État actuel des résistances aux herbicides en Suisse début 2022

Marie Fesselet, Frédéric Tschuy et Judith Wirth
Agroscope, Systèmes de production Plantes, Malherbologie Grandes Cultures, 1260 Nyon, Suisse

Renseignements: Judith Wirth, e-mail: judith.wirth@agroscope.admin.ch

https://doi.org/10.34776/afs13-125f Date de publication: 22. Août 2022



Conyza canadensis **(Vergerette du Canada) résistant au glyphosate dans un vignoble suisse.**
(Photo: Frédéric Tschuy, Agroscope)

Résumé

Depuis la mise en place en 2011 d'un monitoring des résistances aux herbicides par Agroscope, 179 populations d'adventices suspectées de résistance aux herbicides ont été testées à Changins. 131 populations (73 %) ont montré des résistances aux herbicides. A ce jour, une résistance a été démontrée en Suisse chez six espèces adventices (trois monocotylédones et trois dicotylédones). La majorité des résistances sont simples, elles concernent un seul mode d'action, c'est-à-dire un groupe d'herbicides, par exemple les inhibiteurs de l'ALS. Grâce à des analyses moléculaires, des résistances liées à la cible (RLC) ont été détectées pour les inhibiteurs de l'ACCase, de l'ALS et du photosystème II, ainsi que pour le glyphosate. Ces résultats permettent de donner aux agriculteurs concernés par les résistances des informations plus précises sur la perte d'efficacité de ces modes d'action.

Key words: herbicide resistance, target site resistance (TSR), non-target site resistance (NTSR), ACCase inhibitors, ALS inhibitors, Glyphosate.

Introduction

Actuellement, au niveau mondial, des résistances aux herbicides ont été mises en évidence chez 267 espèces d'adventices (154 dicotylédones et 113 monocotylédones). Elles concernent 165 herbicides dans 72 pays (Heap 2022). Depuis 2011, le groupe Malherbologie grandes cultures d'Agroscope offre la possibilité de tester au niveau suisse des populations d'adventices soupçonnées d'être résistantes (Tschuy & Wirth, 2015). Il s'agit de plantes issues de graines de populations d'adventices qui ont survécu, dans des parcelles agricoles, à un traitement herbicide qui aurait dû normalement les détruire. Pour détecter les résistances, des tests en serre sont complétés depuis quelques années par des tests moléculaires. Cela permet de différencier la résistance liée à la cible de l'herbicide (RLC) de la résistance non liée à la cible (RNLC). La RLC est causée par une seule mutation dans le gène codant pour la protéine cible de l'herbicide. Les protéines sont constituées d'une succession de 20 acides aminés liés les uns aux autres. Chaque acide aminé est codé par un groupe de trois nucléotides (codon) constitués de quatre bases différentes: A, T, G et C. L'acide aminé Isoleucine (Ile) est par exemple codé par le codon ATT dans la position 2041 de la séquence d'acides aminés de la protéine ACCase (figure 1). Si, à cause d'une mutation, le nucléotide A est remplacé par le nucléotide G, l'acide aminé Isoleucine est substitué par l'acide aminé Valine (Val) → Ile-2041-Val. Pour cette position du gène de l'ACCase, il existe deux autres mutations connues dans le même codon → Ile-2041-Asn et Ile-2041-Thr. Ce type de mutation modifie la structure du site de fixation de l'herbicide de la protéine ciblée qui n'est dès lors plus inhibée par la matière active concernée. Par conséquent, l'herbicide perd son efficacité. La RLC peut rapidement évoluer dans une population d'adventices, car une seule mutation permet la survie immédiate des individus qui la possèdent. Par contre, une mutation RLC ne présente pas forcément un degré de résistance élevée et elle ne concerne pas systématiquement tous les herbicides ayant le même mode d'action. L'identification des mutations à la cible permet, dans certains cas, de donner plus d'informations sur la perte d'efficacité d'un groupe d'herbicides. Les RNLC incluent tous les mécanismes de résistance autres que les mutations de la cible, comme par exemple une réduction de la pénétration de l'herbicide dans la plante ou une détoxification active (Délye, Colbach & Le Corre, 2020). La connaissance des mécanismes de résistances est importante pour développer localement des stratégies de désherbage efficaces, ainsi que pour gérer ou retarder l'apparition des résistances aux herbicides. La résistance ne doit pas être confondue avec le manque d'efficacité. L'inefficacité d'un herbicide peut être due, par exemple, à l'application de l'herbicide à un stade non adapté du développement de l'adventice ou dans des conditions météorologiques non optimales. L'inadéquation de la dose appliquée aux adventices visées et des adjuvants

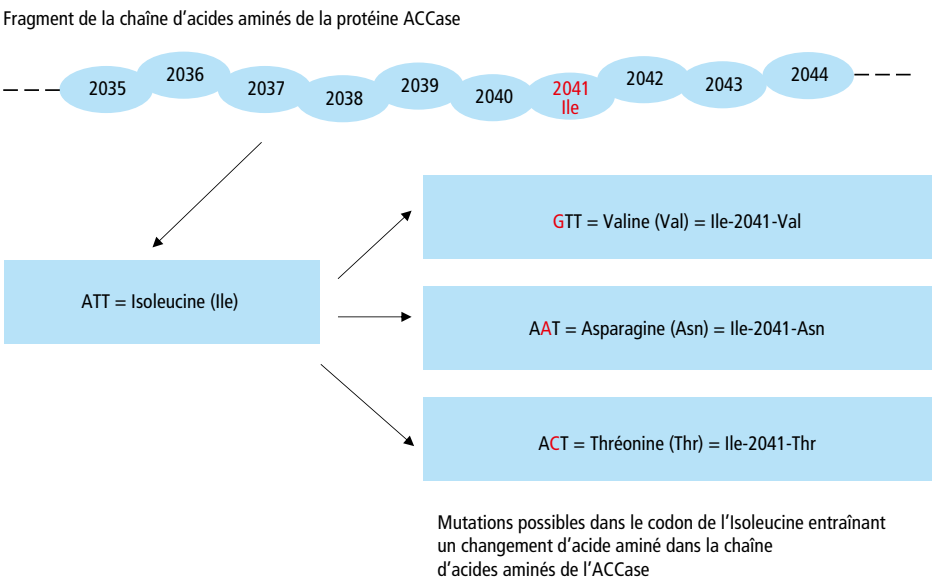

Figure 1 | Exemple d'une résistance liée à la cible (RLC): dans la protéine ACCase, l'acide aminé Isoleucine à la position 2041 de la chaîne d'acides aminés peut être substitué par trois autres acides aminés (Valine, Asparagine et Thréonine) selon le type de mutation à la cible présente dans la séquence du gène.

