

Végéphy – 24^e CONFÉRENCE DU COLUMA
JOURNÉES INTERNATIONALES SUR LA LUTTE CONTRE LES MAUVAISES HERBES
ORLÉANS – 3, 4 et 5 DÉCEMBRE 2019

ETAT DES LIEUX DE LA RESISTANCE AUX HERBICIDES
AU NIVEAU MONDIAL, ANALYSE DU CONTEXTE
ET CONTROLE RAISONNE DU STOCK SEMENCIER

G. LE GOUPIL

SYNGENTA CROP PROTECTION AG - Rosentalstrasse 67 - 4058 BALE, SUISSE

RÉSUMÉ

Partout dans le monde la résistance aux herbicides continue de progresser et d'impacter la productivité des exploitations agricoles. Malgré des efforts conséquents de communication et d'éducation, il semble difficile de pouvoir stopper ce phénomène. En parallèle, la pression réglementaire et sociétale tend à impacter négativement le nombre de solutions chimiques plus vite que la recherche ne peut en amener sur le marché. Malheureusement, la résistance semble se disséminer plus vite que la conversion aux bonnes pratiques dont l'adoption est limitée par le contexte climatique et socio-économique. Heureusement, la problématique de la résistance aux herbicides semble inspirer de nombreuses firmes qui mettent au point des nouveaux outils et des technologies plus innovantes les unes que les autres.

Mots-clés : herbicides, résistance, stock semencier, innovation, cadre réglementaire, agronomie, nouvelles technologies

ABSTRACT

Around the world, herbicide resistance continues to grow and impact farm productivity. Despite significant efforts of communication and education it seems difficult to be able to stop this phenomenon. At the same time, regulatory and societal pressure tends to have a negative impact on the number of chemical solutions that research can deliver to the market. Unfortunately, resistance seems to be spreading faster than the conversion to good practices in which the adoption is limited by the climatic and socio-economic context. Fortunately, the issue of herbicide resistance seems to inspire many firms that are developing new tools and technologies that are more innovative than others.

Keywords: herbicides, resistance, seed bank, innovation, regulatory framework, agronomy, new technologies

INTRODUCTION

Sans l'utilisation de produits phytosanitaires, de nombreuses cultures subissent une baisse de rendement d'environ 30%. Cette diminution est notamment observée pour les céréales, les pommes de

terre et le riz. Les mauvaises herbes y contribuent pour plus de 14%, devant les dégâts causés par les maladies et les ravageurs¹. La résistance aux herbicides a été observée dès les premières années d'utilisation des herbicides chimiques dans les années 50². Largement adoptés pour les nombreux bénéfices qu'ils apportent aux agriculteurs et leur contribution à la sécurité alimentaire, ils sont devenus l'outil de prédilection pour lutter contre les adventices³. Malheureusement, au fil du temps, la pression de sélection exercée sur les populations de mauvaises herbes est venue à bout des herbicides les plus puissants et le nombre de cas de résistance ne cesse d'augmenter⁴. Cet article a pour objectif de dresser un rapide état des lieux des résistances dans les pays du monde où la situation est devenue difficile. Nous analyserons le contexte réglementaire et politique dans lequel l'innovation peine à trouver sa place. Puis nous discuterons les outils complémentaires au désherbage chimique qui pourraient permettre de préserver l'efficacité des herbicides existants tout en maintenant la rentabilité des exploitants agricoles.

MATERIEL ET METHODE

Le recueil des informations a été effectué lors d'entretiens au sein de la société Syngenta dans divers départements tels que Recherche et Développement, Homologation, Agriculture Durable, Agronomie Digitale, Nouvelles Technologies et Marketing.

Les données régionales ont été fournies par les correspondants locaux de Syngenta le plus souvent collectés auprès de leurs partenaires techniques, de la distribution et universitaires.

Enfin les références des articles et sites internet consultés pour compléter ces informations sont indiqués dans la partie bibliographie en fin d'article.

RESULTATS

ETAT DES LIEUX DE LA PROGRESSION DE LA RESISTANCE DANS LE MONDE

Comme le rapporte the International Survey of Herbicide Resistant Weeds⁵ en 2019 on décompte 502 uniques cas de résistance aux herbicides (espèce x site d'action) au niveau mondial. Il a été ainsi identifié des populations résistantes à 23 des 26 sites d'action commercialisés ce qui représente 167 herbicides différents. Déjà, 258 espèces adventices résistantes ont été référencées, 150 dicotylédones et 108 monocotylédones. Même si l'on note des disparités régionales et locales, la résistance a été confirmée dans 70 pays affectant 93 cultures. Les cultures les plus touchées par les problèmes de résistance aux herbicides sont sans surprise le blé, le maïs, le riz et le soja dans lesquelles l'usage abondant d'herbicides dans les plus grands pays agricoles n'est plus à démontrer. Même si l'atrazine détient toujours la palme de l'herbicide ayant sélectionné le plus d'espèces résistantes (66 espèces en 2019), le glyphosate fait son entrée dans le top 3 (43 espèces en 2019), suivi de près par une multitude d'inhibiteurs de l'ALS (43 espèces en 2019 pour l'imazethapyr ou le tribenuron). Les graminées restent les championnes de l'adaptation aux pratiques de désherbage chimique. *Lolium rigidum* résiste désormais à 14 modes d'action différents. Une population pouvant résister à 7 modes d'action à la fois a même été identifiée en Australie. Dans la grande famille des dicotylédones *Amaranthus palmeri* et *tuberculatus*, dont nous parlerons plus tard, ont démontré leur capacité à s'adapter à 7 modes d'action également.

