Vol. 16, No. 2, 2021

scnat
académie des sciences naturelles

swiss academies
factsheets

academies-suisses.ch

Pesticides : répercussions sur l'environnement, la biodiversité et les services écosystémiques

Les pesticides sont avant tout utilisés dans l'agriculture, mais aussi en milieu urbain et dans d'autres domaines. Sous forme de produits phytosanitaires, ils réduisent les pertes de rendement et de qualité dues aux organismes nuisibles. Toutefois, l'emploi actuel de pesticides porte toutefois un préjudice considérable à l'environnement et en particulier à la biodiversité. En dépit de certaines lacunes, les répercussions indésirables sont bien documentées. La présente fiche d'information aborde spécifiquement les incidences de l'usage de pesticides sur l'environnement, la biodiversité et les services écosystémiques et propose des pistes d'action possibles pour la politique et la société, visant à réduire les effets indésirables. Elle ne thématise pas, par exemple, l'importance des pesticides pour la production agricole ou les incidences sur la santé humaine.

En Suisse, les pesticides sont avant tout admis sous forme de produits phytosanitaires (PPS) et de biocides (encadré 1). Ils sont principalement utilisés dans l'agriculture, mais aussi dans le milieu urbain (horticulture, commerce et artisanat, communes, particuliers) ainsi que dans l'industrie alimentaire et fourragère et la sylviculture, en vue de lutter contre les organismes indésirables. Comme les pesticides sont des substances biologiquement actives et sont en général directement épandus dans l'environnement, les effets indésirables produits sur les organismes non cibles sont pratiquement inévitables.

Dans l'agriculture, la protection des plantes est l'une des conditions essentielles à la culture et à la prospérité des récoltes (fig. 1). La bonne pratique agricole considère les mesures de protection indirectes telles qu'une riche biodiversité et la promotion des auxiliaires comme les fondements de la protection des plantes. Les pesticides ne devraient entrer en jeu que si toutes les autres mesures ont échoué. Ce principe est représenté par la pyramide de protection des plantes. L'agriculture biologique utilise aussi certains pesticides, mais principalement des produits d'origine naturelle ou présentant une structure identique à celle des produits naturels.[a, 1]

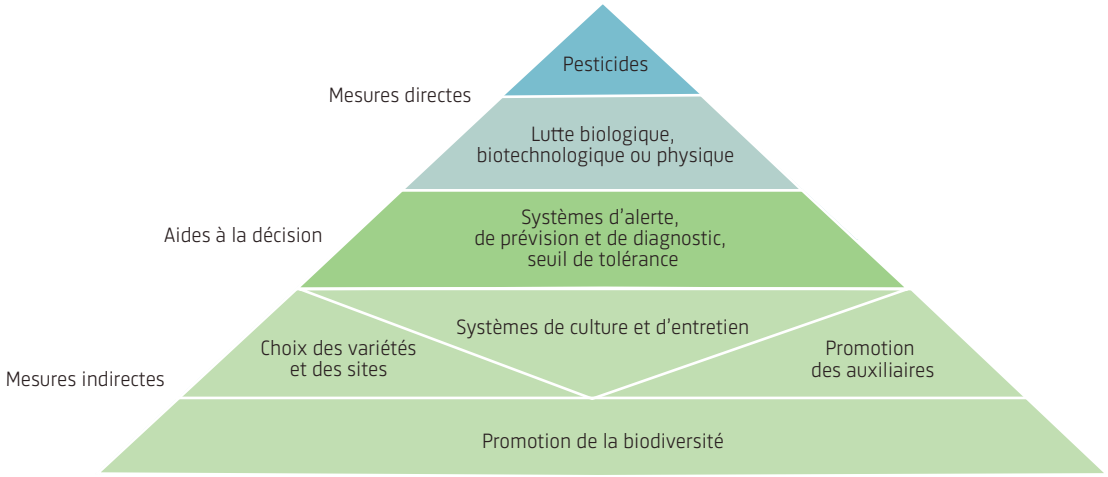

Fig. 1: La pyramide de la protection des plantes indique la pratique agricole à suivre. Les pesticides y sont présentés en dernier recours, lorsque toutes les autres mesures ont échoué. Ce schéma souligne l'importance de la biodiversité, qui constitue la base de la fonctionnalité et de la stabilité des écosystèmes, y compris des écosystèmes agricoles. Adapté de Boller et al. 2004 ; Meissle et al. 2012 ; Riedel et al. 2019 ; Conseil fédéral 2017.[8–11]

Encadré 1: Que signifie pesticide ?

En Suisse, en 2020, environ 500 substances actives étaient homologuées en tant que PPS et/ou biocides. Plus de 300 d'entre elles sont considérées comme pesticides.[2] L'effet produit par les pesticides sur les organismes est déterminé par leur toxicité, qui peut être multipliée par plus de mille en fonction de la substance active,[3, 4] par leur concentration dans l'environnement, la durée et la fréquence d'exposition ainsi que l'influence d'autres facteurs perturbateurs.[5, 6]

Pesticides : substances biologiquement actives utilisées pour lutter contre les organismes indésirables. Une distinction est faite entre les insecticides (employés contre les insectes), les herbicides (contre les végétaux), les fongicides (contre les champignons) et d'autres groupes de substances. En Suisse, les pesticides peuvent être homologués en tant que PPS, biocides ou médicaments.

Produits phytosanitaires (PPS) : conformément à la loi sur les produits chimiques, les PPS ont pour objectif de protéger les plantes (cultivées) ou les récoltes contre les organismes nuisibles, d'influencer les processus vitaux des végétaux d'une autre manière que les nutriments, d'inhiber une croissance indésirable des végétaux, d'anéantir des parties (indésirables) de la plante ou de conserver des produits végétaux. Il s'agit de produits issus de substances actives synthétiques ou naturelles[a] ou d'organismes.

Biocides : selon la loi sur les produits chimiques, les biocides sont des substances actives et des préparations qui ne sont pas des produits phytosanitaires et ont pour objectif de combattre les organismes nuisibles ou d'empêcher les dommages qu'ils peuvent causer. Ils sont utilisés en vue de détruire des agents pathogènes (désinfectants), de protéger des matériaux contre les microbes et les algues (agents protecteurs) ou de combattre d'autres organismes indésirables (produits antiparasitaires).[7]

a P. ex. le soufre, l'huile de paraffine, le spinosad, les extraits de plantes tels qu'huile de colza ou pyrèthre (ordonnance du DEFR sur l'agriculture biologique). Les pesticides d'origine naturelle se dégradent normalement plus vite que les synthétiques et sans produits de décomposition problématiques.[163–165] Le cuivre utilisé dans l'agriculture biologique et l'agriculture conventionnelle n'est pas dégradable.

Législation et objectifs

De nombreuses lois et ordonnances régissent l'homologation et l'utilisation des pesticides, et contribuent à réduire au mieux leurs effets indésirables sur l'environnement.[2] En ce qui concerne la mise en péril de l'environnement et de la biodiversité, le principe de précaution joue un rôle essentiel dans la législation. Alors que l'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux) impose des exigences quantitatives en ce qui concerne les teneurs en pesticides, ces exigences font défaut s'agissant des sols.[b]

La politique agricole actuelle ne comporte aucun objectif intermédiaire en ce qui concerne les pesticides.[c] Les objectifs environnementaux pour l'agriculture, qui concrétisent le droit en vigueur, contiennent trois objectifs liés aux pesticides. Les objectifs 1 et 2 n'ont pas été atteints selon le dernier rapport, le potentiel de l'objectif 3 n'est pas encore pleinement exploité.[12, 13]

Le plan d'action PPS est censé réduire les risques des PPS de moitié et de promouvoir des alternatives à la protection chimique des plantes.[10] En septembre 2020, 21 mesures avaient été introduites, sur les 51 formulées.[14] Selon les modélisations, les risques pour les milieux aquatiques[d] liés aux pesticides utilisés dans les grandes cultures présentaient entre 2012–2015 (période de référence du plan d'action) et 2018 une évolution constante voir décroissante pour les herbicides, une évolution constante du côté des fongicides et une évolution constante voire croissante pour les insecticides.[15]

Durant la session de printemps de 2021, l'initiative parlementaire 19.475 « Réduire le risque de l'utilisation des pesticides » a été approuvée par les deux chambres.[16] Celle-ci ancre dans la loi la diminution du risque lié à l'emploi des pesticides : concernant

b A l'exception des valeurs indicatives, seuils d'investigation et valeurs d'assainissement pour le cuivre, stipulées par l'ordonnance sur les atteintes portées au sol (OSol).

c Au contraire de la PA 2005, les politiques agricoles 2014–2017 et 2018–2021 n'ont formulé aucun objectif concernant les pesticides, bien que les objectifs antérieurs n'aient pas été réalisés.

d Exprimé en tant que potentiel de risque résultant de la quantité de PPS utilisée, de leur concentration modélisée dans les eaux et de leur toxicité.[15]

les PPS, une réduction de moitié des risques pour les eaux et les milieux proches de l'état naturel d'ici 2027 par rapport à la période 2012–2015 ; concernant les biocides, une réduction non définie de manière plus précise. Ne sont pas prescrites les mesures permettant d'atteindre ces objectifs et de réduire le risque lié à l'emploi des pesticides. Une réduction du risque ainsi que la mise en œuvre efficace des autres améliorations ancrées dans la législation dans les domaines de l'homologation, de l'information et de la protection des eaux peuvent contribuer à protéger les eaux de surface, les eaux souterraines et la biodiversité.