utilisés est également un facteur de risque d'inefficacité. Les modes d'action principalement concernés par les résistances aux herbicides en Suisse sont les inhibiteurs de l'ACCase et les inhibiteurs de l'ALS. L'acétyl-CoA carboxylase (ACCase) est une enzyme qui intervient dans la synthèse des acides gras qui sont des constituants essentiels des structures et des réserves d'une plante. Les inhibiteurs de l'ACCase sont représentés par trois familles chimiques: les aryloxyphénoxypropionates (FOPs), les phénylpyrazolines (DENs) et les cyclohexanédiones (DIMs) (tableau 1). L'acétolactate synthase (ALS) est une enzyme qui joue un rôle clé dans la synthèse des acides aminés chez les plantes. Les inhibiteurs de l'ALS rassemblent cinq familles chimiques: les sulfonylurées (SU), les triazolopyrimidines (TP), les imidazolinones (IMI), les sulfonylamino-carbonyltriazolinones (SCT) ainsi que les pyrimidinylthio-benzoates (PTB).

L'objectif de cet article est de donner un aperçu de la situation des résistances aux herbicides en Suisse et d'expliquer les mécanismes qui en sont à l'origine.

Matériel et méthode

Essais en serre

Les adventices sont cultivées en pot et reçoivent un traitement herbicide à la dose homologuée (Tschuy & Wirth, 2015). Une partie des plantes, traitées à l'eau, sert de contrôle. Des populations résistantes, lorsqu'elles sont disponibles, et des populations sensibles non résistantes sont incluses dans les tests en serre pour être comparées aux populations potentiellement résistantes. Les herbicides choisis pour les tests sont ceux utilisés par les agriculteurs dans les parcelles avec suspicion d'adventices résistantes. Différents herbicides des groupes HRAC 1, 2, 5 et 9 sont utilisés (tableau 1). Jusqu'en 2014, Agroscope a mené ces tests à Changins. Ils ont ensuite été principalement effectués par les entreprises PlantaLyt GmbH (Hanovre, Allemagne, http://www.plantalyt.de) et IDENTXX GmbH (Stuttgart, Allemagne, http://www.identxx.com). Depuis 2018, Agroscope travaille uniquement avec l'entreprise IDENTXX GmbH.

Essais moléculaires pour détecter les RLC

Depuis 2014, les entreprises PlantaLyt GmbH et IDENTXX GmbH ont réalisées des tests moléculaires pour détecter des RLC. Un génotypage SNP (single nucleotide polymorphisms) est réalisé sur les feuilles des plantes qui ont survécu aux traitements herbicides dans les essais en serre. Les échantillons sont analysés pour rechercher des mutations ponctuelles homozygotes ou hétérozygotes sur des positions connues des gènes codant l'ACCase, l'ALS, la 5-enol-pyruvyl-shikimate-3-phosphate synthase (EPSPS) et la protéine D1 du photosystème II (PS II) selon la méthodologie de Löbmann (Löbmann, Schulte,

Tableau 1 | Liste des herbicides utilisés par Agroscope et Identxx GmbH qui ont montré des résultats positifs aux tests de résistance en serre.

Groupe HRAC	Mode d'action	Famille chimique	Herbicide (nom commercial)	Matière(s) active(s)	Dose N appliquée	Matière active (g/ha)
HRAC 1 (ancien A)	Inhibiteurs de l'ACCase	Aryloxyphénoxy-propionates (FOPs)	Puma extra	fénoxaprop	1,20 l/ha	82,8
			Fusilade Max	fluazifop	2,00 l/ha	250
			Targa Super	quizalofop	1,25 l/ha	62,5
		Phénylpyrazolines (DENs)	Avero	pinoxaden	0,90 l/ha	45
			Axial*	pinoxaden	0,45 l/ha	4
		Cyclohexanédiones (DIMs)	Select	cléthodime	0,50 l/ha	120
			Focus Ultra	cycloxydime	3,00 l/ha	300
HRAC 2 (ancien B)	Inhibiteurs de l'ALS	Sulfonylurées (SU)	Husar OD	iodosulfuron	0,10 l/ha	10
			Husar*	iodosulfuron	0,20 kg/ha	10
			Lexus*	flupyrsulfuron	0,02 kg/ha	10
			Monitor	sulfosulfuron	0,025 kg/ha	20
			Atlantis OD	mésosulfuron + iodosulfuron	0,90-1,20 l/ha	9,0–12,0 + 1,8–2,4
			Lexus Class*	flupyrsulfuron (+ carfentrazone)	0,06 kg/ha	10,02 + 19,98
		Triazolopyrimidines (TP)	Talis	pyroxulam	0,25 kg/ha	1,875
HRAC 5 (ancien C1 et C2)	Inhibiteurs du PS II	Triazynones	Dancor 70 WG	métribuzine	1,00 kg/ha	700
			Sencor SC	métribuzine	0,90 l/ha	540
			Beta Omya	métamitron	5,00 l/ha	3503
		Thymine/uracile	Venzar	lénacile	2,50 kg/ha	2000
		Urées	Isoproturon*	isoproturon	0,75–3,00 l/ha	375–1500
			Arlit	chlortoluron	3,00 l/ha	2100
			Carmina	chlortoluron (+ diflufénican)	2,50 l/ha	1500 + 100
HRAC 9 (ancien G)	Inhibiteur de l'EPSP synthase	Glycines	Roundup Power Max	glyphosate	2,25 l/ha	1080
			Roundup Ultra*	glyphosate	3,00 l/ha	1080

*herbicides retirés du marché suisse.

Runge, Christen & Petersen, 2021). Six espèces d'adventices ont été analysées: vulpin des champs (*Alopecurus myosuroides*), agrostide jouet-du-vent (*Apera spica-venti*), ray-grass d'Italie (*Lolium multiflorum*), chénopode blanc (*Chenopodium album*), vergerette du Buenos Aires (*Erigeron bonariensis*) et la vergerette du Canada (*Erigeron canadensis*).

Parmi les mutations connues, les positions suivantes ont été analysées:

- pour le gène de l'ACCase: Ile-1781, Trp-1999, Trp-2027, Ile-2041, Asp-2078, Cys-2088 et Gly-2096.
- pour le gène de l'ALS: Ala-197, Pro-197, Ala-205, Asp-376, Arg-377 et Trp-574.
- pour le gène psbA du PS II: Leu-218, Val-219, Thr-220, Ala-251, Phe-255, Gly-256, Ser-264, Asn-266 et Leu-275.
- pour le gène de l'EPSPS synthase: Pro-106.

