



POLLUTION DES EAUX PAR LES PESTICIDES

APPROCHES POUR RÉDUIRE LES APPORTS ÉMANANT DE L'AGRICULTURE

Le relevé effectué en 2012 sur la pollution par les pesticides de cinq cours d'eau de taille moyenne a montré que des critères de qualité écotoxicologiques et des exigences légales n'étaient souvent pas remplis. Pour réduire les apports de pesticides provenant des surfaces agricoles, il existe – outre des mesures en bordure de champ (p. ex. des bandes tampons) – des possibilités d'agir efficacement sur les surfaces de production elles-mêmes. La réussite durable de ces approches suppose l'existence de dispositions adéquates ainsi que l'implication constructive des acteurs principaux (agriculteurs) et des parties prenantes (consommateurs et marché).

Simon Spycher; Johannes Hunkeler; Andreas Bosshard, Ö+L Ökologie und Landschaft GmbH*

Fritz Häni, Spiez – ancien professeur à la Haute école des sciences agronomiques, forestières et alimentaires (HAFL)

ZUSAMMENFASSUNG

GEWÄSSERBELASTUNG DURCH PESTIZIDE – ANSÄTZE ZUR VERMINDE- RUNG LANDWIRTSCHAFTLICH BEDINGTER EINTRÄGE

In fünf Einzugsgebieten wurde 2012 die bisher umfassendste Analyse der chemischen Belastung von Schweizer Oberflächengewässern durchgeführt (*Nationale Beobachtung Oberflächengewässerqualität NAWA SPEZ*). Die Belastung mit Pestiziden (Pflanzenschutzmittel und Biozide) erwies sich dabei als höher als bisher angenommen. Die gemessenen Konzentrationen lagen häufig über den chronischen Qualitätskriterien (CQK), was Wasserorganismen beeinträchtigen kann. Pflanzenschutzmittel aus der Landwirtschaft machen den grössten Teil der nachgewiesenen Wirkstoffe aus, aber auch ausserhalb der Landwirtschaft eingesetzte Pflanzenschutzmittel und Biozide tragen zur Belastung bei und können in urbanen Gebieten die Einträge aus der Landwirtschaft übersteigen. Im vorliegenden Beitrag werden mögliche Massnahmen zur Verminderung der Einträge aus der Landwirtschaft evaluiert. Die Einteilung der Massnahmen erfolgt nach den von der Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (FAO) vorgeschlagenen drei Bereichen Reduktion des Einsatzes, Substitution von Wirkstoffen mit ungünstigem Umweltprofil und Optimierung der Anbausysteme bzw. der Handhabung der Pflanzenschutzmittel.

INTRODUCTION

En 2012, l'analyse la plus complète jamais effectuée de la pollution chimique des eaux de surface suisses a été menée dans cinq bassins versants (*Observation nationale de la qualité des eaux de surface NAWA SPE*) [1, 2]. Elle révèle que la pollution des eaux par les pesticides est supérieure à ce que laissent présager les données du précédent monitoring de routine, qu'il s'agisse du nombre de substances détectées ou de la toxicité de leurs mélanges [3]:

- Sur les 5 sites et lors de chaque mesure, il a été détecté un mélange de 25 à 45 pesticides. Par «pesticides», on désigne à la fois les produits phytosanitaires (agriculture, horticulture, jardins privés [4]) et les biocides (protection de l'homme et de ce qu'il produit, p. ex. désinfectants ou produits pour la protection du bois [5]).
- L'analyse a révélé la présence de 112 substances actives à action pesticide, dont 85 sont autorisées uniquement comme produits phytosanitaires, 2 sont autorisées uniquement comme biocides et 25 comme produits phytosanitaires et biocides ou comme médicaments vétérinaires.
- 31 substances ne respectent pas l'exigence chiffrée de 0,1 µg/l fixée par l'ordonnance sur la protection des eaux et 23 ne

* Contact: simon_lukas.spycher@alumni.ethz.ch

remplissaient pas les critères de qualité écotoxicologiques (14 autorisées uniquement comme produits phytosanitaires, 8 autorisées comme produits phytosanitaires et biocides, 1 autorisée uniquement comme biocide).

L'analyse des données du monitoring biologique a montré que dans les secteurs avec une proportion élevée de grandes cultures et de cultures spéciales, les objectifs écologiques sont moins fréquemment atteints – et de loin – que dans les secteurs avec une grande proportion d'herbages [6]. Il en va de même dans les zones fortement urbanisées. Il est connu que les apports de produits phytosanitaires (jardins privés, espaces verts, etc.) et de biocides (protection des matériaux p. ex.) provenant des zones urbanisées sont parfois plus importants dans les eaux que les apports émanant des activités agricoles [7]. En ce qui concerne toutefois la longueur des tronçons de cours d'eau affectés et le nombre de substances détectées, ainsi que leur toxicité, l'agriculture est considérée comme la première source de micropolluants provenant d'apports diffus [8].

L'administration fédérale travaille actuellement à l'élaboration d'un «plan d'action visant à la réduction des risques et à l'utilisation durable des produits phytosanitaires», dont l'une des tâches principales consistera à présenter des mesures possibles garantissant l'innocuité des apports pour les organismes aquatiques. La présente publication doit apporter une contribution à ce plan d'action.

Afin d'identifier les mesures susceptibles de réduire efficacement les apports de polluants dans les eaux de surface, il est important de connaître les principales sources et voies d'apport de ces substances [8]. Les voies d'apport des produits phytosanitaires peuvent être réparties en quatre groupes:

- entraînement par ruissellement, avec des écoulements d'eau superficiels et des particules du sol;
- apports provenant du drainage des parcelles agricoles;
- dérive (transport par le vent de gouttelettes contenant des substances actives);
- apports ponctuels (causés par des éliminations inappropriées ou par le nettoyage non conforme des pulvérisateurs, des véhicules ou des cuves).

Grandement favorisé par les conditions climatiques de la Suisse, l'entraînement

par ruissellement superficiel est de loin la première voie d'apport [9]. Les apports provenant du drainage sont également très importants, 30% des surfaces d'assolement suisses étant équipées de drains [10]. Comparée à ces deux voies principales, la part des apports par dérive est nettement moins significative [11, 12]. Celle des apports ponctuels provenant de l'agriculture peut en revanche être relativement élevée: elle a été estimée à près de 20% dans une région caractéristique du Plateau suisse [13] et peut atteindre 75% de tous les apports dans le cas des substances actives également utilisées dans les zones urbanisées [13].

PROBLÉMATIQUE ET MÉTHODE

Le présent article évalue les possibilités de réduire les apports de produits phytosanitaires provenant de l'agriculture (qui est proportionnellement le secteur d'activité le plus consommateur de produits phytosanitaires [8]). Selon le «Code international de conduite pour la distribution et l'utilisation des pesticides» publié par la FAO (l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture), il existe trois pistes d'action susceptibles de réduire les apports de produits phytosanitaires dans les eaux [14]:

- la réduction de l'utilisation
- la substitution
- l'optimisation du système de culture et de l'usage des produits phytosanitaires

La réduction de l'utilisation de produits phytosanitaires passe principalement par des systèmes de culture écologiques (production intégrée, agriculture biologique, etc.). La substitution est possible chaque fois qu'il existe des substances actives avec un profil écologique moins néfaste et un risque d'apport moins important. Pour l'optimisation du système de culture, il existe toute une série de mesures de réduction des apports applicables dans le champ, en bordure de champ ou en ce qui concerne l'usage des produits phytosanitaires [12, 15].

À l'aide d'exemples choisis, la présente étude décrit plusieurs possibilités d'action motivées par trois interrogations centrales:

- 1) De quelles cultures proviennent les substances actives détectées dans les eaux de surface?
- 2) Quelles sont les possibilités offertes par les systèmes de culture écologiques –

principalement la production intégrée et l'agriculture biologique – pour réduire les apports de polluants?

- 3) Quel est le potentiel des trois pistes d'actions (réduction, substitution, optimisation) pour réduire la pollution des eaux et quels peuvent être les effets attendus sur le rendement et la rentabilité?

ANALYSE DES SOURCES DE POLLUTION

DONNÉES DU MONITORING CHIMIQUE

Les mesures réalisées en 2012 par l'Eawag dans les cinq bassins versants sélectionnés – Salmsacher Aach (TG), Furtbach (ZH), Surb (AG), Limpach (SO) et Mentue (VD) – ont servi de base à la présente analyse [1, 2]. Ces mesures ont été enregistrées de la mi-mars à la mi-juillet et couvrent donc la majeure partie de la période d'utilisation des produits phytosanitaires. Elles excluent principalement les utilisations d'herbicides requises en automne pour les cultures hivernales, ainsi que les traitements fongicides appliqués aux cultures de colza et de betteraves sucrières durant l'automne [16]. La méthode analytique employée a permis de recenser 80 à 90% de toutes les substances actives utilisées [1]. Bien que le glyphosate soit un produit phytosanitaire très fréquemment utilisé (si on rapporte l'utilisation à la surface), il n'a pas été possible de procéder à son relevé du fait que sa mesure exige une méthode analytique spéciale. Les concentrations mesurées ont été comparées avec les critères de qualité chroniques (CQC) utilisés lors de précédentes études [1, 3]. Un CQC est une valeur seuil dont le dépassement à long terme aura probablement des effets néfastes sur les organismes aquatiques [17].

ATTRIBUTION DES SUBSTANCES ACTIVES AUX DIFFÉRENTES CULTURES

L'interprétation des données de monitoring peut être améliorée par des informations concernant l'utilisation de produits phytosanitaires. C'est pourquoi, depuis plusieurs décennies, la Grande-Bretagne publie, pour chaque culture, la surface traitée avec telle ou telle substance active (p. ex. [18, 19]). Cette information présente également un grand intérêt pour la vulgarisation, la recherche et l'industrie phytosanitaire.

Étant donné le manque d'informations publiquement accessibles pour chacune

DE QUELLES CULTURES PROVIENNENT LES PRODUITS PHYTOSANITAIRES DÉTECTÉS DANS LES EAUX?

Pour répondre à cette question, nous avons défini une clé de répartition inspirée d'une méthode développée en Allemagne [20]. Pour chaque substance active, cette clé prend en compte toutes les cultures autorisées en 2012 ainsi que l'ensemble des ravageurs. Afin de pondérer les différentes autorisations, nous avons également intégré les données suivantes: surface cultivée des différentes cultures concernées en Suisse, recommandations relatives à l'utilisation des substances actives selon les services spécialisés cantonaux d'*Arenenberg* et du *Strickhof* (grandes cultures) et *Agroscope* (arboriculture et viticulture), mention dans l'«assortiment phyto» de *fenaco* (grandes cultures, arboriculture fruitière, viticulture, culture des petits fruits et culture maraîchère), restrictions liées aux autorisations spéciales pour les grandes cultures, principale période d'utilisation (automne et printemps).

Prenons l'exemple du péthoxamide (herbicide) pour illustrer notre démarche: des autorisations existaient en 2012 pour les fraises (455 ha), les haricots issus de la culture maraîchère (295 ha), les courges oléagineuses (49 ha), les légumineuses (3827 ha), le maïs (62 944 ha) et le colza (22 097 ha). Comme l'assortiment phyto de *fenaco* (*Landi*) proposait un produit pour chacune de ces cultures, toutes les cultures ont été pondérées à égalité, ce qui a donné la répartition suivante: attribution de 70% au maïs, de 25% au colza, de 4% aux légumineuses et de <1% aux autres

cultures. Comme les applications sur les cultures de colza sont recommandées en automne, un apport de péthoxamide émanant des surfaces de colza était improbable pendant la période de mesures allant de mars à juillet. Le facteur de correction utilisé pour les cultures hivernales a conduit à l'estimation suivante: attribution de 92% au maïs et de 8% aux autres cultures.

En complément, nous avons tenu compte des quelques données disponibles sur l'utilisation du produit en dehors du secteur agricole (sylviculture, jardins privés, aménagement paysager) [21–23]. Ces données permettent notamment de savoir quelles sont les substances actives qui seraient a priori peu concernées par des mesures mises en œuvre dans le secteur agricole. Le recueil détaillé des données utilisées et de leur analyse est disponible sur demande.

L'étude s'est limitée aux 23 substances actives dont les concentrations dans les 5 bassins versants dépassaient les CQC, car les mises en valeur réalisées sur les fongicides et les insecticides intègrent parfois plusieurs centaines d'indications (combinaison d'une culture et d'un ravageur) et supposent donc un travail considérable. Ce panel a été complété par 10 autres substances actives fréquemment détectées dans les eaux (> 40% des échantillons) et dont la concentration la plus haute était au maximum dix fois inférieure aux CQC.

Encadré 1

des substances actives étudiées, une clé de répartition particulière a été définie (*encadré 1*).

La clé de répartition a permis d'effectuer les attributions suivantes:

- 7 des 33 substances actives analysées ont été attribuées à 100% à la seule culture pour laquelle elles étaient autorisées: le foramsulfuron, le métosulam, le nicosulfuron, l'atrazine (maïs exclusivement), l'isoproturon et le désinfectant de semences fipronil (céréales exclusivement). Le biocide CMIT (agent conservateur) n'a aucun usage phytosanitaire.
- 7 autres substances actives ont été attribuées à une seule culture pour une part très élevée ou majoritaire: > 90% pour le MCPA, la métamitron, la terbuthylazine et le péthoxamide, > 50% pour le prosulfocarbe, le métazachlore et le proyzamide.
- 10 substances actives ont été attribuées à deux cultures dominantes, qui totalisent ensemble plus de 70% de la quantité évaluée.
- 9 substances actives ont été attribuées à trois cultures ou plus.