Emploi des pesticides en Suisse

Le volume des ventes de PPS fait l'objet d'une saisie centralisée. Il a diminué de 2220 à 1950 tonnes entre 2015 et 2019.[17] Cela ne permet toutefois guère de statuer à propos de l'évolution des risques encourus par l'environnement et la biodiversité.[3, 18] Ceux-ci sont en effet avant tout déterminés par la toxicité des PPS et le mode d'exposition des organismes dans l'environnement (encadré 1).[5, 6] Le volume des ventes de PPS présentant un potentiel de risque particulier[e] a décru de 244 à 212 tonnes pendant la même période.[17]

Nul ne sait actuellement avec précision où les PPS sont utilisés et dans quelles proportions.[f] Selon les estimations, 85–90 % du volume total de PPS est utilisé dans l'agriculture et 10–15 %, dans le milieu urbain.[19] En sylviculture, environ 0,02 % du volume de substances actives des PPS sont utilisées, respectivement 15–20 % du volume de cyperméthrine vendu, qui est très toxiques pour les organismes aquatiques.[20, 21]

Aux PPS s'ajoutent, dans le milieu urbain et dans l'agriculture, plusieurs centaines de tonnes de biocides.[22, 23] Faute de saisie centralisée jusqu'à présent, une estimation quantitative est difficile.[f] Pour l'environnement, l'emploi de biocides, à l'exception de quelques substances actives, pose globalement moins de problèmes que l'utilisation de PPS,[24] car, dans de nombreuses utilisations, les biocides parviennent moins directement dans l'environnement.[g]

Dans l'agriculture, l'emploi de pesticides (quantité par ha, fréquence) est le plus élevé dans la culture des fruits, des vignes, des pommes de terre, des betteraves à sucre et de certains légumes.[25] Les herbicides sont aussi utilisés dans les prairies et les pâturages. Jusqu'à présent, les estimations des risques réels pour les organismes aquatiques ne sont disponibles que pour certaines grandes cultures.[15] La figure 2 montre ces potentiels de risque et fournit des indications concernant les grandes cultures pour lesquelles des mesures de réduction du risque pourraient tendre à être les plus efficaces à l'échelle de la Suisse. A cet égard, il convient de considérer que les risques estimés peuvent sensiblement varier en fonction des paramètres de modèle et des valeurs utilisés.[26]

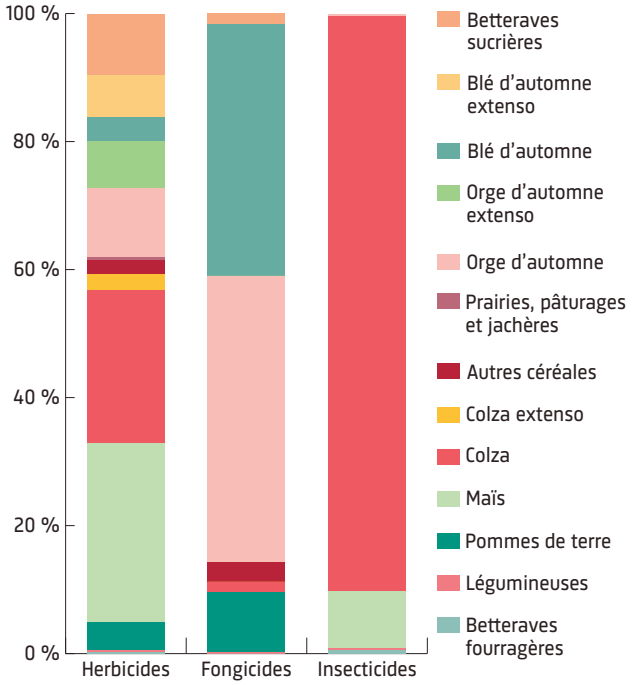

Fig. 2 : Potentiels de risque pour les eaux de surface, fondés sur les emplois d'herbicides, de fongicides et d'insecticides dans les grandes cultures (extrapolés sur l'ensemble des surfaces cultivées en Suisse, moyennes des années 2016–2018). Exemple : concernant les insecticides, environ 90 % des risques liés à l'emploi des pesticides dans les grandes cultures sont imputables aux cultures de colza. Une comparaison des cultures n'est possible qu'à l'intérieur des groupes de substances et non entre les herbicides, fongicides et insecticides. Sources : rapport agricole 2020, Dépouillement centralisé indicateurs agro-environnementaux 2009–2018.

Apports de pesticides

En général, les pesticides sont épandus en particulier sous forme de PPS, directement dans l'environnement. Une partie des pesticides épandus aboutit dans le sol ou, par dérive, dans les surfaces voisines, avant que les organismes visés ne soient atteints. Une autre partie parvient plus tard, par le biais des organismes cibles, dans les sols et les eaux, par exemple en cas de pluie. Ces pertes non voulues varient toutefois fortement en fonction de la technique utilisée et de la situation.[27] Elles sont particulièrement élevées pour les semences traitées et en cas d'épandage par hélicoptère, où près de 80–98 % des substances actives aboutissant dans l'air, le sol ou les eaux.[28–32]

Bien documentée, la charge en pesticides des petits cours d'eau est principalement imputable à l'agriculture.[33] Les pesticides utilisés dans l'agriculture aboutissent dans les eaux surtout par ruissellement, érosion, via les conduites de drainage et des « courts-circuits » tels que bouches d'égouts ou fossés de drainage, et de sources ponctuelles.[34–36] Autres canaux : le lessivage et la dérive. Les apports du milieu urbain parviennent dans les eaux soit par voie directe soit via des rejets de stations d'épuration.[37]

e Substances dont on envisage la substitution selon l'OPPh ou qui persistent dans le sol (DT50 > 6 mois).[10]

f Dans le cadre du plan d'action PPS, un projet de quantification des volumes de PPS utilisés dans les différents champs d'application des PPS est en cours. Suite à l'initiative parlementaire 19.475, les biocides font aussi désormais l'objet d'une obligation de communication à la Confédération concernant leur mise sur le marché (jusque-là seulement appliquée aux PPS). De plus, un système d'information centralisé est à l'étude pour l'utilisation des PPS et des biocides. Les dernières estimations pour les domaines non agricoles ont révélé des quantités respectives de 59 et 29 tonnes en 2006 et en 2010 pour les substances actives utilisées en horticulture.[166] Le volume de substance active de huit herbicides destinés à l'usage privé a été estimé à 97,5 tonnes en 2008;[167] Aucune tendance n'est identifiable concernant les quantités vendues.[150]

g Les biocides parviennent parfois dans l'environnement uniquement via les stations d'épuration des eaux, où une proportion importante est éliminée. Par conséquent, le nombre de biocides trouvés dans les eaux est inférieur à celui des PPS. En outre, il est prévu d'équiper les stations d'épuration des eaux avec une étape de traitement supplémentaire.[22, 37]

Présence et effets des pesticides

L'emploi et les émissions de pesticides peuvent générer, dans l'environnement, des concentrations critiques pour les organismes non cibles, les pesticides étant parfois mis en évidence loin du site de l'épandage dans l'air, le sol, les eaux ou dans des organismes.[38–41] A cet égard, non seulement la présence et les effets des différentes substances actives entrent en ligne de compte, mais aussi la présence de plusieurs pesticides et un éventuel effet cocktail. S'y ajoutent les produits de dégradation persistants des divers pesticides, qui peuvent être présents dans l'environnement dans des concentrations aussi élevées voire plus élevées que leur substance de départ et s'avérer, dans certains cas, plus toxiques même.[42]

Les incidences des (différents) pesticides sur les organismes ne sont souvent pas faciles à déterminer. Ainsi, la présence d'un pesticide dans l'environnement ne signifie pas forcément que des organismes en sont affectés (encadré 1). Par ailleurs, les pesticides agissent souvent de concert avec d'autres facteurs de stress.

Mode d'action

Les impacts des pesticides sur les organismes sont déterminés par la toxicité et la concentration des substances actives, la durée et la fréquence d'exposition ainsi que par l'influence d'autres facteurs.[43–45] En tant que substances biologiquement actives, les pesticides exercent une action directe, aiguë ou chronique, sur les organismes et peuvent les détruire ou influer sur leur reproduction, leur développement, leur santé et leur comportement. Certains pesticides ont un effet très spécifique, d'autres affectent de nombreuses espèces animales et végétales. Les effets indirects revêtent une grande importance, par exemple une réduction de l'offre alimentaire ou une modification des réseaux alimentaires (fig. 3). Enfin, les pesticides peuvent accroître la sensibilité d'organismes vis-à-vis d'autres facteurs de stress tels que maladies ou perte d'habitat.[46–50]

Les pesticides affectent non seulement des individus, mais aussi des populations entières (fig. 3).[51] Il peut en résulter la disparition locale ou régionale d'espèces. De même, l'utilisation de pesticides peut exercer une influence négative sur les biocénoses, les milieux et les services écosystémiques, tels que la pollinisation ou la qualité de l'eau.[51–54] Les pesticides représentent donc un danger pour la biodiversité.

Estimation des incidences des pesticides sur l'environnement

Lors de l'homologation des substances actives, leur toxicité est testée sur une sélection d'organismes, mais la toxicité croisée de plusieurs substances actives présentes en même temps dans un cours d'eau p. ex. ne l'est pas (fig. 4), ni les interactions avec d'autres facteurs de stress. De plus, certains groupes d'organismes importants ne sont pas ou insuffisamment pris en considération, tels que les champignons aquatiques, les amphibiens et les reptiles.[57, 58] L'estimation des risques effectuée actuellement dans le cadre de la procédure d'homologation ne permet d'évaluer les effets indésirables sur la biodiversité que dans une mesure limitée et est probablement sous-estimée.[59, 60] Par conséquent, il faut se demander si l'objectif lié à l'homologation des pesticides conformément à l'OPPh et à l'OPBio – éviter les effets secondaires inacceptables produits sur l'être humain, la faune et l'environnement – est effectivement atteint sur la base de l'évaluation actuelle des risques, notamment pour les biocénoses et les écosystèmes.

Les paragraphes qui suivent s'intéressent à la présence de pesticides dans les sols et les eaux, ainsi qu'à leurs effets sur certains groupes d'organismes, biocénoses et services écosystémiques.

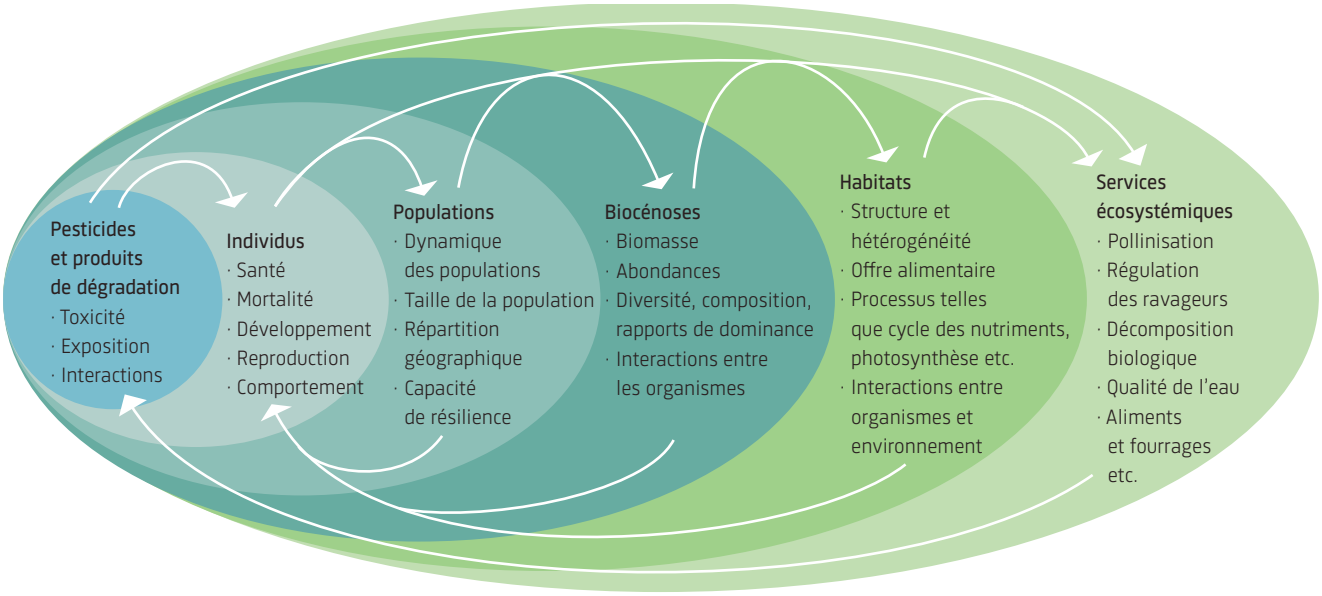

Fig. 3: L'emploi de pesticides peut involontairement affecter la biodiversité, de l'individu au milieu. Cela peut avoir un impact négatif sur les services écosystémiques tels que la régulation naturelle des ravageurs et parfois accroître encore le recours aux pesticides. L'impact sur les denrées alimentaires et les fourrages peut être positif grâce à l'effet voulu de l'utilisation des pesticides sur les organismes cibles, mais il peut aussi être négatif par le biais d'autres effets involontaires sur les organismes non cibles ou en raison des résidus de pesticides. Basé sur Köhler & Triebskorn 2013; TFSP 2015; Søgaard Jørgensen et al. 2018 .[51, 55, 56]