Conditions pour qu'une population soit considérée comme résistante

Les populations qui présentent un taux de survie des plantes égal ou supérieur à 50 % lors des tests en serre sont déclarées résistantes au mode d'action de l'herbicide testé. De même, toute population d'adventices dans laquelle une plante individuelle présente une mutation RLC est déclarée résistante au mode d'action concerné. Les populations ayant un taux de survie entre 26 % et 50 % dans les tests en serre sont considérées comme ayant une résistance émergente. Avec un taux de survie de plantes égal ou inférieur à 25 %, les populations sont déclarées sensibles à l'herbicide.

Résultats

Populations résistantes aux herbicides en Suisse

Depuis 2011, des résistances ont été confirmées en Suisse chez 131 populations de six espèces d'adventices (figure 2). L'espèce la plus impactée est le vulpin des champs avec 46 populations résistantes, suivie par l'agrostide jouet-du-vent avec 42 populations, le ray-grass d'Italie avec 27 populations, le chénopode blanc avec 13 populations et récemment la vergerette du Canada et la vergerette de Buenos Aires avec respectivement deux et une populations (figure 3). Des cartes présentant la répartition des résistances aux herbicides en Suisse sont actualisées au début de chaque année sur la page Malherbologie du site internet d'Agroscope, à l'adresse suivante: https://www.agroscope.admin.ch/.

Résistances simples ou multiples

Résistances simples

Si les résistances concernent seulement un mode d'action/un groupe HRAC, il s'agit d'une résistance simple (RS). Chez le vulpin des champs, 23 populations ont démontré une RS aux inhibiteurs de l'ACCase, quatre aux inhibiteurs de l'ALS et deux aux inhibiteurs du PS II. Chez l'agrostide jouet-du-vent, 37 populations montrent une RS aux inhibiteurs de l'ALS. 13 populations de ray-grass d'Italie montrent une RS aux inhibiteurs de l'ACCase, quatre aux inhibiteurs de l'ALS et cinq populations au glyphosate (figure 4). Chez les chénopodes blancs, il existe uniquement des RS contre les inhibiteurs du PS II

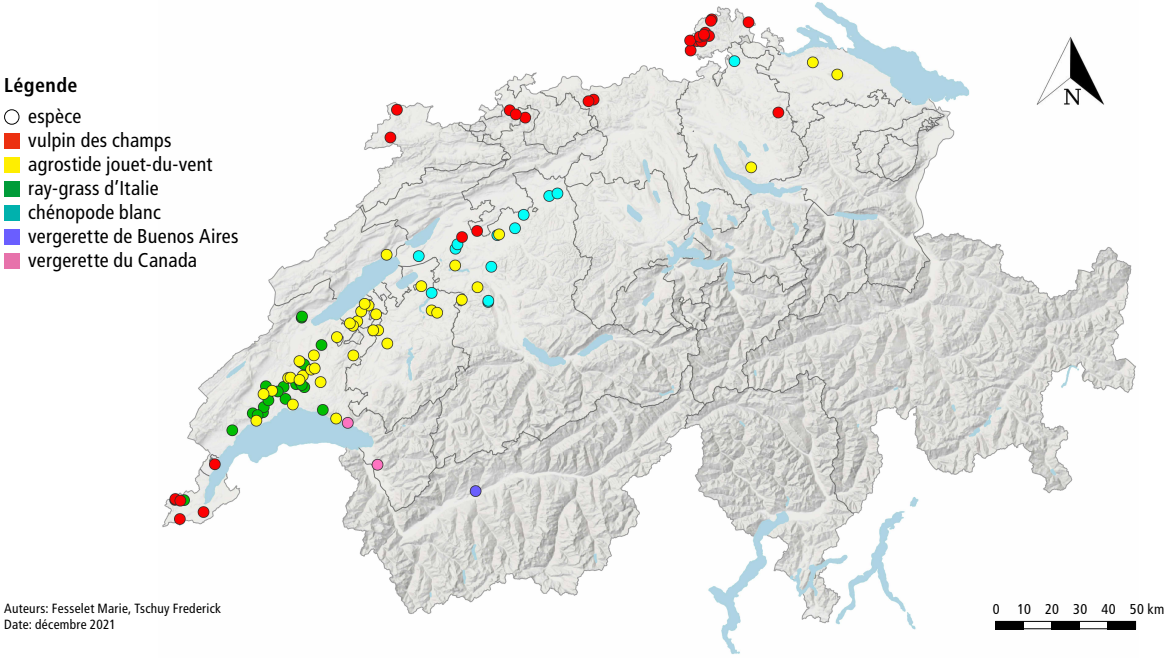

Figure 2 | Populations d'adventices identifiées comme résistantes aux herbicides depuis 2011 en Suisse selon l'espèce.

(13). Enfin, chez la vergerette du Buenos Aires et la vergerette du Canada respectivement une et deux RS au glyphosate ont été démontrées.

Résistances doubles ou triples

Si les mutations concernent deux ou trois modes d'action différents, on parle de résistance double (RD) et triple (RT). Sept populations de vulpins des champs sont doublement résistantes aux inhibiteurs de l'ACCase et de l'ALS. De plus, cinq populations sont doublement résistantes aux inhibiteurs de l'ACCase et du PS II. Chez cette espèce, nous avons également cinq populations simultanément résistantes à trois modes d'action: ACCase, ALS et PS II (fig. 4). Chez l'agrostide jouet-du-vent, trois populations montrent des doubles résistances aux inhibiteurs de l'ACCase et de l'ALS et deux populations des résistances doubles aux inhibiteurs de l'ALS et du PS II. Chez le ray-grass d'Italie, deux RD ont été détectées. D'une part, pour les inhibiteurs de l'ACCase et de l'ALS et d'autre part, pour les inhibiteurs de l'ALS et du PS II. Deux populations de cette espèce sont multi-résistantes à trois modes d'actions: l'ACCase, l'ALS et le PS II.

Résistances liées à la cible (RLC) et non liées à la cible (RNLC)

Les résistances liées à la cible (RLC) ont été recherchées sur 69 des 131 populations d'adventices résistantes dans les essais en serre. Près de 70 % (49) ont montré des RLC.