Le *tableau 1* présente les résultats de l'évaluation. Certaines substances actives ne sont plus autorisées aujourd'hui (atrazine, carbofuran, diazinon, fipronil) ou

sont soumises à des restrictions d'autorisation. Certains pyréthriinoïdes du groupe A tels que la deltaméthrine et la cyperméthrine ne sont plus autorisés pour lutter contre le méligèthe du colza en raison de problèmes de résistance.

Si on répartit entre les différentes cultures les concentrations mesurées pour les 33 substances actives, en tenant compte de l'application estimée, il apparaît que la plupart des dépassements de CQC sont imputables à la culture du maïs (19% de toutes les substances actives et 38% des herbicides). Il est donc intéressant de se demander quels sont les herbicides fréquemment utilisés dans la culture du maïs qui n'ont pas été décelés en fortes concentrations. Une évaluation des herbicides autorisés pour la culture du maïs (réalisée selon la démarche décrite dans l'*encadré 1*) a montré que seules trois autres substances actives sont principalement attribuables à la culture du maïs: la diméthénamide, la sulcotrione et la mésotrione. À partir des données disponibles, on peut en conclure que presque toutes les substances actives utilisées dans la culture du maïs sont rejetées dans les eaux en quantités élevées. Cela s'explique principalement par la grande proportion des surfaces occupées par la culture du maïs, mais aussi par le fait que

le maïs pousse lentement et que le sol reste découvert plus longtemps qu'avec les autres cultures [24, 25] et par la mobilité relative des substances actives utilisées [26]. Mettre en œuvre des mesures visant à réduire les apports issus de la culture du maïs présente donc un intérêt considérable.

CORRÉLATION AVEC L'OCCUPATION DU SOL

À des fins de vérification, les évaluations du *tableau 1* ont été comparées avec la proportion des surfaces occupées par les cultures concernées dans les cinq bassins versants. Pour ce faire, les concentrations moyennes de substances actives utilisées pendant la période de mesures principalement pour une ou deux cultures ont été mises en corrélation avec la proportion des surfaces occupées par les cultures correspondantes dans les cinq bassins versants. Si la comparaison ne doit pas nécessairement faire ressortir une forte corrélation, elle doit montrer que les substances actives clairement attribuables à une seule et même culture ne sont pas décelables en fortes concentrations dans les bassins versants faiblement ou pas du tout occupés par la culture concernée. La *figure 1* en apporte la confirmation pour les cinq bassins versants. Quatre autres comparaisons

Substance active	Champ d'application et statut d'autorisation ¹	RQ _{max} ²	Nombre de dépassements de CQC	Part > 5 ng/l	Principales cultures ³	Incertitude de l'évaluation ⁴
Deltaméthrine	Insecticide (P, B)	667	10	32 ⁵	Colza (40%), c. maraîchère (35%)	**
Chlorpyrifos-méthyl	Insecticide (P)	40	8	48 ⁵	C. maraîchère (45%), arboriculture (40%)	**
Lambda-cyhalothrine	Insecticide (P, B)	25	7	23 ⁵	Colza (40%), c. maraîchère (35%)	**
Métazachlore	Herbicide (P)	8,9	12	44	C. maraîchère (65%) ⁶	***
Foramsulfuron	Herbicide (P)	8,7	4	9	Maïs (100%)	***
Thiaclopride	Insecticide (P, B)	6,5	6	22	Colza (45%), c. maraîchère (20%), arboriculture (15%)	*
S-métolachlore	Herbicide (P)	3,6	9	98	Maïs (70%), betteraves (25%)	**
Diazinon	Insecticide (PX, BX, V)	2,9	8	47	C. maraîchère (35%), domaine non-agricole (30%), arboriculture (25%)	*
Terbuthylazine	Herbicide (P, BX)	2,9	6	62	Maïs (90%)	***
Diuron	Herbicide (P, B)	2,6	13	60	Arboriculture (55%), viticulture (30%)	**
Cyperméthrine	Insecticide (P)	2,5	7	77 ⁵	C. maraîchère (40%), autres utilisations (30%) ⁷ , colza (25%)	**
Carbofuran	Insecticide (P)	2,3	4	22	C. ornementale (50%), betteraves (25%)	*
Flufénacet	Herbicide (P)	2,1	3	44	Maïs (65%), céréales (25%) ⁸	**
Cyprodinil	Fongicide (P)	2,1	1	38	Viticulture (45%), céréales (25%), arboriculture (15%)	*
CMIT	Bactéricide (B)	1,8	2	9		***
Métosulam	Herbicide (P)	1,4	1	4	Maïs (100%)	***
Dicamba	Herbicide (P)	1,3	1	20	Céréales (40%), herbages (30%), maïs (25%)	*
Nicosulfuron	Herbicide (P)	1,3	2	38	Maïs (100%)	***
Fipronil	Insecticide (PX, B, V)	1,2	1	2	Céréales (100%)	***
Prosulfocarbe	Herbicide (P)	1,1	1	44	Pommes de terre (85%) ⁹	***
Isoproturon	Herbicide (P, B)	1,1	1	67	Céréales (100%)	***
Linuron	Herbicide (P)	1,0	1	38	Pommes de terre (25%), c. maraîchère (25%), autres (15%)	*
Péthoxamide	Herbicide (P)	1,0	1	24	Maïs (90%) ⁶	***
Métribuzine	Herbicide (P)	1,0	0	40	Pommes de terre (70%), céréales (15%)	**
Atrazine	Herbicide (PX)	0,6	0	71	Maïs (100%)	***
2,4 D	Herbicide (P)	0,4	0	76	Herbages (35%), céréales (25%) ⁸ , arboriculture (20%), aménagement paysager (20%)	*
Métamitron	Herbicide (P)	0,4	0	62	Betteraves (95%)	***
Thiamethoxam	Insecticide (P, B)	0,3	0	44	Désinfectant de semences de céréales (35%) ⁷ , aménagement paysager ou jardins privés (25%), arboriculture (20%)	**
Propyzamide	Herbicide (P)	0,2	0	60	C. maraîchère (65%) ⁶	**
MCPA	Herbicide (P)	0,2	0	76	Herbages (90%)	**
Carbendazime	Fongicide (P, B)	0,2	0	69	Arboriculture (35%), c. maraîchère (20%)	*
Mécoprop	Herbicide (P)	0,1	0	98	Herbages (55%), céréales (30%)	*
Azoxystrobine	Fongicide (P)	0,1	0	76	Céréales (25%), viticulture (20%), pommes de terre (15%), c. maraîchères (15%)	*

¹ P: produit phytosanitaire; B: biocide; V: médicament vétérinaire; X: autorisé temporairement de 2005 à 2012, mais plus aujourd'hui

² Quotient de risque RQ_{max} = MFC_{max}/CQC, avec MFC_{max}: concentration mesurée la plus haute et CQC: critère de qualité chronique

³ Cultures impliquées dans la pollution des eaux pendant la période de mesures. La part des cultures pour lesquelles l'utilisation de produits phytosanitaires est recommandée en automne ou en printemps a été réduite d'un facteur 5-20 déterminé en fonction de la dégradabilité

⁴ Incertitude quant à la part des différentes cultures: *** grande certitude (attribution à une seule culture ou existence d'une culture ou d'une indication clairement dominante), ** certitude moyenne, * grande incertitude (nombreuses cultures et indications)

⁵ Part supérieure au seuil de détection (au lieu de part supérieure à 5 ng/l)

⁶ Colza en automne uniquement

⁷ Sylviculture principalement [21]

⁸ Céréales en automne et au printemps

⁹ Céréales en automne uniquement

Tab. 1 Attribution des substances actives analysées aux différentes cultures. Les substances actives sont classées dans l'ordre décroissant des quotients de risque RQ (rapport entre la concentration mesurée la plus haute et les critères de qualité chroniques). Les parts attribuées à chaque culture sont arrondies aux 5% supérieurs. Les cultures dont la part est inférieure à 15% ne sont pas représentées

Zuordnung der untersuchten Wirkstoffe zu den Kulturen. Die Wirkstoffe sind nach abnehmender Höhe des Risikoquotienten RQ (höchste gemessene Konzentration dividiert durch chronisches Qualitätskriterium) geordnet. Die Anteile der Kulturen sind auf 5% gerundet. Kulturen mit einem Anteil < 15% sind nicht wiedergegeben

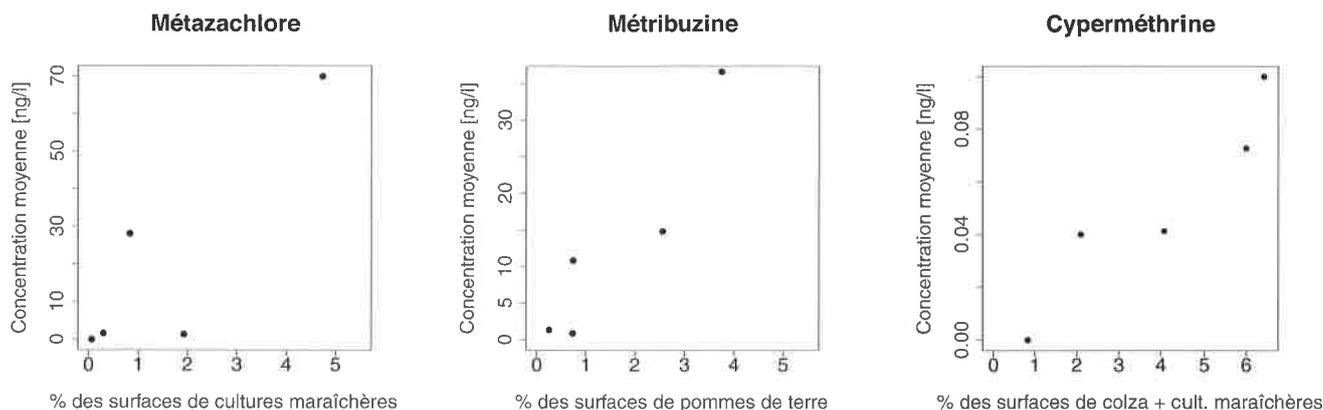


Fig. 1 Concentration moyenne dans les 5 bassins versants pendant la période de mesures, en relation avec le pourcentage des surfaces occupées par les cultures les plus pertinentes (selon tab. 1) pour le métazachlore, la métribuzine et la cyperméthrine

In den 5 Einzugsgebieten von März bis Mitte Juli gemessene mittlere Konzentration, aufgetragen gegen den prozentualen Flächenanteil (an gesamter Bodennutzung) der für Metazachlor, Metribuzin und Cypermethrin gemäss Tabelle 1 relevantesten Kultur(en)

entre la concentration moyenne et les cultures ont également fait apparaître une corrélation entre le faible pourcentage de surfaces occupées par la culture concernée et l'absence de concentrations élevées. Il s'agissait en l'occurrence de la métamitron (betteraves sucrières), du propyzamide (cultures maraîchères), du prosulfocarbe (pommes de terre) et de la carbendazime (cultures maraîchères et arboriculture). Aucune relation entre la concentration moyenne et l'occupation du sol par la culture n'a été établie pour l'isoproturon, la lambda-cyhalothrine et la deltaméthrine. Dans le cas du diuron, les concentrations sont apparues en forte corrélation avec la proportion des surfaces urbanisées, ce qui est déjà ressorti dans d'autres études [7]. Aucune comparaison n'a été possible pour les substances actives utilisées dans la culture du maïs, car la proportion des surfaces occupées par cette culture dans les 5 bassins versants est presque partout aussi élevée. Dans l'ensemble, les comparaisons confirment la plausibilité des évaluations présentées dans le tableau 1.

BILAN: PRINCIPALES SOURCES DE POLLUTION

- La plupart des concentrations d'herbicides supérieures aux CQC peuvent être attribuées à la culture du maïs. Des dépassements ont aussi été démontrés pour les herbicides utilisés dans les cultures maraîchères ainsi que dans les cultures de pommes de terre, de betteraves sucrières et de céréales. Dans le cas du diuron, la corrélation avec

la proportion des surfaces urbanisées laisse penser que la principale source de pollution est l'utilisation de biocides. Concernant les céréales et le colza, il est à noter que la période de mesures ne couvre pas les pulvérisations d'herbicides pratiquées en automne.

- Les insecticides détectés dans les eaux peuvent être attribués principalement à la culture maraîchère et du colza, mais avec un degré d'incertitude élevé. Il n'est pas possible de se prononcer sur l'origine des apports de fongicides.

Compte tenu de ce bilan, les considérations qui suivent sur les possibilités de réduire les apports de polluants dans les eaux se concentrent premièrement sur les herbicides utilisés dans la culture du maïs et dans d'autres cultures en lignes (p.ex. betteraves sucrières) et deuxièmement sur le colza. L'importance de la culture du colza dans la problématique est attestée également par la comparaison historique présentée au chapitre suivant.

