

De nouveaux outils de décision pour une gestion durable des adventices

Sandie Masson¹, Bruno Chauvel², Christophe Carlen¹ et Judith Wirth¹

¹Agroscope, Domaine Systèmes de production plantes, groupe Malherbologie, 1260 Nyon, Suisse

²INRAE, UMR Agroécologie, Pôle Gestion durable des adventices Agroécologie, F-21000 Dijon, France

Renseignements: Sandie Masson, e-mail: sandie.masson@agroscope.admin.ch

<https://doi.org/10.34776/afs12-78f> Date de publication: 31. Mai 2021



Sarclage du colza en septembre 2020 sur la parcelle innovante d'un agriculteur impliqué dans le projet PestiRed. Combinée avec d'autres leviers de désherbage, cette mesure permet de réduire l'utilisation des herbicides. (Photo: Carole Parodi, Agroscope)

Résumé

En 2017, le Conseil fédéral suisse a adopté le plan d'action visant à la réduction des risques et à l'utilisation durable des produits phytosanitaires. L'une des mesures de ce plan est «la renonciation complète ou partielle aux herbicides». Or, celle-ci n'est réalisable qu'au travers d'une stratégie de gestion globale des adventices, à l'échelle de la culture et de la rotation. En effet, les adventices sont nuisibles pour la culture en place l'année en cours, mais aussi de manière pluriannuelle par le biais de leur stock semencier. La mise en œuvre de mesures préventives et curatives basées sur les principes de la protection intégrée nécessite de nouveaux outils d'aide à la décision. Des indicateurs de nuisibilité autres que la densité des adventices ont

été développés. Une méthode simple, basée sur l'estimation visuelle du volume relatif des adventices, est actuellement testée en vue de son utilisation dans la pratique. Des outils basés sur la modélisation de l'effet de systèmes de culture sur la flore adventice et le rendement selon différents scénarii climatiques sont également en développement. Cet article fait le point sur les recherches en matière de gestion des adventices et présente les outils d'aide à la décision à l'étude, en vue d'une agriculture toujours plus durable.

Key words: weed thresholds, integrated weed management, harmfulness of weeds, preventive and curative weed control.

Introduction

La réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires est l'un des principaux leviers pour atteindre une production agricole durable. L'une des mesures du plan d'action phytosanitaire est ainsi «la renonciation complète ou partielle aux herbicides». Ces derniers sont particulièrement difficiles à réduire car, outre leur efficacité, ils sont l'outil le plus rapide, le plus facile d'utilisation et le moins coûteux pour lutter contre les adventices. Pour satisfaire aux exigences des prestations écologiques requises (PER), leur utilisation est actuellement conditionnée par le dépassement d'un seuil d'intervention, c'est-à-dire une densité d'adventices au-delà de laquelle l'intervention herbicide est estimée moins coûteuse que les pertes encourues. Or, la diminution de l'utilisation des herbicides n'est possible que par la mise en œuvre d'une stratégie de gestion globale. Tous les processus directs ou indirects permettant de prévenir l'apparition, la dispersion, le développement ou l'augmentation d'une population adventice doivent être mis en œuvre. Ceci demande d'utiliser de nouveaux outils, en complément des seuils d'intervention, afin de mieux anticiper la présence et la nuisibilité d'espèces adventices dans une parcelle.

Qu'est-ce qu'une gestion durable des adventices? Quelles sont les spécificités de la flore adventice? Quelle est la nuisibilité des adventices sur la production? Quelle est la pertinence des outils actuellement utilisés pour évaluer cette nuisibilité? Quels nouveaux outils sont en développement pour une gestion durable et optimale des adventices? Telles sont les questions auxquelles cet article tente de répondre en s'appuyant sur la synthèse de 40 ans de recherche en malherbologie.

Gestion durable des adventices

Principe de la gestion intégrée des adventices

La gestion intégrée des adventices (fig. 1) a pour objectif d'améliorer le rendement et la qualité des cultures tout en limitant l'effet négatif des pratiques de désherbage sur l'environnement et la santé. Le but est aussi de maintenir les services fournis par les «mauvaises herbes» pour la pollinisation, la protection des sols et la fourniture de ressources alimentaires aux auxiliaires des cultures. La gestion intégrée des adventices se base sur quatre concepts d'interventions: physique (mécanique), biologique, écologique et, en dernier lieu, chimique (Merfield 2019). La lutte physique fait appel à des techniques mécaniques et thermiques. La lutte biologique implique l'utilisation d'ennemis naturels (champignons,

carabidés... etc.). La gestion écologique utilise la compréhension des interactions entre les mauvaises herbes et les cultures (compétition, suppression... etc.). Elle se base sur l'optimisation des pratiques culturales pour renforcer la vigueur de la culture et sa tolérance aux adventices. La lutte chimique implique l'utilisation d'herbicides naturels ou de synthèse. Au sein de ces quatre familles d'interventions, des mesures préventives ou curatives sont employées.

Mesures préventives

Les mesures préventives se basent principalement sur les approches écologiques et physiques de la gestion des adventices. La première étape pour gérer les adventices en préventif est de développer la diversité végétale dans les systèmes agricoles (Gaba *et al.* 2017). À l'échelle de la rotation, il est nécessaire de diversifier les dates de semis (printemps/automne), les familles de cultures et d'introduire des cultures intercalaires. La diversité doit aussi être développée à l'échelle des paysages par le biais de l'assolement et des éléments paysagers, afin de favoriser les régulations naturelles des adventices par des auxiliaires (Petit *et al.* 2008). Cette diversité temporelle et spatiale évite aussi une spécialisation de la flore. Les espèces hautement compétitives sont ainsi moins favorisées et il y a donc moins de perte de rendement (Storkey et Neve 2018, Adeux *et al.* 2019).

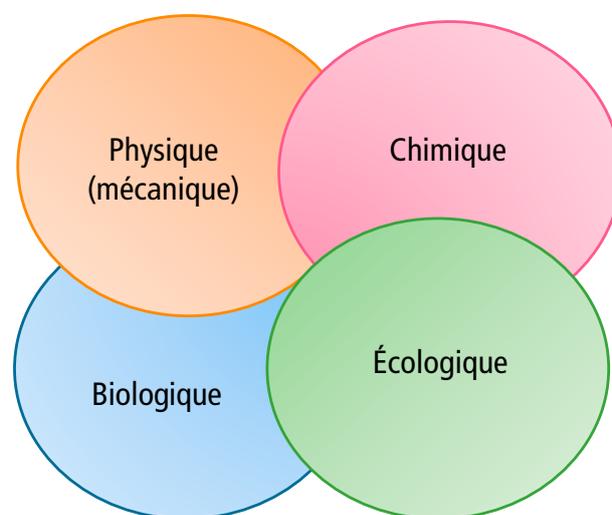


Figure 1 | Les quatre composantes de la gestion intégrée des adventices (tiré de (Merfield 2019)).