Cette collection d'informations est uniquement qualitative car basée sur les déclarations volontaires de la communauté scientifique de cas "nouveaux" de résistance (*i.e.* nouvelles combinaisons espèces x mode(s) of action x pays). Une fois publiés, la recherche se détourne souvent de ces cas et il est extrêmement difficile de quantifier la propagation de ces populations. Bien sûr des monitorings sont organisés au niveau local mais la consolidation des informations quantitatives est fastidieuse et très coûteuse. On peut donc craindre à juste titre que la situation soit encore plus dramatique que le portrait dressé ci dessus.

Amérique du Nord (exemple des Etats-Unis)

L'Amérique du Nord (incluant Canada et Mexique) produit une belle proportion de grains et d'oléagineux, 8% du blé, 34% du soja et 36% du maïs à l'échelle mondiale⁶.

En 1968, on rapportait le premier cas de résistance à l'atrazine aux Etats-Unis. Quelques années après l'introduction des inhibiteurs de l'ACCase et de l'ALS la résistance aux herbicides est devenue une préoccupation grandissante. Mais avec l'adoption massive des cultures tolérantes au glyphosate, sur près de 90% des surfaces de maïs, soja et coton⁷, le pays a connu un répit pendant une bonne vingtaine d'années. Soudain, dans les années 2000, le nombre de cas de résistance au glyphosate se mit à exploser, à commencer par *Conyza canadensis*. Aujourd'hui, l'ennemi agricole numéro 1 est bien l'Amaranthe (*A. palmeri* et *A. tuberculatus*)⁸. Avec leur capacité d'adaptation et leur production grainière hors normes (plus de 100 000 graines par plante), ces espèces ont littéralement envahi les plaines américaines maïsicoles. Pratiquement aucun mode d'action n'est épargné. Une autre espèce d'adventices, *Kochia scoparia* résistante au glyphosate, aux inhibiteurs de l'ALS et aux auxines, grâce à son légendaire et infatigable mode de dissémination par le vent, est très répandu dans les plaines du nord et le Canada⁹.

Les agriculteurs américains ont finalement fait évoluer leurs pratiques. Aujourd'hui la majorité des hectares reçoit 2 modes d'action ou plus, dont une application d'herbicides résiduels à modes d'action alternatifs pour leur bonne performance contre les adventices à longue période germinative, comme justement, *Amaranthus* sp. et *Conyza* sp.¹⁰. Mais l'inaction préventive, l'absence de diversité dans le système cultural et l'absence de méthodes alternatives de désherbage ne permettent pas encore d'enrayer la situation et ne fait que reporter le problème sur le nouveau mode d'action utilisé.

Amérique du Sud (Exemple du Brésil)

L'Amérique du Sud représente environ 25% de la surface cultivée mondiale et compte plus de 20 millions d'hectares de maïs et environ 58 millions d'hectares de soja¹¹. La taille des fermes est impressionnante, presque la moitié des hectares sont gérés par des fermes de plus de 1000 hectares¹². 90% des hectares sont conduits en technique culturale simplifiée et le glyphosate est un élément clé du système cultural et s'utilise entre 3 et 5 fois par saison^{13,14,15}. Ceci dit, les terres sont le plus souvent louées et les exploitants recherchent une efficacité et une rentabilité à court terme, comme par exemple au Brésil.

Si l'on devait choisir 2 espèces emblématiques pour rapporter la situation au Brésil ce serait *Digitaria insularis* (graminée perenne)^{16, 17} et *Conyza* sp. (dicotylédone)^{18, 19}. Les experts s'accordent à penser que la résistance au glyphosate affectera 80% des populations de *Digitaria insularis* et 60% pour *Conyza* sp. d'ici 2027²⁰. L'amaranthe multi-résistante est aussi une problématique en Amérique du Sud, *Amaranthus hybridus*, espèce endémique et très compétitive^{21, 22}, mais aussi *Amaranthus palmeri* qui a fait son chemin depuis les Etats-Unis en passant par l'Argentine, vraisemblablement arrivée sous forme de semences via le matériel agricole^{23, 24,25}.

Même si les solutions de pré-levée (ex. S-métolachlore, pyroxasulfone, saflufenacil...) se développent en réaction à la vague de résistance qui submerge le Brésil, les agriculteurs sont toujours attirés par les solutions de post-levée en interculture (glyphosate, clethodim...) mais aussi dans la culture de soja grâce au large panel de cultures tolérantes aux herbicides. Les compagnies semencières ont redoublé d'ingéniosité pour mettre à disposition des variétés tolérantes à 1 (ex. glyphosate ou glufosinate), puis 2 (ex. glyphosate+dicamba), voire 3 modes d'action (ex. glyphosate+glufosinate+2,4D).

L'Asie

L'agriculture en Asie est très diversifiée en terme de cultures et de zones climatiques. On décompte près de 500 millions d'agriculteurs traditionnels et la taille des exploitations est en moyenne de 1.5 hectares. A l'opposé, on trouve d'immenses exploitations agricoles, comme les palmeraies (Malaisie, Indonésie) ou les fermes d'Etat en Chine très avancées techniquement. En Asie, la résistance aux herbicides est moins problématique que la résistance aux insecticides et fongicides. Jusqu'à très

récemment le désherbage manuel était la pratique la plus courante. Avec la migration de la population rurale vers les villes qui a fortement réduit la main-d'oeuvre agricole, les agriculteurs se tournent de plus en plus vers les solutions chimiques³⁴.