Sols

Deux études suisses portant sur des échantillons de sols provenant resp. de 100 et 169 champs ont mis en évidence des pesticides sur l'ensemble des surfaces conventionnelles ou en production intégrée et sur 90 % des surfaces vouées à une exploitation biologique.[61, 62] Même après vingt ans de culture biologique, jusqu'à 16 pesticides synthétiques ont été mis en évidence, ce qui souligne le long temps de rétention de ces substances dans les sols. Les concentrations observées dans les sols affectés à une exploitation conventionnelle étaient environ dix fois supérieures à celles trouvées dans les cultures biologiques. L'une des études n'a examiné que les néonicotinoïdes[h] et a constaté leur présence dans plus de 80 % des sols des surfaces de promotion de la biodiversité.[62]

Diverses études révèlent des effets négatifs d'insecticides et de fongicides sur les organismes du sol, tels que les mycorhizes.[61, 63–71] Le traitement des semences peut notamment avoir une incidence négative sur les lombrics ainsi que sur les communautés bactériennes dans la zone racinaire des plantes.[72, 73] Pour les herbicides, en revanche, peu de répercussions négatives sur les organismes du sol ont été documentées[70] et d'autres facteurs d'exploitation peuvent jouer un rôle plus pertinent que l'emploi d'herbicides.[74] Après un épandage de pesticides, les organismes du sol récupèrent à des vitesses différentes, ce qui peut influer sur les rapports de dominance entre eux et leur diversité.[75, 76]

L'incidence de l'emploi de pesticides sur l'ensemble de l'écosystème sol et en particulier sur les services écosystémiques tels que la fertilité du sol[77, 78] n'est toutefois pas encore totalement comprise.[79] De plus, des critères de qualité et des normes légales permettant d'évaluer l'état du sol du point de vue de la teneur en pesticides, à l'instar des eaux, font largement défaut. Cependant, en modifiant l'abondance et la diversité des organismes du sol, les pesticides peuvent exercer une influence négative sur les services écosystémiques, tels que la dégradation biologique des substances.[80]

Eaux de surface

En Suisse, les pesticides sont omniprésents dans les eaux de surface dont les bassins versants sont voués à l'agriculture – environ 150 substances actives ont pu être mises en évidence dans les eaux et leurs sédiments, parfois près de 100 tout au long de l'année dans certaines eaux et jusqu'à 65 en même temps dans un échantillon.[24, 33, 81–85]

Les pesticides sont fortement préjudiciables aux organismes aquatiques, tels que larves d'insectes, algues, champignons, poissons, notamment dans les petits cours d'eau dont le bassin versant est marqué par l'agriculture. Les normes de l'OEaux pour certaines substances actives[i] ainsi que d'autres critères de qualité chroniques[j] sont fréquemment dépassés, souvent pendant des mois, et les critères de qualité aigus le sont régulièrement (fig. 4), dans nombre de cas d'un facteur supérieur à dix.[6, 33, 52, 83, 84, 86–90] Par ailleurs, les critères de qualité sont souvent dépassés simultanément par plusieurs substances actives, ce qui expose les organismes à un cocktail de substances. La concentration totale des pesticides persiste souvent à un niveau si élevé que l'évaluation du risque du cocktail sur la base des substances mesurées indique une mauvaise qualité de l'eau.[6, 88] Les dépassements persistants et répétés ont pour effet que les biocénoses ne peuvent pas se rétablir. Les pics de concentration et donc l'exposition des organismes aquatiques ont parfois été sous-estimés de plus de cent fois jusqu'il y a peu en raison de la résolution temporelle limitée des séries de mesures et des processus d'analyse.[81, 82]

Une étude européenne montre les effets des pesticides sur les invertébrés aquatiques, avec des pertes allant jusqu'à 42 % des groupes d'espèces présentes au niveau régional.[91] En Suisse, une détérioration de l'état des biocénoses a été observée dans des cours d'eau dont le bassin versant présentait une part croissante de grandes cultures.[92]

Dans les milieux aquatiques, les pesticides peuvent entraver aussi bien la dégradation de matières organiques et de polluants, dans la mesure où le nombre, la diversité et les communautés d'organismes subissent une influence négative.[57, 93]

Eaux souterraines

Sur plus de la moitié des sites de mesure des eaux souterraines de Suisse, des pesticides ou leurs produits de dégradation sont régulièrement mis en évidence – au total plus de 40 substances différentes.[94, 95] Pour les stations de mesure de bassins versants affectés principalement à une exploitation agricole intensive, des pesticides sont mis en évidence dans pratiquement tous les échantillons.[96] Les concentrations de certains pesticides ou de leurs produits de dégradation excèdent dans plus de la moitié des stations de mesure des eaux souterraines du Plateau suisse 0,1 µg/l.[k, 97] Selon le canton, des concentrations supérieures à 0,1 µg/l ont été observées sur 0–70 % des points de prélèvement d'eau potable où des problèmes étaient soupçonnés.[98] Environ 95 % de ces concentrations étaient imputables à six substances actives utilisées presque exclusivement dans les grandes cultures et à leurs produits de dégradation.[99]

Seules des substances persistantes et mobiles atteignent les eaux souterraines, où les processus de dégradation sont lents et le séjour de l'eau souvent long. Par conséquent, des contaminants peuvent subsister dans les eaux souterraines pendant des décennies, même après l'interdiction des substances actives de départ.[94, 96]

h Les néonicotinoïdes acétamipride, imidaclopride, thiaméthoxame (date limite de vente : 1.7.21, date limite d'utilisation : 1.7.22) et thiaclopride (date limite de vente : 30.9.20, date limite d'utilisation: 30.9.21) sont pour l'instant encore admis en Suisse,[168] même si le dernier nommé est sur la liste des PPS à potentiel de risque particulier dont on envisage le remplacement (OPPh).

i 0,1 µg/l ou exigences numériques spécifiques, fondées sur des critères écotoxicologiques pour certaines substances actives.

j Critères de qualité environnementale pour une substance définie, dont on ne peut exclure qu'elle nuise à des organismes en cas de dépassement court ou prolongé.[37] Pour protéger les organismes aquatiques de dommages aigus, les critères de qualité aigus ne doivent pas être dépassés dans l'eau. Pour certains pesticides, les critères de qualité chroniques et aigus sont assortis d'exigences numériques dans l'OEaux.

k Conformément à l'OPBD (ordonnance du DFI sur l'eau potable et l'eau des installations de baignade et de douche accessibles au public) et à l'OEaux, une valeur maximale/exigence de 0,1 µg/l est appliquée à l'eau potable et aux eaux souterraines prévues à cet effet pour les pesticides et les produits de dégradation pertinents, c'est-à-dire jugés problématiques. En raison de la situation juridique en suspens concernant la pertinence des produits de dégradation du chlorothalonil, il ne peut être affirmé, au moment de la publication de la présente fiche d'information, si les concentrations supérieures à 0,1 µg/l de ces produits de dégradation sont considérées comme un dépassement des valeurs maximales/exigences ou non.[169] Le cas du chlorothalonil montre que la problématique des nombreux produits de dégradation est encore insuffisamment élucidée. De nouveaux acquis pourraient révéler à tout moment que des pesticides autorisés ou des produits de dégradation présents depuis longtemps peuvent être problématiques.[152]

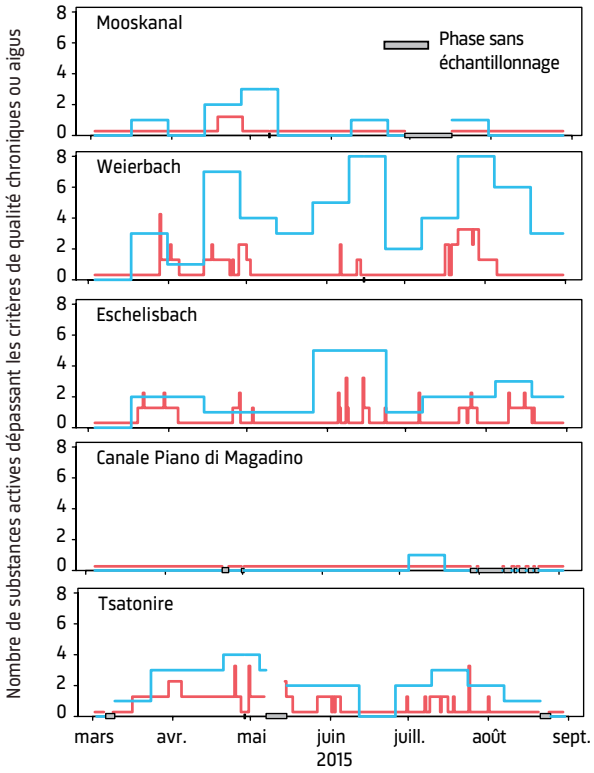

Fig. 4 : Nombre de substances actives ayant dépassé les critères de qualité chroniques (en bleu) et aigus (en rouge) dans une sélection de petits cours d'eau. La comparaison des critères de qualité aigus s'est fondée sur les concentrations des échantillons composites d'une demi-journée ; celle des critères de qualité chroniques, sur les concentrations moyennes de 14 jours. D'après Doppler et al. 2017 .[82]