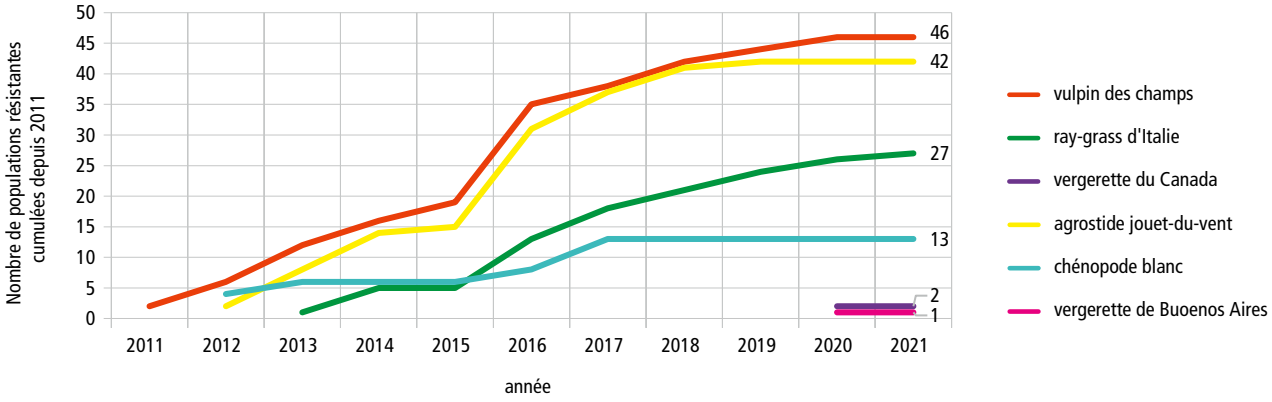

Figure 3 | Évolution du nombre cumulé de populations d'adventices résistantes aux herbicides depuis 2011 en Suisse selon les espèces.

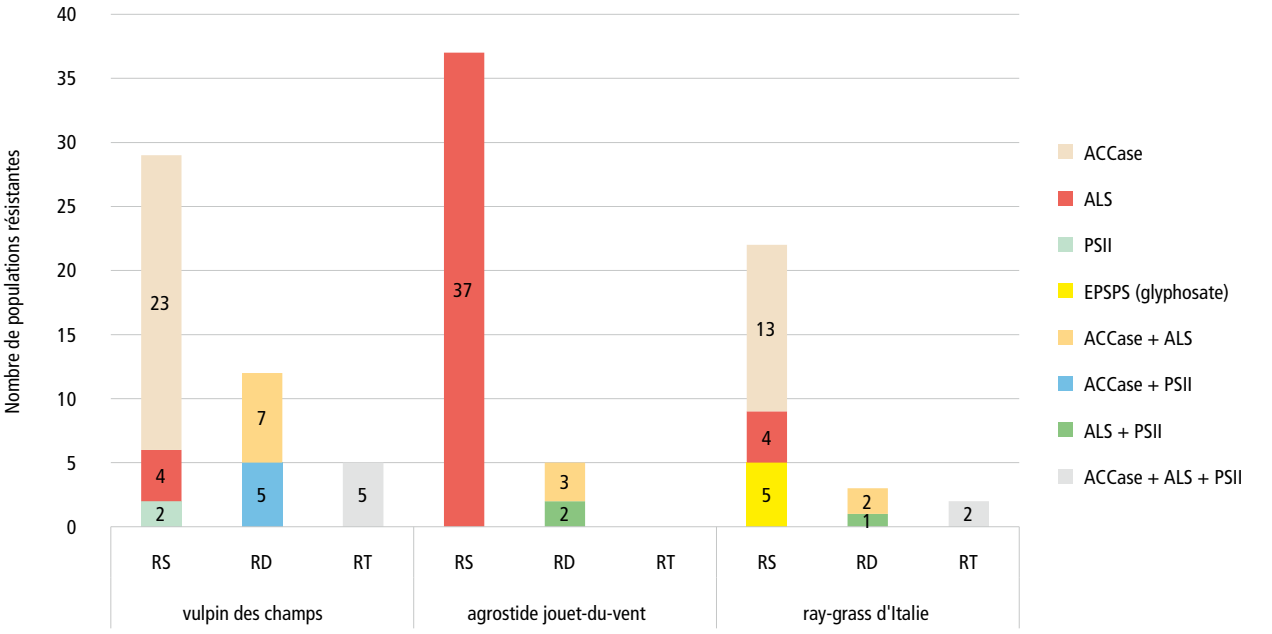

Figure 4 | Types de résistance aux herbicides selon l'espèce. RS = résistance simple = un mode d'action concerné; RD = résistance double = deux modes d'action concernés, RT = résistance triple = trois modes d'action concernés.

Pour les 30 % restantes, la résistance est bien présente, mais elle n'est pas liée à la cible (RNLC).

Pour les inhibiteurs de l'ACCase, 69 % des populations de vulpins des champs et 93 % des populations de ray-grass d'Italie testées ont montré des RLC (figure 5). Pour les inhibiteurs de l'ALS, 100 % des populations de vulpins des champs, 33 % des populations de ray-grass d'Italie et 57 % des populations d'agrostides jouet-du-vent testées ont montré des RLC. Pour les inhibiteurs du PS II, des RLC ont seulement été détectées chez les chénopodes blancs (100 % des populations testées). Pour ce dernier mode d'action, les cas chez les vulpins des champs, les ray-grass d'Italie et les agrostides jouet-du-vent sont tous des RNLC. Les deux populations de ray-grass d'Italie testées résistantes au glyphosate ont également démontré des RLC.

RLC: mutations ponctuelles sur des positions connues des gènes

Globalement, chez les populations de vulpin des champs et de ray-grass d'Italie, huit différentes mutations ont été détectées pour le gène de l'ACCase: Ile-1781-Leu, Gly-2096-Ala, Ile-2041-Asn, Asp-2078-Gly, Ile-2041-Thr, Ile-2041-Val, Trp-2027-Cys et Cys-2088-Arg (tableau 2). Pour ces deux espèces, la mutation la plus représentée en Suisse est Ile-1781-Leu, respectivement 11 et 13 fois, suivie par la mutation Ile-2041-Asn, respectivement cinq et sept fois. Concernant le gène de l'ALS, trois différentes mutations ont été trouvées chez le vulpin, l'agrostide et le ray-grass: Pro-197-Thr, Trp-574-Leu et Asp-376-Glu. Avec 11 récurrences, Pro-197-Thr est la mutation qui a été détectée le plus souvent, suivie par la mutation Trp-574-Leu (cinq fois). Une seule mutation, Ser-264-Gly, a