La seconde étape se situe à l'échelle des itinéraires techniques mis en œuvre dans chacune des cultures du système. Le décalage de la date de semis permet d'éviter la période préférentielle de levée des adventices. La mise en œuvre de faux-semis a pour but de faire lever une partie des adventices avant le semis de la culture principale. Le hersage à l'aveugle juste après le semis permet à la culture de prendre de l'avance sur les adventices. Le choix de variétés au port couvrant ou l'accélération du développement végétatif précoce grâce à la fertilisation ou au choix variétal limite l'accès à la lumière. Le travail du sol permet d'enfouir les graines à des profondeurs où leur capacité germinative est fortement réduite, tandis que le semis direct évite toute perturbation du sol favorable à la germination. La mise en place de sous-semis ou de culture associée amène une concurrence directe avec les adventices pour les ressources. Enfin, la récupération des graines d'adventices avant leur tombée au sol grâce à la récupération des menues pailles ou encore grâce à l'écimage avant la maturité de la graine est un point clé pour prévenir des infestations pluriannuelles.

La combinaison de ces mesures est importante, car chacune prise séparément n'est pas suffisamment efficace. Chaque mesure pourra agir sur un groupe d'adventices (aux caractéristiques biologiques similaires) et n'avoir aucun effet sur un autre groupe. Par exemple, le labour sera efficace sur les adventices qui germent en surface, telles que le vulpin des champs (*Alopecurus myosuroides*), mais moins sur la folle-avoine (*Avena fatua*) qui peut germer en profondeur. La mise en œuvre de ces mesures doit aussi être réfléchi de manière globale en prenant en compte les risques des autres ravageurs des cultures (Bertrand et Doré 2008).

Mesures curatives

La mise en œuvre d'une combinaison de mesures préventives ne permet pas toujours d'éviter la levée d'adventices en cours de culture. Il est alors important d'identifier les adventices présentes et d'évaluer leur nuisibilité. Si, selon un ensemble de critères, les espèces présentes sont jugées nuisibles pour la culture et/ou le système, alors une intervention en curatif peut être décidée. Les traitements herbicides sont actuellement la mesure curative principalement utilisée pour gérer les adventices. Cependant, leurs nombreux effets négatifs sur la santé humaine et l'environnement et le retrait des matières actives disponibles (E. Birch, Begg *et al.* 2011) poussent à utiliser des moyens plus durables de lutte curative.

Le désherbage mécanique/physique connaît un nouvel essor. Celui-ci est attribuable à l'introduction de la robotique et à l'amélioration de la précision des outils mé-

caniques de désherbage. Son utilisation est cependant fortement conditionnée par les conditions météorologiques. Il est souvent difficile de trouver le bon moment d'intervention combinant la bonne météorologie et le bon stade de développement des mauvaises herbes et de la culture. Ces pratiques doivent donc être utilisées au bon moment et en combinaison avec d'autres moyens de lutte.

La lutte biologique contre les mauvaises herbes est fondée sur l'utilisation de pathogènes naturellement ravageurs des adventices. Par exemple, le coléoptère *Ophraella communa*, originaire de Chine, a entraîné une réduction de 80 % de la population d'ambrosie (*Ambrosia artemisiifolia* L.) après son introduction accidentelle en Italie (Schaffner *et al.* 2020). La prédation des graines de mauvaises herbes par les coléoptères est actuellement étudiée en France (Petit *et al.* 2014) afin d'évaluer la régulation du stock semencier.

Spécificité et nuisibilité de la flore adventice

La flore, spécifique d'un milieu et d'un système

La flore adventice est une communauté d'espèces en partie spécifique à un milieu agricole. En France et en Suisse, plus de 1000 espèces adventices sont répertoriées, soit un cinquième du nombre total d'espèces angiospermes existantes. Parmi elles, 200 espèces sont considérées comme nuisibles pour la production en grandes cultures (Jauzein 1995; Lauber *et al.* 2012). Les caractéristiques de chacune des espèces adventices sont encore largement méconnues: facteurs de sortie de dormance, durée de vie des graines dans le sol, profondeur d'enracinement, besoins en nutriments, etc.

L'environnement paysager de la parcelle détermine sa communauté d'adventices (Alignier et Petit 2012). Leur mode de reproduction à partir de graines et/ou par multiplication végétative (racines, bulbes, rhizomes) leur garantit une survie pluriannuelle. Le système de culture, par l'intermédiaire des modalités techniques mises en œuvre, agit comme un filtre et favorise la levée de certaines espèces plutôt que d'autres à partir du stock semencier (fig. 2).

En 2003, sur la station expérimentale d'Agroscope à Changins (VD), des relevés ont été effectués dans différents systèmes de culture. Les stocks semenciers dans les 25 premiers centimètres du sol étaient très importants, de 6000 à 22000 semences viables/m² selon les modalités de travail du sol. Vingt-deux espèces différentes ont été identifiées (Vullioud, Delabays *et al.* 2006). Ce stock représente la réserve de diversité végétale d'une parcelle

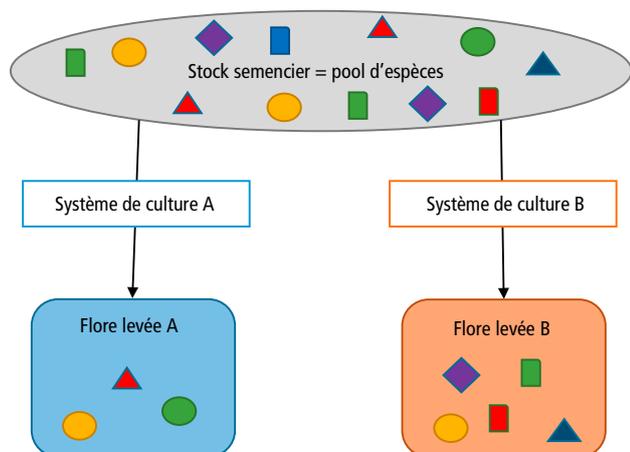


Figure 2 | Le système de culture, par l'intermédiaire des modalités techniques mises en œuvre, agit comme un filtre et favorise la levée de certaines espèces plutôt que d'autres à partir du stock semencier.

cultivée et les futures espèces adventices susceptibles d'interférer avec les cultures de la rotation. Chaque année, selon l'espèce et les conditions climatiques, 6 % à 28 % de ces graines lèvent. Les autres restent dans le sol en état de dormance (Dessaint *et al.* 1997; Chauvel *et al.* 2018). La flore levée, visible en surface du sol, n'est donc que la partie émergée de l'iceberg (fig. 3).

Plusieurs modes de nuisibilité

La nuisibilité annuelle (primaire) de la flore adventice est la nuisibilité directe ou indirecte sur la culture en place. Les adventices peuvent engendrer différents types de nuisibilité, à différents stades du cycle cultural (fig. 4) :

- Une gêne mécanique ou chimique (allélopathie) à la germination et à la levée de la culture
- Un ralentissement de la croissance de la culture par compétition pour l'accès aux ressources (lumière, eau, éléments nutritifs)
- La transmission de maladies (ex. ergot – *Claviceps purpurea*)
- Une gêne lors de la récolte (ex. gaillet gratteron – *Galium aparine*)
- La présence de graines adventices dans la récolte, ce qui en diminue la qualité (semence de ray-grass [*Lolium sp.*] dans la récolte de blé par exemple) avec des coûts d'épuration plus ou moins élevés.