Le riz est la culture arable la plus répandue avec près de 140 millions d'hectares produisant 87% de la production mondiale²⁶. Dans les pays développés, grands consommateurs de pesticides comme le Japon ou la Corée, la résistance, aux inhibiteurs de l'ALS en particulier mais aussi aux inhibiteurs de l'ACCCase, est très répandue chez les espèces graminées (exemples *Echinochloa crus-galli*^{27,28} et *Monochoria* sp.) et les carex (exemple *Scirpus* sp. et *Sagittaria* sp.²⁹). Ceci dit, les pays où le désherbage manuel est toujours majoritaire ne sont pas à l'abri de la résistance. Le riz sauvage (*Oryza* sp.) est arraché des rizières à la main depuis des décennies. Ainsi au fil du temps, ayant souvent échappées à l'oeil humain, les plantes ressemblant le plus au riz cultivé ont été sélectionnées. Il est désormais très difficile de les différencier, réduisant ainsi le niveau d'efficacité du désherbage manuel.

L'Inde est le deuxième plus grand producteur de blé, derrière la Chine. Après le riz il s'agit de la culture la plus importante pour l'alimentation humaine. Cela représente plus de 8% de la production mondiale de blé et 13% de la surface agricole indienne est occupée par cette céréale.

Phalaris minor se dissémine très facilement via les canaux d'irrigation (rizières) mais surtout via les semences de blé contaminées. Il serait d'ailleurs arrivé en Inde de la même façon dans le passé, cette espèce de mauvaise herbe n'étant pas endémique de cette partie du monde. On estime à 4 millions d'hectares dans le nord du pays présentant de la résistance aux inhibiteurs de l'ACCCase et de l'ALS mais aussi photosystème II (isoproturon)³⁰.

La résistance n'est pas encore dramatique dans le maïs. Ici encore le désherbage s'effectue le plus souvent manuellement ou mécaniquement (exemples Vietnam, Thaïlande). La Chine, avec ses 38 millions d'hectares de maïs, n'a pas encore adopté les cultures tolérantes aux herbicides²⁶. Il existe très peu de données quant à l'étendue du phénomène en Chine, mais on estime à 15-20% la surface infectée par des adventices résistantes aux herbicides inhibiteurs de l'ALS ou du photosystème II.

Dans les plantations de palmiers à huile et d'arbres à caoutchouc, l'usage intense des herbicides explique la multitude de modes d'action affectée par la résistance (glyphosate, paraquat, glufosinate, ALS, auxines et inhibiteurs de l'ACCCase^{31,32}). Dans le cas d'une population d'*Eleusine indica* identifiée en Malaisie montrant une forte résistance au glufosinate, l'agriculteur a expliqué avoir utilisé cet herbicide jusqu'à 24 fois par année³³.

L'Australie

Dans les années 1850, 185 millions de moutons pâturaient paisiblement dans les larges plaines australiennes. Pour les nourrir les agriculteurs semèrent environ 60 millions d'hectares de ray-grass (*Lolium rigidum*) à une densité de 1000 grains/m². Quand, dans les années 1970-1980, le prix de la laine chuta, ils se reconvertirent vers la mono-culture de céréales sans aucun travail du sol qui risquait d'endommager leurs sols sableux et très superficiels. Sans surprise, déjà en 2006, 12 millions d'hectares présentaient de la résistance aux inhibiteurs de l'ACCCase et de l'ALS en particulier chez *Lolium rigidum*.

Au vue de leur situation, les Australiens ont été les premiers à prendre des mesures de gestion de résistance. Aujourd'hui le stock semencier de *Lolium rigidum* est sous contrôle mais reste la priorité numéro 1. Aucun échec de désherbage n'est toléré et chaque survivant doit être éradiqué, par quelque méthode que ce soit, pour éviter à tout prix la recontamination du sol par les graines. Les céréales sont implantées sur une parcelle préalablement nettoyée avec des herbicides non sélectifs tels que le glyphosate et le paraquat. La quasi totalité des herbicides de post-levée n'étant plus efficace, les agriculteurs se sont donc tournés vers des solutions moins sélectives qu'ils utilisent en pré-semis incorporé (exemples trifluraline, prosulfocarbe et S-métolachlore, pyroxasulfone). Tous ces herbicides ont la particularité d'appartenir à des familles de modes d'action à faible risque de résistance et procurent une efficacité résiduaire permettant de contrôler plusieurs cohortes de levée d'adventices. Pour inclure de la diversité dans le désherbage chimique, les agriculteurs ont introduit

des cultures dicotylédones (exemples colza, lupins) dans la rotation afin de pouvoir utiliser d'autres modes d'action alternatifs (propyzamide, clethodim, atrazine, glyphosate sur les cultures tolérantes). Enfin, développés à l'origine par un agriculteur innovant et adaptés par des firmes de machinisme agricole, les outils de capture de semences de mauvaises herbes à la récolte ont fait leur entrée dans le panel d'outils pour la gestion du stock semencier. Aujourd'hui on estime que leur adoption par les céréaliers australiens approche les 70%³⁵.