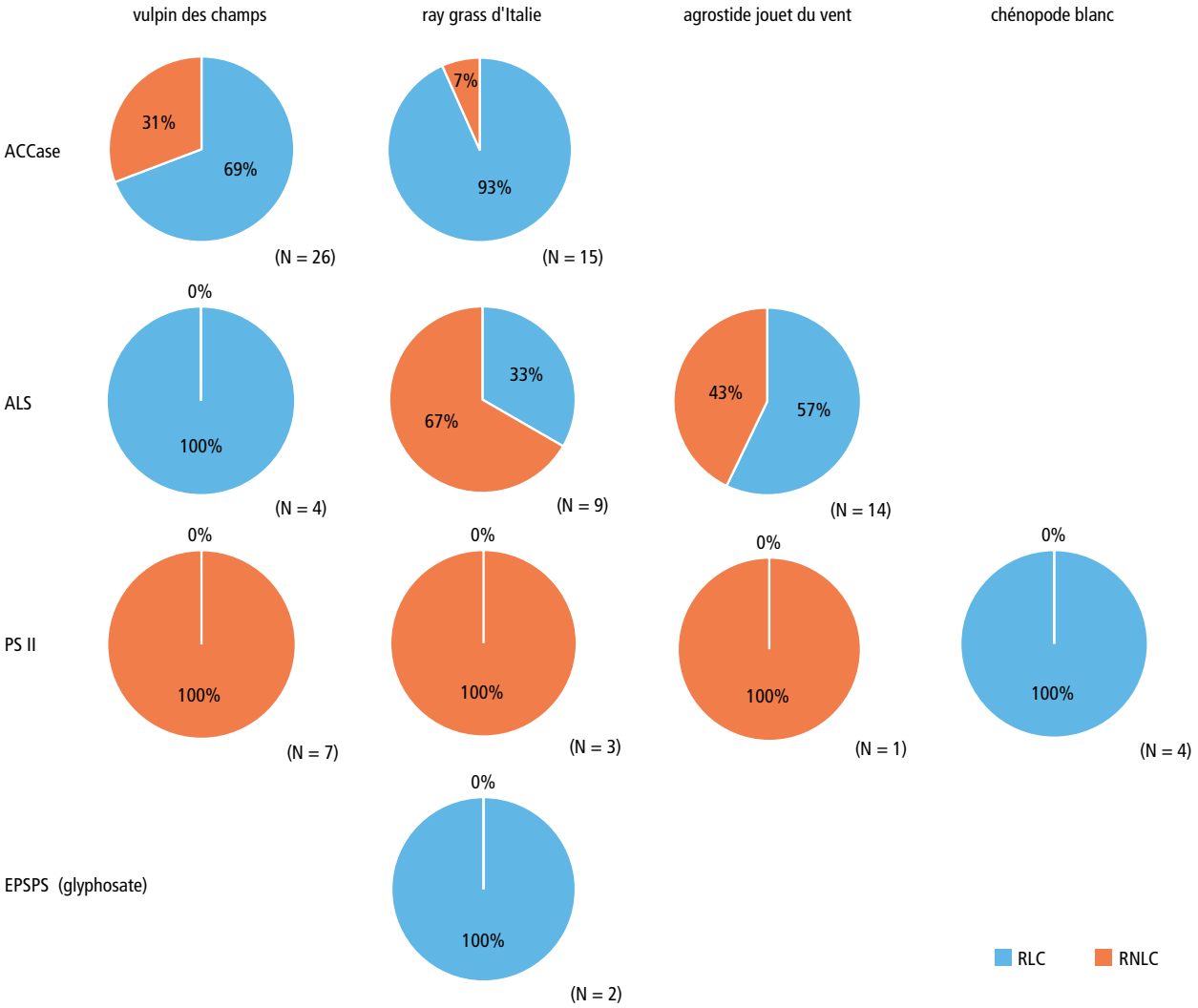

Figure 5 | Proportion des résistances liées à la cible (RLC) en pourcentage. Un certain nombre de populations (N) qui ont montré des résistances en serre ont été testées au niveau moléculaire pour déterminer s'il s'agit de résistances liées à la cible (RLC) ou de résistances non liées à la cible (RNLC).

Tableau 2 | Nombre de mutations RLC identifiées en Suisse selon les espèces d'adventices et les modes d'action HRAC.

Mode d'action	Mutation RLC	Vulpin des champs	Agrostide jouet-du-vent	Ray-grass d'Italie	Chéno-pode blanc
Inhibiteurs de l'ACCase	Ile-1781-Leu	11		13	
	Gly-2096-Ala	5			
	Ile-2041-Asn	5		7	
	Asp-2078-Gly	4		1	
	Ile-2041-Thr	2			
	Ile-2041-Val	1			
	Trp-2027-Cys	1			
	Cys-2088-Arg			1	
Inhibiteurs de l'ALS	Pro-197-Thr	3	7	1	
	Trp-574-Leu	2	1	2	
	Asp-376-Glu			1	
Inhibiteur du PS II	Ser-264-Gly				4
Inhibiteur de l'EPSP synthase	Pro-106-Ser			2	

été identifiée quatre fois pour le gène psbA du PS II et elle concerne quatre populations de chénopode blanc. Enfin, pour le gène de l'EPSPS synthase, la mutation Pro-106-Ser, responsable de la résistance au glyphosate, a été mise en évidence deux fois chez le ray-grass d'Italie.

Discussion

Les résistances aux herbicides en Suisse sont détectées sur l'ensemble du plateau Suisse et en Valais, principalement en grandes cultures, mais aussi dans la vigne. Cependant, ces résultats ne sont pas exhaustifs et ne reflètent qu'une partie de la réalité, selon la priorité donnée à cette problématique par les différents acteurs impliqués dans les déclarations de suspicion de résistances. Le nombre de populations résistantes augmentent progressivement. Les quatre modes d'action des herbicides concernés par des résistances en Suisse (HRAC 1, 2, 5 et 9) sont les mêmes que les quatre principaux mode d'actions concernés au niveau mondial (Heap, 2022). Avec seulement six espèces d'adventices touchées, le niveau de résistance en Suisse est cependant assez faible. En France, des résistances ont été démontrées chez 25 espèces d'adventices (Délye *et al.*, 2020) https://www.r4p-inra.fr/fr/statut-des-resistances-en-france/ et en Allemagne chez 13 espèces (renseignement personnel, Dagmar Rissel, JKI Braunschweig).