Ecosystèmes terrestres

Les effets des pesticides sur la biodiversité terrestre apparaissent quand on compare entre elles les différentes surfaces ou régions soumises à des emplois plus ou moins intensifs de pesticides.[100–102] Les végétaux et les animaux peuvent être affectés par les apports directs et indirects de pesticides dans les cultures, mais aussi dans les habitats proches des surfaces traitées, tels que les lisières de forêt.[103–106]

Plantes

La diversité et le nombre des plantes adventices ont régressé à l'échelle européenne, notamment en raison de l'emploi d'herbicides.[107–109] Comme les plantes sont à la base de la chaîne alimentaire, le recul de leur diversité, de leur fréquence, de leur biomasse, de leur offre en fleurs et en graines se répercute sur d'autres organismes.[110] Ainsi, les plantes constituent une base alimentaire pour de nombreux insectes, qui servent eux-mêmes de nourriture pour les oiseaux.[111–113] De plus, les feuilles, le pollen, les graines et les fruits peuvent être contaminés par des pesticides[114, 115] et entraîner une exposition de la faune.[116, 117] Comme l'agriculture biologique renonce aux herbicides, elle a des répercussions particulièrement positives sur les plantes par rapport aux cultures conventionnelles.[68, 118]

Insectes

L'emploi de pesticides est un des multiples facteurs marquants du net recul observé en de nombreux endroits de la diversité et de l'abondance des insectes.[101, 119–121] Les insecticides nuisent aux insectes non cibles[122–124] généralement par voie directe. Les herbicides, en revanche, réduisent avant tout la nourriture disponible[110, 112] et modifient l'habitat des insectes de façon à pouvoir menacer leurs populations.[100, 101]

Il en résulte aussi une diminution des services écosystémiques des insectes. L'emploi de pesticides peut réduire la pollinisation des plantes sauvages et cultivées[112, 125, 126] de même que la régulation naturelle des ravageurs.[101] Ainsi, la diversité et la fréquence d'insectes prédateurs sont nettement plus basses dans les systèmes d'exploitation conventionnelle que biologiques.[118, 127]

Oiseaux et mammifères

Les pesticides peuvent exercer une influence négative directe ou indirecte sur les oiseaux et les mammifères et sur leurs populations (p. ex. empoisonnement resp. modification de l'habitat).[46, 128–134] De solides indices suggèrent que les insecticides nuisent aux populations d'oiseaux par la réduction de la biomasse d'insectes.[135–138] En Suisse, les effectifs d'oiseaux insectivores des milieux agricoles ont diminué de 60 % depuis les années 1990.[139] Cela serait une conséquence de l'emploi de pesticides, de techniques d'exploitation modernes ainsi que de remembrements. En même temps, les effectifs des espèces d'oiseaux des zones agricoles ayant un régime mixte et d'oiseaux insectivores des forêts sont demeurés stables ou affichent même une légère augmentation. Parmi les mammifères, les chauve-souris sont considérées comme particulièrement sensibles aux pesticides.[140] Les insecticides utilisés pour protéger le bois peuvent leur porter un préjudice direct dans leurs abris.[141, 142]

Coûts externes de l'emploi de pesticides

Le recours aux pesticides peut réduire les pertes de récolte et de qualité, accroître les rendements et donc augmenter les revenus des agricultrices et agriculteurs. Cependant, il génère toujours aussi des coûts : directs, par l'achat des pesticides ou des pulvérisateurs, et indirects, par l'influence négative sur les services écosystémiques tels que la régulation naturelle des ravageurs. Pour la société, il en résulte des coûts externes, non compensés par le marché, sous forme de dépenses pour la régulation et la réduction des effets indésirables, de même que pour les préjudices portés à la biodiversité, aux services écosystémiques et à la santé humaine.[143, 144]

Concernant la Suisse, il n'existe aucune analyse indépendante relative aux coûts externes de l'emploi de pesticides. Sur la base d'une étude d'associations de protection de l'environnement,[145] Avenir Suisse estime ces coûts, pour 2018, à 100 millions de francs.[146, 147] Les coûts effectifs devraient être supérieurs, notamment dans la mesure où certaines répercussions sur les écosystèmes n'ont pas été monétarisées et les biocides pas été pris en compte. Vision Landwirtschaft a estimé pour 2018 des coûts externes plus élevés d'environ 500 millions de francs.[148] Ces estimations ne tiennent pas compte des coûts externes occasionnés à l'étranger par la production d'aliments importés, ni des coûts qui pourraient survenir si les fournisseurs d'eau potable devaient prendre des mesures supplémentaires, par exemple, en raison des concentrations de produits de dégradation du chlorothalonil dans les eaux souterraines.

Pistes d'action

Les résidus de pesticides sont largement répandus dans les sols et les eaux. Les exigences légales concernant les teneurs en pesticides ainsi que les critères de qualité écotoxicologiques ne sont pas respectées dans de nombreux cours d'eau. Bon nombre d'études montrent que l'emploi de pesticides est préjudiciable à l'environnement et à la biodiversité. Les mesures adoptées jusqu'à présent de même que, en partie, les exigences légales et leur mise en œuvre[149, 150] s'avèrent insuffisantes pour éviter les effets indésirables des pesticides. Le principe de précaution est ainsi trop peu pris en compte.

Pour respecter les exigences légales et atténuer les effets indésirables des pesticides, il importe de réduire les risques auxquels ils exposent la biodiversité et l'environnement. A cet égard, l'ancrage légal de la réduction des risques par l'initiative parlementaire 19.475 fût une étape importante. En outre, il est indispensable de réduire l'emploi de pesticides à risque et les surfaces traitées, notamment dans les aires d'alimentation, dans la zone d'influence des espaces réservés aux eaux,[151] ainsi que des aires et zones protégées. Les émissions doivent être réduites et un arrêt de l'emploi des pesticides à risque élevé doit être décrété.

Pour y remédier, des stratégies globales sont nécessaires[152] comprenant des changements au niveau social, politique et économique, surtout dans le système agro-alimentaire, mais aussi dans d'autres domaines d'application des pesticides. Les pistes d'action présentées (cf. encadré 2) reposent notamment sur des leviers et des points d'intervention nécessaires à une transition vers davantage de durabilité d'après le Conseil mondial pour la biodiversité (IPBES).[153]

Des mesures importantes ont été initiées concernant diverses pistes d'action.[10, 16] Toutefois, beaucoup d'approches connues de la pratique et de la science sont encore trop peu utilisées.[154–156] L'évaluation des mesures doit examiner leurs effets indésirables potentiels sur l'environnement tout au long de la chaîne d'approvisionnement, en Suisse et à l'étranger, et traiter les conflits d'objectifs.[74, 152, 156–158] Les problèmes environnementaux ne doivent pas être délocalisés ou exportés, mais résolus.

Encadré 2 : Pistes d'action pour réduire les impacts indésirables des pesticides sur la biodiversité et l'environnement.[10, 18, 19, 34, 35, 99, 152, 153, 159–161] Une réduction substantielle ne pourra être réalisée que si un ensemble approprié d'instruments politiques, économiques et communicationnels est mobilisé.[152, 153, 162]

Systèmes de production durables

1. Mise en œuvre de systèmes de production plus durables : Mettre en pratique des mesures de protection des végétaux sans ou avec peu de pesticides et de plus faibles émissions (régulation naturelle des ravageurs, mesures technologiques etc.) (fig. 1 et 2). Adopter des systèmes de production durables adaptés au site et moins tributaires de pesticides.
2. Investissements dans l'innovation et la recherche : Développer des mesures indirectes et non chimiques de protection des plantes ainsi que des méthodes permettant une utilisation des biocides plus soucieuse de l'environnement.
3. Interdiction de pesticides particulièrement dangereux : Interdire les pesticides présentant un risque élevé pour l'environnement, tout en assurant que les éventuelles substances de remplacement ne génèrent pas d'effets indésirables. Examiner les décisions d'homologation sur la base des effets réels des pesticides dans l'environnement.
4. Renforcement de la formation et de la diffusion du savoir : Diffuser les connaissances concernant la protection des végétaux indirecte, les variantes aux biocides ainsi que d'autres mesures de réduction des risques. Encourager les conseils indépendants.

Echelles de valeurs et comportements de consommation

5. Encouragement de comportements durables : Informer la société et les parties concernées des conséquences de leur comportements et promouvoir des comportement durables (cf. CF art. 73). Réduire les gaspillages d'aliments, modifier les habitudes de consommation (sélection des aliments etc.) de façon à réduire les effets indésirables des pesticides en Suisse et à l'étranger. S'abstenir d'utiliser des pesticides dans la sphère privée.

Cadre favorable

6. Prise en compte des coûts externes : Intégrer les coûts externes dans les décisions, les internaliser et les imputer aux parties responsables. Abolir ou redéfinir les subventions contribuant à ces coûts. Compenser les répercussions non monétarisables sur la biodi versité au moyen d'une promotion de la biodiversité.
7. Création d'incitations et juste configuration des changements de système : Introduire des changements de système assortis d'incitations ciblées et soutenir les personnes concernées.
8. Définition d'objectifs contraignants et vérification de leur réalisation : Documenter les domaines et sites d'utilisation, les applications, les concentrations de pesticides dans l'environnement ainsi que leurs risques potentiels. Fixer des objectifs contraignants et définir des indicateurs appropriés.
9. Information transparente et en temps utile : Communiquer de manière transparente les décisions relatives à l'homologation, les pesées d'intérêts effectuées au cours du processus, p. ex. entre la production et la protection de l'environnement, les informations relatives aux risques et aux champs d'application des pesticides et les progrès accomplis dans la réalisation des objectifs.
10. Renforcement du droit environnemental et de son exécution : Remédier aux carences de la législation et de son exécution (fixer des exigences chiffrées sur la base de critères de qualité écotoxicologiques et d'une évaluation des risques de l'effet cocktail, formuler des restrictions applicables dans le cadre de l'homologation, etc.).

Conclusion

Les incidences négatives des pesticides sur les organismes non cibles, sur la biodiversité et en particulier sur les eaux sont bien documentées au plan scientifique. De même, les dépassements parfois élevés et prolongés des exigences légales et des critères écotoxicologiques relatifs à la qualité de l'environnement en Suisse ont été très souvent démontrés. Il en résulte des coûts significatifs, mais difficiles à quantifier dans leur intégralité, pour la société.

En même temps, des lacunes subsistent : concernant, par exemple, les domaines d'utilisation des pesticides, l'effet cocktail et les interactions avec d'autres facteurs de risque, pouvant renforcer les effets négatifs sur la biodiversité, ainsi que leurs répercussions sur les biocénoses et les services écosystémiques. Les tests de toxicité requis pour l'homologation des pesticides ne prennent pas, ou trop peu, en considération certains aspects essentiels pour la biodiversité tels que l'effet cocktail, les interactions et les effets à long terme. Ainsi, les effets indésirables des pesticides ne sont identifiés à l'avance que dans une mesure limitée et les effets négatifs sur la biodiversité sont donc encore très probablement sous-estimés.