L'Europe

L'Europe, avec ses 10.8 millions d'hectares cultivés et ses exploitations de taille moyenne (16 hectares), possède une agriculture très diversifiée, dominée par les céréales à pailles, le colza et le maïs^{36,37}. La diversité des pratiques agricoles et de la flore adventice explique en grande partie, malgré une adoption très précoce des herbicides dans l'histoire, le fait que l'Europe ne soit pas aussi impactée que les autres pays cités ci-dessus³⁸.

C'est au Royaume-Uni, en France, en Allemagne, en Pologne, en République Tchèque, en Espagne et en Italie que l'on dénombre le plus de cas de résistance⁵. Pour ce qui est du glyphosate, la situation n'est pas si dramatique, mais des cas de *Conyza spp.*⁴³ résistants ont été enregistrés dans des cultures pérennes (exemples plantations d'agrumes, vignes), où l'usage du glyphosate est assez intensif en inter-rang. Ceci dit on trouve désormais quelques cas de *Lolium spp.* résistants au glyphosate dans le blé^{44,45}, sur des parcelles où cet herbicide est très utilisé en interculture, en particulier dans les zones à travail du sol simplifié. Dans le maïs, on retrouve plutôt des cas anciens de résistance aux triazines, sélectionnés par l'utilisation de l'atrazine à l'époque, mais récemment des cas de graminées (*Echinochloa crus-galli*, *Sorghum halepense*) et de dicotylédones (*Amaranthus spp.*) résistantes aux inhibiteurs de l'ACCCase ou de l'ALS⁵ ont été rapportés. Mais c'est surtout en Europe de l'Ouest que les infestations de graminées résistantes aux inhibiteurs de l'ALS et de l'ACCCase inquiètent dans les céréales à paille, en particulier *Alopecurus myosuroides*^{39,40}, *Lolium spp.*, *Avena spp.* et *Apera spica-venti*⁴¹. Pour ne citer qu'une seule dicotylédone, *Papaver rhoeas* est de plus en plus présent dans le sud de l'Europe et présente un fort taux de résistance aux inhibiteurs de l'ALS mais aussi aux auxines.⁴²

Pour contrôler ces populations difficiles de graminées résistantes, nous observons un retour à l'usage des herbicides de pré-levée (exemples prosulfocarbe, flufénacet...), utilisés en programme avec les herbicides de post-levée, et un retour aux pratiques agronomiques visant à réduire l'émergence des adventices et à épuiser le stock semencier.

Dans le monde entier, malgré des efforts conséquents de communication et d'éducation au niveau de l'usage raisonné des herbicides depuis plusieurs décennies, il semble difficile de pouvoir stopper ce qui ressemble aujourd'hui à une pandémie. Malheureusement, nous constatons que le nombre de cas de résistance aux herbicides augmente bien plus rapidement que le nombre de nouveaux modes d'action arrivants sur le marché.

DISCUSSION

UNE INNOVATION QUI SE FAIT ATTENDRE

Le dernier mode d'action lancé dans les années 90 fut l'inhibition de l'HPPD (exemple la mésotrione)⁴⁶.

Alors la question qui brûle toutes les lèvres est bien "à quand un nouveau mode d'action?". Les efforts de recherche continuent. Pour preuve, plus de 50 modes d'action ont été découverts et validés à ce jour. Il ne s'agit absolument pas d'un manque d'aptitude à identifier ou créer des molécules agissant sur un nouveau mode d'action. Mais seulement la moitié des modes d'action a pu être exploitée pour développer des molécules commercialisables jusqu'à présent. Il est relativement facile d'identifier et de tester des molécules efficaces sur les cibles à inhiber, in vitro. Cependant réussir à amener la molécule jusqu'à sa cible, in planta, tout en conservant ses propriétés et sans impact négatif sur les organismes non cibles, relève assez souvent de l'exploit.

Fort heureusement il y a encore une longue vie pour les "vieux" modes d'action en particulier ceux pour lesquels les populations d'adventices ont des difficultés à sélectionner des mécanismes de résistance efficaces (exemples les auxines ou les VLCFA). La recherche au niveau des interactions entre les herbicides et leur cible, comme par exemple au sein de la famille des inhibiteurs de l'ACCase, a permis de découvrir des molécules qui, bien qu'appartenant au même groupe de mode d'action, sont capable de contrôler des populations adventices résistances aux précédentes molécules (dans le cas de résistance par mutation de la cible)⁴⁷. Cependant, il est désormais démontré que la résistance non liée à la cible peut impacter de nombreux herbicides appartenant à des modes d'action différents. Ainsi, toute nouvelle molécule, même appartenant à un nouveau mode d'action, sera tôt ou tard menacée par l'apparition de résistance, en particulier si son utilisation n'est pas raisonnée.

Mais le critère le plus important, pour le développement d'un nouvel herbicide, reste le potentiel commercial. Bien entendu les solutions actuelles ont placé la barre très haut en terme de performance technique, des critères réglementaires et économiques. Avec l'augmentation des surfaces parcellaires, la diminution de la main-d'oeuvre agricole, combinées à la demande croissante en rendement, les agriculteurs réclament des solutions sélectives, efficaces, faciles à mettre en herbe et à moindre coût.