La nuisibilité pluriannuelle (secondaire) est l'impact de la flore adventice sur plusieurs cultures, à l'échelle d'une rotation. C'est une nuisibilité indirecte potentielle, induite par le stock semencier de la parcelle en combinai-

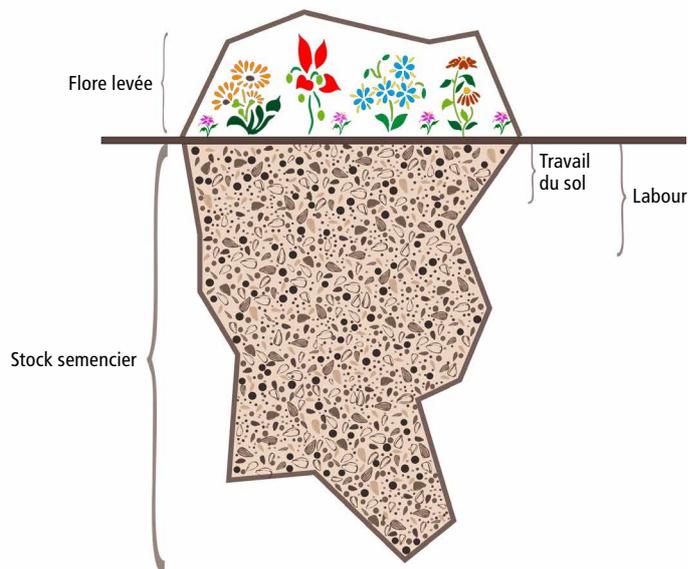


Figure 3 | La flore levée observée au champ est la partie émergée de l'iceberg. Le stock semencier constitue la flore sous-jacente susceptible de lever si les conditions sont favorables.

son avec le système de culture. Ce dernier peut favoriser ou défavoriser l'augmentation du stock semencier de certaines espèces.

Plusieurs facteurs de nuisibilité

La nuisibilité diffère selon l'espèce adventice. Par exemple, une espèce annuelle de quelques centimètres de haut (pâturin annuel – *Poa annua*, mouron des champs – *Anagallis arvensis*) ne va pas exercer la même relation de compétition avec la culture en place qu'une espèce adventice vivace de grande taille (cirse des

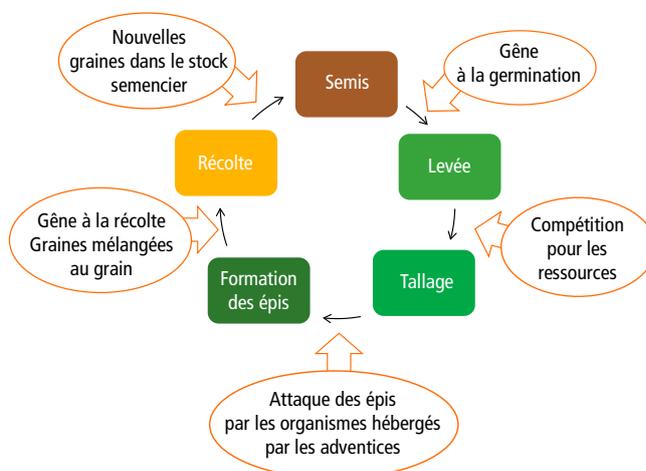


Figure 4 | Les différentes formes de nuisibilité des adventices au cours du cycle de culture d'une céréale.

champs – *Cirsium arvense*, liseron des champs – *Convolvulus arvensis*).

La nuisibilité est aussi fortement corrélée aux dates d'émergence des adventices parallèlement au stade de la culture (fig. 5). Plusieurs études publiées dans les années 1990 ont démontré que, selon leur période d'émergence, les adventices auront un impact très différent sur le rendement (Oliver 1988; Dieleman *et al.* 1996; Knezevic *et al.* 1997; Zwerger et Arlt 2002). Par exemple, un décalage d'émergence de trois à cinq semaines par rapport à la levée de la culture aura un impact de deux à dix fois inférieur ou suffira pour éviter tout impact sur les rendements de soja ou de maïs (Swanton *et al.* 1999). De même, cinq plantes de chénopode blanc (*Chenopodium album*) par m² au stade deux à cinq feuilles de la betterave correspondent à une perte de rendement des betteraves de 40 %, tandis qu'au stade 10 à 13 feuilles il n'y a pas de perte de rendement (fig. 6a). Aussi, dans le cas d'une émergence d'adventices six semaines après une plantation d'oignons, il y a alors une corrélation directe entre la couverture du sol par les adventices et le rendement des oignons. Plus il y a d'adventices, plus le rendement baisse (fig. 6b). En revanche, lorsque les adventices ont émergé trois semaines avant la récolte, leur pourcentage de couverture n'est pas corrélé au rendement. Ce dernier ne baisse pas, quel que soit le pourcentage d'adventices (fig. 6c).

Enfin, la nuisibilité est d'autant plus forte que la disponibilité des ressources (lumière, eau, éléments nutritifs) est



Figure 5 | Forte densité de géraniums (*Geranium* sp.) à germination tardive dans du blé. Cette densité ne va pas forcément créer une nuisibilité directe, mais alimentera stock semencier si on laisse les plantes produire des graines. (Photo: INRAE)

Perte de rendement betteravier (%)

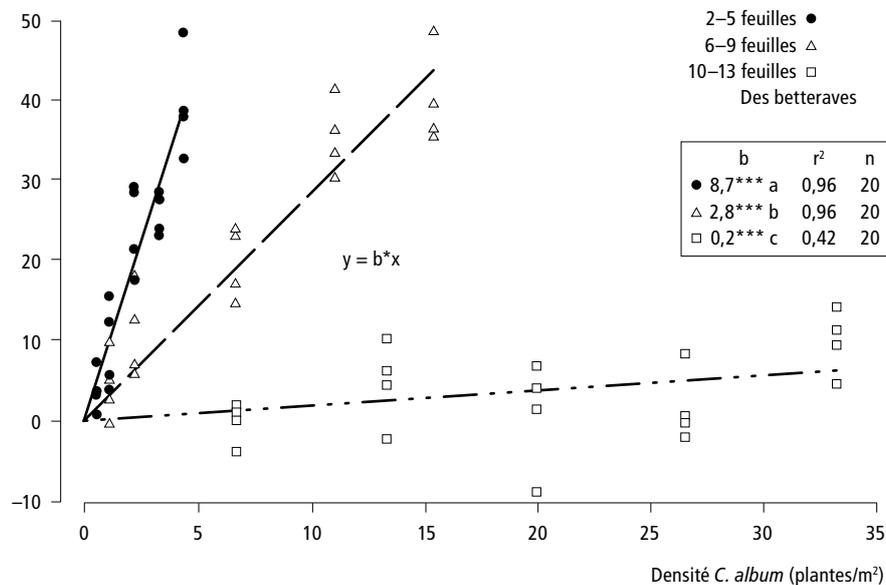


Figure 6a | Effet de la densité et de la période de levée du chénopode blanc (*Chenopodium album*) sur le rendement betteravier (tiré de Zwerger et Arlt 2002).