POTENTIEL DES SYSTÈMES DE CULTURE ÉCOLOGIQUES

La stratégie en trois parties (réduction, substitution, optimisation) n'est pas nouvelle. Depuis toujours, elle fait partie intégrante des systèmes de culture écologiques et plus particulièrement de la production intégrée (PI) et de l'agriculture biologique (bio) [27, 28]. Ces deux systèmes sont basés sur le principe de précaution [29-32]. Ils incluent de manière explicite

la protection des eaux et respectent l'agro-écosystème en misant prioritairement sur les processus naturels de régulation. L'agriculture biologique est le système qui va le plus loin dans cette voie, puisqu'elle renonce aux produits phytosanitaires de synthèse (réduction jusqu'à zéro). Elle est également la plus cohérente en matière de substitution (remplacement par des agents ayant un profil plus écologique, ou lutte biologique) et en matière d'optimisation du système de culture. Puisque la proportion des surfaces occupées par l'agriculture biologique dans la zone de plaine atteint seulement 7,1% (contre 12,3% en moyenne sur l'ensemble du territoire suisse) [33], son développement dans les secteurs de grandes cultures constituerait une stratégie efficace de réduction des apports de produits phytosanitaires dans les eaux - d'autant que les besoins du marché suisse sont loin d'être couverts (on estime par exemple que le blé panifiable biologique provient seulement à 34% de la production nationale [34]). Pour autant, même l'agriculture biologique ne peut exclure fondamentalement une pollution des eaux par des produits phytosanitaires (p.ex. cuivre, pyrèthrine, spinosad [35]).

Le présent document se focalise sur le potentiel de la production standard dominante en termes de superficie (à savoir la production standard selon les prestations écologiques requises PER) et sur les possibilités de réduire les apports de produits phytosanitaires grâce à la production intégrée.

QUELLE CONTRIBUTION LA PI APPORTE-T-ELLE À LA PROTECTION DES EAUX? – GENÈSE ET PERSPECTIVES

Dans la perception du public, la production intégrée (PI) est souvent assimilée à la production standard moderne (selon les prestations écologiques requises PER) ou confondue avec la lutte intégrée (integrated pest management). Cette dernière est née dans les années 1950 en réaction aux problèmes de résistance des ravageurs et de pollution environnementale liés à un usage croissant de produits phytosanitaires chimiques, principalement dans l'arboriculture et la viticulture [43]. La première définition de la production intégrée proposée par la FAO laissait une grande marge d'interprétation [44]. Depuis, bon nombre de définitions se sont succédées [45]: celle qui semble convenir aujourd'hui décrit la production intégrée comme un concept global, qui considère l'exploitation agricole comme un tout et préconise d'entretenir et d'exploiter l'agroécosystème de manière ciblée, dans le respect manifeste des sols, des eaux, de l'air, des végétaux et des animaux. De même que l'agriculture biologique, la production intégrée ne se limite pas à des aspects purement techniques: elle entend également restaurer «l'art de cultiver» mis à mal par la stratégie de rendement maximal qui n'a cessé de se développer depuis les années 1970 – un art responsable, curieux et créatif (se référer à l'histoire des agricultures intégrée et biologique [27, 31, 38, 39, 46-48]). À une époque où la mise en œuvre concrète de la production intégrée était encore bien vague dans d'autres pays ou ne parvenait pas à se défaire des prescriptions légales applicables à tous les agriculteurs sans distinction, la production intégrée pratiquée en Suisse a connu une autre évolution.

Depuis 1992, la Confédération encourage la culture extensive des céréales (sans aucun fongicide, insecticide, ni régulateur de croissance). La production végétale particulièrement respectueuse de l'environnement et la détention respectueuse du bien-être des animaux bénéficient quant à eux, depuis 1993, d'un système de contributions décidé par le Parlement fé-

déral. Cinq programmes écologiques soutenant entre autres la production intégrée et l'agriculture biologique ont été si bien accueillis par les agriculteurs qu'ils ont rapidement commencé à donner des résultats positifs [49, 50]. Dès les premières années, les exploitations de grandes cultures – qui jouent un rôle essentiel dans la protection des eaux – ont manifesté pour la production intégrée un intérêt dont la progression a été des plus rapides. Leur intérêt pour l'agriculture biologique n'a pas suivi la même évolution, le seuil à franchir pour la reconversion biologique d'une exploitation de grandes cultures étant bien plus haut (en plaine, la part de l'agriculture biologique atteint 7,1% contre 12,3% en moyenne sur l'ensemble du territoire suisse) [33].

Dans les années 1990, la production intégrée encouragée par l'État reposait sur le volontariat. Les agriculteurs qui optaient pour ce système appartenaient à une élite et pouvaient en être fiers. En 1999, le programme écologique relatif à la production intégrée a été arrêté et remplacé par les PER dont la satisfaction conditionne désormais le droit des agriculteurs à percevoir des paiements directs. D'un programme attrayant basé sur le volontariat, la Suisse est passée à un système obligatoire conditionnant le droit aux contributions d'État [51].

Qu'en est-il des initiatives privées? L'année 1989 a vu la création d'une association suisse des paysannes et paysans pratiquant la production intégrée, connue aujourd'hui sous le nom IP-Suisse. Depuis 1995, IP-Suisse mise sur le marché des labels en se démarquant par des prescriptions supplémentaires, plus strictes que celles des PER, notamment en ce qui concerne le respect de la biodiversité sur l'ensemble de l'exploitation et la réduction de l'utilisation de produits phytosanitaires pour certains produits agricoles répondant à la demande du marché (propre liste de produits phytosanitaires, réduite sur la base de critères écologiques). La demande du marché est aujourd'hui suffisamment

forte pour intéresser les agriculteurs à la PI. Pour autant, leur motivation à pratiquer ce type d'agriculture ne devrait pas reposer uniquement sur le bonus tarifaire associé à certains produits, mais également sur une démarche volontaire et sur la place laissée à la créativité et à la capacité d'innovation de chaque agriculteur. Car c'est le libre choix de l'agriculteur, la PI lui permet de se sentir appartenir à un groupe pionnier. Sur la base de ses connaissances et de ses capacités, il aspire à produire à un haut niveau, tout en exploitant du mieux qu'il peut les processus naturels de régulation. Dans cette démarche, il est important qu'il bénéficie d'un conseil compétent et dispose de sources d'information parfaitement adaptées aux besoins des agriculteurs et tenant compte de la diversité des points de vue. Cela signifie par exemple que les contenus des «assortiments phyto» de *fenaco* relatifs à la protection de l'environnement ne devraient pas être raccourcis, mais au contraire même être étendus (un bon exemple était l'ancienne classification des produits phytosanitaires en trois catégories de menace environnementale, ce qu'on a malheureusement abandonné récemment [52]). L'existence de différents labels peut avoir un effet positif en créant une concurrence motivante entre prestataires (plusieurs labels pour l'agriculture biologique et la production intégrée). Outre le respect de certaines exigences minimales, chaque label peut définir ses propres priorités, par exemple dans le domaine de la biodiversité, de la consommation énergétique ou de l'utilisation des produits phytosanitaires [53].

Pour garantir le succès durable de la production intégrée, les principaux acteurs (en premier lieu les agriculteurs) et les parties prenantes (principalement les consommateurs et le marché) doivent être impliqués de façon constructive. Les organisations de labellisation et leurs membres peuvent jouer un rôle pionnier dans la mise en application concrète de nouveaux résultats de recherche et de nouvelles pratiques.

Encadré 2

Les améliorations concrètes pouvant être apportées par la production intégrée sont peu présentes dans le débat actuel sur la pollution des eaux. La Suisse a pourtant été pionnière dans ce domaine entre la fin

des années 1970 et les années 1990 [36-39], exerçant même une influence déterminante sur les évolutions observées au plan international [40-42]. L'idée de base de la production intégrée est d'exploiter

en priorité les processus naturels de régulation, en vue de réduire l'utilisation des matières auxiliaires et de garantir aux agriculteurs un revenu durable. L'objectif visé est une agriculture respectueuse

de l'environnement, réalisant de bons rendements et menant à des produits de qualité, apte à préserver ou à restaurer la fertilité des sols et un environnement diversifié [16, 28, 40].

L'étude de base ayant servi à évaluer la nécessité des mesures phytosanitaires et leur possibilité de restriction est «l'Analyse de la situation phytopathologique en Suisse en 1986», réalisée par la Société suisse de phytologie [54]. Cette société scientifique a été fondée en 1982 en réaction au malaise croissant concernant l'emploi de substances chimiques pour la protection des végétaux; son but était d'associer plus étroitement la vulgarisation agricole, l'expérience d'agriculteurs innovants, les consommateurs, le marché et la politique agricole [29, 55, 56]. Dans son analyse de la situation phytopathologique, elle a évalué, pour toutes les cultures importantes, les possibilités offertes par une production aussi respectueuse de l'environnement que possible [54]. Implicitement, et parfois de manière explicite, elle a pris en considération les trois pistes d'action que sont la réduction de l'utilisation de produits phytosanitaires, la substitution de certains d'entre eux et l'optimisation du système de culture et de l'agroécosystème. Des éléments essentiels de l'ordonnance instituant des contributions pour des prestations particulières en matière d'écologie dans l'agriculture (OCEco) adoptée en 1993, et de l'ordonnance sur les paiements directs (OPD) et au système des PER reposent sur l'analyse de la situation phytopathologique et des rapports de suivi. Les principaux éléments concernant directement la protection des végétaux étaient l'assolement régulier, l'introduction de bilans de fumure équilibrés et de seuils d'intervention, la préférence donnée aux produits phytosanitaires qui ne nuisent pas aux auxiliaires, l'instauration d'une part minimale de surfaces de compensation écologique (les actuelles «surfaces de promotion de la biodiversité») et, plus tard, le système des «autorisation spéciales» pour les produits phytosanitaires. La plupart de ces contenus ont été repris en 1999 dans le nouveau système des prestations écologiques requises (PER) conditionnant l'accès aux paiements directs.

Les concepts qui ont été développés sur la base du document «Analyse de la situation phytopathologique» représentaient une bonne solution pour les structures d'ex-

ploitation de l'époque. Mais la situation a changé: la mécanisation a nettement progressé, le temps de travail nécessaire a été réduit d'un facteur 2-4 [65], la taille des exploitations n'a cessé d'augmenter, les tâches accomplies par les entreprises de travaux agricoles se sont multipliées, les désinfectants de semences ont pris plus d'importance et de nouvelles résistances sont apparues. Les solutions aux problèmes d'aujourd'hui doivent tenir compte de ces modifications.

TENDANCES POSITIVES ET NÉGATIVES DE L'UTILISATION D'INSECTICIDES

Parce que les pratiques phytosanitaires ne sont pas suffisamment documentées, il est difficile d'identifier clairement leurs évolutions positives ou négatives et surtout de les étayer par des données. Si les données historiques font cruellement défaut en Suisse, c'est notamment parce qu'il a fallu attendre 2006 pour obtenir des données cohérentes sur les ventes. Une étude du Fonds national suisse (FNS)

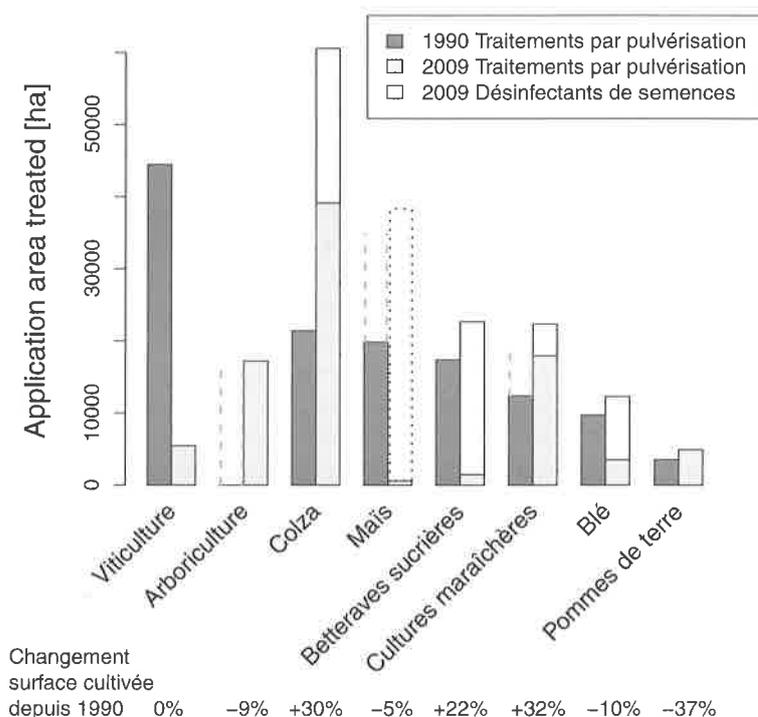


Fig. 2 Évolution des surfaces traitées avec des insecticides, comparaison entre 1990 et 2009¹.

Les colonnes gris clair représentent les désinfectants de semences [59]². Les traitillés indiquent l'absence d'informations comparables pour 1990 (fruits à pépins et désinfectants de semences; aucun néonicotinoïde n'était encore employé en 1990)

Entwicklung der mit Insektiziden behandelten Fläche, Vergleich zwischen 1990 und 2009¹.

