization kinetics of catch crop residues in soil: parameterization of the residue decomposition module of stics model for mature and non mature residues*. Plant and Soil 325, 171–185. doi:10.1007/s11104-009-9966-4
- 88 Oerke E.-C. (2006) : *Crop losses to pests*. Journal of Agricultural Science 144, 31–43. doi:10.1017/S0021859605005708
- 89 Campos-Herrera R., Jaffuel G., Chiriboga X., Blanco-Pérez R., Fesselet M., Půža V., Mascher F., Turlings T.C.J. (2015) : *Traditional and molecular detection methods reveal intense interguild competition and other multitrophic interactions associated with native entomopathogenic nematodes in Swiss tillage soils*. Plant and Soil 389, 237–255. doi:10.1007/s11104-014-2358-4
- 90 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. doi.org/10.1016/j.agee.2016.06.009
- 91 Jaffuel G., Blanco-Pérez R., Büchi L., Mäder P., Fliessbach A., Charles R., Degen T., Turlings T.C.J., Campos-Herrera R. (2017) : *Effects of cover crops on the overwintering success of entomopathogenic nematodes and their antagonists*. Applied Soil Ecology 114, 62–73. doi:10.1016/j.apsoil.2017.02.006
- 92 Campos-Herrera R., Půža V., Jaffuel G., Blanco-Pérez R., Čepulytė-Rakauskienė R., Turlings T.C.J. (2015) : *Unraveling the intraguild competition between Oscheius spp. nematodes and entomopathogenic nematodes: Implications for their natural distribution in Swiss agricultural soils*. Journal of Invertebrate Pathology 132, 216–227. doi:10.1016/j.jip.2015.10.007
- 93 Haas D., Défago G. (2005) : *Biological control of soil-borne pathogens by fluorescent pseudomonads*. Nature Reviews Microbiology 3, 307–319. doi:10.1038/nrmicro1129
- 94 Mercado-Blanco J., Bakker P.A.H.M. (2007) : *Interactions between plants and beneficial Pseudomonas spp.: exploiting bacterial traits for crop protection*. Antonie Van Leeuwenhoek 92, 367–389. doi:10.1007/s10482-007-9167-1
- 95 Lugtenberg B., Kamilova F. (2009) : *Plant-growth-promoting rhizobacteria*. Annual Review of Microbiology 63, 541–556. doi:10.1146/annurev.micro.62.081307.162918
- 96 Kim M.S., Kim Y.C., Cho B.H. (2004) : *Gene expression analysis in cucumber leaves primed by root colonization with Pseudomonas chlororaphis O6 upon challenge-inoculation with Corynespora cassicola*. Plant Biology 6, 105–108. doi:10.1055/s-2004-817803
- 97 Maurhofer M., Hase C., Meuwly P., Métraux J., Défago G. (1994) : *Induction of systemic resistance of tobacco to Tobacco Necrosis Virus by the root-colonizing Pseudomonas fluorescens strain CHA0 – influence of the gacA gene and of pyoverdine production*. Phytopathology 84, 139–146.
- 98 Pieterse C.M.J., van Pelt J.A., Verhagen B.W.M., Ton J., van Wees A.C.M., Léon-Kloosterziel K.M., van Loon L.C. (2003) : *Induced systemic resistance by plant-growth-promoting rhizobacteria*. Symbiosis 35, 39–54.
- 99 Kupferschmied P., Maurhofer M., Keel C. (2013) : *Promise for plant pest control: root-associated pseudomonads with insecticidal activities*. Frontiers in Plant Science 4, 287. doi:10.3389/fpls.2013.00287
- 100 Weller D.M., Raaijmakers J.M., Gardener B.B.M., Thomashow L.S. (2002) : *Microbial populations responsible for specific soil suppressiveness to plant pathogens*. Annual Review of Phytopathology 40, 309–348. doi:10.1146/annurev.phyto.40.030402.110010
- 101 Raaijmakers J.M., Weller D.M. (1998) : *Natural Plant Protection by 2,4-Diacetylphloroglucinol-Producing Pseudomonas spp. in Take-All Decline Soils*. Molecular Plant-Microbe Interactions 11, 144–152. doi:10.1094/MPMI.1998.11.2.144