L'introduction des cultures tolérantes aux herbicides génétiquement modifiées a également conduit à un transfert de la valeur du désherbage de la chimie vers les semences. Aujourd'hui, la recherche herbicide est en compétition avec la recherche génétique. Qui peut aujourd'hui rivaliser avec le glyphosate contrôlant plus de 120 espèces de mauvaises herbes pour un peu moins de 7 ou 8 \$ par hectare aux USA ? De plus, ces dernières années, la consolidation de l'industrie phytosanitaire a réduit les ressources de recherche et développement tandis que les coûts associés ne cessent d'augmenter atteignant les 286 millions de dollars pour une seule molécule⁴⁸. Dans un contexte où une grande majorité des molécules est tombée dans le domaine public, les firmes génériques, avec peu ou pas d'investissement dans les activités de recherche et développement, ont un avantage économique certain.

Le contexte réglementaire, joue aussi un rôle dans ce constat. Les nouvelles molécules doivent répondre à des critères toujours plus exigeants en terme de toxicologie, écologie et d'impact environnemental. La prise en compte de ces paramètres très tôt dans le processus de sélection diminue le taux de succès alors que le coût et la complexité augmentent.

DES LIMITATIONS REGLEMENTAIRES ET SOCIETALES DE PLUS EN PLUS CONTRAIGNANTES

Au niveau mondial, les systèmes réglementaires sont divers mais 2 grands principes d'évaluation se distinguent. D'un côté, le système européen dont l'approche est basée sur l'évaluation des propriétés intrinsèques de danger de la substance à évaluer, *i.e.* sa toxicité potentielle pour l'homme et l'environnement. A l'opposé, l'approche des Etat-Unis ou encore de l'Australie, est basée sur l'analyse des risques liés au produit phytosanitaire. En d'autres termes on évalue la probabilité de sa toxicité lors de l'utilisation ou l'exposition. D'autres pays, comme le Brésil, l'Inde ou la Chine ont adopté un système intermédiaire se rapprochant du système d'évaluation des risques des Etats-Unis. Dans ces pays, de nouvelles molécules appartenant à des modes d'action, certes déjà commercialisés, mais assez peu impactés par la résistance ont pu être mis sur le marché récemment (exemple bicyclopyrone, saflufenacil, pyroxasulfone).

Au cours des dernières décennies, en lien avec l'identification des dangers et l'application du principe de précaution, l'Europe a connu un plus grand nombre de restrictions et de non-renouvellements d'homologation de produits phytosanitaires que les autres pays du monde. De plus, le temps d'évaluation des dossiers est également différent. En moyenne après la soumission d'un dossier les autorités américaines vont rendre leur décision en deux ans et demi contre cinq ans en Europe. A noter que le cadre réglementaire européen va toujours en se complexifiant. Il est toujours plus conservateur et les changements de règles interviennent souvent alors que les procédures d'évaluation sont déjà en cours. Il ne faut pas oublier que les études fournies sont générées en

amont de la soumission et qu'il faut une dizaine d'années pour la génération des données qui constitueront le dossier de la substance active. Enfin une montée en puissance de la pression sociétale, politique et médiatique influence les prises de décision au niveau européen. La science ne prévaut pas toujours sur la politique. Au-delà du cadre légal réglementaire viennent en sus s'ajouter aussi des standards dits "secondaires" comme les cahiers des charge de certains acteurs de la filière ou les listes noires de supermarchés.

La complexification des systèmes réglementaires, la pression des ONGs et la politique, dans le monde entier, et plus particulièrement en Europe, conduisent à la perte de molécules phytosanitaires disponibles pour les agriculteurs. Notamment, la perte des herbicides, en l'absence d'alternatives crédibles, compromet la gestion des mauvaises herbes et la rentabilité des agriculteurs voire la sécurité alimentaire. La mise en place de méthodes de conservation va être très difficile en l'absence de molécules telles que le glyphosate, la glufosinate, le paraquat et le diquat. Les échanges de denrées agricoles sont aussi bouleversés par ces différences réglementaires entre pays. Et bien entendu le phénomène de résistance aux herbicides sera de plus en plus difficile à endiguer si l'éventail de choix des modes d'action se réduit.

LA GESTION DU STOCK SEMENCIER AU COEUR DES PREOCCUPATIONS

Il existe deux approches pour définir la présence de mauvaises herbes, soit en tant que plantes émergeant dans une culture une année donnée, ou en tant que stock semencier, qui se détermine par la quantité de semences d'adventices présentes (en surface ou dans le sol) qui pourraient potentiellement germer. Dans la culture, nous utilisons des herbicides pour atteindre les plantes à leur émergence au stade plantule ou au stade adulte (pre-levée vs post-levée). C'est une stratégie annuelle qui est définie par le type de cultures et les solutions herbicides disponibles. Aujourd'hui les solutions herbicides en général permettent d'obtenir des efficacités de très haut niveau (95-99%). Mais chaque plante restante a le potentiel de produire un grand nombre de graines et réensemencer la parcelle en venant s'ajouter au stock semencier existant. En fonction des espèces, une mauvaise herbe peut produire jusqu'à des centaines de milliers de graines. De plus, ces graines peuvent survivre dans le sol, et entrer en dormance, pendant de nombreuses années. Ainsi, les semences s'accumulent au cours du temps attendant les conditions idéales pour germer. Cibler les semences de mauvaises herbes est une stratégie long terme car l'on s'attaque à la partie immergée de l'iceberg. En d'autres termes, la plante adventice est l'ennemi de la culture, leurs semences sont les ennemis de la parcelle.