Certains agriculteurs dans le canton de Schaffhouse rencontrent de grands problèmes à gérer les vulpins des champs résistants, surtout dans l'orge. Toutefois, en Suisse, les populations d'adventices résistantes dans les grandes cultures peuvent, dans une grande partie des cas, toujours être contrôlées. D'une part, la plupart des résistances détectées étant des résistances simples, le mélange et l'alternance des modes d'action biochimiques (groupes HRAC) sont des stratégies efficaces tant qu'il reste des produits homologués qui ne sont pas concernés par les résistances détectées. D'autre part, les exigences en matière de rotation (exigences liées aux prestations écologiques - PER) favorisent la diversité des cultures par l'obligation de mettre en place quatre cultures différentes et des parts maximales dans l'assolement. Cette rotation diversifiée, qui inclut des cultures d'hiver et d'été, favorise la diversité de la flore adventice et réduit le risque de dominance d'une seule espèce (Adeux *et al.*, 2019). Cela permet d'intervenir avec différents groupes d'herbicides dans une rotation. De plus, la prairie temporaire étant encore présente sur de nombreuses exploitations, la multiplication notamment des graminées en est ainsi réduite. La mise en place de couverts végétaux limitant la germination dans les intercultures, les dates de semis différentes tout comme le labour régulier et le désherbage mécanique peuvent également diminuer la présence des adventices. Les résistances liées à plusieurs groupes d'herbicides/modes d'action, bien que peu présentes sont en augmentation. Il s'agit de résistances multiples conférées par plusieurs mutations sur des gènes différents. Ces différents types de résistances sont plus difficiles à gérer avec des herbicides car le choix des possibilités est réduit. Il faut alors envisager des alternatives non chimiques plus conséquentes comme le recours au désherbage mécanique voire la mise en place forcée de prairies. Actuellement, le désherbage mécanique est encore peu répandu, mais l'augmentation des surfaces concernées est réelle, pour plusieurs raisons: reconversion au bio, demande du marché (IP Suisse) ainsi que progrès technologique. En plus des soutiens financiers public sont mis à disposition, comme par exemple des CER (contributions à l'efficience des ressources) pour la réduction des herbicides sur les terres ouvertes ou pour la réduction des produits phytosanitaires dans les cultures de betteraves sucrières.

Pour la vigne, la situation est plus complexe, l'alternance des modes d'action est devenue difficile en raison du retrait de certains herbicides. Dans les vignobles mécanisables, des stratégies combinant l'enherbement, le désherbage mécanique et parfois le travail du sol sont utilisés comme alternatives au désherbage chimique, toutefois pour l'entretien du cavaillon les alternatives au désherbage chimique sont encore très limitées.

La RLC chez les inhibiteurs de l'ACCase

Les inhibiteurs de l'ACCase, qui sont des graminicides sélectifs, ont été introduits à la fin des années 1970 et le

premier cas de résistance a été annoncé en 1982 auprès de l'ivraie raide (*Lolium rigidum*) en Australie (Heap & Knight, 1982). Actuellement, 50 espèces monocotylédones résistantes ont été détectées au niveau mondial (Heap 2022). Seize mutations liées à la cible sont connues pour l'ACCase dans certaines positions d'acides aminés (1781, 1999, 2027, 2041, 2078, 2088 et 2096) (Kaundun, 2014; Takano, Ovejero, Belchior, Maymone & Dayan, 2020). Huit types de mutations différents ont été détectés chez le vulpin et le ray-grass.

Vulpin des champs

Cinq codons de résistance différents ont été décrits et classifiés en deux catégories: respectivement spécifique pour les FOPs (2027, 2041 et 2096) et pour les FOPs/DIMs (1781 et 2078) (Kaundun, 2014). En Suisse, chez le vulpin des champs, deux tiers des populations résistantes testées montrent des RLC. Par exemple, chez une population identifiée à Donneloye (VD) qui est résistante au fluazifop et au quizalofop en serre, trois RLC ont été détectées en même temps: Ile-1781-Leu, Asp-2078-Gly et Ile-2041-Asn (tableau 3). D'autres études ont pu démontrer que chez le vulpin, la mutation Ile-1781-Leu confère des résistances aux FOPs fenoxaprop, clodinafop et haloxyfop, ainsi qu'au cycloxydime (Délye, Matéjicek & Michel, 2008). La mutation Asp-2078-Gly donne une résistance aux quatre herbicides précédemment mentionnés ainsi qu'au cléthodime. En Irlande, des populations de vulpin résistantes présentant la mutation Ile-1781-Leu étaient résistantes au propaquizafop et au cycloxydime (Alwarnaidu Vijayarajan *et al.*, 2021). On peut donc s'attendre à ce que les populations de vulpin en Suisse ayant les deux mutations Ile-1781-Leu et Asp-2078-Gly soient également résistantes à toutes ces matières actives (Alwarnaidu Vijayarajan *et al.*, 2021; Délye *et al.*, 2008). Cependant, le niveau de résistance peut varier en fonction du type de mutation (hétérozygote ou homozygote) (Kaundun, 2014). En 2014, en Angleterre et en France, la mutation Ile-1781-Leu était massivement présente, alors que la mutation Gly-2096-Ala était prédominante en Allemagne (Kaundun, 2014). En Suisse, ces deux mutations, ainsi que six autres types de mutations sont présentes, mais leurs incidences dans les populations suisses de vulpin des champs restent encore à découvrir.

Ray-grass d'Italie

Chez le ray-grass d'Italie, 93 % des populations testées au niveau moléculaire ont montré des RLC. La mutation Ile-1781-Leu rend la population de Bournens (VD) résistante contre les FOPs fluazifop et quizalofop, ainsi que contre le cycloxydime et le pinoxaden (Tableau 3). D'autres essais ont pu démontrer des résistances au clodinafop, à l'haloxyfop, au pinoxaden, au sethoxydime et au cléthodime (niveau faible) causées par la mutation Ile-1781-Leu (Scarabel, Panozzo, Varotto & Sattin, 2011; Takano *et al.*, 2020). La mutation Asp-2078-Gly crée, quant à elle, des résistances au diclofop, au cléthodime et au pinoxaden (Takano *et al.*, 2020). Les *Lolium* sp., portant la mutation Cys-2088-Arg, montrent une résistance au clodinafop, au sethoxydime et au pinoxaden (Scarabel *et al.*, 2011). En général, les mutations aux codons 1999 et 2088 ont surtout été trouvées chez *Lolium* sp. (Kaundun, 2014). Dans des populations de ray-grass italien, danois et grec, les mêmes types de mutations ont été détectés qu'en Suisse (Scarabel *et al.*, 2020).

Tableau 3 | Exemples de mutations RLC et leurs résistances associées observées en serre dans des populations de vulpin de champs et de ray-grass d'Italie résistantes aux inhibiteurs d'ACCase.