Certes, de nombreuses réglementations existent en Suisse concernant les pesticides et des mesures importantes ont déjà été initiées (plan d'action Produits phytosanitaires, approbation de l'initiative parlementaire 19.475 « Réduire le risque d'utilisation des pesticides » et autres activités). Afin que les prescriptions légales soient observées, que les objectifs soient réalisés et que les critères de qualité écotoxicologiques scientifiquement fondés soient respectés, une rapide mise en œuvre de mesure efficaces s'impose toutefois. Cela exige des changements au plan social, politique et économique, touchant surtout le système agro-alimentaire, mais aussi d'autres domaines d'utilisation des pesticides (encadré 2).

ODD : OBJECTIFS DE DURABILITÉ DE L'ONU

En publiant cette fiche, l'Académie suisse des sciences naturelles apporte sa contribution aux ODD 2, 3, 6, 12, 15:
« Eliminer la faim, assurer la sécurité alimentaire, améliorer la nutrition et promouvoir une agriculture durable », « Donner aux individus les moyens de vivre une vie saine et promouvoir le bien-être à tous les âges », «Garantir l'accès de tous à l'eau et à l'assainissement et assurer une gestion durable des ressources en eau », « Etablir des modes de consommation et de production durables » et « Préserver et restaurer les écosystèmes terrestres »

> sustainabledevelopment.un.org
> eda.admin.ch/agenda2030/fr/home/agenda-2030/die-17-ziele-fuer-eine-nachhaltige-entwicklung.html

1 – 169 Une version de la présente fiche d'information, accompagnée des références bibliographiques, peut être téléchargée sur biodiversite.scnat.ch/publications/factsheets

MENTION LÉGALES

EDITRICE ET CONTACT
Académie suisse des sciences naturelles (SCNAT) • Forum Biodiversité Suisse
Maison des Académies • Laupenstrasse 7 • Case postale • 3001 Berne
+41 31 306 93 40 • biodiversite@scnat.ch • biodiversite.scnat.ch

Jodok Guntern, chef suppléant du Forum Biodiversité :
jodok.guntern@scnat.ch

Florian Altermatt, président du Forum Biodiversité :
florian.altermatt@eawag.ch

PROPOSITION DE CITATION
Guntern J et al. (2021) Pesticides : répercussions sur l'environnement, la biodiversité et les services écosystémiques. Swiss Academies Factsheet 16 (2)

AUTEURES ET AUTEURS
Jodok Guntern (Forum Biodiversité Suisse, SCNAT) • Bruno Baur (Université de Bâle) • Karin Ingold (Université de Berne, Eawag) • Christian Stamm (Eawag) • Ivo Widmer (Forum Biodiversité Suisse, SCNAT) • Irene Wittmer (Plateforme VSA Qualité de l'eau) • Florian Altermatt (Président du Forum Biodiversité, SCNAT, Université de Zurich)

REMERCIEMENT
Andri Bryner (Eawag) • Tobias Doppler (Plateforme VSA Qualité de l'eau) • Kathrin Fenner (Université de Zurich, Eawag) • Marion Junghans (Centre Ecotox) • Kurt Seiler (Interkantonales Labor AR, AI, SH)

RÉDACTION
Ursula Schöni et Daniela Pauli (Forum Biodiversité Suisse, SCNAT)

TRADUCTION
Henri-Daniel Wibaut

RELECTURE
Danièle Martinoli (Forum Biodiversité Suisse, SCNAT)

MISE EN PAGE
Olivia Zwygart (SCNAT)

ILLUSTRATION
Monika Rohner

ISSN (print): 2297-1602
ISSN (en ligne): 2297-1610

DOI: 10.5281/zenodo.4680677

Cradle to Cradle™-factsheet certifiée et climatiquement neutre par Vögeli AG à Langnau.

Bibliographie

1 Tamm L, Speiser B, Niggli U (2018) **Reduktion von Pflanzenschutzmitteln in der Schweiz: Beitrag des Biolandbaus.** Agrarforschung Schweiz 9: 52–59.

2 Schweizerische Eidgenossenschaft (2020) **19.475 Parlamentarische Initiative Risiko beim Einsatz von Pestiziden reduzieren.** Bericht der Kommission für Wirtschaft und Abgaben des Ständerats.

3 Schulz R, Bub S, Petschick LL, Stehle S, Wolfram J (2021) **Applied pesticide toxicity shifts toward plants and invertebrates, even in GM crops.** Science 372: 81–84.

4 Korkaric M, Hanke I, Grossar D, Neuweiler R, Christ B, Wirth J, Hochstrasser M, Dubuis P-H, Kuster T, Breitenmoser S, Egger B, Perren S, Schürch S, Aldrich A, Jeker L, Poiger T, Daniel O (2020) **Datengrundlage und Kriterien für eine Einschränkung der PSM-Auswahl im ÖLN.** Agroscope Science 106: 31.

5 Ashauer R, Kuhl R, Zimmer E, Junghans M (2020) **Effect Modeling Quantifies the Difference Between the Toxicity of Average Pesticide Concentrations and Time-Variable Exposures from Water Quality Monitoring.** Environmental Toxicology and Chemistry 39: 2158–2168.

6 Rösch A, Beck B, Hollender J, Stamm C, Singer H, Doppler T, Junghans M (2019) **Geringe Konzentrationen mit grosser Wirkung. Nachweis von Pyrethroid- und Organophosphat-Insektiziden in Schweizer Bächen im pgl-1-Bereich.** Aqua & Gas 11: 54–66.

7 BAFU (2020) **Sorgfältiger Umgang mit Biozidprodukten.** https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/chemikalien/fachinformationen/sorgfaeltiger-umgang-mit-biozidprodukten.html. Accessed 20 Jan 2021.

8 Meissle M, Romeis J, Bigler F (2012) **Bt-Mais – Ein möglicher Beitrag zur integrierten Produktion in Europa?** Agrarforschung Schweiz 3: 292–297.

9 Boller EF, Avilla J, Joerg E, Malavolta C, Wijnands FG, Esbjerg P (2004) **Integrated production. Principles and Technical Guidelines, 3rd edition.** IOBC/wprs Bulletin 27: 49.

10 Schweizerischer Bundesrat (2017) **Aktionsplan zur Risikoreduktion und nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln.** Bericht des Bundesrates.

11 Riedel J, Meyer S, Guyer U (2019) **Bioforschungstagung 2018: Den Pflanzenschutz neu denken.** Agrarforschung Schweiz 10: 36–39.

12 BAFU, BLW (2008) **Umweltziele Landwirtschaft. Hergeleitet aus bestehenden rechtlichen Grundlagen.** Umwelt-Wissen Nr. 0820. Bundesamt für Umwelt, Bern: 221.

13 BAFU, BLW (2016) **Umweltziele Landwirtschaft. Statusbericht 2016.** Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1633: 114.

14 BLW, BAFU, BLV, SECO, Agroscope (2020) **Umsetzung Aktionsplan Pflanzenschutzmittel.**

15 de Baan L, Blom JF, Daniel O (2020) **Pflanzenschutzmittel im Feldbau: Einsatz und Gewässerrisiken von 2009 bis 2018.** Agrarforschung Schweiz 11: 162–174.

16 WAK-S (2021) Parlamentarische Initiative 19.475. **Das Risiko beim Einsatz von Pestiziden reduzieren.** In: Curia Vista. https://www.parlament.ch/de/ratsbetrieb/suche-curia-vista/geschaeft?AffairId=20190475. Accessed 12 Mar 2021.

17 BLW (2020) **Verkaufsmengen der Pflanzenschutzmittel-Wirkstoffe nach Hauptgruppen.** Excel-Dokument. https://www.blw.admin.ch/blw/de/home/nachhaltige-produktion/pflanzenschutz/pflanzenschutzmittel/verkaufsmengen-der-pflanzenschutzmittel-wirkstoffe.html. Accessed 20 Jan 2021.

18 Möhring N, Gaba S, Finger R (2019) **Quantity based indicators fail to identify extreme pesticide risks.** Science of the Total Environment 646: 503–523.

19 Vision Landwirtschaft (2016) **Pestizid-Reduktionsplan Schweiz. Aktuelle Situation, Reduktionsmöglichkeiten, Zielsetzungen und Massnahmen.**

20 Schütz A, Dietsch P, Thomas M (2020) **Prüfung von Alternativen zu Pflanzenschutzmitteln im Wald. Schlussbericht zur externen Vorstudie.** Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU). Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL.

21 BLW (2020) **Verkaufsmengen je Pflanzenschutzmittel-Wirkstoff. Wirkstoffe gemäss Anhang 1 der Pflanzenschutzmittelverordnung (SR 916.161) für das jeweilige Jahr.** Excel-Dokument. https://www.blw.admin.ch/blw/de/home/nachhaltige-produktion/pflanzenschutz/pflanzenschutzmittel/verkaufsmengen-der-pflanzenschutzmittel-wirkstoffe.html. Accessed 20 Jan 2021.

22 Burkhardt M, Dietschweiler C, Kupper T (2016) **Biozidprodukte – Eintrag in Gewässer. Verbrauchsmengen biozider Wirkstoffe in Schutzmitteln, Antifoulings und im Veterinärbereich.** Aqua & Gas 4: 46–54.

23 Burkhardt M, Dietschweiler C (2013) **Mengenabschätzung von Bioziden in Schutzmitteln in der Schweiz – Bautenfarben und –putze (PA 7), Holz (PA 8), Mauerwerk (PA 10) und Antifouling (PA 21).** Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU).

24 Wittmer I, Moschet C, Simovic J, Singer H, Stamm C, Hollender J, Junghans M, Leu C (2014) **Über 100 Pestizide in Fliessgewässern.** Aqua & Gas 3: 32–43.

25 BLW (2020) **Verkauf und Einsatz von Pflanzenschutzmitteln.** In: Agrarbericht 2020. https://www.agrarbericht.ch/de/umwelt/wasser/verkauf-und-einsatz-von-pflanzenschutzmitteln. Accessed 20 Jan 2021.

26 de Baan L (2020) **Sensitivity analysis of the aquatic pesticide fate models in SYNOPS and their parametrization for Switzerland.** Science of the Total Environment 715: 136881.

27 Rodríguez-Eugenio N, McLaughlin M, Pennock D (2018) **Soil pollution a hidden reality.** FAO, Rome. 142.

28 Goulson D (2014) **Pesticides linked to bird declines.** Nature 511: 295–296.

29 Bonmatin J-M, Giorio C, Girolami V, Goulson D, Kreutzweiser DP, Krupke CH, Liess M, Long E, Marzaro M, Mitchell E, Noome D, Simon-Delso N, Tapparo A (2014) **Environmental fate and exposure; neonicotinoids and fipronil.** Environmental Science and Pollution Research 22: 35–67.