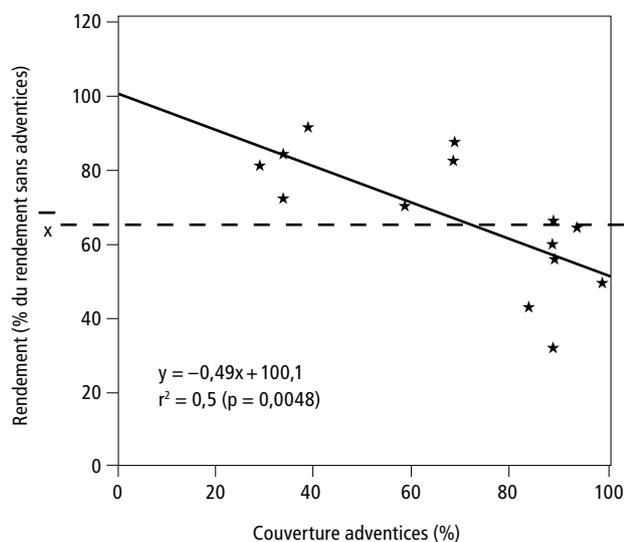


Figure 6b | Effet d'une émergence précoce d'adventices sur le rendement des oignons six semaines après le semis (tiré de Zwerger et Arlt (2002)).

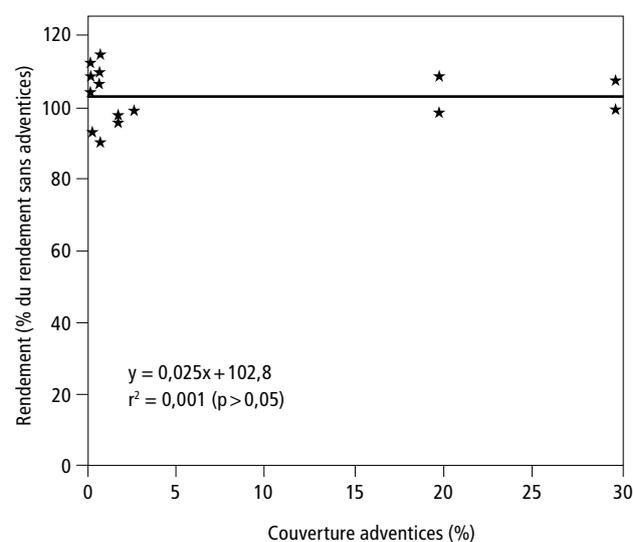


Figure 6c | Effet d'une émergence tardive d'adventices sur le rendement des oignons trois semaines avant la récolte (tiré de Zwerger et Arlt 2002).

limitée. Dans la figure 7, l'année 1983 a été une année sèche. Dans ces conditions, 200 plantes de panic pied-de-coq (*Echinochloa crus-galli*) par m² ont provoqué une perte de récolte de maïs quasi-totale. En revanche, en 1982, les conditions en eau étaient non limitantes, la même densité d'adventices a alors eu seulement un petit impact sur le rendement (fig. 7).

Dans la pratique, les adventices sont estimées comme étant responsables d'une perte de rendement de 7 à 13 % malgré le désherbage mis en œuvre (Oerke 1994, Oerke 2006). Une synthèse récente des essais de désherbage effectués en France de 1993 à 2015 a permis de comparer les parcelles avec désherbage chimique et les parcelles témoins sans désherbage. 92 % des essais montrent une perte significative de rendement dans

le blé non désherbé (en moyenne -26 q/ha sur tous les essais), mais seulement 51 % des essais en colza (en moyenne -3,5 q/ha sur tous les essais) et 61 % en tournesol (en moyenne -4,1 q/ha sur tous les essais) (Cordeau et al. 2016).

Outils d'aide à la gestion des adventices

Limite des seuils d'intervention actuels

Les seuils économiques d'intervention herbicides sont actuellement le principal outil d'aide à la gestion des adventices. Les premiers travaux pour établir ces seuils ont été réalisés à la fin des années 1970 et publiés dans les années 80 (Koch et Hurle 1978; Caussanel 1989). L'effet de la densité d'adventices sur le rendement a été modélisé à partir de données d'expérimentations. Le tableau 1 compile les différentes valeurs de seuils de nuisibilité existantes pour les mêmes adventices des céréales selon les publications scientifiques européennes. En Suisse, les équipes d'Agroscope à Reckenholz ont travaillé à l'établissement de seuils et à la publication d'ouvrages sur la base des travaux allemands de Koch et Hurle (1978), Gerowitt et Heitefuss (1990), Ammon et Irla (1996), Zwerger et Arlt (2002). Les publications de ces travaux ne sont plus disponibles mais elles sont à l'origine de la fiche 1.33 d'Agriidea (tabl. 2).

L'utilisation de ces seuils comme unique outil d'aide à la gestion adventice est aujourd'hui remise en cause pour différentes raisons. Tout d'abord, les valeurs pour une

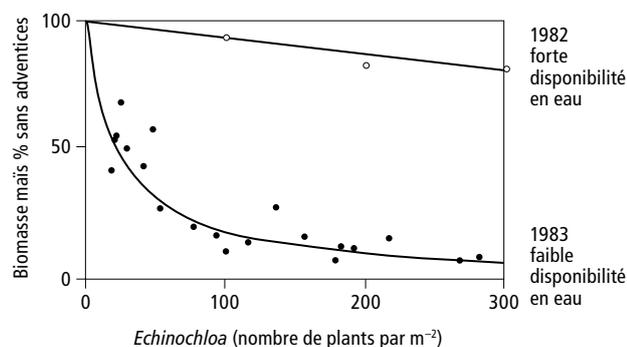


Figure 7 | Biomasse relative du maïs en fonction de la densité de panic pied de coq pour les années 1982 et 1983 (Kropff et Lotz 1992).

Tableau 1 | Seuils de nuisibilité publiés dans la littérature scientifique pour les céréales (densité moyenne d'adventices entraînant une baisse de rendement de 5%).