- 102 Stutz E.W., Défago G., Kern H. (1986) : *Naturally occurring fluorescent pseudomonads involved in suppression of black root rot of tobacco*. *Phytopathology* 76, 181–185.
- 103 Singh P., Siddiqui Z.A. (2010) : *Biocontrol of root-knot nematode Meloidogyne incognita by the isolates of Pseudomonas on tomato*. *Archives of Phytopathology and Plant Protection* 43, 1423–1434. doi:10.1080/03235400802536857
- 104 Flury P., Vesga P., Péchy-Tarr M., Aellen N., Dennert F., Hofer N., Kupferschmied K.P., Kupferschmied P., Metla Z., Ma Z., Siegfried S., de Weert S., Bloemberg G., Höfte M., Keel C.J., Maurhofer M. (2017) : *Antimicrobial and Insecticidal: Cyclic Lipopeptides and Hydrogen Cyanide Produced by Plant-Beneficial Pseudomonas Strains CHA0, CMR12a, and PCL1391 Contribute to Insect Killing*. *Frontiers in Microbiology* 8, 100. doi:10.3389/fmicb.2017.00100
- 105 Imperiali N., Denner F., Schneide J., Laessl T., Velatt C., Fessele M., Wyle M., Masche F., Mavrod O., Mavrod D., Maurhofer M., Keel C. (2017) : *Relationships between Root Pathogen Resistance, Abundance and Expression of Pseudomonas Antimicrobial Genes, and Soil Properties in Representative Swiss Agricultural Soils*. *Frontiers in Plant Science* 8, 427. doi:10.3389/fpls.2017.00427
- 106 Schjønning P., Lamandé M., Keller T., Pedersen J., Stettler M. (2012) : *Rules of thumb for minimizing subsoil compaction*. *Soil Use and Management* 28, 378–393. doi:10.1111/j.1475-2743.2012.00411.x
- 107 Service de protection des sols du canton de Berne : <https://www.youtube.com/watch?v=qd62cjFHMzo>
- 108 Institut de recherche de l'agriculture biologique (FiBL) : <http://www.bioaktuell.ch/pflanzenbau/boden/allgemein/spatenprobe-film.html>
- 109 Hasinger G., Keller L., Marendaz E., Neyroud J.-A., Vökt U., Weisskopf P. (2001) : *Évaluation du sol au champ*. Centrale de vulgarisation agricole de Lindau (LBL)
- 110 Ball B.C., Batey T., Munkholm L.J. (2007) : *Field assessment of soil structural quality – a development of the Peerlkamp test*. *Soil Use and Management* 23, 329–337. doi:10.1111/j.1475-2743.2007.00102.x
- 111 Johannes A., Weisskopf P., Schulin R., Boivin P. (2017) : *To what extent do physical measurements match with visual evaluation of soil structure?* *Soil and Tillage Research* 173, 24–32. doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.06.001>
- 112 <https://github.com/MichaelPolla/VESS/raw/master/builds/android.apk>
- 113 <http://www.itab.asso.fr/programmes/solab.php>
- 114 Dexter A.R., Richard G., Arrouays D., Czyż E.A., Jolivet C., Duval O. (2008) : *Complexed organic matter controls soil physical properties*. *Geoderma* 144, 620–627. doi:10.1016/j.geoderma.2008.01.022
- 115 Johannes A., Matter A., Schulin R., Weisskopf P., Baveye P.C., Boivin P. (2017) : *Optimal organic carbon values for soil structure quality of arable soils. Does clay content matter?* *Geoderma* 302, 14–21. doi:10.1016/j.geoderma.2017.04.021
- 116 Neyroud J., Supcik P., Magnollay F. (1997) : *La part du sol dans la production intégrée – 1. Gestion de la matière organique et bilan humique*. *Revue Suisse d'Agriculture* 29, 45–51.
- 117 Oberholzer H.-R., Weisskopf P. : www.humusbilanz.ch. Agroscope.
- 118 Ebertseder T., Engels C., Heyn J., Reinhold J., Brock C., Fürstenfeld F., Hülsbergen K.-J., Isermann K., Kolbe H., Leithold G., Schmid H., Schweitzer K., Willms M., Zimmer J. (2014) : *Humusbilanzierung. Eine Methode zur Analyse und Bewertung der Humusversorgung von Ackerland*. Vereinigung der deutschen landwirtschaftlichen Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA) : Standpunkt. https://www.humusbilanz.ch/download/VDLUFA_2014_Humusbilanzierung.pdf
- 119 www.simeos-amg.org
- 120 Coleman K., Jenkinson D.S. (1996) : *RothC-26.3 – A model for the turnover of carbon in soil*. *Evaluation of Soil Organic Matter Models – Using Existing Long-Term Datasets*, Nato ASI Subseries, I. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 237–246.
- 121 Keuskamp J.A., Dingemans B.J.J., Lehtinen T., Sarneel J.M., Hefting M.M. (2013) : *Tea Bag Index: a novel approach to collect uniform decomposition data across ecosystems*. *Methods in Ecology and Evolution* 4, 1070–1075. doi:10.1111/2041-210X.12097
- 122 <http://www.teatime4science.org/data/submit-one-data-point>
- 123 École supérieure d'agriculture d'Angers : <http://www.groupe-esa.com/wp-content/uploads/2017/09/fiche-indicateur-levabag.pdf>
- 124 www.soilcc.ca/soilweek/2017/Soil-Your-Undies-Protocol.pdf