HRAC concerné	Espèce d'adventices	RLC détecté	Résistances démontrées en serre	Références
ACCase	Vulpin des champs	Ile-1781-Leu Asp-2078-Gly Ile-2041-Asn	fluazifop	population suisse (Donneloye, VD)
			quizalofop	
		Ile-1781-Leu	fenoxaprop	Délye *et al.* 2008
			clodinafop	
			haloxyfop	
			cycloxdime	
		Asp-2078-Gly	fenoxaprop	
			clodinafop	
			haloxyfop	
			cycloxdime	
			cléthodime	
		Ile-1781-Leu	propaquizafop	Vijayarajan *et al.* 2021
			cycloxydime	
	Ray-grass d'Italie	Ile-1781-Leu	fluazifop	population suisse (Bournens, VD)
			quizalofop	
			cycloxydime	
			pinoxaden	
		Ile-1781-Leu	clodinafop	Takano *et al.* 2020
			haloxyfop	
			pinoxaden	
			cléthodime	
		Asp-2078-Gly	diclopfop*	
			cléthodime	
			pinoxaden	
		Ile-1781-Leu	clodinafop	Scarabel *et al.* 2011
			haloxyfop	
			pinoxaden	
			cléthodime	
			sethoxydime*	
		Cys-2088-Arg	clodinafop	
			sethoxydime*	
			pinoxaden	

*non homologué en Suisse.

La RLC chez les inhibiteurs de l'ALS

Le premier herbicide inhibiteur de l'ALS, le chlorsulfuron, a été commercialisé en 1982, et le premier cas de résistance aux inhibiteurs de l'ALS a déjà été détecté en 1987 aux Etats-Unis chez la laitue serriole (*Lactua serriola*) (Mallory-Smith, Thill & Dial, 1990). Actuellement, 65 espèces monocotylédones et 105 espèces dicotylédones résistantes ont été détectées au niveau mondial (Heap 2022). Dans le gène de l'ALS, 29 substitutions d'acides d'aminés sur huit positions du gène (122, 197, 205, 376, 377, 574, 653 et 654) ont été démontrées dans 64 espèces d'adventices (Cao, Zhou & Huang, 2022; Runge, Keil, Löbmann, Petersen & Brändle, 2020; Tranel & Wright, 2002). La plupart des substitutions d'acides aminés ont été détectées chez les codons Pro-197 et Trp-574. La mutation Pro-197 a été identifiée chez différentes monocotylédones et elle confère des résistances uniquement contre les sulfonylurées (Cao *et al.*, 2022; Scarabel *et al.*, 2020; Yu & Powles, 2014). En Suisse, elle est également dominante chez les monocotylédones analysées. Par contre, on sait qu'une mutation au niveau du codon Trp-574 crée une résistance à tous les inhibiteurs de l'ALS (Cao *et al.*, 2022; Scarabel *et al.*, 2020; Heap 2022). Dans tous les cas, une mutation de RLC sur l'ALS réduit la sensibilité aux inhibiteurs de l'ALS, mais l'intensité de cette réduction varie en fonction de la mutation et de l'herbicide. Autrement dit, selon la mutation et l'herbicide, une réduction de sensibilité se traduira ou non par une résistance de l'adventice au dosage préconisé de l'herbicide appliqué au champ.

La RLC chez la protéine D1 du photosystème II

La première résistance à la métribuzine a été découverte en 1989 chez l'amarante à épis verts (*Amaranthus powelli*) aux Etats-Unis (Eberlein, Al-Khatib, Guttieri & Fuerst, 1992). Actuellement, 34 espèces monocotylédones et 53 espèces dicotylédones résistantes aux inhibiteurs du PSII ont été détectées au niveau mondial (Heap 2022). La résistance des chénopodes blanc aux triazinones (ex. métribuzine et métamitrone) et triazines peut être causée par la RLC qui conduit à l'échange de l'acide aminé Ser-264-Gly dans la protéine D1 du chloroplaste (Eberlein *et al.*, 1992; Thiel & Varrelmann, 2014). Cette résistance apparait principalement dans des champs de betteraves car elle est liée au large usage d'herbicides qui sont spécifiques à cette culture. Elle est également présente en Suisse et toutes les populations de chénopode blanc analysées au niveau moléculaire portaient cette mutation. Par contre, toutes les populations de graminées résistantes aux inhibiteurs du PSII en Suisse présentaient des RLNC.

La RLC chez l'EPSPS synthase

Le glyphosate est commercialisé depuis 1974 (Duke & Powles, 2008) et les premiers ray-grass résistants au glyphosate ont été découverts en Australie en 1996 (Powles, Lorraine-Colwill, Dellow & Preston, 1998). Actuellement, 29 espèces monocotylédones et 27 espèces dicotylédones résistantes ont été détectées au niveau mondial (Heap 2022). Chez *Lolium* sp. des mécanismes multiples de résistances au glyphosate sont connus (Fernández-Moreno, Alcántara-De La Cruz, Smeda & De Prado, 2017). En plus de la RLC Pro-106-Ser, qui est présente en Suisse, des RNLC existent aussi et les deux types de mutations peuvent donner des désavantages concurrentiels au ray-grass.

Les résistances non liées à la cible (RNLC)

Ce type de résistance est très répandu chez les graminées et il est nettement plus difficile à diagnostiquer, car plusieurs gènes interagissent. La RNLC est due à tout mécanisme réduisant l'accès de l'herbicide à sa cible, comme une dégradation ou une séquestration du produit. Chez une même plante, les deux types de mécanismes peuvent être présents en même temps. Pour plus d'informations sur la RNLC, se référer à l'article de Délye *et al.* (2020) en accès libre sur internet.