Espèces adventices	Nombre de plantes/m ²									
	Neururer (1975)	Neururer (1976)	Wahmhoff (1986)	Aarts (1985)	Cousens, Wilson et al. (1985)	Auld et Tisdell (1987)	Zanin, Berti et al. (1993)	Gherekhlou, Noroozi et al. (2010)	Gerowitt et Heitefuss (1990)	Swanton, Weaver et al. (1999)
Monocotylédones										10–40
<i>Alopecurus myosuroides</i> Huds.	Vulpin des champs			30	25	30–50		25–35		20–30
<i>Apera spica-venti</i> L.	Agrostide jouet-du-vent	19,2		20	15					
<i>Avena fatua</i> L.	Folle avoine	10,8				8–12	3–7			
<i>Avena sterilis</i>	Avoine stérile							7–12	5	
<i>Bromus sterilis</i>	Brome stérile							40		
<i>Lolium multiflorum</i>	Ray-grass d'Italie							25–35		
Dicotylédones									40–50	
<i>Cirsium arvense</i> L.	Cirse des champs	1,6	4,3							
<i>Convolvulus</i> spp	Liserons							12		
<i>Vicia sativa</i>	Vesce cultivée							5–10		
<i>Fallopia convolvulus</i>	Renouée liseron	2,8	0,7	2	5					2
<i>Galeopsis tetrahit</i> L.	Ortie royale	3,4	9,4							
<i>Galium aparine</i> L.	Gaillet gratteron	4,3	0,7	0,5	0,5			2		0,1–0,5
<i>Matricaria recutita</i> L.	Matricaire camomille	4,2			5					
<i>Sinapis arvensis</i> L.	Moutarde des champs	2,7	6,1							
<i>Papaver rhoeas</i>	Coquelicot	22								
<i>Stellaria media</i> L.	Stellaire intermédiaire	7,2	10,3		50					
<i>Veronica</i> sp.	Véroniques	4,6	9,0		50					
<i>Viola arvensis</i>	Pensée des champs									
<i>Alchemilla vulgaris</i>	Alchémille des champs									
<i>Lamium</i> sp	Lamiers									
<i>Vicia villosa</i> Roth	Vesce de Cerdagne	2,1	0,8	2						
<i>Chenopodium album</i>	Chénopode blanc							19		
<i>Salsola kali</i>	Soude brulée							13		
<i>Rapistrum rugosum</i>	Rapistre rugueux							27		

même espèce diffèrent en fonction de la publication (tabl. 1). Toutefois, les résultats d'essais aux champs et de simulations sur 60 ans ont montré que le nombre de traitements herbicides au cours du cycle cultural était le même, que le seuil d'intervention soit fixé à une densité d'une ou de dix adventices/m² (Munier-Jolain, Chauvel et al. 2002). Deuxièmement, les seuils sont basés sur des modèles de compétition entre adventices et culture dans des situations bispécifiques (une adventice et une culture) (Carlson et Hill 1985). Or, en pratique,

les parcelles n'hébergent pas une seule espèce mais une communauté d'adventices diversifiée. Certains modèles ont tenté d'introduire l'effet simultané de plusieurs adventices en incorporant les pertes de rendement individuelles estimées par espèces (Swanton et al. 1999), mais l'impact de la présence de plusieurs espèces n'est pas additif. Les relations de compétition entre les espèces réduisent leurs effets mesurés individuellement. Ainsi, un des premiers modèles multi-espèces établi pour prédire les pertes de rendement en soja surestimait d'envi-

Tableau 2 | Seuils d'interventions pour les adventices en Suisse, d'après la fiche 1.33 du classeur «grandes cultures» d'Agridea.

Dicotylédones adventices	Espèce de céréale	Période de contrôle (Stade BBCH)	Seuil d'intervention
Gaillet gratteron	Toutes	13–39	0,1 plante / m ² resp. 1 plante / 10 m ²
Renouée liseron	Toutes	13–29	2 plantes/m ²
Vesces	Toutes	13–29	2 plantes/m ²
Stellaire intermédiaire	Toutes	13–29	25 plantes/m ²
Ortie royale	Toutes	13–29	3 à 5 plantes/m ²
Diverses adventices à feuilles larges	Toutes	13–29	5% de la couverture totale du sol ou 50 plantes/m ²
Graminées adventices			
Agrostide jouet du vent	Blé d'automne (semis précoce)	13–29	10 plantes/m ²
	Orge d'automne, blé d'automne (semis tardif), céréales de printemps	13–29	20 plantes/m ²
	Seigle d'automne	13–29	30 plantes/m ²
Vulpin des champs	Blé d'automne (semis précoce)	13–29	15 plantes/m ²
	Orge d'automne, blé d'automne (semis tardif)	13–29	20 plantes/m ²
	Seigle d'automne, céréales de printemps	13–29	30 plantes/m ²
Ray-grass d'Italie	Céréales d'automne	13–29	8 plantes/m ²
Pâturin annuel	Céréales d'automne	13–29	50 plantes/m ²
Folle avoine	Céréales d'automne	13–29	10 plantes/m ²
	Céréales de printemps	13–29	5 plantes/m ²
	Multiplication	–	0 plantes/m ²
Diverses graminées	Toutes	13–29	Total 10 à 50 plantes/m ²

ron 7,5 % le dommage à la culture (Berti et Zanin 1994). Troisièmement, les seuils n'ont pas été recalculés depuis les années 90, alors que les prix de vente et les coûts de production, inclus dans le calcul, ont changé (Gerhards *et al.* 2012). Quatrièmement, la répartition des adventices dans la parcelle est souvent très hétérogène (fig. 8). Le seuil peut être dépassé à un endroit mais pas partout. Cela rend difficile la décision de l'intervention de désherbage et son efficacité.

Enfin, le principal biais des seuils est qu'ils ne prennent pas en compte l'effet d'une population élevée d'adventices sur la production de graines et donc le risque de levée pour les cultures suivantes de la rotation. Si l'on prend l'exemple du vulpin, un traitement ne devrait être déclenché qu'à partir de 20–30 vulpins par m² (en moyenne des publications dans le tabl. 1). Dans le cas d'une densité inférieure (par exemple, 15 vulpins par m²), la culture ne sera pas fortement impactée l'année en cours mais l'infestation risque d'être incontrôlable sur le long terme en raison de la production de graines. C'est pourquoi les seuils sont très peu utilisés dans la pratique (Ramseier *et al.* 2016). En conclusion, les seuils permettent de classer les espèces selon leur nuisibilité individuelle, mais ils ne permettent pas à eux seuls une gestion durable de la flore adventice.

Nouveaux indicateurs de nuisibilité

La densité d'adventices est la variable actuellement utilisée pour déterminer leur nuisibilité et calculer les seuils d'intervention (Swanton *et al.* 1999). Après de nombreuses années d'expérimentation en malherbologie, la communauté scientifique constate que la mesure de la densité adventice au champ n'explique qu'une part de la variabilité des rendements obtenus. D'autres variables ont été développées et sont utilisées dans la recherche:

- La couverture du sol par l'ensemble des adventices ou par adventice et la relation avec la couverture du sol par la culture

Cette variable traduit la capacité d'un ensemble de plantes ou de chaque plante à capter la lumière et à couvrir le sol (Kropff et Lotz 1992; Florez *et al.* 1999). Dans le cas de la betterave, c'est la variable qui explique le mieux le rendement, bien que l'effet de certaines espèces à port érigé telles que le panic pied-de-cop (*Echinochloa crus-galli*) ou le chénopode blanc (*Chenopodium album*) (Gerhards *et al.* 2017) soit sous-estimé.

- La biomasse totale ou par adventice et la relation avec la biomasse produite par la culture



Figure 8 | Infestation localisée de brome stérile (*Anisantha sterilis*). (Photo: INRAE)

La relation entre la biomasse des adventices et la biomasse de la culture explique à elle seule 31% de la variabilité des pertes de rendements des céréales (Milberg et Hallgren 2004). La biomasse par adventice est aussi fortement corrélée à la production de graines.