30 Simon-Delso N, Amaral-Rogers V, Belzunces LP, et al (2014) **Systemic insecticides (neonicotinoids and fipronil): trends, uses, mode of action and metabolites.** Environmental Science and Pollution Research 22: 5–34.

31 Viret O, Siegfried W, Holliger E, Raisigl U (2003) **Comparison of spray deposits and efficacy against powdery mildew of aerial and ground-based spraying equipment in viticulture.** Crop Protection 22: 1023–1032.

32 Robin SUR, Stork A (2003) **Uptake, translocation and metabolism of imidacloprid in plants.** Bulletin of Insectology 56: 35–40.

33 Spycher S, Teichler R, Vonwyl E, Longrée P, Stamm C, Singer H, Daouk S, Doppler T, Junghans M, Kunz M (2019) **Anhaltend hohe PSM-Belastung in Bächen.** Aqua & Gas 4: 14–25.

34 Kobierska F, Koch U, Kasteel R, Stamm C, Prasuhn V (2020) **Plant protection product losses via tile drainage: A conceptual model and mitigation measures.** Agrarforschung Schweiz 11: 115–123.

35 Prasuhn V, Doppler T, Spycher S, Stamm C (2018) **Pflanzenschutzmitteleinträge durch Erosion und Abschwemmung reduzieren.** Agrarforschung Schweiz 9: 44–51.

36 Schönenberger U, Stamm C (2021) **Hydraulic shortcuts increase the connectivity of arable land areas to surface waters.** Hydrology and Earth System Sciences 25: 1727–1746.

37 Braun C, Gälli R, Leu C, Munz N, Schindler Wildhaber Y, Strahm I, Wittmer I (2015) **Mikroverunreinigungen in Fliessgewässern aus diffusen Einträgen. Situationsanalyse.** Umwelt Zustand Nr. 1514. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern.

38 Wood TJ, Goulson D (2017) **The environmental risks of neonicotinoid pesticides: a review of the evidence post 2013.** Environmental Science and Pollution Research 24: 17285–17325.

39 Gregorio V, Büchi L, Anneville O, Rimet F, Bouchez A, Chèvre N (2012) **Risk of herbicide mixtures as a key parameter to explain phytoplankton fluctuation in a great lake: the case of Lake Geneva, Switzerland.** Ecotoxicology 21: 2306–2318.

40 Amt für Natur und Umwelt Graubünden (2020) **Vom Winde verweht: Messung von Pestiziden in der Luft im Münstertal (2019).**

41 TIEM (2020) **Pestizid-Belastung der Luft. Eine deutschlandweite Studie zur Ermittlung der Belastung der Luft mit Hilfe von technischen Sammlern, Bienenbrot, Filtern aus Be- und Entlüftungsanlagen und Luftgüte-Rindenmonitoring hinsichtlich des Vorkommens von Pestizid-Wirkstoffen, insbesondere Glyphosat.** Im Auftrag von Bündnis für eine enkeltaugliche Landwirtschaft e.V..

42 Boxall AB, Sinclair CJ, Fenner K, Kolpin D, Maund SJ (2004) **When synthetic chemicals degrade in the environment. What are the absolute fate, effects, and potential risks to humans and the ecosystem?** Environmental Science & Technology 38: 368A-375A.

43 Ashauer R (2009) **Effekte schwankender Schadstoffbelastungen.** EAWAG News 67: 12–14.

44 Nyman A-M, Schirmer K, Ashauer R (2014) **Importance of toxicokinetics for interspecies variation in sensitivity to chemicals.** Environmental Science & Technology 48: 5946–5954.

45 Chevillat V, Balmer O, Birrer S, Doppler V, Graf R, Jenny M, Pfiffner L, Rudmann C, Zellweger-Fischer J (2012) **Gesamtbetriebliche Beratung steigert Qualität und Quantität von Ökoausgleichsflächen.** Agrarforschung Schweiz 3: 104–111.

46 Schmidt B (2007) **Prädatoren, Parasiten und Geduld: Neue Erkenntnisse zur Wirkung von Pestiziden auf Amphibien.** Zeitschrift für Feldherpetologie 14: 1–8.

47 Schneeweiss A, Werner I (2019) **Ökotoxikologische Wirkungen von PSM auf Fische. Eine Literaturstudie untersucht mögliche Auswirkungen von priorisierten PSM.** Aqua & Gas 11: 82–91.

48 Vidau C, Diogon M, Aufauvre J, Fontbonne R, Viguès B, Brunet J-L, Texier C, Biron DG, Blot N, El Alaoui H, Belzunces LP, Delbac F (2011) **Exposure to sublethal doses of fipronil and thiacloprid highly increases mortality of honeybees previously infected by Nosema ceranae.** PLoS one 6: e21550.

49 Pettis JS, vanEngelsdorp D, Johnson J, Dively G (2012) **Pesticide exposure in honey bees results in increased levels of the gut pathogen Nosema.** Naturwissenschaften 99: 153–158.

50 Fauser-Misslin A, Sadd BM, Neumann P, Sandrock C (2014) **Influence of combined pesticide and parasite exposure on bumblebee colony traits in the laboratory.** Journal of Applied Ecology 51: 450–459.

51 Köhler HR, Triebskorn R (2013) **Wildlife ecotoxicology of pesticides: Can we track effects to the population level and beyond?** Science 341: 759–765.

52 Burdon FJ, Munz NA, Reyes M, Focks A, Joss A, Räsänen K, Altermatt F, Eggen RIL, Stamm C (2019) **Agriculture versus wastewater pollution as drivers of macroinvertebrate community structure in streams.** Science of the Total Environment 659: 1256–1265.

53 Stamm C, Burdon F, Fischer S, Kienle C, Munz N, Tlili A, Altermatt F, Behra R, Bürgmann H, Joss A, Räsänen K, Eggen R (2017) **Einfluss von Mikroverunreinigungen. Lebensgemeinschaften in Fliessgewässern – Ergebnisse aus dem Projekt EcoImpact.** Aqua & Gas 6: 90–95.

54 Liess M, Schäfer RB, Schriever CA (2008) **The footprint of pesticide stress in communities--species traits reveal community effects of toxicants.** Science of the Total Environment 406: 484–490.

55 TFSP (2015) **Worldwide Integrated Assessment (WIA) on systemic insecticides.** Infografic. http://www.tfsp.info/en/resource. Accessed 20 Jan 2021.

56 Søgaard Jørgensen P, Aktipis A, Brown Z, Carriere Y, Downes S, Dunn RR, et al. (2018) **Antibiotic and pesticide susceptibility and the Anthropocene operating space.** Nature Sustainability 1: 632–641.

57 Ittner LD, Junghans M, Werner I (2018) **Aquatic Fungi: A Disregarded Trophic Level in Ecological Risk Assessment of Organic Fungicides.** Frontiers in Environmental Science 6: 10.3389/fenvs.2018.00105.

58 Ockleford C, Adriaanse P, Berny P, et al (2018) **Scientific Opinion on the state of the science on pesticide risk assessment for amphibians and reptiles.** EFSA Journal 16: e05125.

59 Topping CJ, Aldrich A, Berny P (2020) **Overhaul environmental risk assessment for pesticides.** Science 367: 360–363.

60 Brühl CA, Zaller JG (2019) **Biodiversity decline as a consequence of an inappropriate environmental risk assessment of pesticides.** Frontiers in Environmental Science 7: 2013–2016.

61 Riedo J, Wettstein FE, Rösch A, Herzog C, Banerjee S, Büchi L, Charles R, Wächter D, Martin-Laurent F, Bucheli TD, Walder F, van der Heijden M (2021) **Widespread occurrence of pesticides in organically managed agricultural soils – the ghost of a conventional agricultural past?** Environmental Science & Technology 55: 2919–2928.

62 Humann-Guilleminot S, Binkowski ŁJ, Jenni L, Hilke G, Glauser G, Helfenstein F (2019) **A nation-wide survey of neonicotinoid insecticides in agricultural land with implications for agri-environment schemes**. Journal of Applied Ecology 56: 1502–1514.

63 Bünemann EK, Schwenke GD, Van Zwieten L (2006) **Impact of agricultural inputs on soil organisms – A review.** Australian Journal of Soil Research 44: 379–406.

64 Jänsch S, Frampton GK, Römbke J, Van Den Brink PJ, Scott-Fordsmand JJ (2006) **Effects of pesticides on soil invertebrates in model ecosystem and field studies: A review and comparison with laboratory toxicity data.** Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal 25: 2490–2501.

65 Pfiffner L, Luka H (2007) **Earthworm populations in two low-input cereal farming systems.** Applied Soil Ecology 37: 184–191.

66 Pisa L, Amaral-Rogers V, Belzunces LP, Bonmatin J-M, Downs C, Goulson D, Kreutzweiser DP, Krupke CH, Liess M, McField M, Morrissey CA, Noome DA, Settele J, Simon-Delso N, Stark JD, van der Sluijs JP, Van Dyck H, Wiemers M (2014) **Effects of neonicotinoids and fipronil on non-target invertebrates.** Environmental Science and Pollution Research 22: 68–102.

67 van der Sluijs JP, Amaral-Rogers V, Belzunces LP, et al (2014) **Conclusions of the Worldwide Integrated Assessment on the risks of neonicotinoids and fipronil to biodiversity and ecosystem functioning.** Environmental Science and Pollution Research 22: 148–154.

68 Tuck SL, Winqvist C, Mota F, Ahnström J, Turnbull LA, Bengtsson J (2014) **Land-use intensity and the effects of organic farming on biodiversity: a hierarchical meta-analysis.** Journal of Applied Ecology 51: 746–755.

69 Lo CC (2010) **Effect of pesticides on soil microbial community.** Journal of Environmental Science and Health Part B 45: 348–359.

70 Rose MT, Cavagnaro TR, Scanlan CA, Rose TJ, Vancov T, Kimber S, Kennedy IR, Kookana RS, Van Zwieten L (2016) **Impact of Herbicides on Soil Biology and Function.** Advances in Agronomy 136: 133–220.

71 Hage-Ahmed K, Rosner K, Steinkellner S (2019) **Arbuscular mycorrhizal fungi and their response to pesticides.** Pest Management Science 75: 583–590.

72 Van Hoesel W, Tiefenbacher A, König N, Dorn VM, Hagenguth JF, Prah U, Widhalm T, Wiklicky V, Koller R, Bonkowski M, Lagerlöf J, Ratzenböck A, Zaller JG (2017) **Single and combined effects of pesticide seed dressings and herbicides on earthworms, soil microorganisms, and litter decomposition.** Frontiers in Plant Science 8: 215.