- 125 Kratz W. (1998) : *The Bait-Lamina Test General Aspects, Applications and Perspectives*. Environmental Science and Pollution Research 55, 94–96.
- 126 <https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/>
- 127 Observatoire Participatif des Vers de Terre : https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/OPVT_accueil.php
- 128 Schlaeppi K., Bender S.F., Mascher F., Russo G., Patrignani A., Camenzind T., Hempel S., Rillig M.C., van der Heijden M.G.A. (2016) : *High-resolution community profiling of arbuscular mycorrhizal fungi*. New Phytologist 212, 780–791. doi:10.1111/nph.14070
- 129 Campos-Herrera R., Johnson E.G., EL-Borai F.E., Stuart R.J., Graham J.H., Duncan L.W. (2011) : *Long-term stability of entomopathogenic nematode spatial patterns in soil as measured by sentinel insects and real-time PCR assays*. Annals of Applied Biology 158, 55–68. doi:10.1111/j.1744-7348.2010.00433.x
- 130 www.bodenmessnetz.ch
- 131 <https://map.geo.admin.ch>
- 132 Meuli R.G., Schwab P., Wächter D., Ammann S. (2014) : *Observatoire national des sols (NABO) 1985 à 2004*. État de l'environnement 1409, Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne.
- 133 Rossier N., von Niederhäusern A., Bongard L. (2012) : *FRIBO – Réseau fribourgeois d'observation des sols 1997–2011*. Institut agricole de l'État de Fribourg IAG, Posieux.
- 134 Keller A., Franzen J., Knüsel P., Zürrer M., Papritz A. (2018) : *Plateforme d'information des sols suisse (PIS-CH)*. Synthèse thématique ST4 du Programme national de recherche « Utilisation durable de la ressource sol » (PNR 68), Berne.
- 135 Office fédéral de la statistique (2017) : *Encyclopédie statistique de la Suisse*. Neuchâtel.
- 136 Bellini E. (2015) : *Sols et constructions. État de la technique et des pratiques*. Connaissance de l'environnement 1508, éd. : Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne.
- 137 IP-Suisse (2016) : *Directives pour l'ensemble de l'exploitation. Exigences de base pour tous les programmes du label IP-SUISSE*. <https://www.ipsuisse.ch/CMS/ModanFile-Handler.axd?DateiGUID=oc76e9f6-6756-46ae-893b-e1d836229159>
- 138 Bio Suisse (2018) : *Cahier des charges pour la production, la transformation et le commerce de produits bourgeon*. https://www.bio-suisse.ch/media/VundH/Regelwerk/2018/FR/rl_2018_1.1_f_gesamt_01.02.2018.pdf
- 139 Office fédéral de l'agriculture (OFAG), Agridea (2017) : *Guide du Suisse-Bilanz*.
- 140 Buess A., Gantner U., Lötscher M., Stöckli A., Tschumi M (2011) : *Le système de connaissances agricoles en Suisse*. Recherche Agronomique Suisse 2, 484–489.
- 141 Lechenet M., Deytieux V., Antichi D., Aubertot J.-N., Bärberi P., Bertrand M., Cellier V., Charles R., Colnenne-David C., Dachbrodt-Saaydeh S., Debaeke P., Doré T., Farcy P., Fernandez-Quintanilla C., Grandeau G., Hawes C., Jouy L., Justes E., Kierzek R., Kudsk P., Lamichhane J.R., Lescourret F., Mazzoncini M., Melander B., Messéan A., Moonen A.C., Newton A.C., Nolot J.M., Panozzo S., Retaureau P., Sattin M., Schwarz J., Toqué C., Vasileiadis V.P., Munier-Jolain N. (2017) : *Diversity of methodologies to experiment integrated pest management in arable cropping systems: analysis and reflections based on a European network*. European Journal of Agronomy 83, 86–99.
- 142 Häller B., Pfister M., Zbinden K., Lehmann R. (2017) : *REDES – Ressourceneffizienz im Dienste der Ernährungssicherheit*. Rapport de clôture et sur le suivi méthodique du projet pilote « Cercle de travail REDES ». Haute école des sciences agronomiques, forestières et alimentaires (HAFL), Zollikofen.
- 143 Forum des consommateurs (KF), Association Suisse du Commerce Fruits, Légumes et Pommes de terre (SWISSCOFEL), Fruit-Union Suisse (FUS), Union maraîchère suisse (UMS) (2016) : *L'accord de droit privé sur la déclaration de légumes frais et de baies fraîches cultivés sous serre et hors-sol sera supprimé*. Communiqué de presse du 08.11.2016, Berne.
- 144 Barański M., Srednicka-Tober D., Volakakis N., Seal C., Sanderson R., Stewart G.B., Benbrook C., Biavati B., Markellou E., Giotis C., Gromadzka-Ostrowska J., Rembialska E., Skwarło-Sonta K., Tahvonen R., Janovska D., Niggli U., Nicot P., Leifer C. (2014) : *Higher antioxidant and lower cadmium concentrations and lower incidence of pesticide residues in organically grown crops: a systematic literature review and meta-analyses*. British Journal of Nutrition 112, 794–811.
- 145 Burton R.J.F., Schwarz G. (2013) : *Result-oriented agri-environmental schemes in Europe and their potential for promoting behavioural change*. Land Use Policy 30, 628–641.