Die hellgrauen Balken stellen Saatgutbehandlungen dar [59]². Gestrichelte Linien weisen darauf hin, dass für 1990 keine vergleichbaren Informationen vorliegen (Kernobst und Saatbeizmittel, wobei 1990 noch keine Neonikotinoide eingesetzt wurden)

¹ L'enquête de 2009 n'a fourni aucune donnée confirmée sur la fréquence des traitements des cultures maraîchères; c'est pourquoi on a appliqué la même fréquence qu'en 1990. Les données se limitent aux choux, aux salades, aux carottes et aux oignons

Bei Gemüse gab es in der Erhebung von 2009 keine gesicherten Angaben zur Behandlungshäufigkeit, weshalb für 2009 die gleiche Behandlungshäufigkeit wie 1990 angenommen wurde. Die Angaben beschränken sich auf Kohlgewächse, Salate, Karotten und Zwiebeln

² Pour les désinfectants de semences du maïs, il faut distinguer le méthiocarbe, déjà utilisé depuis longtemps, et les néonicotinoïdes, dont la part pour 2009 n'est pas connue

Bei den Saatbeizmitteln im Maïs muss unterschieden werden zwischen dem bereits länger eingesetzten Methiocarb und den Neonikotinoïden, deren Anteile für 2009 aber unbekannt sind

dressant la liste complète des fréquences de traitement en 1990 [57] sert toujours de point de comparaison pour les derniers relevés d'Agroscope [58]. Même si ces deux sources de données ne reposent pas sur des relevés couvrant l'ensemble de la Suisse, il est possible de dégager des tendances, notamment en présence d'écart importants – ce qui est le cas pour les utilisations d'insecticides. Par analogie avec la méthode employée dans l'étude de la FNS, la «surface traitée avec des insecticides» (*application area treated*) illustrée à la figure 2 est le produit mathématique de la surface cultivée et du nombre moyen d'interventions. Les différences observées entre 1990 et 2009 s'expliquent moins par des variations de surface cultivée (hausse maximale de 22% pour les betteraves sucrières et baisse maximale de 37% pour les pommes de terre) que par des variations du nombre d'interventions (hausse de 120% pour les pommes de terre et baisse de près de 90% pour les vignes).

RÉUSSITE DANS LA VITICULTURE

La viticulture est le domaine dans lequel la surface traitée avec des insecticides a été la plus fortement réduite. Cette réduction s'explique par la mise en œuvre réussie de trois mesures qui illustrent parfaitement la philosophie de la PI [60]:

- protection phytosanitaire indirecte par le biais d'enherbement stimulant les auxiliaires [61]
- utilisation de phéromones aidant à lutter contre le ver de la grappe [62]
- utilisation préférentielle de produits inoffensifs pour les auxiliaires, choisis conformément aux recommandations et aux consignes des établissements de recherche et de l'organisation de labellisation *Vitiswiss*

La clé de cette réussite est un aménagement des vignes basé sur l'idée que le vignoble est un écosystème fonctionnel dans lequel des mesures de culture et de protection des végétaux peuvent avoir des effets positifs et négatifs. C'est sur ce fondement que de nouveaux concepts ont pu être mis en pratique avec la collaboration de viticulteurs motivés et de représentants d'association engagés.

ÉVOLUTION PROBLÉMATIQUE DE LA CULTURE DU COLZA

C'est dans les cultures de colza que l'utilisation des insecticides a le plus pro-

gressé. Cette évolution tient à l'augmentation des traitements par pulvérisation en surface, mais aussi aux traitements de semences, qui ont gagné de l'importance dans les années 1990 avec l'introduction des néonicotinoïdes (pratique suspendue depuis 2014). Pour ces substances actives utilisées comme insecticides, le dosage par hectare se situe dans le même ordre de grandeur que les applications par pulvérisation [59]. Alors que les fongicides n'étaient pas encore pulvérisés en 1990, leur recensement en 2009 fait apparaître 0,8 traitement par an. Les facteurs essentiels qui ont conduit à la forte hausse des utilisations de produits phytosanitaires dans les cultures de colza nécessiteraient une analyse séparée.

AUTRES EXEMPLES

L'un des premiers succès de la PI et de la recherche agronomique appliquée est le développement et la diffusion de la méthode permettant de lutter contre la pyrale du maïs avec l'aide de minuscules guêpes du genre *trichogramma* (méthode déployée dans une plus large mesure depuis 1984). Alors que certains pays combattaient ce ravageur avec des substances chimiques [63], la Suisse est parvenue avec peu de moyens à promouvoir une pratique qui se substitue à l'application de produits insecticides sur plusieurs milliers d'hectares chaque année. Pour autant, cette réussite ne s'est pas répercutée sur les statistiques: la forte diminution de la surface traitée avec des insecticides entre 1990 et 2009 (*cf. fig. 2*) n'est pas le résultat d'un changement dans la lutte contre la pyrale du maïs, mais de l'utilisation nouvelle des désinfectants de semences dans la lutte contre des ravageurs du sol.

Dans les cultures de betteraves sucrières également, les traitements par pulvérisation en surface ont cédé la place aux désinfectants de semences. Le relevé d'Agroscope ne contenant aucune information sur les cultures maraîchères intensives, les indications prises en compte sont celles de 1990. De fait, la hausse illustrée à la figure 2 est imputable uniquement à l'augmentation de la surface cultivée. On notera ici que le nombre d'interventions recensé dans les données suisses prises en compte (1990) est plutôt inférieur à celui publié dans de récentes enquêtes étrangères sur l'utilisation des produits phytosanitaires dans les cultures maraîchères, principalement

pour les carottes et les salades [64, 19]. Dans le cas du blé, la réduction des traitements de surface s'explique essentiellement par l'introduction de la culture extenso, qui couvre aujourd'hui près de 50% de la surface.

BILAN

Les ressources investies dans la recherche agronomique appliquée et dans la vulgarisation agricole durant les années 1990 ont abouti à une réduction de l'emploi des insecticides dans différentes cultures. Les données disponibles démontrent tout au moins l'aspect tendanciel du phénomène.

RÉDUCTION DES APPORTS DE PLUSIEURS CULTURES IMPORTANTES

Dans les pages suivantes, plusieurs possibilités concrètes inspirées des trois pistes d'action du Code de conduite de la FAO ont été évaluées pour la culture du maïs, de la betterave sucrière et du colza. Ces pistes d'action sont la réduction de l'utilisation de produits phytosanitaires, la substitution par des substances actives ayant un profil écologique moins néfaste et l'optimisation de l'usage des produits. Dans la culture du maïs, les produits pulvérisés sont presque uniquement des herbicides, aucun fongicide n'étant autorisé; le traitement par pulvérisation en surface avec des insecticides chimiques de synthèse nécessite une autorisation spéciale, si bien que ce procédé ne concerne qu'une superficie très restreinte (comme précisé dans le Rapport agricole de l'OFAG [65]). Pour ces raisons, l'évaluation portant sur la culture du maïs a seulement pris en compte les applications d'herbicides pratiquées sur quelque 60 000 ha. L'emploi d'herbicides est également la mesure phytosanitaire la plus fréquente dans la culture de la betterave sucrière (3,8 traitements par an d'après les relevés d'Agroscope). Si le traitement insecticide est prédominant dans la culture du colza, les herbicides et les fongicides sont eux aussi fréquemment utilisés, si bien que l'évaluation de cette culture a tenu compte des trois champs d'action (insecticides, herbicides, fongicides).

MAÏS

Réduction

Dans certaines phases de son développement, le maïs est sensible au manque de nutriments et plus encore au manque

Procédé	Site	Rentabilité comparative	Rendement	Réduction de l'usage d'herbicides	Autres aspects étudiés
Procédé complet de production intégrée selon [68] avec traitement localisé sur le rang et sarclage	Canton de Berne [69, 70] 1985-1991	MBC ¹ de -4,4% à +3,0%	de -3,0% à -6,1%	73%	Auxiliaires, prolifération des adventices, maladies, ravageurs, coûts, biologie du sol (CO ₂ , vers de terre, dégradation de la cellulose, ATP)
Traitement localisé sur le rang et sarclage	Canton de Thurgovie [71] 1988	différente selon les sites ²	de +4% (n.s.) à +11% (s.)	67%	
Traitement localisé sur le rang et sarclage ou désherbage mécanique (production biologique)	Canton de Lucerne 1997-2002 [72]	-7% ³	-5% pour le maïs à ensiler et -8% pour le maïs-grain ⁴	63%	Prolifération des adventices, coûts, énergie, structure du sol, auxiliaires, biodiversité
		+97% ³	-6% pour le maïs à ensiler ⁵ et -14% pour le maïs-grain	100%	
Traitement localisé sur le rang et sarclage	Bade-Wurtemberg (Allemagne) 2011-2012 [73] ⁶	-5% (n.s.) ⁷	-3% (n.s.)	70%	Prolifération des adventices, coûts
Traitement localisé sur le rang et sarclage/ 7 procédés (mécaniques) sans herbicides	Ombrie (Italie) [74] 2002-2004	aucune donnée	de -2% à -5% (n.s.) de -2% à 45% ⁸ (s.)	50% 100%	Prolifération des adventices
Désherbage mécanique (production conventionnelle)	Lelystad (Pays-Bas) 2009-2013 [75]	encore aucune donnée	-3% ⁹	100%	Coûts, intrants (pas encore publié)

n.s.: non significatif; s.: significatif [d'après le test de la plus petite différence significative (LSD) de Fisher]

¹ MBC: marge brute comparable, par rapport au système de culture intensive

² Coûts 2 à 4 fois supérieurs selon le taux d'utilisation des machines, cependant avec des coûts très bas pour le traitement par pulvérisation en surface avec de l'atrazine

³ Différence de marge brute entre la PI intensive et la PI extensive ou la production biologique [dans ce cas, le calcul est basé sur le prix à la production du produit bio]

⁴ Fumure inférieure de 40-33 kg N/ha à celle du traitement par pulvérisation en surface avec des herbicides

⁵ Moyenne pour l'ensemble de l'essai de systèmes de culture mené de 1991 à 2008 [76]

⁶ L'étude livre les résultats d'un autre procédé testé en Italie [basé sur un système de modélisation qui indique si les mauvaises herbes doivent être régulées chimiquement ou mécaniquement] et d'un procédé testé en Slovénie [qui combine la réduction de la quantité d'herbicides et la régulation mécanique des mauvaises herbes]. Dans les deux cas, le rendement et le résultat brut n'enregistrent pas de hausse ou de baisse significative.

⁷ Différence du résultat brut

⁸ Procédé avec pertes de rendement élevées, pas entièrement éprouvé dans la pratique et plutôt de nature expérimentale

⁹ Labour (pertes de rendement plus élevées en l'absence de labour, surtout dans le cas du travail du sol de type «strip-till»)

Tab. 2 Résultats des études sur la réduction de l'utilisation d'herbicides dans les cultures de maïs. Base de comparaison dans l'ensemble des études: traitements par pulvérisation en surface d'herbicides avec les dosages et les fréquences de traitement habituels de la région
Resultate von Studien zu reduziertem Herbizideinsatz im Maisanbau. Als Vergleich diente in allen Studien der ganzflächige Herbizideinsatz mit in der Region üblichen Aufwandmengen und Behandlungshäufigkeiten



Fig. 3 Le désherbage mécanique a fait des progrès. À gauche: sarcluse avec guidage manuel (photo: R. Tschachtli, BBZN). À droite: sarcluse avec guidage par caméra

Die mechanische Unkrautregulierung hat sich weiterentwickelt. Links: Hackgerät mit manueller Lenkung (Foto: R. Tschachtli, BBZN) und rechts: Hackgerät mit Kamerasteuerung

d'eau. La régulation des adventices est donc essentielle. Dans les années 1990, le traitement localisé sur le rang était une pratique courante pour réduire l'utilisation des herbicides; le procédé consiste

à pulvériser le produit herbicide uniquement sur une bande qui suit les lignes de la culture et à prévoir deux passages de bineuse pour le sarclage des interlignes. Un désherbage entièrement mécanique

est également possible, surtout si une solution est trouvée pour empêcher l'envasement des lignes de plantation par les adventices. L'utilisation de sous-semis freinant la prolifération des adventices

est une autre possibilité particulièrement intéressante pour lutter contre l'érosion et la lixiviation des nitrates. Le procédé consiste à semer – après le semis du maïs (traitement localisé sur le rang évent.) et après un ou plutôt deux passages de sarcluse – une variété appropriée de légumineuse et/ou de graminée (p. ex. du trèfle blanc ou du ray-grass anglais) qui empêche la prolifération des adventices tardives mais ne gêne pas la croissance du maïs (procédés «intégré B» et «bio» [16]; voir aussi [67]). Des essais réalisés par le FiBL (*Institut de recherche de l'agriculture biologique*) dans les années 1980 ont montré que le rendement de maïs obtenu avec les sous-semis de trèfle étudiés était légèrement inférieur au rendement d'un contrôle chimique mais supérieur au rendement d'un désherbage entièrement mécanique [66]. La *Haute école des sciences agronomiques, forestières et alimentaires* (HAFL) mène actuellement un projet sur la capacité des sous-semis à se substituer entièrement aux herbicides dans la culture du maïs [116].³

Le *tableau 2* recense les diverses méthodes de régulation des adventices testées avec une utilisation d'herbicides réduite ou proscrite.