73 Nettles R, Watkins J, Ricks K, Boyer M, Licht M, Atwood LW, Peoples M, Smith RG, Mortensen DA, Koide RT (2016) **Influence of pesticide seed treatments on rhizosphere fungal and bacterial communities and leaf fungal endophyte communities in maize and soybean.** Applied Soil Ecology 102: 61–69.

74 Böcker T, Möhring N, Finger R (2019) **Herbicide free agriculture? A bio-economic modelling application to Swiss wheat production.** Agricultural Systems 173: 378–392.

75 Frampton GK, van den Brink PJ (2007) **Collembola and macroarthropod community responses to carbamate, organophosphate and synthetic pyrethroid insecticides: Direct and indirect effects.** Environmental Pollution 147: 14–25.

76 Kattwinkel M, Liess M, Arena M, Bopp S, Streissl F, Römbke J (2015) **Recovery of aquatic and terrestrial populations in the context of European pesticide risk assessment.** Environmental Reviews 23: 382–394.

77 Mäder P, Fliessbach A, Dubois D, Gunst L, Fried P, Niggli U (2002) **Soil fertility and biodiversity in organic farming.** Science 296: 1694–1697.

78 Sandhu HS, Wratten SD, Cullen R, Case B (2008) **The future of farming: The value of ecosystem services in conventional and organic arable land. An experimental approach.** Ecological Economics 64: 835–848.

79 Beaumelle L, Thouvenot L, Hines J, Jochum M, Eisenhauer N, Phillips HRP (2021) **Soil fauna diversity and chemical stressors: a review of knowledge gaps and roadmap for future research.** Ecography 44: 1–15.

80 Fenner K, Canonica S, Wackett LP, Elsner M (2013) **Evaluating pesticide degradation in the environment: Blind spots and emerging opportunities.** Science 341: 752–758.

81 Dax A, Stravs M, Stamm C, Ort C, Singer H (2020) **MS²field: Mikroverunreinigungen mobil messen.** Aqua & Gas 12: 14–19.

82 Doppler T, Mangold S, Wittmer I, Spycher S, Comte R, Stamm C, Singer H, Junghans M, Kunz M (2017) **Hohe PSM-Belastung in Schweizer Bächen.** Aqua & Gas 4: 46–56.

83 Doppler T, Dietzel A, Wittmer I, Grelot J, Rinta P, Kunz M (2020) **Mikroverunreinigungen im Gewässermonitoring. Ausbau von NAWA Trend und erste Resultate 2018.** Aqua & Gas 7/8: 44–53.

84 Casado-Martinez MC, Schneeweiß A, Thiemann C, Dubois N, Pintado-Herrera M, Lara-Martin PA, Ferrari BJD, Werner I (2020) **Ökotoxizität von Bachsedimenten. Eine Monitoringkampagne zeigt, dass Pestizide in den Sedimenten von fünf kleinen Fließgewässern Auswirkungen auf Sedimentorganismen haben.** gwf Wasser 161: 55–67.

85 Chiaia-Hernández AC, Zander PD, Schneider T, Szidat S, Lloren R, Grosjean M (2020) **High-Resolution Historical Record of Plant Protection Product Deposition Documented by Target and Nontarget Trend Analysis in a Swiss Lake under Anthropogenic Pressure.** Environmental Science and Technology 54: 13090–13100.

86 Schneeweiss A, Junghans M, Segner H, Werner I (2019) **Ökotoxikologische Risiken von PSM für Fische. Eine Literaturstudie ermittelt Risiken von PSM und priorisiert die relevantesten Stoffe.** Aqua & Gas 11: 74–80.

87 Munz NA, Burdon FJ, de Zwart D, Junghans M, Melo L, Reyes M, Schönenberger U, Singer HP, Spycher B, Hollender J, Stamm C (2017) **Pesticides drive risk of micropollutants in wastewater-impacted streams during low flow conditions.** Water Research 110: 366–377.

88 Junghans M, Langer M, Baumgartner C, Vermeirssen E, Werner I (2019) **Ökotoxikologische Unterschuchungen: Risiko von PSM bestätigt. NAWA-SPEZ-Studie 2017 zeigt Beeinträchtigung von Gewässerorganismen.** Aqua & Gas 4: 26–35.

89 Ochsenbein U, Berset J, Scheiwiller E, Guthruf K (2012) **Mikroverunreinigungen in Aaretalgewässern.** Aqua & Gas 11: 68–79.

90 Spycher S, Mangold S, Doppler T, Junghans M, Wittmer I, Stamm C, Singer H (2018) **Pesticide risks in small streams – how to get as close as possible to the stress imposed on aquatic organisms.** Environmental Science and Technology 52: 4526–4535.

91 Beketov M a, Kefford BJ, Schäfer RB, Liess M (2013) **Pesticides reduce regional biodiversity of stream invertebrates.** Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 110: 1–5.

92 Leib V (2015) **Makrozoobenthos in kleinen Fliessgewässern: schweizweite Auswertung.** Aqua & Gas 4: 66–75.

93 Relyea R, Hoverman J (2006) **Assessing the ecology in ecotoxicology: a review and synthesis in freshwater systems.** Ecology Letters 9: 1157–71.

94 BAFU (2019) **Zustand und Entwicklung Grundwasser Schweiz. Ergebnisse der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA, Stand 2016.** Umwelt-Zustand Nr. 1901. Bundesamt für Umwelt, Bern: 138.

95 Schweizer Kantonschemiker (2019) **Pflanzenschutzmittel in Trinkwasser (Kampagnenbericht)**: 12.

96 Kiefer K, Müller A, Singer H, Hollender J (2019) **New relevant pesticide transformation products in groundwater detected using target and suspect screening for agricultural and urban micropollutants with LC-HRMS.** Water Research 165: 1–20.

97 Müller S, Schärer M, Jenny A, Schwab C, Muralt R, Reinhardt M, Leu C, Beer M (2020) **Grundwasserschutz muss Qualität des Trinkwassers sichern. Handlungsbedarf in den Zuströmbereichen.** Aqua & Gas 7/8: 28–35.

98 BLV (2020) **Chlorothalonil-Metaboliten: Rohdaten Umfrage bei den Kantonen** (Excel-Dokument, 15.09.2020). https://www.blv.admin.ch/blv/de/home/lebensmittel-und-ernaehrung/lebensmittelsicherheit/stoffe-im-fokus/pflanzenschutzmittel/chlorothalonil.html. Accessed 20 Jan 2021.

99 Spycher S, Dübendorfer C, Tratschin R, Schneider R, Ramseier H (2020) **Evaluation von Massnahmen zum Schutz des Grundwassers vor PSM und deren Metaboliten.** Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt. EBP Schweiz AG, Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL).

100 Brittain C, Vighi M, Bommarco R, Settele J, Potts SG (2010) **Impacts of a pesticide on pollinator species richness at different spatial scales.** Basic and Applied Ecology 11: 106–115.

101 Geiger F, Bengtsson J, Berendse F, et al (2010) **Persistent negative effects of pesticides on biodiversity and biological control potential on European farmland.** Basic and Applied Ecology 11: 97–105.

102 Ewald JA, Wheatley CJ, Aebischer NJ, Moreby SJ, Duffield SJ, Crick HQP, Morecroft MB (2015) **Influences of extreme weather, climate and pesticide use on invertebrates in cereal fields over 42 years.** Global Change Biology 21: 3931–3950.

103 de Snoo GR, van der Poll RJ (1999) **Effect of herbicide drift on adjacent boundary vegetation.** Agriculture, Ecosystems & Environment 73: 1–6.

104 Gove B, Power SA, Buckles GP, Ghazoul J (2007) **Effects of herbicide spray drift and fertilizer overspread on selected species of woodland ground flora: comparison between short-term and long-term impact assessments and field surveys.** Journal of Applied Ecology 44: 374–384.

105 Boutin C, Strandberg B, Carpenter D, Mathiassen SK, Thomas PJ (2014) **Herbicide impact on non-target plant reproduction: what are the toxicological and ecological implications?** Environmental Pollution 185: 295–306.

106 Carpenter D, Boutin C, Allison JE (2013) **Effects of chlorimuron ethyl on terrestrial and wetland plants: Levels of, and time to recovery following sublethal exposure.** Environmental Pollution 172: 275–282.

107 Freemark K, Boutin C (1995) **Impacts of agricultural herbicide use on terrestrial wildlife in temperate landscapes: a review with special reference to North America.** Agriculture, Ecosystems & Environment 52: 67–91.

108 Andreasen C, Streibig JC (2011) **Evaluation of changes in weed flora in arable fields of Nordic countries – based on Danish long-term surveys.** Weed Research 51: 214–226.

109 Richner N, Holderegger R, Linder HP, Walter T (2014) **Reviewing change in the arable flora of Europe: a meta-analysis.** Weed Research 55: 1–13.

110 Marshall EJP, Brown VK, Boatman ND, W. LPJ, Squire GR, Ward LK (2003) **The role of weeds in supporting biological diversity within crop fields.** Weed Research 43: 77–89.

111 Wilson JD, Morris AJ, Arroyo BE, Clark SC, Bradbury RB (1999) **A review of the abundance and diversity of invertebrate and plant foods of granivorous birds in northern Europe in relation to agricultural change.** Agriculture, Ecosystems & Environment 75: 13–30.

112 Biesmeijer JC, Roberts SPM, Reemer M, Ohlemüller R, Edwards M, Peeters T, Schaffers a P, Potts SG, Kleukers R, Thomas CD, Settele J, Kunin WE (2006) **Parallel declines in pollinators and insect-pollinated plants in Britain and the Netherlands.** Science 313: 351–354.

113 Zurbuchen A, Müller A (2012) **Wildbienenschutz – von der Wissenschaft zur Praxis.** Bristol Stiftung, Zürich; Haupt, Bern, Stuttgart, Wien.

114 Sanchez-Bayo F (2011) **Impacts of agricultural pesticides on terrestrial ecosystems.** In: Sanchez-Bayo F (ed). Ecological impacts of toxic chemicals. Bentham Science Publishers Ltd, USA: 63–87.

115 Botías C, David A, Hill EM, Goulson D (2016) **Contamination of wild plants near neonicotinoid seed-treated crops, and implications for non-target insects.** Science of the Total Environment 566: 269–278.

116 Humann-Guilleminot S, Clément S, Desprat J, Binkowski ŁJ, Glauser G, Helfenstein F (2019) **A large-scale survey of house sparrows feathers reveals ubiquitous presence of neonicotinoids in farmlands.** Science of the Total Environment 660: 1091–1097.

117 Botías C, David A, Hill EM, Goulson D (2017) **Quantifying exposure of wild bumblebees to mixtures of agrochemicals in agricultural and urban landscapes.** Environmental Pollution 222: 73–82.