Afin de réduire le stock semencier il faut donc opter pour une gestion raisonnée du désherbage en y intégrant une multitude d'outils. Longtemps délaissée, au profit des herbicides, l'agronomie reprend peu à peu sa place dans la lutte contre les adventices. Méthode ancestrale, le travail du sol est un des meilleurs outils pour gérer le stock semencier. Enterrer les graines tombées au sol permet de réduire la population de façon très efficace. La profondeur idéale et le taux de décroissance annuel sont dépendants de l'espèce. Cela dit, ces méthodes doivent être utilisées à bon escient car leur impact négatif sur la qualité des sols n'est plus à démontrer. La technique du faux-semis, accompagné d'un désherbage chimique ou mécanique en interculture, permet de diminuer le stock semencier sans avoir à se soucier de la sélectivité des solutions vis-à-vis de la culture. Le désherbage mécanique, cette fois dans la culture, peut éventuellement s'effectuer à l'aide d'outils tels que herse et houe, mais aussi à l'aide de paillage. Très consommateur de main-d'oeuvre, le désherbage manuel est encore très courant dans beaucoup de pays en voie de développement. Comme pour les herbicides, la diversité en agronomie est clé. Varier les cultures à cycle végétatif différent perturbe le cycle de la mauvaise herbe.

Les mauvaises herbes entrent en compétition avec la culture pour l'eau, la lumière, les éléments nutritifs, d'où l'impact sur le rendement. Mais pourquoi les adventices devraient-elles toujours gagner? En adaptant les dates et les densités de semis, ainsi qu'en choisissant des variétés plus compétitives, on peut permettre à la culture de mieux prendre le dessus sur ces envahisseurs. Encore une fois, il faut éviter à tout prix que les semences de quelques survivants en fin de saison ne recontaminent le stock semencier. De nombreuses méthodes, très ingénieuses, ont pour objectif de

capturer les semences pour éviter leur retour au champ. Enfin le nettoyage des outils agricoles est une mesure d'hygiène impérative avant tout déplacement vers d'autres parcelles voir d'autres fermes.

Aujourd'hui, la problématique de la résistance aux herbicides semble inspirer de nombreuses firmes qui mettent au point des nouveaux outils et des technologies plus innovantes les unes que les autres.

UN MONDE AGRICOLE QUI EVOLUE VERS LES NOUVELLES TECHNOLOGIES ET LE DIGITAL

Pour réduire les quantités d'herbicides utilisés et optimiser leur efficacité, les technologies d'application de précision sont en plein essor. Grâce à l'imagerie hyperspectrale ou encore la technologie GPS, capables d'identifier les mauvaises herbes et les différencier des cultures, couplée à des buses ultra sophistiquées, nous serons bientôt en mesure d'apporter très précisément la bonne dose d'herbicide au bon endroit⁴⁹. Ces technologies de détection et de cartographie peuvent aussi bénéficier le désherbage mécanique sur l'inter-rang. Les herbes et houes téléguidées sont déjà utilisées mais surtout dans les cultures à forte valeur comme les cultures maraîchères car l'investissement matériel n'est pas négligeable⁵⁰. Encore au stade expérimental ou commercialisées à petite échelle, certaines innovations utilisent les propriétés du froid, du feu, de l'électricité, de la vapeur d'eau ou encore du laser pour tenter d'affecter la biologie des mauvaises herbes et les détruire. Il est encourageant de voir que la grande majorité de ces firmes, très souvent de type "start-up", focalise ses efforts dans le domaine du contrôle des adventices par rapport dans la lutte fongicide et insecticide. A l'opposé, la lutte biologique est plus avancée pour ces dernières⁵¹.

La gestion des mauvaises herbes se complexifie et devient un véritable casse-tête pour l'agriculteur, sachant qu'au-delà du désherbage, un agriculteur prend environ 50 décisions par saison (Etude Syngenta). La révolution digitale en cours dans le monde agricole, considérée comme le plus important changement économique après la révolution industrielle, va permettre de mettre à la disposition des agriculteurs des outils d'aide à la décision puissants. L'analyse et la corrélation de la multitude d'informations utiles vont les aider à prendre les bonnes décisions, optimiser leurs opérations et ainsi améliorer la rentabilité de leur exploitation.

CONCLUSION

Finalement, partout dans le monde la résistance continue de progresser et d'impacter la productivité des exploitations agricoles quelques soient leur géographie et leurs pratiques culturales. En parallèle, la pression réglementaire et sociétale tend à impacter négativement le nombre de solutions chimiques plus vite que la recherche ne peut en amener sur le marché. Ceci dit n'importe quel nouvel herbicide sera tôt ou tard impacté par la résistance s'ils sont utilisés dans les mêmes conditions qu'aujourd'hui. Malheureusement, malgré des efforts conséquents de communication et d'éducation, la réponse à ce phénomène est encore réactive au profit de la prévention. Clairement, la résistance se dissémine plus vite que la conversion aux bonnes pratiques. Leur adoption est toujours limitée par le contexte climatique et socio-économique. A l'ère du numérique, les nouvelles technologies et les outils d'aide à la décision devraient permettre de lever le frein au changement de comportement. Partager les connaissances et les solutions efficaces acquises dans d'autres parties le monde est aussi un moyen d'inspirer les agriculteurs et les acteurs de la filière agricole pour tenter d'enrayer ce phénomène. La résistance n'a pas de frontières.