- 146 Boivin P. (2017) : *Rémunérer la qualité du sol agricole. Utopie ou nouveau paradigme pour concilier agriculture et fonctions environnementales ?* Agronomie, écologie et innovation TCS 93, 12–15.
- 147 Stamm C., Doppler T., Prasuhn V., Singer H. (2012) : *Standortgerechte Landwirtschaft bezüglich der Auswirkung von landwirtschaftlichen Hilfsstoffen auf Oberflächengewässer*. Rapport final. Étude réalisée sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV). Eawag, Dübendorf.
- 148 Office fédéral de l'agriculture (OFAG) (2011) : *Stratégie Climat pour l'agriculture. Protection du climat et adaptation au changement climatique pour une agriculture et une économie alimentaire suisses durables*. OFAG, Berne.
- 149 Kotschi J., Adelhelm R. (1984) : *Standortgerechte Landwirtschaft – zur Entwicklung kleinbäuerlicher Betriebe in den Tropen und Subtropen*. Éd. : Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), Eschborn. 17–34.
- 150 Bertschinger L., Baur R., Carlen C., Frey J., Jeangros B., Kessler W., Viret O., Mayor J.-P. (2015) : *Contributions de la recherche à l'intensification écologique pour une production végétale durable*. Recherche Agronomique Suisse 9, 408–415.
- 151 Blanchet G., Gavazov K., Bragazza L., Sinaj S. (2016) : *Responses of soil properties and crop yields to different inorganic and organic amendments in a Swiss conventional farming system*. Agriculture, Ecosystems and Environment 230, 116–126. doi:10.1016/j.agee.2016.05.032
- 152 Gallet A., Flisch R., Ryser J.-P., Frossard E., Sinaj S. (2003) : *Effect of phosphate fertilization on crop yield and soil phosphorus status*. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 166, 568–578. doi:10.1002/jpln.200321081
- 153 Armengot L., Berner A., Blanco-Moreno J.M., Mäder P., Sans F.X. (2015) : *Long-term feasibility of reduced tillage in organic farming*. Agronomy for Sustainable Development 35, 339–346. doi:10.1007/s13593-014-0249-y
- 154 Thomet P., Koch B. (1993) : *Langfristige Auswirkungen von Düngung und Schnittregime auf eine Heumatte*. Landwirtschaft Schweiz, Band 6 (2), 107–114.
- 155 Jeangros B. (1993) : *Prairies permanentes en montagne. I. Effets de la fréquence des coupes et de la fertilisation azotée sur la composition botanique*. Revue Suisse Agricole 6, 345–360.
- 156 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, 27–39. doi.org/10.1016/j.eja.2015.01.002
- 157 Wittwer R.A., Dorn B., Jossi W., van der Heijden M.G.A. (2017) : *Cover crops support ecological intensification of arable cropping systems*. Scientific Reports 7, 41911 doi:10.1038/srep41911
- 158 Charles R., Cholley E., Frei P. (2011) : *Assolement, travail du sol, variété et protection fongicide en production céréalière*. Recherche Agronomique Suisse 2(5), 212–219.
- 159 Charles R., Cholley E., Frei P., Mascher F. (2011) : *Maladies et rendement du blé d'automne: influence du système de culture*. Recherche Agronomique Suisse 2 (6), 264–271.
- 160 Sébillotte M. (1990) : *Système de culture, un concept opératoire pour les agronomes*. Le point sur les systèmes de culture. INRA, Paris, 165–196.
- 161 Ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol) du 1^{er} juillet 1998, état : 12 avril 2016 (RS 814.12).
- 162 Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz – BBodSchG).
- 163 Doran J.W., Coleman D.C., Bezdicek D.F., Stewart B.A. (éd.; 1994) : *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Special Publication 35.
- 164 El Titi A., Boller E.F., Gendrier J.P. (1993) : *Integrated Production. Principles and Technical Guidelines*. Bulletin of the International Organization for Biological and Integrated Control of Noxious Animals and Plants, West Palearctic Regional Section (IOBC/WPRS) 16.
- 165 Peacock S., Smith B.M., Stockdale E.A., Watson C. (2015) : *Aspects of Applied Biology 128, Valuing long-term sites and experiments for agriculture and ecology*. Association of Applied Biologists, Warwick Enterprise Park, Wellesbourne, Warwick CV35 9EF, UK.