Conclusions et perspectives

Malgré l'augmentation lente des résistances aux herbicides en Suisse, disposer d'un aperçu continu de la situation est important pour gérer cette problématique au niveau local. En outre, la connaissance des RLC et des types de mutations présentes nous donne des informations précieuses pour mieux gérer la perte d'efficacité des herbicides et éviter des applications inutiles. Etant donné que la disponibilité des herbicides est de plus en plus restreinte, des stratégies de gestion durable des adventices, combinant un ensemble de moyens de lutte incluant des rotations diversifiées, des faux-semis, des sous-semis, des couverts végétaux, du désherbage mécanique etc. sont de plus en plus utilisées par les agriculteurs suisses. Idéalement les herbicides sont seulement utilisés en dernier recours en cas d'une très forte infestation avec une adventice problématique. Il reste qu'il faut prendre le phénomène de résistance aux herbicides très au sérieux car, une fois installée au champ, la résistance peut y demeurer de nombreuses années et les alternatives de désherbage restantes sont généralement plus onéreuses. ■

Bibliographie

- Heap, I., 2022. The International Survey of Herbicide Resistant Weeds. Accès: www.weedscience.org [11.08.2022]
- Adeux, G., Munier-Jolain, N., Meunier, D., Farcy, P., Carlesi, S., Barberi, P. & Cordeau, S. (2019). Diversified grain-based cropping systems provide long-term weed control while limiting herbicide use and yield losses. *Agronomy for Sustainable Development,* **39**(4). https://doi.org/10.1007/s13593-019-0587-x
- Alwarnaidu Vijayarajan, V. B., Forristal, P. D., Cook, S. K., Schilder, D., Staples, J., Hennessy, M. & Barth, S. (2021). First detection and characterization of cross-and multiple resistance to acetyl-CoA carboxylase (ACCase)-and acetolactate synthase (ALS)-inhibiting herbicides in black-grass (Alopecurus myosuroides) and Italian ryegrass (Lolium multiflorum) populations from Ireland. *Agriculture (Switzerland),* **11**(12). https://doi.org/10.3390/agriculture11121272
- Cao, Y., Zhou, X. & Huang, Z. (2022). Amino acid substitution (Gly-654-Tyr) in acetolactate synthase (ALS) confers broad spectrum resistance to ALS-inhibiting herbicides. *Pest Management Science,* **78**(2), 541–549. https://doi.org/10.1002/ps.6658
- Délye, C., Colbach, N. & Le Corre, V. (2020). Résistances aux herbicides: mécanismes, situation en France et bonnes pratiques. *Innovations Agronomiques,* **81**, 33–49.
- Délye, C., Matéjicek, A. & Michel, S. (2008). Cross-resistance patterns to ACCase-inhibiting herbicides conferred by mutant ACCase isoforms in Alopecurus myosuroides Huds. (black-grass), re-examined at the recommended herbicide field rate. *Pest Management Science,* **64**(11), 1179–1186. https://doi.org/10.1002/ps.1614
- Duke, S. O. & Powles, S. B. (2008). Glyphosate: a once-in-a-century herbicide. *Pest Management Science,* **64**(4), 319–325. https://doi.org/Doi 10.1002/Ps.1518
- Eberlein, C., Al-Khatib, K., Guttieri, M. & Fuerst, E. (1992). Distribution and Characteristics of Triazine-Resistant Powell Amaranth (Amaranthus powellii) in Idaho. *Weed Science,* **40**(4), 507–512. https://doi.org/10.1017/S0043174500058045
- Fernández-Moreno, P. T., Alcántara-De La Cruz, R., Smeda, R. J. & De Prado, R. (2017). Differential resistance mechanisms to glyphosate result in fitness cost for lolium perenne and L. Multiflorum. *Frontiers in Plant Science,* **8**. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01796
- Heap, J. & Knight, R. (1982). A population of ryegrass tolerant to the herbicide diclofop- methyl. *Journal - Australian Institute of Agricultural Science,* **48**(3), 156–157. Hentet fra https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0020343648&partnerID=40&md5=d03e75e21fdeddd21f564f8ee4a790b3
- Kaundun, S. S. (2014). Resistance to acetyl-CoA carboxylase-inhibiting herbicides. *Pest Management Science,* **70**(9), 1405-1417. https://doi.org/10.1002/ps.3790
- Löbmann, A., Schulte, M., Runge, F., Christen, O. & Petersen, J. (2021). Occurrence, resistance factors and cross-resistance patterns to herbicides inhibiting acetolactate synthase (ALS) of *Echinochloa crus-galli* (L.) Pal. Beauv. in Central Europe. *Journal of Plant Diseases and Protection,* **128**, 843–852. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s41348-021-00434-1
- Mallory-Smith, C. A., Thill, D. C. & Dial, M. J. (1990). Identification of sulfonylurea herbicide-resistant prickly lettuce (Lactuca serriola). *Weed Technology,* **4**, 163–168.
- Powles, S. B., Lorraine-Colwill, D. F., Dellow, J. J. & Preston, C. (1998). Evolved resistance to glyphosate in rigid ryegrass (Lolium rigidum) in Australia. *Weed Science,* **46**(5), 604-607. https://doi.org/10.1017/s0043174500091165
- Runge, F., Keil, S., Löbmann, A., Petersen, J. & Brändle, F. (2020). Methods for investigating allele frequencies and distribution in the acetolactate-synthase (ALS) gene in target-site-resistant *Echinochloa crus-galli. Julius-Kühn-Archiv,* **464**, 477–485. https://doi.org/DOI 10.5073/jka.2020.464.072
- Scarabel, L. *et al.* (2020). Diversified Resistance Mechanisms in Multi-Resistant Lolium spp. in Three European Countries. *Frontiers in Plant Science,* **11**. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.608845
- Scarabel, L., Panozzo, S., Varotto, S. & Sattin, M. (2011). Allelic variation of the ACCase gene and response to ACCase-inhibiting herbicides in pinoxaden-resistant Lolium spp. *Pest Management Science,* **67**(8), 932–941. https://doi.org/10.1002/ps.2133
- Takano, H. K., Ovejero, R. F. L., Belchior, G. G., Maymone, G. P. L. & Dayan, F. E. (2020). ACCase-inhibiting herbicides: Mechanism of action, resistance evolution and stewardship. *Scientia Agricola,* **78**(1). https://doi.org/10.1590/1678-992x-2019-0102
- Thiel, H. & Varrelmann, M. (2014). Identification of a new PSII target site psbA mutation leading to D1 amino acid Leu218Val exchange in the Chenopodium album D1 protein and comparison to cross-resistance profiles of known modifications at positions 251 and 264. *Pest Management Science,* **70**(2), 278–285. https://doi.org/10.1002/ps.3556
- Tranel, P. J. & Wright, T. R. (2002). Resistance of weeds to ALS-inhibiting herbicides: What have we learned? *Weed Science,* **50**(6), 700–712. https://doi.org/10.1614/0043-1745(2002)050[0700:RROWTA]2.0.CO;2
- Tschuy, F. & Wirth, J. (2015). Situation actuelle des résistances aux herbicides en Suisse. *Recherche Agronomique Suisse,* **6**(11–12), 516–523.
- Yu, Q. & Powles, S. B. (2014). Resistance to AHAS inhibitor herbicides: Current understanding. *Pest Management Science,* **70**(9), 1340-1350. https://doi.org/10.1002/ps.3710