118 Bengtsson J, Ahnström J, Weibull A (2005) **The effects of organic agriculture on biodiversity and abundance: a meta-analysis.** Journal of Applied Ecology 42: 261–269.

119 Sánchez-Bayo F, Wyckhuys KAG (2019) **Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers.** Biological Conservation 232: 8–27.

120 Gilburn AS, Bunnefeld N, McVean Wilson J, Botham MS, Brereton TM, Fox R, Goulson D (2015) **Are neonicotinoid insecticides driving declines of widespread butterflies?** PeerJ 2015: 1–13.

121 Wagner DL, Grames EM, Forister ML, Berenbaum MR, Stopak D (2021) **Insect decline in the Anthropocene: Death by a thousand cuts.** Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 118: 1–10.

122 Zaller JG, Brühl CA (2019) **Editorial: non-target effects of pesticides on organisms inhabiting agroecosystems.** Frontiers in Environmental Science 7: 1–3.

123 Whitehorn PR, O'Connor S, Wackers FL, Goulson D (2012) **Neonicotinoid pesticide reduces bumble bee colony growth and queen production.** Science 336: 351–352.

124 Gill RJ, Ramos-Rodriguez O, Raine NE (2012) **Combined pesticide exposure severely affects individual- and colony-level traits in bees.** Nature 491: 105–108.

125 Akademien der Wissenschaften Schweiz (2014) **Bienen und andere Bestäuber: Bedeutung für Landwirtschaft und Biodiversität.** Swiss Academies Factsheets 9: 1–9.

126 Kremen C, Williams NM, Thorp RW (2002) **Crop pollination from native bees at risk from agricultural intensification.** Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 99: 16812–16816.

127 Zehnder G, Gurr GM, Kühne S, Wade MR, Wratten SD, Wyss E (2007) **Arthropod pest management in organic crops.** Annual Review of Entomology 52: 57–80.

128 Burn A (2000) **Pesticides and their effects on lowland farmland birds.** Ecology and Conservation of Lowland Farmland Birds 89–104.

129 Brühl CA, Schmidt T, Pieper S, Alscher A (2013) **Terrestrial pesticide exposure of amphibians: an underestimated cause of global decline?** Scientific Reports 3: 1–4.

130 Jenni-Eiermann S, Bühler U, Zbinden N (1996) **Vergiftung von Greifvögeln durch Carbofurananwendung im Ackerbau.** Der Ornithologische Beobachter 93: 69–77.

131 Jahn T, Hötker H, Oppermann R, Bleil R, Vele L (2014) **Protection of biodiversity of free living birds and mammals in respect of the effects of pesticides.** Report No. (UBA-FB) 001830. Umweltbundesamt.

132 Harrington LA, Macdonald DW, Oxford Univ. (United Kingdom). Wildlife Conservation Research Unit (2002) **A review of the effects of pesticides on wild terrestrial mammals in Britain.** Report to the RSPCA. Wildlife Conservation Research Unit, University of Oxford.

133 Filippi-Codaccioni O, Devictor V, Bas Y, Clobert J, Julliard R (2010) **Specialist response to proportion of arable land and pesticide input in agricultural landscapes.** Biological Conservation 143: 883–890.

134 Boatman ND, Brickle NW, Hart JD, Milsom TP, Morris AJ, Murray AWA, Murray KA, Robertson PA (2004) **Evidence for the indirect effects of pesticides on farmland birds.** Ibis 146: 131–143.

135 American Bird Conservancy, Mineau P, Palmer C (2013) **The impact of the nation's most widely used insecticides on birds.**

136 Jenny M (1990) **Nahrungsökologie der Feldlerche Alauda arvensis in einer intensiv genutzten Agrarlandschaft des schweizerischen Mittellandes.** Der Ornithologische Beobachter 87: 31–53.

137 Morris AJ, Wilson JD, Whittingham MJ, Bradbury RB (2005) **Indirect effects of pesticides on breeding yellowhammer (Emberiza citrinella).** Agriculture, Ecosystems & Environment 106: 1–16.

138 Hallmann CA, Foppen RPB, van Turnhout CAM, de Kroon H, Jongejans E (2014) **Declines in insectivorous birds are associated with high neonicotinoid concentrations.** Nature 511: 341–343.

139 Knaus P, Antoniazza S, Wechsler S, Guélat J, Kéry M, Strebel N, Sattler T (2018) **Schweizer Brutvogelatlas 2013–2016. Verbreitung und Bestandesentwicklung der Vögel in der Schweiz und im Fürstentum Liechtenstein.** Schweizerische Vogelwarte, Sempach.

140 Carravieri A, Scheifler R (2013) **Effets des substances chimiques sur les Chiroptères: état des connaissances.** Rhinolophe 19: 1–46.

141 Natural England (2011) **Bat roosts and timber treatment products.** Natural England Technical Information Note TIN092.

142 Schweizerische Koordinationsstelle für Fledermausschutz (2013) **Fledermausverträgliche Holzschutzmittel.** Version vom 2. Mai 2013.

143 Kim KH, Kabir E, Jahan SA (2017) **Exposure to pesticides and the associated human health effects.** Science of the Total Environment 575: 525–535.

144 Kahn LG, Philippat C, Nakayama SF, Slama R, Trasande L (2020) **Endocrine-disrupting chemicals: implications for human health.** The Lancet Diabetes and Endocrinology 8: 703–718.

145 Zandonella R, Sutter D, Liechti R, von Stokar T (2014) **Volkswirtschaftliche Kosten des Pestizideinsatzes in der Schweiz.** Greenpeace, Pro Natura, SVS/BirdLife Schweiz, WWF.

146 Dümmler P, Roten N (2018) **Eine Agrarpolitik mit Zukunft.** avenir Suisse.

147 Dümmler P, Anthamatten J (2020) **Weiterhin wachsende Kosten der Landwirtschaft.** avenir Suisse.

148 Schläpfer F (2020) **Kosten und Finanzierung der Landwirtschaft.** Vision Landwirtschaft.

149 Regierungsrat Kanton Zürich (2020) **428. Anfrage (Kontrolle von Auflagen zum Schutz von Oberflächengewässern bei der Verwendung von Pflanzenschutzmitteln).** Auszug aus dem Protokoll des Regierungsrates des Kantons Zürich. Sitzung vom 29. April 2020. Regierungsratsbeschlus Nr. 428.

150 Gubser C, Butterweck J (2018) **Stand der Umsetzung des Herbizidverbots. Studie zur Umsetzung des Anwendungsverbots von Herbiziden auf und an Strassen, Wegen und Plätzen.** Umwelt-Wissen Nr. 1815. Bundesamt für Umwelt, Bern.

151 Altermatt F (2020) **Die ökologische Funktion der Gewässerräume.** Umweltrecht in der Praxis 1: 51–67.

152 Möhring N, Ingold K, Kudsk P, Martin-Laurent F, Niggli U, Siegrist M, Studer B, Walter A, Finger R (2020) **Pathways for advancing pesticide policies.** Nature Food 1: 535–540.

153 IPBES (2019) **IPBES (2019): Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services.** S. Díaz, J. Settele, E. S. Brondízio E.S., H. T. Ngo, M. Guèze, J. Agard, A. Arneth, P. Balvanera, K. A. Brauman, S. H. M. Butchart, K. M. A. Chan, L. A. Garibaldi, K. Ichii, J. Liu, S. M. Subramanian, G. F. Midgley, P. Miloslavich, Z. Molnár, D. Obura, A. Pfaff, S. Polasky, A. Purvis, J. Razzaque, B. Reyers, R. Roy Chowdhury, Y. J. Shin, I. J. Visseren-Hamakers, K. J. Willis, and C. N. Zayas (eds.). IPBES secretariat, Bonn, Germany: 56.

154 Vision Landwirtschaft (2020) **best-practice Pestizidreduktion.** https://www.visionlandwirtschaft.ch/de/bestpractice/allgemein-best-practices-pestizide. Accessed 12 Mar 2021.

155 Latsch A (2021) **Erkenntnisse aus der Forschung umsetzen: Das Ressourcenprojekt PFLOPF. Pflanzenschutzoptimierung mit Precision Farming.** 8. Nachhaltigkeitstagung Agroscope.

156 Lechenet M, Dessaint F, Py G, Makowski D, Munier-Jolain N (2017) **Reducing pesticide use while preserving crop productivity and profitability on arable farms.** Nature Plants 3: 1–6.

157 Fuchs R, Brown C, Rounsevell M (2019) **Europe's Green Deal offshores environmental damage to other nations.** Nature 586: 671–673.

158 Furrer C, Stüssi M, Bystricky M (2021) **Einfluss von Import-Herkunftsländern und Nahrungsmittelverlusten auf die Umweltwirkungen des Schweizer Agrarsektors.** Agroscope Science 114: 29.

159 Gubler L, Ismail S, Seidl I (2020) **Biodiversitätsschädigende Subventionen in der Schweiz.** Swiss Academies Factsheets 15: 1–16.

160 Wuepper D, Roleff N, Finger R (2020) **Does it matter who advises farmers? Pest management choices with public and private extension.** Food Policy 99: 101995.

161 Lefebvre M, Langrell SRH, Gomez-y-Paloma S (2014) **Incentives and policies for integrated pest management in Europe: a review.** Agronomy for Sustainable Development 35: 27–45.

162 Schweizerischer Bundesrat (2019) **Umwelt Schweiz 2018.** Bericht des Bundesrates.

163 Seifert J (2014) **Neonicotinoids.** In: Wexler P (ed) Encyclopedia of Toxicology. Academic Press: 477–481.

164 Elliott M (1976) **Properties and applications of pyrethroids.** Environmental Health Perspectives 14: 3–13.

165 Elliott M, Farnham AW, Janes NF, Needham PH, Pulman DA, Stevenson JH (1973) **A Photostable Pyrethroid.** Nature 246: 169–170.

166 Krebs R, Hartmann F, Wächter D (2011) **Einsatz von Pflanzenschutzmitteln im Schweizerischen Gartenbau: Datenübersicht – indikatorbasierte Risikobeurteilung – Monitoringkonzept. Einsatz von Pflanzenschutzmitteln im Schweizerischen Gartenbau: Datenübersicht – indikatorbasierte Risikobeurteilung.** Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU). zhaw.

167 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. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern.

168 BLW (2021) **Pflanzenschutzmittelverzeichnis** (Stand: 19.2.2021). https://www.psm.admin.ch. Accessed 23 Feb 2021.

169 Bundesverwaltungsgericht (2021) **Medienmitteilung zur Zwischenverfügung B-3340/2020 vom 15. Februar 2021. Chlorothalonil: Zweite Zwischenverfügung.**