- La période critique pour la culture, de sensibilité aux adventices

Pour chaque culture, il existe une période critique pendant laquelle la présence d'adventices est particulièrement préjudiciable au rendement (tabl. 3). Passée cette période, les adventices peuvent être tolérées à condition de maîtriser leur production de graines.

Ces indicateurs doivent encore être combinés dans un outil d'aide à la décision qui permette aux agriculteurs de décider d'une intervention curative préférentiellement mécanique ou biologique et non plus seulement chimique, en fonction des observations au champs. Pour pallier la difficulté de récolter des biomasses d'adventices et de culture au champ, l'équipe de malherbologie grandes cultures d'Agroscope teste d'ores et déjà avec les agriculteurs engagés dans le projet Pestired et dans l'essai longue durée Herbiscope une nouvelle méthode d'évaluation visuelle du volume aérien des adventices et de la culture (Wirth *et al.* 2020) (fig. 9).

Les technologies d'imagerie par capteurs pourront faciliter ces mesures. Elles sont en cours de test pour estimer la répartition des adventices dans les parcelles d'essais et établir des seuils plus fiables pour les blés d'hiver (Keller *et al.* 2014). Il est primordial de prendre en compte

la nuisibilité à long terme des adventices lors du calcul de ces nouveaux seuils. Une étude canadienne (Simard *et al.* 2009) a montré qu'en dessous d'un seuil de 0,4 % de recouvrement relatif d'adventices, les pertes de rendements étaient négligeables malgré une réduction de 85 % des applications d'herbicides. Cependant, cela s'est vérifié seulement la première année d'expérimentation. Au bout de trois ans de rotation maïs-soja, l'économie d'herbicides n'était plus que de 10 % car les adventices levaient plus tôt et en plus grande quantité. L'analyse a permis de rectifier le seuil de recouvrement relatif à 0,077 % pour une efficacité sur le long terme. À ce niveau, les technologies d'imagerie n'étaient plus assez précises pour mesurer le recouvrement adventice, des améliorations technologiques doivent encore être réalisées.

Modéliser pour évaluer les mesures préventives

La modélisation est le moyen le plus efficace pour aider à la mise en œuvre de mesures préventives. Le modèle FLORSYS, développé par l'INRAE, permet d'ores et déjà aux chercheurs d'évaluer l'effet de systèmes de culture sur les adventices et le rendement, de manière pluriannuelle sur une parcelle virtuelle (Colbach *et al.* 2008). Les caractéristiques fonctionnelles de 26 espèces adventices fréquentes (représentatives des grands groupes fonctionnels d'adventices) et de 33 cultures de vente et couverts végétaux sont paramétrées. Les données d'entrée sont les opérations culturales du système testé, les caractéristiques du sol de la parcelle, et les données météorologiques pour un lieu donné. Ensuite, à partir de ces données d'entrée et du paramétrage détaillé du fonctionnement des adventices, le modèle représente le cycle de vie des adventices et de la culture. Trois règles clés régissent le fonctionnement du modèle: la plante qui émerge en premier est celle qui a le plus de chance de prendre le dessus, la plante qui sait le mieux s'adapter

Tableau 3 | Périodes critiques de désherbage communément établies, d'après Scavo and Mauromicale (2020) et (Martin *et al.* 2001).

Culture	Période critique de sensibilité aux adventices DJU: degrés jours unifiés (Tmax + Tmin)/2 – Tbase)
Blé d'hiver	De 506 à 1023 DJU, soit du stade tallage à épi 1 cm
Colza	Entre 17 et 38 jours après l'émergence soit jusqu'au stade 4–6 feuilles
Maïs	De la 3 ^e à la 10 ^e feuille
Pomme de terre	De 19–24 à 43–51 jours après l'émergence
Tournesol	14–26 jours après l'émergence
Soja	Jusqu'à 30 jours après l'émergence

pour capter le plus de ressources disponibles est celle qui se développera le plus et la plante qui produit le plus de graines résistantes à toute condition de sol sera celle qui durera le plus longtemps (Colbach *et al.* 2021). Les données de sortie sont la densité d'individus de chaque espèce, leur biomasse et leur stade de croissance ainsi que le stock semencier viable du sol. Pour que les résultats des simulations de FLORSYS soit utiles et utilisables pour et par les conseillers et les agriculteurs, les don-

nées sont traduites en indicateurs d'impacts négatifs (ex: perte de rendement) ou positifs (ex: gain de biodiversité) (Mézière *et al.* 2015). Un module de règles de décision a également été ajouté. Il permet de tester l'effet de différentes combinaisons de techniques culturales sur les indicateurs d'impacts (Colas *et al.* 2016). Ceci constitue les premières étapes de développement d'un outil d'aide à la décision à destination des agriculteurs basé sur le modèle FLORSYS.