BIBLIOGRAPHIE

¹www.transgen.de/Pflanzengesundheit

²Shaner D, Weed Science 62(2):427-431

- ³Gianessi LP, The increasing importance of herbicides in worldwide crop production, *Pest Manage Sci* **69**:1099–1105 (2013)
- ⁴Powles S B & Yu Q, Evolution in action: plants resistant to herbicides, *Ann Rev Plant Biol* **61**:317–347 (2010)
- ⁵Ian Heap, WeedScience.org (2019)
- ⁶US Department of Agriculture, World agricultural production. [Online] USDA Foreign Agricultural Service Circular Series WAP 07-17. Available: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf>. [1September2017]
- ⁷US Department of Agriculture, Recent trends in GE adoption 2017. Economic Research Service. [Online] Available: <https://www.ers.usda.gov/data-products/adoption-of-genetically-engineered-crops-in-the-us/recent-trends-in-ge-adoption.aspx> [10 July 2017]
- ⁸Ward SM, Webster TM & Steckel LE, Palmer Amaranth (*Amaranthus palmeri*): a review, *Weed Technol* **27**:12–27 (2013)
- ⁹Friesen LF, Beckie HJ, Warwick SI & Van Acker RC, The biology of Canadian weeds, 138 *Kochia scoparia* (L.) Schrad. *Can J Plant Sci* **89**:141–167 (2009)
- ¹⁰Foresman C & Glasgow L, US grower perceptions and experiences with glyphosate-resistant weeds, *Pest Manag Sci* **64**:388–391 (2008)
- ¹¹US Department of Agriculture. World agricultural production. [Online]. USDA Foreign Agricultural Service Circular Series WAP 07-17. Available: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf>. [1September2017]
- ¹²Food and Agriculture Organization, Country pasture profiles. [Online]. Available: <http://www.fao.org/ag/agp/agpc/doc/Counprof/regions/latamerica.htm> [2November2017]
- ¹³Derpsch R, No-tillage and conservation agriculture: a progress report, in *No-Till Farming Systems*, ed. by Goddard T, Zebisch MA, Gan YT, Ellis W, Watson A & Sombatpanit S. World Association of Soil and Water Conservation, Bangkok, pp.7–39 (2008)
- ¹⁴Gazziero DLP, Maschede DK, Adegas FS, Vargas L, Karam D, Maciel CDG *et al.*, A era glyphosate, in *A era glyphosate: agricultura, meio-ambiente e homem*, ed. by Meschede DK and Gazziero DLP. Midiograf, Londrina, Brazil, pp.11–21(2016)
- ¹⁵Vargas L, Adegas F, Gazziero DLP, Karam D, Agostinetto D & Silva WT, Weed resistance in Brazil: historical, distribution, economic impact, management and prevention, in *A era glyphosate: agricultura, meio-ambiente e homem*, ed. by Meschede DK & Gazziero DLP. Midiograf, Londrina, Brazil, pp.219–239 (2016)
- ¹⁶Adegas F, Vargas L and Gazziero D, Status of herbicide weed resistance in Brazil. Proceedings of the Global Herbicide Resistance Challenge, Denver, Colorado (2017)

- ¹⁷Lopez Ovejero RF, Takano HK, Nicolai M, Ferreira A, Melo MSC, Cavenaghi AL *et al.*, Frequency and dispersal of glyphosate-resistant sourgrass (*Digitaria insularis*) populations across Brazilian agricultural production areas. *Weed Sci* **65**:285–294 (2017)
- ¹⁸Gazziero DLP, Adegas FS, Voll E, Vargas L, Karam D, Matallo MB *et al.*, Interferência da buva em área cultivadas com soja. Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas. Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas Daninhas, p.329 (2010)
- ¹⁹Frene R, Baez Buchanan M, Ravotti M and Serafini L, Weed control programs for *Conyza sumatrensis* glyphosate-resistant biotypes in glufosinate-, glyphosate- and 2,4-D- tolerant soybeans in Argentina. Proceedings of the Global Herbicide Resistance Challenge, Denver, Colorado (2017)
- ²⁰CONSHRB groupe d'experts au Brésil (2017)
- ²¹Barat E and Faccini D, Influências del yuyo colorado sobre el rendimiento del cultivo de soja. *Revista Acaecer* **146** (1988)
- ²²AAPRESID (Agriculture No Till Farmers Association), REM. [Online]. Available: www.aapresid.org.ar/rem [29 June 2017]
- ²³Morichetti S, Cantero JJ, Nuñez C, Barboza G, Ariza Espinar L, Amuchastegui A *et al.*, Sobre la presencia de *Amaranthus palmeri* (Amaranthaceae) em Argentina. *Bol Soc Arg De Bot* **48**:347–354 (2013)
- ²⁴Andrade Júnior E, Cavaenaghi A, Guimarães S and Carvalho S, Primeiro relato de *Amaranthus palmeri* no Brasil em áreas agrícolas no estado de Mato Grosso [First report of *Amaranthus palmeri* in Brazil in agricultural areas in the state of Mato Grosso, Portuguese]. *Circular Técnica MA-MT* **19**:1–8 (2015)
- ²⁵Gonçalves Netto A, Nicolai M, Carvalho SJP, Borgato EA and Christoffoleti PJ, Multiple resistance of *Amaranthus palmeri* to ALS and EPSPS inhibiting herbicides in the State of Mato Grosso, Brazil. *Planta Daninha* **34**:581–587 (2016)
- ²⁶US Department of Agriculture. World agricultural production. [Online]. USDA Foreign Agricultural Service Circular Series WAP 07-17. Available: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf>. [1 September 2017]
- ²⁷Yang X, Yu X-Y and Li Y-F, *De novo* assembly and characterization of the barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*) transcriptome using next-generation pyrosequencing. *PLoS One* **8**:e69168 (2013)
- ²⁸Chen G, Wang Q, Yao Z, Zhu L and Dong L, Penoxsulam-resistant barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*) in rice fields in China. *Weed Biol Manag* **16**:16–23 (2016)
- ²⁹Iwakami S, Watanabe H, Miura T, Matsumoto H & Uchino A, Occurrence of sulfonylurea resistance in, *Sagittaria trifolia*, a basal monocot species, based on target-site and non-target-site resistance. *Weed Biol Manag* **14**:43–49 (2014)