Les rendements obtenus avec un traitement localisé sur le rang varient très peu des rendements obtenus avec un traitement par pulvérisation en surface. La hausse significative de rendements dans certains essais réalisés par l'*Agroscope* à Tänikon est attribuée par l'auteur lui-même à l'ameublissement du sol [71]. Si les rendements des procédés bannissant l'utilisation d'herbicides varient selon le site et le procédé, ils enregistrent en règle générale une réduction inférieure à 10%. Le principal obstacle à la réduction de l'utilisation d'herbicides n'est pas son effet sur le rendement, mais une plus grande charge de travail pour l'agriculteur et une incertitude quant à la possibilité de contrôler la prolifération des adventices problématiques de manière suffisante.

Les données relatives à la rentabilité présentent de telles disparités qu'elles sont difficilement comparables. Dans l'évaluation la plus complète réalisée à ce jour dans les conditions typiques de la Suisse

(Essai de systèmes de culture à Burgrain), des traitements avec des pulvérisateurs équipés pour le traitement localisé sur le rang ont été testés de 1997 à 2002. D'après les résultats de l'étude, le traitement localisé sur le rang impose une charge de travail supplémentaire de 6 heures de main d'œuvre par hectare [77]. Cette valeur élevée s'explique en premier lieu par le fait qu'au moment de l'étude, le traitement localisé sur le rang requerrait encore l'intervention de deux personnes (*fig. 3, à gauche*).

Comparées aux anciennes sarcluses, les sarcluses de nouvelle génération n'ont pas besoin d'être guidées par une deuxième personne et permettent parfois de doubler la largeur de travail (*fig. 3, à droite*). Pour apprécier leur rentabilité, il serait toutefois utile de disposer de données plus récentes. Au cours d'essais de longue durée menés à Burgrain, on a pu observer la présence d'un stock important de graines de mauvaises herbes en état de germer, mais aucun impact sur le rendement, si bien que le site a été jugé adéquat (absence de certaines plantes adventices telles que le chardon des champs) [78].

Substitution

En fonction de leur dégradabilité et de leur capacité de sorption, les substances actives utilisées sont plus ou moins susceptibles de pénétrer dans les eaux via les écoulements superficiels et les drains. Pour évaluer la probabilité que ces substances parviennent dans les eaux, une première approche a consisté à définir un indicateur basé sur la constante de sorption et la demi-vie des substances actives [26]. Pour les substances actives les plus utilisées dans la culture du maïs, la probabilité de parvenir dans les eaux calculée par l'indicateur varie d'un facteur 100 entre la valeur la plus haute (nicosulfuron) et la valeur la plus basse (pendiméthaline) [26]. L'utilisation préférentielle de substances actives moins mobiles et plus dégradables mériterait une évaluation approfondie.

Optimisation

Lorsque des produits phytosanitaires sont utilisés dans une culture, il existe plusieurs possibilités (décrites en détail dans d'autres publications) pour diminuer les apports par dérive [79, 80], entraînement par ruissellement [81, 82] et apports ponctuels [83]. Des concepts de mise en

œuvre existent également [84–86]. Ce qui fait largement défaut en revanche, ce sont des mesures de réduction des apports provenant du drainage des champs [87]. L'efficacité des mesures visant à réduire l'entraînement par ruissellement (bandes tampons en bordure de champ, bandes de protection contre l'érosion dans le champ, lit de semence grossier, etc.) dépend fortement des conditions locales (capacité d'infiltration et de rétention d'eau, topographie, connexion entre les eaux). L'une des mesures jugées essentielles dans plusieurs documents de vulgarisation (p. ex. [82]) est le travail du sol réduit ou travail de conservation du sol (*reduced soil tillage, conservation tillage*). Le potentiel de cette technique a été évalué de manière exhaustive [88, 89]. Le potentiel de réduction de l'entraînement par ruissellement peut varier très fortement en fonction de la nature du sol, de la culture et de la technique de travail du sol (labour, semis sous litière, semis en bande fraisée, semis direct). Pour cette raison la situation spécifique à la Suisse est traitée ci-dessous.

La part du semis direct se situe aux alentours de 4% de l'ensemble la surface cultivée [90]. Dans les cultures de maïs, la méthode la plus utilisée est celle du semis en bande fraisée, développée dans les années 1990 par des agriculteurs innovants et la station de recherche *Agroscope* (Reckenholz) [25]. S'il n'existe actuellement que des estimations sur la part de cultures de maïs concernées [91], les inscriptions pour les contributions à l'efficience (CER) des ressources devraient fournir des indications précises à partir de 2016. Les auteurs du présent document n'ont pas connaissance d'études spécifiques sur la réduction de l'entraînement par ruissellement avec la méthode de semis en bande fraisée pratiquée aujourd'hui. Une approximation est toutefois possible si l'on se réfère à l'étude sur l'entraînement par ruissellement de l'atrazine, menée de 1989 à 1992 sur sept sites différents: d'après cette étude, le fait de moins travailler le sol n'a pas réduit les concentrations de substances polluantes détectées dans les eaux de ruissellement. Mais puisque le ruissellement lui-même a diminué de 50% et que les pertes de particules du sol ont chuté de 95%, l'entraînement par ruissellement de l'atrazine a baissé de 80% par rapport au travail du sol à la charrue (labour). Une étude récente basée sur des essais d'aspersion artificielle fournit des informations sur différents facteurs

³ Sur la page de titre, la photo du bas est celle d'un champ expérimental avec des sous-semis; elle témoigne de la bonne couverture du sol après la récolte (photo: H. Ramseier).

d'influence [92]: la comparaison entre le semis sous litière et le travail conventionnel du sol avec une charrue montre que le fait de travailler le sol avec ménagement (semis sous litière) n'aboutit pas nécessairement à une réduction du ruissellement superficiel. La réduction effective du ruissellement superficiel et des pertes de sol suppose la combinaison de trois facteurs: une couverture de sol optimisée, un nombre minime d'interventions culturales et la préparation d'un lit de semence grossier.

Dans la pratique agricole actuelle, la diminution du travail du sol est généralement associée à une utilisation accrue d'herbicides [93]. Des possibilités de réduire la dépendance au glyphosate sont actuellement à l'étude en Europe [94] et sont également au cœur du projet du FNS «Cover crops for conservation agriculture». Le chemin de la réussite passe par la sélection de cultures intermédiaires et de sous-semis parfaitement adaptés.

Les techniques culturales simplifiées (ou technique de conservation du sol) présentent des avantages indiscutables dans la lutte contre l'érosion. Mais au-delà de ça, il existe également des synergies entre la protection des eaux et la protection des sols, qu'il est possible d'exploiter par exemple sous la forme de mesures contre le tassement du sol ou de bandes de protection contre l'érosion [95].

Bilan

Il existe de réelles possibilités de réduction, de substitution et d'optimisation dans la culture du maïs. Un travail du sol réduit ou de conservation peut être considéré comme avantageux sur les surfaces menacées par l'érosion. Par contre, sur les surfaces drainées et dans les secteurs où les eaux souterraines sont fortement contaminées, seule la réduction de la quantité des produits phytosanitaires appliqués est efficace.

BETTERAVE SUCRIÈRE

Réduction

Des essais menés en France par l'Institut Technique de la Betterave (ITB) montrent que les procédés combinant le désherbage chimique et le désherbage mécanique sont plus rentables que le désherbage purement chimique. Si on remplace les 4 traitements herbicides habituels par 2 traitements chimiques et 2 passages mécaniques, les coûts par hectare diminuent d'environ 25 à 35% [96]. D'après l'ITB, ses calculs intègrent le fait que le désherbage mécanique est impossible lorsque les conditions météorologiques sont mauvaises (hypothèse: désherbage mécanique possible 7 années sur 10). En Allemagne, des rapports sur de possibles réductions de coûts mentionnent en outre un impact positif sur le rendement [97]. Le potentiel de telles approches – si elles étaient transposées à la Suisse – est actuellement évalué dans le cadre d'une étude menée par la HAFL en collaboration avec des organisations de la branche [117]. Le fait que les tailles de parcelles soient plus petites qu'en France ou en Allemagne et que les précipitations soient plus abondantes pose des défis particuliers à l'utilisation de sarcluses mécaniques en Suisse. Si les premiers résultats de l'étude montrent que les volumes d'herbicides peuvent être considérablement réduits, le coût global de la lutte contre les mauvaises herbes reste toutefois comparable à celui du désherbage purement chimique, ce en raison du niveau élevé du coût du travail et du coût des machines. Les sarcluses modernes guidées par une caméra fonctionnent parfaitement sur le plan technique et réalisent de bons rendements

à l'hectare. Pour que leur utilisation soit rentable, il faut que le taux d'utilisation des machines soit aussi élevé que possible, ce qui suppose une utilisation interexploitations sur toutes les cultures sarclées.

Substitutions et optimisation

Pour les betteraves sucrières également, il existe un potentiel de remplacement des substances actives mobiles par des substances actives moins mobiles, qui n'a pas encore été évalué de manière systématique. En matière d'optimisation, les approches pour la culture des betteraves sucrières sont globalement les mêmes que pour la culture du maïs.

COLZA

Réduction

Insecticides: différentes mesures permettent de réguler l'infestation des cultures de colza par les deux ravageurs qui causent le plus de dégâts au printemps, à savoir le méligèthe du colza (*Meligethes aeneus* et *Meligethes viridescens*) et le charançon de la tige du colza (*Ceutorhynchus napi*) [16].

- Des procédés développés en Suisse utilisent la navette (*Brassica rapa*) comme plante piège pour les ravageurs du colza. La navette se développe plus rapidement et fleurit plus tôt, attirant à elle plusieurs ravageurs du colza [98]. La méthode recommandée consiste à semer en bordure de champ, sur une bande de 10 à 15 m de large, un mélange composé de colza et de 5% de navette et de traiter uniquement cette bande en cas de dépassement du seuil de nuisibilité [16]. Dans certains cantons, les procédés adaptés à des situations où les attaques de méligèthes sont habituellement modérées ont été encouragés par la distribution gratuite de semences de navette; mais ils ne sont plus que peu répandus aujourd'hui dans la pratique agricole.
- En France, l'Institut technique des producteurs d'oléagineux Terres Inovia recommande pour les régions avec une pression de méligèthes modérée d'associer 5 à 10% d'une autre variété de colza dont la floraison est particulièrement précoce. D'après les indications fournies par Terres Inovia, ce procédé serait déjà utilisé, dans certaines régions, sur 30% des surfaces. Il serait intéressant de savoir si le procédé français et le procédé suisse peuvent se combiner: la méthode consisterait à semer une variété de colza particulièrement précoce sur la bande réservée en bordure de champ et de ne traiter que cette bande en cas d'infestation.

L'évolution des seuils économiques de nuisibilité mérite d'être notée. En France par exemple, les seuils de nuisibilité du méligèthe du colza n'ont cessé d'être relevés ces dernières années. Il est en effet apparu que du colza suffisamment approvisionné en nutriments était capable de compenser convenablement les dégâts alimentaires causés par ce ravageur. Pour cette raison, des seuils de nuisibilité bien plus élevés sont désormais fixés pour le colza sain et il est même recommandé de renoncer aux traitements insecticides dans les premiers stades de développement du colza [99]. Reste à établir dans quelle mesure ces considérations sont transposables aux conditions en Suisse.

Fongicides: des essais menés par la Plateforme Grandes cultures Suisse (PAG-CH) ont montré que souvent l'utilisation de fon-

gicides n'est pas rentable économiquement [100]. Selon des études conduites en France par l'*Institut national de la recherche agronomique (INRA)*, la fumure, la date de semis et le choix des variétés peuvent considérablement réduire le risque de maladie [101]. Ce sont des résultats prometteurs et capables d'inspirer de futures pratiques.

Herbicides: le colza est une plante relativement compétitive. Dans les cantons de Genève et de Fribourg, il a été démontré que l'utilisation de sous-semis freinant la prolifération des mauvaises herbes n'avait de conséquence ni sur le rendement ni sur les coûts [102, 103]. Dans le canton de Lucerne, la première année d'essais a confirmé ces résultats; la deuxième année a montré que de bonnes conditions de semis du colza étaient indispensables à la réussite du procédé [104]. Le traitement localisé sur le rang et le désherbage purement mécanique sont également possibles: des essais suédois ont montré qu'ils n'avaient pas d'effet substantiel sur le rendement des cultures de colza (+4% de rendement avec le traitement localisé sur le rang et -3% de rendement avec le désherbage purement mécanique) [105]. Une étude conduite sur 17 sites français de 2005 à 2007 a permis de comparer des procédés intensifs avec des systèmes de culture intégrés [106]. Même si ces systèmes ne sont pas directement transposables à la Suisse, la nécessité de réaliser de telles études est incontestable: l'étude française a mis en évidence une réduction de l'utilisation de produits phytosanitaires de 44%, pour une baisse de rendement de 6% et une hausse de marge brute de 20%. Si la Suisse fut l'un des premiers pays à réaliser ce genre d'évaluations [42, 69, 72], elle ne dispose plus aujourd'hui d'aucune donnée récente.

Substitution

Jusqu'ici, les expériences tentées avec de la poudre de roche n'ont connu qu'un succès limité [107, 108]. Mais les essais me-

nés récemment avec des agents mouillants adaptés et de l'argile minérale ont fait preuve d'une plus grande efficacité: avec un à deux traitements, le rendement est inférieur de 5% à celui des produits chimiques de synthèse; avec trois traitements, il est supérieur de 4% (fig. 4) [109]. En raison du prix relativement élevé des traitements, l'argile minérale serait surtout intéressante en culture extenso – mais son utilisation ne serait pas autorisée compte tenu des conditions actuellement requises pour les contributions (art. 69 OPD).