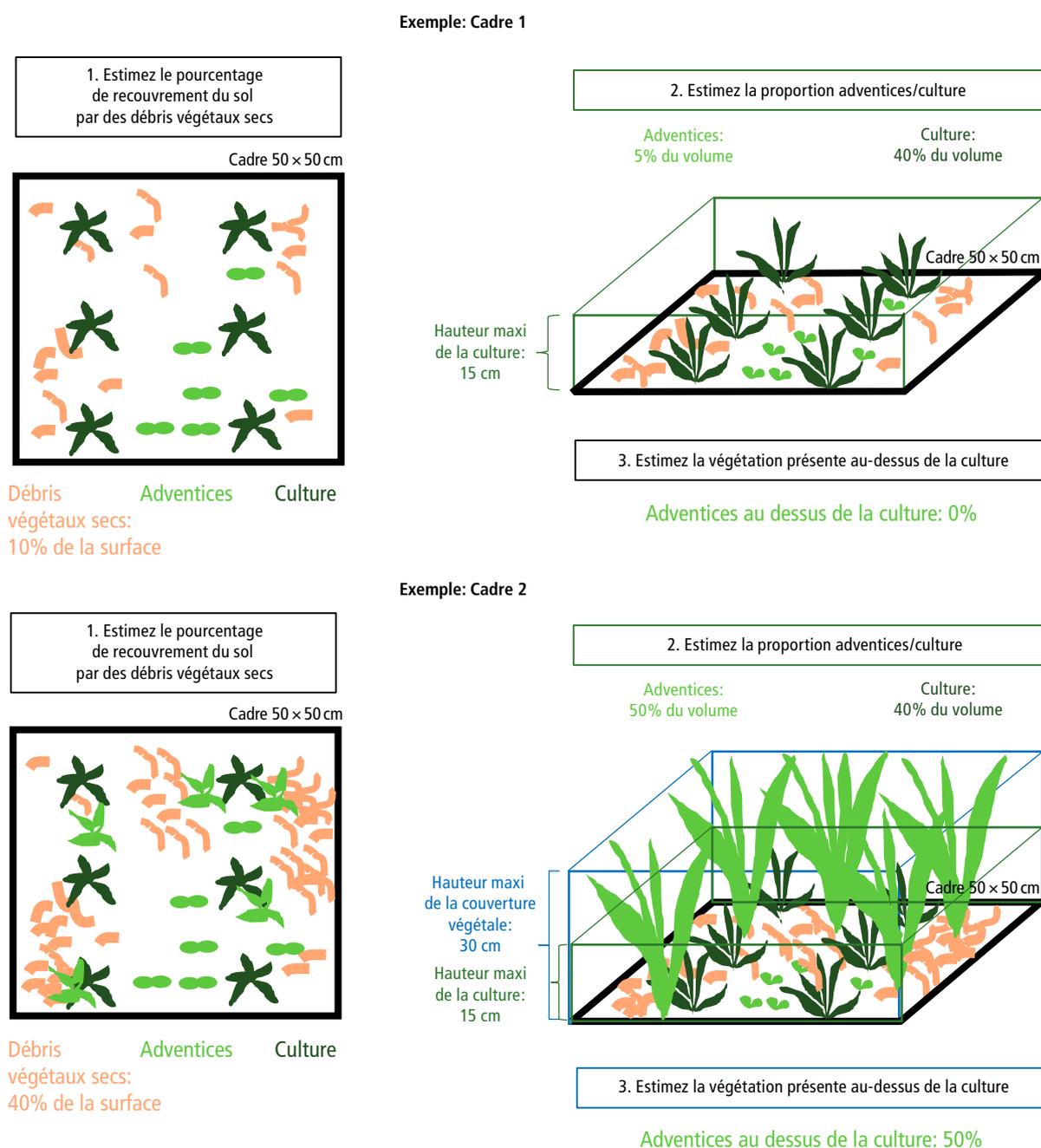


Figure 9 | Exemple d'estimation visuelle du volume des adventices et de la culture, méthode testée dans le cadre du projet PestiRed et de l'essai longue durée Herbiscopie sur le site d'Agroscope à Changins.

Stock semencier encore difficile à quantifier

Afin de vérifier à long terme l'efficacité des mesures préventives et curatives, le suivi du stock semencier réel des parcelles serait pertinent. Ce stock est en effet le meilleur indicateur de l'abondance et de la diversité des communautés floristiques susceptibles de lever. Cependant, il est difficile à évaluer, car les protocoles utilisés sont complexes et peu fiables: très grand nombre de carottes de terre à prélever dans la parcelle, dénombrement des graines extraites du sol à la loupe binoculaire fastidieux ou stimulation de la levée des adventices sous conditions contrôlées ne représentant pas exactement les conditions trouvées au champ. L'identification et le comptage automatiques des semences n'ont pas été développés malgré l'essor de nouvelles technologies d'imagerie et de robotique (Brenchley et Warington 1930; Mahé *et al.* 2020). L'analyse de l'ADN des graines, à l'aide de la PCR en temps réel (réaction de polymérisation en chaîne), pourrait être une piste d'avenir pour accélérer la quantification d'un stock semencier (Riley *et al.* 2010) mais cela demanderait autant de réaction PCR que de plantes différentes attendues. Cette méthode pourrait être utilisée dans le cas de recherche d'une espèce spécifique dans un stock semencier mais elle ne permet pas actuellement de dénombrer toutes les adventices présentes.

Conclusion et perspectives

- Au cours des 40 dernières années de recherche en malherbologie, la difficulté d'établir des indicateurs efficaces et pratiques pour la gestion des adventices a été progressivement démontrée.

- Les adventices sont une communauté naturelle toujours présente dans les parcelles. Leurs interactions au sein de l'agrosystème sont complexes. La gestion doit donc s'envisager à l'échelle de chaque culture et de la rotation, en combinant plusieurs mesures de lutte et en utilisant plusieurs outils d'aide à la décision aux périodes où ils sont pertinents.
- Un outil d'aide à la décision paramétré avec de nouveaux indicateurs de nuisibilité (couverture, biomasse, ... etc), en plus de la densité, estimés visuellement ou avec des technologies d'imagerie, permettrait d'évaluer la nuisibilité des adventices et d'intervenir en curatif avec des moyens préférentiellement mécaniques et biologiques, ou en dernier recours chimiques.
- En complément, l'utilisation d'un outil développé à partir du modèle de prévision du développement des adventices dans une situation donnée, FLORSYS, permettrait de valider ou de modifier le système de cultures en place et d'anticiper les mesures préventives à mettre en œuvre en fonction du risque.
- À l'avenir, pour améliorer la gestion durable des adventices et permettre une «renonciation complète ou partielles aux herbicides», il faudra d'une part renforcer la connaissance des espèces et des interactions entre elles et avec les cultures ainsi que la recherche de stratégies de lutte préventives et curatives; et d'autre part, développer la modélisation et des technologies d'imagerie pour mieux reconnaître et évaluer la nuisibilité des adventices. Ce sont ces thèmes sur lesquels travaillent aujourd'hui les équipes de recherche malherbologie en Suisse et en Europe. ■

Bibliographie

- Aarts D. V., 1985. A management information system for weed control in winter wheat. *Proc british Crop Protect. Conf. Weeds* 2, 679–686.
- Adeux G. *et al.*, 2019. Mitigating crop yield losses through weed diversity. *Nature Sustainability* 2(11), 1018–1026.
- Alignier A. & Petit S., 2012. Factors shaping the spatial variation of weed communities across a landscape mosaic. *Weed Research* 52 (5), 402–410.
- Ammon H.-U. & Irla E., 1996. Unkrautbekämpfung im Acker-und Futterbau, Landwirtschaftliche Lehrmittelzentrale.
- Auld B. A. & Tisdell C. A., 1987. Economic thresholds and response to uncertainty in weed control. *Agricultural Systems* 25 (3), 219–227.
- Berti A. & Zanin G., 1994. Density equivalent: a method for forecasting yield loss caused by mixed weed populations. *Weed Research* 34 (5), 327–332.
- Bertrand M. & Doré T., 2008. Comment intégrer la maîtrise de la flore adventice dans le cadre général d'un système de production intégrée? *Innovations Agronomiques* 3, 1–13.
- Birch E. *et al.*, 2011. How agro-ecological research helps to address food security issues under new IPM and pesticide reduction policies for global crop production systems. *Journal of Experimental Botany* 62 (10), 3251–3261.
- Brenchley W. E. & Warington K., 1930. The weed seed population of arable soil: I. Numerical estimation of viable seeds and observations on their natural dormancy. *The Journal of Ecology*, 235–272.
- Carlson H. L. & Hill J. E., 1985. Wild oat (*Avena fatua*) competition with spring wheat: plant density effects. *Weed Science*, 176–181.
- Caussanel J., 1989. Nuisibilité et seuils de nuisibilité des mauvaises herbes dans une culture annuelle: situation de concurrence bispécifique. *Agronomie*, EDP Sciences, 1989, 9 (3), 219–240.
- Chauvel B. *et al.*, 2018. Gestion durable de la flore adventice des cultures, Editions Quae.
- Colas F. *et al.*, 2016. Développement d'un outil d'aide à la décision pour la gestion intégrée des adventices.
- Colbach N. *et al.*, 2021. The FLORSYS crop-weed canopy model, a tool to investigate and promote agroecological weed management. *Field Crops Research* 261, 108006.
- Colbach, N. *et al.*, 2008. La modélisation au service de l'évaluation et de la conception des systèmes de cultures intégrés. *Innovations Agronomiques* 3, 61–73.