- ³⁰Chhokar RS & Sharma RK, Multiple herbicide resistance in little seed Canarygrass (*Phalaris minor*): a threat to wheat production in India. *Weed Biol Manag* **8**:112–123 (2008)
- ³¹Rutherford M, Flood J and Sastroutomo SS, Roundtable for sustainable palm oil (RSPO): Research project on integrated weed management strategies for oil palm. Final report. [Online]. Available: http://www.rspo.org/file/RSPO%20IWM_FINAL%20REPORT%20to%20RSPO%209%205%2011.pdf [1November2017]
- ³²Dilipkumar M, Chuah TS, Goh SS and Sahid I, Weed management issues, challenges, and opportunities in Malaysia. *CropProt* [https:// doi.org/10.1016/j.cropro.2017.08.027](https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.08.027) (2017)
- ³³Jalaludin A, Ngim J, Bakar BH and Alias Z, Preliminary findings of potentially resistant goosegrass (*Eleusine indica*) to glufosinate-ammonium in Malaysia. *Weed Biol Manag* **10**:256–260 (2010)
- ³⁴Mark A Peterson, Alberto Collavo, Ramiro Ovejero, Vinod Shivrain & Michael J Walshe , The challenge of herbicide resistance around the world: a current summary, *Pest Manag Sci* **74**:2246–2259 (2018)
- ³⁵www.weedsmart.org.au
www.seedterminator.com.au
- ³⁶Dietrich C and Devuyst P, At a glance, July 2016. Agriculture in the European Union and United States. [Online]. Available: [http:// www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2016/586615/EPRS_ATA\(2016\)586615_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2016/586615/EPRS_ATA(2016)586615_EN.pdf)[31July2017]
- ³⁷Trnka M, Rötter RP, Ruiz-Ramos M, Kersebaum KC, Olesen JE, Žalud Z et al., Adverse weather conditions for European wheat production will become more frequent with climate change. *Nat Clim Change* **4**:637–643 (2014)
- ³⁸Sattin M, Herbicide resistance in Europe: an overview. Proceedings of the British Crop Production Council International Conference Crop Science &Technology, Glasgow, UK (2005)
- ³⁹Moss SR, Perryman SA and Tatnell LV, Managing herbicide-resistant blackgrass (*Alopecurus myosuroides*): theory and practice. *Weed Technol* **21**:300–309(2007)
- ⁴⁰Drobny HG, Salas M and Claude J, Management of metabolic resistant black-grass (*Alopecurus myosuroides* Huds.) populations in Germany-challenges and opportunities. *Z Pflanzenkr Pflanzenschutz* **20**:65 (2006)
- ⁴¹Hamouzova K, Soukup J and Paterova L, A farmer survey on herbicide resistance in loose silky bent grass in the Czech Republic, in Weed management in changing environments: 17th European Weed Research Society Symposium, 23–26June, Montpellier, France (2015)
- ⁴²Rey-Caballero J, Royo-Esnal A, Recasens J, González I and Torra J, Management options for multiple herbicide-resistant corn poppy (*Papaver rhoeas*) in Spain. *Weed Sci* **65**:295–304(2017)
- ⁴³González-Torralva F, Cruz-Hipolito H, Bastida F, Mülleder N, Smeda RJ and De Prado R, Differential susceptibility to glyphosate among the Conyza weed species in Spain. *J Agric Food Chem* **58**:4361–4366 (2010)

⁴⁴Collavo A and Sattin M, Resistance to glyphosate in *Lolium rigidum* selected in Italian perennial crops: bioevaluation, management and molecular bases of target-site resistance. *Weed Res* **52**:16–24 (2012)

⁴⁵ Collavo A and Sattin M, First glyphosate-resistant *Lolium spp.* biotypes found in a European annual arable cropping system also affected by ACCase and ALS resistance. *Weed Res* **54**:325–334 (2014)

⁴⁶Rüegg WT, Quadranti M & Zoschke A, Herbicide research and development: challenges and opportunities. *Weed Research* **47**, 271–275 (2007)

⁴⁷ Kaundun SS, Resistance to acetyl-CoA carboxylase-inhibiting herbicides. *Pest Manag Sci* **70**: 1405-1417 (2014)

⁴⁸ The Cost of New Agrochemical Product Discovery, Development and Registration in 1995, 2000, 2005-8 and 2010-2014; R&D expenditure in 2014 and expectations for 2019. Phillips McDougall. March 2016

⁴⁹Westwood *et al.*, 2018, Wang *et al.*, Computers and Electronics in Agriculture 2019, Lin Sustainability 2017

⁵⁰www.turfmagazine.com/innovation/production-boosters-dominate-2014-gieexpo/
www.visionweeding.com/thermal-weeding

⁵¹www.flameengineering.com

www.soilsteam.com

www.sydney.edu.au

www.sglsystems.com

www.sagarobotics.com