Optimisation

Parce que le colza couvre le sol rapidement et abondamment, sa culture présente un risque d'érosion et un potentiel d'entraînement par ruissellement plutôt faible. Comme les insecticides les plus utilisés à ce jour (les pyréthroïdes) ont une grande capacité de sorption au niveau des particules du sol [110], les principales voies d'apport en cause dans la pollution des eaux sont l'entraînement par ruissellement avec des particules du sol et les sources ponctuelles. Le fait de remplacer les substances actives actuelles par d'autres classes de substances actives plus mobiles (les pyréthroïdes n'étant plus autorisés contre le méligèthe du colza en raison de problèmes de résistance) pourrait accroître le risque d'apport: pour remédier au problème, les mesures visant à réduire l'entraînement par ruissellement dans la culture du maïs (mentionnées plus haut) devraient convenir également à la culture du colza

Bilan

Dans la culture du colza également, il existe de réelles possibilités de réduction, de substitution et d'optimisation. Compte tenu des problèmes de résistance observés chez les ravageurs du colza, les stratégies intégrées de régulation des ravageurs présentent dans tous les cas un intérêt qui dépasse la seule protection des eaux.



Fig. 4 Application d'argile minérale contre le méligèthe du colza pendant le stade sensible (à gauche); colza traité en floraison (à droite)

Einsatz von Tonmineralien gegen den Rapsglanzkäfer im sensiblen Stadium (links) und blühender, behandelter Raps (rechts)

(photos: Werner Jossi, Agroscope)

ÉVALUATION DES TROIS PISTES D'ACTION

La comparaison quantitative des trois pistes d'action que sont la réduction, la substitution et l'optimisation suppose l'existence d'informations sur la part de chaque voie d'apport et de données quantitatives sur l'efficacité de chaque solution.

Réduction

Concernant la réduction de l'utilisation de produits phytosanitaires, des indications quantitatives sont possibles et l'efficacité en termes de réduction des apports est indépendante de la voie d'apport.

Substitution

Concernant la substitution de certaines substances actives par d'autres plus facilement dégradables et moins mobiles, il est possible de générer des données quantitatives sur l'efficacité de cette piste en se basant sur des modèles et en analysant des données de monitoring. L'efficacité dépend de la voie d'apport: si les apports provenant du drainage peuvent être réduits par l'utilisation préférentielle de substances actives plus sorbantes ou plus rapidement dégradables, la réduction de l'entraînement par ruissellement dépend quant à elle très peu du phénomène de sorption [111].

Optimisation

L'optimisation est bien plus difficile à quantifier, principalement parce que les risques d'apport varient fortement au niveau de la parcelle (p. ex. s'il existe des secteurs hydromorphes) [111] et parce que les possibilités d'apports indirects via les exutoires en bordure de parcelle sont nombreuses [84]. Dans la pratique, la planification de mesures d'optimisation pose problème puisqu'il est difficile de faire la différence entre le ruissellement superficiel saturé et le ruissellement superficiel non saturé en se basant uniquement sur des données SIG [84]. Or cette distinction est essentielle pour choisir la bonne solution, les mesures de réduction des apports étant beaucoup moins nombreuses pour les surfaces enclines au ruissellement saturé que pour les surfaces enclines au ruissellement non saturé [82]. En ce sens, identifier les principales voies d'apport des substances polluantes est un sujet de recherche important pour les stratégies d'optimisation [112]. En rai-

	Réduction ¹	Substitution	Optimisation
Entraînement par ruissellement superficiel saturé	++	+	+
Entraînement par ruissellement superficiel non saturé	+++	+	+++
Apports provenant du drainage	++	++	(+)
Sources ponctuelles	(+)	(+) ²	+++

¹ Concerne la réduction par des traitements en bandes avec des herbicides. En cas de désherbage purement mécanique, la réduction des apports est importante dans tous les cas de figure

² Sources ponctuelles: aucune réduction des apports si le produit phytosanitaire est seulement moins mobile, mais efficacité faible sur les organismes aquatiques s'il est moins toxique

Tab. 3 Matrice des pistes d'action et des voies d'apports à l'exemple des herbicides: efficacité (+++: élevée, ++: moyenne, +: faible) et incertitude (blanc: très faible, clair: faible, moyen: moyenne, foncé: grande)

Matrix der Handlungsansätze und Eintragspfade am Beispiel Herbizide: Wirksamkeit (+++: hoch, ++: mittel, +: tief) und Unsicherheit (weiss: sehr tief, hell: tief, mittel, dunkel: hoch)

son du niveau élevé d'incertitude associé à la substitution et à l'optimisation, la réduction possible des apports a été classée grossièrement en trois catégories allant de «+» à «+++» (tab. 3). Le tableau 3 montre que les mesures de réduction ne dépendent pas de la voie d'apport. Dans le cas du ruissellement superficiel non saturé, la réduction par des traitements en bandes a été jugée très efficace parce qu'il est attesté que le travail supplémentaire du sol conduit à une réduction de l'entraînement par ruissellement [113]. La substitution par d'autres produits phytosanitaires chimiques offre une marge de manœuvre limitée (plus large dans le cas du drainage). La substitution de la lutte chimique par la lutte biologique contre les ravageurs est au contraire très efficace en termes de protection des eaux.

CONCLUSIONS

La présente étude a montré qu'il est urgent de recourir à de nouvelles approches dans la culture du maïs principalement (herbicides), mais également dans la culture du colza (insecticides). Les systèmes de production globaux que sont la production intégrée et l'agriculture biologique, toutes deux fondées sur le principe de précaution, constituent une piste d'action adéquate. Leurs effets positifs sur l'environnement vont bien au-delà de la seule protection des eaux.

Les réponses apportées aux trois questions centrales posées dans les premières pages de ce document sont les suivantes:

1)

L'attribution des substances actives aux différentes cultures est soit réalisable,

soit entachée d'incertitudes, soit impossible. Les herbicides utilisés dans la culture du maïs se distinguent par une proportion conséquente de dépassements des critères de qualité chroniques. Des données régionales sur l'utilisation de produits phytosanitaires – qui font encore défaut en Suisse mais ont déjà été collectées dans différents pays d'Europe – seraient d'une aide précieuse pour mieux circonscrire les sources de pollution et pouvoir trouver des solutions ciblées.

2)

Différents aspects de la production intégrée et de l'agriculture biologique sont susceptibles de réduire efficacement, voire d'empêcher entièrement, les apports de produits phytosanitaires dans les eaux. Pour qu'ils soient davantage mis en pratique, des mesures sont nécessaires à plusieurs niveaux – de la vulgarisation à l'amélioration des techniques existantes, en passant par des incitations et des conditions politiques adaptées. Les données actuellement disponibles sur le désherbage des cultures de maïs, de colza et de betterave sucrière montrent que la réduction de l'utilisation de produits phytosanitaires sur des sites appropriés a un impact minime, voire nul, sur le rendement. Des incitations flexibles, telles que les primes versées depuis 2015 aux agriculteurs du canton de Vaud qui n'utilisent aucun herbicide, peuvent aider à accumuler de l'expérience avec ces méthodes de désherbage et à favoriser leur diffusion. Dans le cas particulier du colza, il existe un potentiel de réduction de l'utilisation des insecticides et des fongicides, mais aussi des herbicides. Une évalua-

tion systématique de toutes les cultures serait assurément d'un grand intérêt, à l'instar de «l'Analyse de la situation phytopathologique en Suisse en 1986»; à cette époque déjà, le document final de la Société suisse de phytologie suggérait une évaluation périodique de la situation [54].

3)

Les trois pistes d'action (réduction, substitution, optimisation) offrent de grands potentiels, qui devraient être exploités en parallèle. On retrouve leurs fondements dans des programmes de recherche européens tels que PURE (*Pesticide Use-and-Risk Reduction*), qui fait partie du septième programme-cadre de l'Union européenne (section «Bioéconomie fondée sur la connaissance»). La réduction produit des résultats particulièrement efficaces puisqu'elle impacte toutes les voies d'apport dans une même mesure. Sur les surfaces contributives (aux transferts de polluants dans les eaux), la réduction est clairement la solution la plus efficace (hormis l'échange de parcelles). Pour ce qui est de la substitution par d'autres produits phytosanitaires chimiques, il est important de se souvenir que le profil écologique d'un produit n'est pas défini uniquement par son apport dans les eaux de surface, mais également par d'autres aspects liés aux eaux souterraines, aux auxiliaires, ainsi qu'à la faune et à la flore terrestres. En ce qui concerne l'optimisation, une meilleure harmonisation entre la protection des sols et la protection des eaux pourrait contribuer à réduire les apports de substances actives: en effet, certaines mesures contre le tassement du sol (p. ex. réduction de la charge par essieu et de la pression des pneumatiques, cultures intermédiaires améliorant le sol) et contre l'érosion (cultures intermédiaires, bandes de protection contre l'érosion) ont également pour conséquence directe de réduire l'entraînement par ruissellement [114]. L'impact des différentes mesures sur le rendement et sur la rentabilité est encore trop mal connu pour les conditions culturelles de la Suisse. Or de telles données (telles que celles collectées en France via des réseaux d'exploitations) sont capitales pour que les mesures adéquates soient mises en œuvre avec succès. En Suisse, un réseau de 205 exploitations pilotes a servi de référence à l'évaluation de la rentabilité de l'agriculture biologique et de la production intégrée (p.ex.

[115]). Avec de tels réseaux, il est également possible d'évaluer quelles mesures sont suffisamment rentables pour d'ores et déjà être diffusées en améliorant la vulgarisation, lesquelles ont encore besoin de la recherche appliquée et lesquelles requièrent absolument des incitations financières favorisant leur plus vaste application.

Dans les années 1990 en Suisse, les efforts combinés de la recherche agronomique appliquée, d'exploitants agricoles pionniers motivés, de services de vulgarisation impliquant des agriculteurs innovants et des conditions favorables en matière de politique agricole ont permis de réaliser des améliorations décisives allant dans le sens d'une exploitation à caractère écologique, incluant la protection des eaux. Pour autant, les données actuelles sur les eaux montrent clairement que les exigences chiffrées de l'ordonnance sur la protection des eaux ne sont pas satisfaites et que les critères de qualité ne sont souvent pas remplis. Le présent article se concentre sur le potentiel offert par la production standard dominante en termes de superficie (PER) et sur la capacité de la production intégrée à réduire les apports de polluants. Il décrit des orientations prometteuses et montre qu'il existe pour chaque culture une marge d'action significative pour améliorer la situation. Les expériences du passé ont prouvé qu'il est possible de réaliser des améliorations substantielles en l'espace de quelques années lorsque les acteurs concernés œuvrent ensemble.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Wittmer, I. K. et al. (2014): Plus de 100 pesticides dans les cours d'eau. *Aqua & Gas* 11, p. 68-79
- [2] Moschet, C. et al. (2014): Picogram per liter detections of pyrethroids and organophosphates in surface waters using passive sampling. *Water Res.* 66, p. 411-422
- [3] Moschet, C. et al. (2014): How a complete pesticide screening changes the assessment of surface water quality. *Environ. Sci. Technol.* 48, p. 5423-5432
- [4] RS 916.161 (2015): Ordonnance sur la mise en circulation des produits phytosanitaires (Ordonnance sur les produits phytosanitaires, OPPh)
- [5] RS 813.12 (2015): Ordonnance concernant la mise sur le marché et l'utilisation des produits biocides (Ordonnance sur les produits biocides, OPBio)
- [6] Leib, V. (2015): Biologischer Zustand kleiner Fließgewässer. *Aqua & Gas* 4, p. 66-75

REMERCIEMENTS

L'étude a été financée par l'Office fédéral de l'environnement (OFEV). Nous remercions sincèrement toutes les personnes interrogées dans le cadre des recherches liées à cet article, en particulier Irene Wittmer (Eawag), Padruot Fried (anciennement Agroscope), Franz Bigler (anciennement Agroscope), Christoph Moschet (Eawag/UC Davis), Muriel Valentin-Morison (INRA), Ruedi Büchi (anciennement Agroscope), Hans Ramseier (HAFL), Andreas Keiser (HAFL), Daniel Strahm (fenaco), Markus Jenny (Station ornithologique), Andreas Schwarz (Canton de Saint-Gall), Johannes Ranke (jrwb), Emilien Quilliot (ITB) et Suzanne Blocaille (ITB). Avec un remerciement particulier à Bertrand Omon (Chambre d'agriculture de l'Eure) pour ses informations détaillées sur les réseaux d'exploitations de Normandie Dephy Ecophyto.