- Cordeau S. *et al.*, 2016. La nuisibilité directe des adventices en grandes cultures: quelles réponses nous apportent les essais désherbages?. 23^e conférence du COLUMA – Journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes.
- Cousens R. *et al.*, 1985. To spray or not to spray: the theory behind the practice. Proc. Br. Crop Prot. Conf. Weeds.
- Dessaint F. *et al.*, 1997. Nine years' soil seed bank and weed vegetation relationships in an arable field without weed control. *Journal of Applied Ecology*, 123–130.
- Dieleman A. *et al.*, 1996. Decision rules for postemergence control of pigweed (*Amaranthus* spp.) in soybean (*Glycine max*). *Weed Science*, 126–132.
- Birch E. *et al.*, 2011. How agro-ecological research helps to address food security issues under new IPM and pesticide reduction policies for global crop production systems. *Journal of Experimental Botany* 62 (10), 3251–3261.
- Florez J. A. *et al.*, 1999. Predicting rice yield losses caused by multispecies weed competition. *Agronomy Journal* 91 (1), 87–92.
- Gaba S. *et al.*, 2017. Livret «Gérer les espèces adventices et la flore des linéaires non cultivés une approche fonctionnelle».
- Gerhards R. *et al.*, 2017. Sugar beet yield loss predicted by relative weed cover, weed biomass and weed density. *Plant Protection Science* 53 (2), 118–125.
- Gerhards R. *et al.*, 2012. Using precision farming technology to quantify yield effects attributed to weed competition and herbicide application. *Weed Research* 52 (1), 6–15.
- Gerowitt B. & Heitefuss R., 1990. Weed economic thresholds in cereals in the Federal Republic of Germany. *Crop Protection* 9 (5), 323–331.
- Gherekhloo J. *et al.*, 2010. Multispecies weed competition and their economic threshold on the wheat crop. *Planta Daninha* 28 (2), 239–246.
- Jauzein P., 1995. Flore des champs cultivés, Sopra.
- Keller M. *et al.*, 2014. Estimating economic thresholds for site-specific weed control using manual weed counts and sensor technology: An example based on three winter wheat trials. *Pest Management Science* 70 (2), 200–211.
- Knezevic S. Z. *et al.*, 1997. Relative time of redroot pigweed (*Amaranthus retroflexus* L.) emergence is critical in pigweed-sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] competition. *Weed Science*, 502–508.
- Koch W. & Hurler K., 1978. Grundlagen der Unkrautbekämpfung, E. Ulmer.
- Kropff M. & Lotz L., 1992. Systems approaches to quantify crop-weed interactions and their application in weed management. *Agricultural Systems* 40 (1–3), 265–282.
- Lauber K. *et al.*, 2012. Flora Helvetica. Bern. Switzerland: Haupt.
- Mahé I. *et al.*, 2020. Soil seedbank: Old methods for new challenges in agro-ecology? *Annals of Applied Biology*.
- Martin S. G. *et al.*, 2001. Critical period of weed control in spring canola. *Weed Science* 49 (3), 326–333.
- Merfield C. N., 2019. Chapter 5 – Integrated Weed Management in Organic Farming. Organic Farming. S. Chandran, M. R. Unni and S. Thomas, Woodhead Publishing: 117–180.
- Mézière, D. *et al.*, 2015. Developing a set of simulation-based indicators to assess harmfulness and contribution to biodiversity of weed communities in cropping systems. *Ecological Indicators* 48, 157–170.
- Milberg P. & E. Hallgren, 2004. Yield loss due to weeds in cereals and its large-scale variability in Sweden. *Field Crops Research* 86 (2–3), 199–209.
- Munier-Jolain N. *et al.*, 2002. Long-term modelling of weed control strategies: analysis of threshold-based options for weed species with contrasted competitive abilities. *Weed Research* 42 (2), 107–122.
- Neururer H., 1975. Weitere Erfahrungen in der Beurteilung der tolerierbaren Verunkrautungsstärke. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz*, Sonderheft 7, 63–69.
- Neururer H., 1976. Ökonomische Schadensschwelle und tolerierbare Verunkrautungsstärke in der Unkrautbekämpfung. Land- und forstwirtschaftliche Forschung in Österreich.
- Oerke E., 1994. Estimated crop losses due to pathogens, animal pests and weeds. En «Crop production and crop protection» (EC Oerke, HW Dehne, F. Schonbeck, A. Weber, Eds.), Elsevier: Amsterdam.
- Oerke E., 2006. Crop losses to pests. *The Journal of Agricultural Science* 144, 31.
- Oliver L. R., 1988. Principles of weed threshold research. *Weed Technology*, 398–403.
- Petit S. *et al.*, 2014. Weed seed choice by carabid beetles (Coleoptera: Carabidae): Linking field measurements with laboratory diet assessments. *European Journal of Entomology* 111 (5), 615–620.
- Petit S. *et al.*, 2008. Les apports de l'écologie du paysage pour comprendre la dynamique de la flore adventice. *Innovations Agronomiques* 3, 49–60.
- Ramseier *et al.*, 2016. Utilisation des seuils d'intervention et des services de prévision et d'avertissement en Suisse. *Recherche Agronomique Suisse* 7 (2), 98–103.
- Riley I. T. *et al.*, 2010. Quantification of roots and seeds in soil with real-time PCR. *Plant and Soil* 331 (1), 151–163.
- Scavo A. & Mauromicale G., 2020. Integrated Weed Management in Herbaceous Field Crops. *Agronomy* 10 (4), 466.
- Schaffner U. *et al.*, 2020. Biological weed control to relieve millions from Ambrosia allergies in Europe. *Nature Communications* 11 (1), 1–7.
- Simard J.-M. *et al.*, 2009. Validation of a Management Program Based on A Weed Cover Threshold Model: Effects on Herbicide Use and Weed Populations. *Weed Science* 57 (2), 187–193.
- Storkey J. & P. Neve, 2018. What good is weed diversity? *Weed Research* 58 (4), 239–243.
- Swanton C. J. *et al.*, 1999. Weed Thresholds. *Journal of Crop Production* 2 (1), 9–29.
- Vuilloud P. *et al.*, 2006. Résultats de 35 ans de culture sans labour à Changins III. Mauvaises herbes, maladies fongiques et ravageurs. *Revue suisse d'Agriculture* 38 (2), 81–87.
- Wahmhoff W., 1986. Erfahrungen mit der praktischen Anwendung von Schadensschwellen bei der Unkrautbekämpfung im Getreide. Proceedings, EWRS symposium on economic weed control.
- Wirth J. *et al.*, 2020. «PestiRed: a Swiss on-farm approach to reduce pesticide use in arable crops.» *Julius-Kühn-Archiv* (464), 290–294.
- Zanin G. *et al.*, 1993. Estimation of economic thresholds for weed control in winter wheat. *Weed Research* 33 (6), 459–467.
- Zwerger P. & K. Arlt, 2002. Unkraut: Ökologie und Bekämpfung, Eugen Ulmer.