Impressum

Auteurs

D^r Raphaël Charles, FiBL, Lausanne
D^{re} Marina Wendling, FiBL, Lausanne
D^r Stéphane Burgos, HAFL, Zollikofen

Élaboré et publié avec le soutien du Fonds national suisse de la recherche scientifique dans le cadre du Programme national de recherche « Utilisation durable de la ressource sol » (PNR 68).

Éditeur

Comité de direction du Programme national de recherche « Utilisation durable de la ressource sol » (PNR 68).

Groupe de suivi de la synthèse thématique

Daniel Baertschi, Bio Suisse, Bâle
David Brugger, Union Suisse des Paysans (USP), Berne
D^r Alfred Buess, Conseil de la recherche agronomique (CRA), Berne
Andreas Chervet, Office de l'agriculture et de la nature du Canton de Berne, Zollikofen
Jacques Dugon, Agridea, Lausanne
Sébastien Gassmann, Canton de Genève, Genève
Olivia Grimm, Office fédéral du développement territorial (ARE), Ittigen
Hansueli Gujer, Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne
D^r Jan Lucht, Scienceindustries, Zurich
Reto Minder, agriculteur, Swiss No-Till, Jeuss
D^r Claudio Screpanti, Syngenta Crop Protection, Stein
André Zimmermann, Service de l'agriculture et de la viticulture (SAVI), Moudon
D^r Michael Zimmermann, Office fédéral de l'agriculture (OFAG), Berne