- [7] Wittmer, I. K. et al. (2011): Loss rates of urban biocides can exceed those of agricultural pesticides. *Sci. Total Environ.* 409, p. 920-932
- [8] Braun, C. et al. (2015): Micropolluants dans les cours d'eau provenant d'apports diffus. Analyse de la situation. Office fédéral de l'environnement. Etat de l'environnement Nr. 1514
- [9] Leu, C.; Schneider, M. K.; Stamm, C. (2010): Estimating catchment vulnerability to diffuse herbicide losses from hydrograph statistics. *J. Environ. Qual.* 39, p. 1441-1450
- [10] Béguin, J.; Smola, S. (2010): Etat des drainages en Suisse - Bilan de l'enquête 2008. Office fédéral de l'agriculture, OFAG, Berne
- [11] Huber, A.; Bach, M.; Frede, H. G. (2000): Pollution of surface waters with pesticides in Germany: Modeling non-point source inputs. *Agric. Ecosyst. Environ.* 80, p. 191-204
- [12] Reichenberger, S. et al. (2007): Mitigation strategies to reduce pesticide inputs into ground- and surface water and their effectiveness; A review. *Sci. Total Environ.* 384, p. 1-35
- [13] Singer, H. et al. (2006): Evaluation der Ökomaßnahmen, Gewässer und Pestizide, Konzept- und Ergebnisbericht. Eawag: Dübendorf
- [14] FAO (2010): International Code of Conduct on the Distribution and Use of Pesticides Guidance on Pest and Pesticide Management Policy Development
- [15] Ernst Basler und Partner. (2015): Massnahmen zur Reduktion von Einträgen von Pflanzenschutzmitteln in Gewässer - Eine Auslegeordnung
- [16] Häni, F. J.; Popow, G.; Reinhard, H.; Schwarz, A.; Vögeli, U. (2014, 3^e édition): Protection des plantes en production durable. édition-Imz, p. 1-466

- [17] Junghans, M.; Kase, R.; Chèvre, N. (2012): Qualitätskriterien für Pflanzenschutzmittel. *Aqua & Gas* 11, p. 16–22
- [18] Garthwaite, D. G. et al. (2013). Pesticide usage survey report 235: arable crops in the United Kingdom 2012.
- [19] Garthwaite, D. G. et al. (2014). Pesticide usage survey report 257: outdoor vegetable crops in the United Kingdom 2013
- [20] Gutsche, V.; Strassemeyer, J. (2007): SYNOPSIS – ein Modell zur Bewertung des Umwelt-Risikopotentials von chemischen Pflanzenschutzmitteln. *Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutz* d 59, p. 197–210
- [21] Moschet, C. (2011). Faktenblatt Insektizide und Fungizide aus landwirtschaftlichen Nutzflächen, in *Faktenblatt*, Eawag: Dübendorf
- [22] Wittwer, A.; Gubser, C. (2010). Umsetzung des Verbots von Pflanzenschutzmitteln. Untersuchung zum Stand der Umsetzung des Anwendungsverbots von Unkrautvertilgungsmitteln auf und an Strassen, Wegen und Plätzen. *Umwelt-Wissen* Nr. 1014
- [23] Krebs, R.; Hartmann, F. (2011). Einsatz von Pflanzenschutzmitteln im Schweizerischen Gartenbau: Datenübersicht – indikatorbasierte Risikobeurteilung – Monitoringkonzept. *Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW), Wädenswil*
- [24] Rüttimann, M. (Basel, 2001): Boden-, Herbizid-, und Nährstoffverluste durch Abschwemmung bei konservierender Bodenbearbeitung und Mulchsaat von Silomais. *Dissertation Universität Basel*
- [25] Bigler, F.; Waldburger, M.; Ammon, H.-U. (1995): Vier Maisanbauverfahren 1990 bis 1993 – Die Verfahren im Vergleich. *Agrarforschung* 2, p. 353–356
- [26] Wittmer, I.; Stamm, C.; Singer, H.; Junghans, M. (2014): Micropolluants – Stratégie d'évaluation pour les micropolluants organiques de sources non ponctuelles, Eawag: Dübendorf
- [27] Diercks, R. (1983). *Alternativen im Landbau*, Ulmer Verlag, p. 1–379
- [28] Häni, F.; Boller, E. F.; Bigler, F. (1990): La Production Intégrée: vers une agriculture marquée au sceau de l'écologie. *Bulletin Sandoz* 93, 9–15/ *Integrierte Produktion – ein Weg zur ökologisch geprägten Landwirtschaft*, Schweiz. *Landw. Forsch.* 29, p. 101–115
- [29] Société Suisse de Phytatrie (1988): *Protection des plantes et pensée globale, le rôle de la Société Suisse de Phytatrie*. *La Recherche agronomique en Suisse* 27, p. 1–114
- [30] Häni, F. (1994): *Entwicklung ökologisch ausgerichteter Bewirtschaftungssysteme in der Schweiz – Projekt «Dritter Weg»*. In: *Integrierter Landbau*, 2. Aufl. (eds. Diercks, R.; Heitefuss, R.), *Verlagsunion Agrar*, p. 329–338 und 426–427/Häni, F. (1996): *Vers une agriculture marquée au sceau de l'écologie – Projet «Troisième voie»*. *Bulletin de la Société Industrielle de Mulhouse* No. 835, p. 203–213
- [31] Häni, F.; Boller, E. F.; Keller, S. (1998): *Natural Regulation at the Farm Level*, in *Enhancing Biological Control* (eds. Bugg, R. L.; Pickett, C. H.), *University of California Press*, p. 161–210
- [32] Boller, E. F.; Häni, F.; Poehling, H.-M. (2004): *Ecological Infrastructures – Ideabook on Functional Biodiversity at the Farm Level*. IOBC/Agri-dea Eschikon-Lindau, p. 1–213/Häni, F. (1989): *Surfaces de compensation écologique – élément vital d'une agriculture équilibrée*. *Revue UFA* 2, p. 51–53
- [33] *Bio-Suisse* (2015): *Statistiques Bio – Conférence de presse annuelle de Bio Suisse du 8 avril 2015*. www.bio-suisse.ch/media/Ueberuns/Medien/BioInZahlen/JMK2015/FR/f_jmk_15_bio_in_zahlen_2015_final.pdf [Accessed on 11.02.2016]
- [34] *Bio Suisse* (2015): *Quantité de céréales panifiables*. www.bioactualites.ch/fr/marche-bio-reboume/marche-informations/marche-grandes-cultures-bio/cereale-panifiable/quantite.html
- [35] *FIBL* (2015): *Liste des intrants – Intrants pour l'agriculture biologique en Suisse*. *Institut de recherche de l'agriculture biologique, Frick*
- [36] Altner, A. et al. (1977): *Integrated Plant Protection – a Road to an Ecosystem-orientated Plant Production* (Statement of Ovronnaz Switzerland, July 1976). *WPRS Bull.* 4, p. 93–116
- [37] Boller, E. F.; Avilla, J.; Gendrier, J. P.; Jörg, E.; Malavolta, C. (1998): *Integrated Production in Europe – 20 years after the declaration of Ovronnaz (CH)*. *IOBC wprs Bull.* 21, p. 1–41
- [38] Baggio, M. (1990): *La valorisation qualitative de la production agricole*. *Rev. Suisse Vitic. Arboric. Hortic.* 10, p. 51–57
- [39] Boller, E. F. (1990): *Integrierte Produktion in der Schweiz*. *Weiterentwicklung in den achtziger Jahren, heutiger Stand und künftige Entwicklungen*. *Mitt. Schweiz. Entomol. Gesellschaft* 63, p. 501–505
- [40] El Titi, A.; Boller, E. F.; Gendrier, J. P. (1993): *Integrated Production: Principles and Technical Guidelines*. *IOBC-wprs Bull.* 16, p. 1–97
- [41] Boller, E. F.; Malavolta, C.; Jörg, E. (1997): *Guidelines for Integrated Production of Arable Crops in Europe – IOBC Guideline III*. *IOBC-wprs Bull.* 20, p. 1–16
- [42] Häni, F.; Vereijken, P., eds. (1990): *Développement de systèmes agricoles ménageant l'environnement – Etat actuel et perspectives en Suisse et dans d'autres pays européens*. *La Recherche agronomique en Suisse* 29, p. 221–436
- [43] Stern, V.; Van den Bosch, R.; Hagen, K. (1959): *The integrated control concept*. *Hilgardia* 29, p. 81–101
- [44] *FAO* (1966): *Principles, definitions and scope of integrated pest control*. *Proc. Integr. Pest Control* 1, p. 11–17
- [45] Bajwa, W. I.; Kogan, M. (2002): *Compendium of IPM Definitions*. *Publication No. 998*, *Oregon State University, Corvallis*
- [46] Edens, T.; Fridgen, C.; Battenfield, S. (1985): *Sustainable agriculture and integrated farming systems*. *Proc. 1984 conference*, *Michigan St. Univ. Press, East Lansing*
- [47] Lampkin, N. (1990): *Organic farming*. *Farming Press, Ipswich, U.K.*
- [48] Zihlmann, U. et al. (2010): *Integrierter und biologischer Anbau im Vergleich. Resultate aus dem Anbausystemversuch Burgrain 1991 bis 2008*. *ART-Bericht* 722, p. 1–16
- [49] Widmer, C. (1994): *Rego Beteiligung am IP-Programm*. *Agrarforschung Schweiz* 1, p. 76–78
- [50] Hilfiker, J.; Malitus, O. (1995): *Vergleich der Landbauformen. IP und Biolandbau – wirtschaftliche Alternative zur konventionellen Produktion*. *FAT-Berichte* Nr.465, p. 1–12
- [51] Schreiber, C. (2001): *Erfolge und Nebenwirkungen staatlich geförderter Ökologie*. *NZZ*, 4.1.2001
- [52] *fenaco* (1989–2008): *Assortiments phyto (classement de tous les PPH en 3 catégories concernant leur profil environnemental) / (depuis 2009): [nouveau] assortiment phyto (partiellement avec des informations concernant des effets sur l'environnement)*
- [53] Vogel, B. (2015): *Migros stellt die Bio-Frage*. *Der Bund*, 4.9.2015
- [54] *Société Suisse de Phytatrie* (1986): *Analyse de la situation phytosanitaire en Suisse en 1986*. *La Recherche agronomique en Suisse* 25, p. 245–388
- [55] *Société Suisse de Phytatrie* (1993): *Jahresberichte der Präsidenten 1982–92 und Beiträge zum Pflanzenschutz*. *La Recherche agronomique en Suisse* 32, p. 279–425
- [56] *Société Suisse de Phytatrie* (1989): *Analyse von 19 Anbaulichlinien (5-mal Bio, 14-mal IP)*, *Arbeitsgruppe «Anbau- und Pflegesysteme»*, 35 pp.
- [57] Fried, P. M. et al. (1993): *Möglichkeiten des Einsatzes biotechnologischer Methoden zur Erhöhung der Resistenz gegen Krankheiten und Schädlinge wichtiger Kulturpflanzen in der Schweiz*, *SNF Schwerpunktprogramm Biotechnologie (Modul 6)*, *Biotechnologie der höheren Pflanzen*
- [58] Spycher, S.; Daniel, O. (2013): *Agrarumweltindikator Einsatz von Pflanzenschutzmitteln – Auswertungen von Daten der Zentralen Auswertung Agrarumweltindikatoren (ZA-AUI) der Jahre 2009 bis 2010*. *Agroscope, Wädenswil*
- [59] Moschet, C. et al. (2015): *Insektizide und Fungizide in Fließgewässern*. *Aqua & Gas* 4, p. 54–65
- [60] Boller, E. F. et al. (1995): *Pflanzenschutz als Teil einer nachhaltigen Produktion*. *Agrarforschung* 2, p. 504–507
- [61] Remund, U.; Gut, D.; Boller, E. F. (1992): *Beziehungen zwischen Begleitflora und Arthropodenfauna in Ostschweizer Rebbergen*. *Schweizerische Zeitschrift für Obst und Weinbau* 128, p. 527–540
- [62] Günter, M.; Pasquier, D. (2008): *La technique de confusion dans la viticulture? Une histoire à succès*. *Schweizerische Zeitschrift für Obst- und Weinbau* p. 4–6

- [63] Bigler, F., Bosshart, S., Waldburger, M.; Ingold, M. (1990): Einfluss der Dispersion von *Trichogramma evanescens* Westw. auf die Parasitierung der Eier des Maiszünslers, *Ostrinia nubilalis* Hbn. Mitteilungen der Schweizerischen Entomol. Gesellschaft 63, p. 381–388
- [64] Rossberg, D.; Hommes, M. (2014): NEPTUN-Gemüsebau 2013 – Berichte aus dem Julius Kühn-Institut 175, Kleinmachnow, Deutschland
- [65] OFAG, (2013): Rapport agricole 2013. Berne
- [66] Kläy, R. (1984): Untersaaten zu Mais – Gegenseitige Beeinflussung von Unterkultur und Mais, sowie Auswirkungen auf Bodenstruktur, Nitratauswaschung, Stickstoff-Fixierung und die Entwicklung der Folgekulturen, Dissertation ETH Nr. 7530
- [67] Zwerger, P.; Ammon, H.U. (2002): Unkraut – Ökologie und Bekämpfung, Ulmer, p. 1–419 / Dierauer, H.U., Stöppler-Zimmer, H. (1994): Unkrautregulierung ohne Chemie, Ulmer, p. 1–134
- [68] Häni, F. (1987): Agriculture intégrée – Règles pour les grandes cultures. Concrètement: Comment conduire vos cultures. *Revue UFA* 9, p. 11–14 / Niklaus et al. (1989): ASIAT – Recommandations pour la production intégrée. *Revue UFA* 2, p. 19–31
- [69] Häni, F. (1989): The Third Way. *Bulletin Organisation Internationale de Lutte Biologique et Intégrée OILB XII*, p. 51–66
- [70] Häni, F. (1993): Weiterentwicklung umweltschonender Bewirtschaftungssysteme – Projekt Dritter Weg. *La Recherche agronomique en Suisse* 32, p. 341–364
- [71] Irla, E. (1989): Pulvérisation en ligne et sarclage des betteraves sucrières et du maïs. Comparaison de procédés pour la lutte contre les mauvaises herbes – Rapport FAT 359
- [72] Reckenholz Agroscope FAL (2004): Integrierter und biologischer Anbau im Vergleich – Anbausystemversuch Burgrain. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Schriftenreihe der FAL 52
- [73] Vasileiadis, V. P. et al. (2015): On-farm evaluation of integrated weed management tools for maize production in three different agro-environments in Europe: Agronomic efficacy, herbicide use reduction, and economic sustainability. *Eur. J. Agron.* 63, p. 71–78
- [74] Pannacci, E.; Tei, F. (2014): Effects of mechanical and chemical methods on weed control, weed seed rain and crop yield in maize, sunflower and soyabean. *Crop Prot.* 64, p. 51–59
- [75] Huiting, H.; van der Weide, R.; Riemens, M. (2014): Practical experiences from physical and cultural weed control in reduced tillage maize growing systems, in: 10 th EWRS Workshop on Physical and Cultural Weed Control – Alnarp, Sweden (ed. Cloutier, D. C.)
- [76] Tschachtli, R. (2010): Vergleich von Anbausystemen auf Burgrain. Berufsbildungszentrum Natur und Ernährung, BBZ Natur und Ernährung, Schüpflheim
- [77] Tschachtli, R.; Dubois, D.; Ammann, H. (2004): Produzentenpreise entscheidend für ökonomischen Erfolg. In: Integrierter und biologischer Anbau im Vergleich – Anbausystemversuch Burgrain, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Schriftenreihe der FAL 52, p. 42–47
- [78] Streit, B.; Scherrer, C.; Tschachtli, R. (2004): Dynamik der Unkrautpopulationen, in: Integrierter und biologischer Anbau im Vergleich – Anbausystemversuch Burgrain, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Schriftenreihe der FAL 52, p. 70–75
- [79] Schweizer, S.; Kauf, P.; Höhn, H. (2013): Application de produits phytosanitaires: mesures de réduction du risque lié à la dérive. *Recherche Agronomique Suisse* 4, p. 484–491
- [80] Balsari, P., Duruchowski, G., Ophoff, H.; Roettele, M. (2013): Best Management Practices to reduce spray drift. TOPPS prowadis, www.topps-life.org/uploads/8/0/0/3/8003583/en_drift_book.pdf [Accessed on 10.25.2015]
- [81] Hanke, L., Poiger, T.; Aldrich, A. P. (2014): Application de produits phytosanitaires: mesures de réduction du risque lié au ruissellement. *Recherche Agronomique Suisse* 5, p. 180–187
- [82] Bauer, F. et al. (2014): Gute fachliche Praxis zur Verringerung der Gewässerbelastung mit Pflanzenschutzmitteln durch Run-off und Erosion. TOPPS prowadis, www.topps-life.org/uploads/8/0/0/3/8003583/de_runoff_book.pdf [Accessed on 10.25.2015]
- [83] TOPPS (2011): Vermeiden von Gewässerverunreinigungen durch Punktquellen – TOPPS Beste Management Praxis (BMP). TOPPS prowadis, www.topps-life.org/uploads/8/0/0/3/8003583/topps_de.pdf [Accessed on 10.25.2015]
- [84] Stamm, C., Doppler, T., Prasuhn, V.; Singer, H. (2012): Standortgerechte Landwirtschaft bezüglich der Auswirkung von landwirtschaftlichen Hilfsstoffen auf Oberflächengewässer. Projekt-Schlussbericht, EAWAG: Dübendorf
- [85] Joos, O.; Bosshard, A.; Bühler, L. (2013): Win4 Pilotprojekt Alberswil-Mauensee/LU – Methodikentwicklung und regionale Vorabklärungen für eine landschaftsorientierte Umsetzung. Ö+L GmbH, Litzibuch
- [86] Daniel, O. et al. (2014): Win4 dans l'agriculture: améliorations écologiques, sociales et économiques. *Recherche Agronomique Suisse* 5, p. 64–67
- [87] Brown, C. D.; van Beinum, W. (2009): Pesticide transport via sub-surface drains in Europe. *Environ. Pollut.* 157, p. 3314–3324
- [88] Alletto, L. et al. (2010): Tillage management effects on pesticide fate in soils. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 30, p. 367–400
- [89] Maetens, W.; Poesen, J.; Vanmaercke, M. (2012): How effective are soil conservation techniques in reducing plot runoff and soil loss in Europe and the Mediterranean? *Earth-Science Rev.* 115, p. 21–36
- [90] Friedrich, T.; Kassam, A.; Corsi, S. (2013): Conservation Agriculture in Europe. In: *Conservation Agriculture - Global Prospects and Challenges* (eds. Jat, R. A., Sahrawat, K. L.; Kassam, A. H.) p. 127–179
- [91] Anken, T. (2015): 25 Jahre Streifenfräsaatclub für nachhaltigen Maisanbau. *Schweizer Landtechnik* 6/7, p. 48–49
- [92] Hösl, R.; Strauss, P. (2014): Wirksamkeit konservierender Bodenbearbeitungsverfahren zur Reduktion von Oberflächenabfluss und Bodenerosion. In: *Das INTERREG IV A-Projekt «Gewässer-Zukunft» 2009–2013* (ed. HBLFA Raumberg-Gumpenstein), p. 59–68
- [93] Freier, B. et al. (2011): Netz Vergleichsbetriebe Pflanzenschutz Jahresbericht 2010 Analyse der Ergebnisse der Jahre 2007 bis 2010 – Berichte aus dem Julius Kühn-Institut. Kleinmachnow, Deutschland
- [94] Melander, B. et al. (2013): European Perspectives on the Adoption of Nonchemical Weed Management in Reduced-Tillage Systems for Arable Crops. *Weed Technol.* 27, p. 231–240
- [95] Mosimann, T. (2013): Erosionsmonitoring im Kanton Basel-Landschaft 1982-2012, Entwicklung der Erosionsgefährdung Schutz der Böden durch die Bewirtschaftung – Folgerungen für die Praxis. Amt für Umweltschutz und Energie, Liestal
- [96] Institut Technique de la Betterave. (2015): Désherbage mécanique combiné: coûts et efficacité. *La Tech, Betteravière* p. 1–2
- [97] Schellbach, I. (2003): Streicheleinheiten für Zuckerrüben. *top Agrar* 4, p. 101–103
- [98] Büchi, R.; Häni, F.; Schenk, B.; Frei, P.; Jenzer, S. (1987): Rübsen in Raps als Fangpflanzen für Rapsschädlinge. *Mitt. Schweiz. Landw.* 35, p. 34–40
- [99] Terres Innovia (2015): Guide de culture – colza 2015. Thiverval-Grignon, Frankreich
- [100] Basler, S. (2014): Raps: Fokus Sorten und Fungizide. In: *Tagung Forum Ackerbau – Erkenntnisse aus Praxisversuchen 19.11.2014*. www.forumackerbau.ch/fileadmin/forumackerbau.ch/Versuche_Raps/FA_Raps_Sorten_und_Fungizide_2014_SB.pdf [Accessed on 10.25.2015]
- [101] Aubertot, J. N., Pinochet, X.; Doré, T. (2004): The effects of sowing date and nitrogen availability during vegetative stages on *Leptosphaeria maculans* development on winter oilseed rape. *Crop Prot.* 23, p. 635–645
- [102] AgriGenève (2014): Fiche technique: colza associé, avril 2014, Groupe d'intérêts: Agriculture de conservation
- [103] Rossier, N. (2014): Essai de colza associé à Grangeneuve, 18 août 2014. Institut agricole du canton de Fribourg (IAG). www.vulg-fr.ch/index.php/fr/documentation/production-vegetal/419-essai-de-colza-associe [Accessed on 10.25.2015]
- [104] Hebeisen, H. (2015): Versuchsbericht Rapsanbau.

- BBZ Natur und Ernährung, beruf.lw.ch/berufsbildungszentren/bbzn/bbzn_fachbereich_lw/bbzn_lw_projekte_versuche/anbauversuche_ackerbau [Accessed on 10.25.2015]
- [105] Nilsson, A. T. S. et al. (2014): Integrated control of annual weeds by inter-row hoeing and intra-row herbicide treatment in spring oilseed rape. 26. Deutsche Arbeitsbesprechung über Fragen der Unkrautbiologie und -bekämpfung, 11.-13. März 2014, Braunschweig. Julius-Kühn-Archiv p. 746-750
- [106] Bouchard, C.; Valantin-Morison, M; Grandeau, G. (2011): Itinéraires techniques intégrés du colza d'hiver: comment concilier environnement et économie. *Courrier de l'environnement de l'INRA* 61, p. 5-20
- [107] Ludwig, T. (2012): Regulierung von Rapschädlingen im ökologischen Winterrapsanbau durch den Mischanbau mit Rübsen (*Brassica rapa* L. var. *silvestris* [Lam.] Briggs) sowie den Einsatz naturstofflicher Pflanzenschutzmittel. Dissertation Humboldt-Universität zu Berlin
- [108] Daniel, C.; Dierauer, H.; Clerc, M. (2013): The potential of silicate rock dust to control pollen beetles (*Meligethes* spp.). *IOBC-WPRS Bull.* 96, p. 47-55
- [109] Jossi, W.; Humphrys, C.; Dorn, B.; Hiltbrunner, J. (2014): Lutte contre le méligèthe du colza avec le produit naturel Surround. *Recherche Agronomique Suisse* 5, p. 80-87
- [110] De Baan, L.; Spycher, S.; Daniel, O. (2015): Utilisation des produits phytosanitaires en Suisse de 2009 bis 2012. *Recherche Agronomique Suisse* 6, p. 48-55
- [111] Leu, C. et al. (2005): Comparison of Atrazine Losses in Three Small Headwater Catchments. *J. Environ. Qual.* 34, p. 1873
- [112] Schmockler-Fackel, P.; Naef, F.; Scherrer, S. (2007): Identifying runoff processes on the plot and catchment scale. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11, p. 891-906
- [113] Couforier, N. et al. (2008): Limiter la formation du ruissellement en sol limoneux, Fiche n° 1 - Maïs. www.chambre-agriculture-76.fr/environnement/eau/lutte-contre-lerosion-et-le-ruissellement/fiches-techniques-erosion/
- [114] Agridea. (2013): *Agriculture et dangers naturels*. p. 10
- [115] Hilfiker, J. (1997): *Comparaison des différentes formes de production - La Pl et l'agriculture biologique constituent-elles des alternatives rentables à la production conventionnelle? Rapports FAT 498*
- [116] Ramseier, H. (2015): *Communication personnelle (Haute école spécialisée bernoise, Haute école des sciences agronomiques, forestières et alimentaires, Zollikofen)*
- [117] Keiser, A. (2015): *Communication personnelle (Haute école spécialisée bernoise, Haute école des sciences agronomiques, forestières et alimentaires, Zollikofen)*

> FORTSETZUNG DER ZUSAMMENFASSUNG

Zentral für die Bewertung der Effektivität möglicher Massnahmen ist die Kenntnis der Quellen der einzelnen Wirkstoffe. Anhand öffentlich verfügbarer Information wurden die 33 in den NAWA Spez-Messungen relevantesten Wirkstoffe dem Einsatz in den verschiedenen Kulturen und ausserhalb der Landwirtschaft zugeordnet. Zwei Drittel der Wirkstoffe lassen sich mit genügender bis hoher Sicherheit einer oder mehreren Kulturen oder einer Biozidanwendung zuordnen. Bei der überwiegenden Mehrheit der im Maisanbau eingesetzten Herbizide, aber auch bei solchen für Zuckerrüben, Getreide, Kartoffeln und Gemüse wurden Konzentrationen über den CQK gemessen.

Ein Vergleich mit historischen Daten zeigt am Beispiel der Insektizide, dass sich mit den in den 1980er und 90er Jahren entwickelten Anbaumethoden eindeutige Erfolge erzielen lassen. Exemplarisch wird bei Mais, Zuckerrüben und Raps aufgezeigt, welche Möglichkeiten heute in den Bereichen Reduktion, Substitution und Optimierung bestehen. Diese reichen von reduziertem Herbizideinsatz durch Kombination chemischer und mechanischer Verfahren über den bevorzugten Einsatz weniger mobiler Stoffe bis hin zu einer Kombination geeigneter Bodenbearbeitungsverfahren, die den oberflächlichen Abfluss einschränken. Wichtig ist die Nutzung von Synergien mit anderen agronomischen Zielen wie dem Erosionsschutz und dem Resistenzmanagement. Relevant für die heutige Diskussion ist die Analyse der Erfolge in der Vergangenheit. Diese basierten auf der Zusammenarbeit der Agrarforscher und Berater mit innovativen Betriebsleitern und auf der Unterstützung durch die Agrarpolitik, die sich an gesellschaftlichen Zielen orientiert. Ein nachhaltiger Erfolg – ökologisch, ökonomisch und sozial – ist zu erwarten, wenn nicht nur die Vorschriften und Kontrollen adäquat sind, sondern auch die wichtigen Akteure (in erster Linie die Landwirte) und die Betroffenen (vorab die Konsumenten und der Markt) konstruktiv eingebunden werden.