Comité de direction du PNR 68

Prof. Emmanuel Frossard, EPF Zurich (président)
Prof. Claire Chenu, AgroParisTech, France
Prof. Peter de Ruiter, Université d'Amsterdam, Pays-Bas
D^{re} Annette Freibauer, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Allemagne
Prof. Bernd Hansjürgens, Helmholtz Zentrum für Umweltforschung UFZ, Leipzig, Allemagne
Prof. Lorenz Hurni, EPF Zurich

D^r Michael Obersteiner, Internationales Institut für angewandte Systemanalyse, Autriche
Prof. Kurt Roth, Université d'Heidelberg, Allemagne

Déléguée du Conseil national de la recherche

Prof. Claudia R. Binder, EPF Lausanne

Représentants de la Confédération

Stephan Scheidegger, Office fédéral du développement territorial (ARE), Berne
D^r Roland von Arx, Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne

Chargé du transfert de connaissances/rédaction

Urs Steiger, steiger texte konzepte beratung, Lucerne

Manager du programme

D^r Pascal Walther, Fonds national suisse (FNS), Berne

Mise en page et graphisme

Kurt Brunner, Palézieux

Corrections

Andreas Vonmoos, terminus textkorrektur, Lucerne

Image de couverture

Nils Nova, Luzern

Impression

Engelberger Druck, Stans

Pour ce qui a trait aux résultats de recherche mentionnés, la responsabilité en échoit aux équipes de recherche concernées ; pour les synthèses thématiques et les recommandations, la responsabilité incombe aux auteurs concernés dont les conclusions ne doivent pas nécessairement correspondre aux opinions des membres du groupe de suivi, du Fonds national suisse ou des responsables de projets.

Référence recommandée

Charles R., Wendling M., Burgos S. (2018) : Sol et production alimentaire. Synthèse thématique ST1 du Programme national de recherche « Utilisation durable de la ressource sol » (PNR 68), Berne.

ISBN: 978-3-907087-29-9

www.fns.ch

www.pnr68.ch

Disponible auprès du Fonds national suisse, Berne

© 2018, Fonds national suisse de la recherche scientifique (FNS),
Berne

L'ouvrage, y compris l'ensemble des parties qui le composent, est protégé au titre du droit d'auteur. Toute utilisation en dehors des strictes limites de la loi sur le droit d'auteur est interdite sans l'accord de l'éditeur et est passible de poursuites. Cela vaut en particulier pour les reproductions, les traductions, les microfilmages ainsi que la sauvegarde et le traitement dans des systèmes électroniques.

Le Programme national de recherche « Utilisation durable de la ressource sol » (PNR 68)

Le Programme national de recherche « Utilisation durable de la ressource sol » (PNR 68) établit les bases pour une exploitation durable des sols en Suisse. À cette fin, il convient de prendre en compte les services tant écologiques qu'économiques fournis par le sol. Le concept des services écosystémiques permet de mettre en valeur les fonctions des sols et leur contribution au bien-être humain. Les recherches ont duré de 2013 à 2017. Les résultats sont rassemblés au sein de cinq synthèses thématiques et d'une synthèse globale.

Synthèse thématique ST1

Sol et production alimentaire

À l'heure actuelle, la qualité du sol est particulièrement menacée par le tassement du sol, la perte de matière organique et de biodiversité, et l'érosion. La synthèse thématique ST1 « Sol et production alimentaire » examine les défis que posent ces menaces à la lumière des résultats des projets du Programme national de recherche « Utilisation durable de la ressource sol » (PNR 68) et aboutit à une vision de l'agriculture appropriée au site et à sa région, qui s'appuie davantage sur les fonctions du sol tout en réduisant l'utilisation de machines et l'apport d'intrants externes.

Synthèse thématique ST2

Sol et environnement

Synthèse thématique ST3

Un agenda du sol pour l'aménagement du territoire

Synthèse thématique ST4

Plateforme d'information des sols suisse (PIS-CH)

Synthèse thématique ST5

Vers une politique durable des sols

