GUIDE D'ÉTUDE DE LA GESTION DE LA RÉSISTANCE

DESTINÉ AUX CONSEILLERS EN CULTURES AGRÉÉS

GÉREZ LA RÉSISTANCE *Maintenant*

Protégez vos terres, un champ à la fois

GUIDE D'ÉTUDE DE LA GESTION DE LA RÉSISTANCE DESTINÉ AUX CONSEILLERS EN CULTURES AGRÉÉS

RÉDACTEURS

Jocelyne Letarte

François Tardif

REMERCIEMENTS

CropLife Canada remercie tous ceux qui ont contribué de leur temps et de leur expertise à la rédaction de ce guide. Nous tenons à remercier tout spécialement Susan Fitzgerald et l'Association des conseillers en cultures agréés de l'Ontario pour leur collaboration tout au long du processus.

CropLife CANADA

CERTIFIED CROP ADVISER

Table des matières

DOMAINE DE COMPÉTENCE I
ÉVOLUTION DE LA RÉSISTANCE

DOMAINE DE COMPÉTENCE 1
Développement de la résistance

1. Biologie de l'évolution de la résistance 4
2. Facteurs influençant le développement et l'évolution de la résistance 19

DOMAINE DE COMPÉTENCE 2
Reconnaître la résistance

1. Raisons possibles de l'échec des traitements de pesticides 24
2. Raisons possibles de la défaillance de la génétique ou des caractères technologiques des plantes 24
3. Processus d'identification de la résistance aux pesticides 28
4. Méthodologie pour tester des organismes nuisibles soupçonnés d'être résistants à un pesticide et confirmer la résistance 29

DOMAINE DE COMPÉTENCE II
PRATIQUES DE GESTION OPTIMALES POUR GÉRER LA RÉSISTANCE

DOMAINE DE COMPÉTENCE 1
Rôle de la cible ou du mode d'action

1. Cible ou mode d'action efficace dans la lutte contre 31
2. Rôle de la cible ou du mode d'action dans 35
3. Évaluation de l'importance d'alterner les groupes de pesticides en fonction des classifications de modes d'action de l'IRAC, du FRAC, de la WSSA ou de l'HRAC 36
4. Cadre de lutte intégrée qui comprend plusieurs cibles/modes d'action ou des méthodes qui retardent le développement de la résistance 45

DOMAINE DE COMPÉTENCE 2
Gestion de la résistance

1. Créer un plan de gestion de la résistance 46
2. Le rôle du contexte et des besoins locaux dans l'élaboration de plan de gestion de la résistance 52
3. Effets des pratiques de gestion optimales de la résistance sur la gestion responsable et la production en ce qui concerne les facteurs ci-dessous 53

DOMAINE DE COMPÉTENCE III
COMMUNICATION PROFESSIONNELLE ET PARTAGE DE L'INFORMATION

DOMAINE DE COMPÉTENCE 1
Communication et gestion de la résistance

1. Importance de reconnaître et déclarer les cas de résistance et procédure à suivre pour le faire 56
2. Avantages des réseaux actifs, des systèmes d'information actualisés et des autres moyens de communication 56
3. Rôle des organismes publics, des organismes sans but lucratif et du secteur privé dans la promotion d'une gestion durable de la résistance s'inscrivant dans le cadre de la lutte intégrée 57
4. Importance de communiquer l'effet des moyens de lutte intégrée sur la résistance aux groupes suivants 58

Sigles utilisés dans le présent guide :

IRAC : Insecticide Resistance Action Committee

FRAC : Fungicide Resistance Action Committee

HRAC : Herbicide Resistance Action Committee

WSSA : Weed Science Society of America

DOMAINE DE COMPÉTENCE I
ÉVOLUTION DE LA RÉSISTANCE

DOMAINE DE COMPÉTENCE 1

Développement de la résistance

Le développement d'une résistance à un pesticide (c'est-à-dire à un insecticide, un fongicide ou un herbicide) se définit comme étant une réduction partielle ou totale de l'efficacité du pesticide à lutter contre un organisme nuisible (par exemple, un insecte, un champignon, un agent pathogène, une mauvaise herbe) lorsque le pesticide est utilisé conformément aux directives indiquées sur son étiquette. Toute résistance d'un organisme nuisible à un pesticide agricole est la résultante de mutations génétiques et du processus de sélection. Un changement au code génétique d'un organisme nuisible (génotype) peut se manifester de différentes manières (phénotypes) et rendre le pesticide inoffensif (ces mécanismes de résistance sont expliqués à la section 1c). Au champ, la résistance à un pesticide se reconnaît à une réduction mesurable de l'efficacité du pesticide. Une fois acquise par une population d'organismes nuisibles, la résistance est héréditaire et donc transmissible aux générations futures.

1. Biologie de l'évolution de la résistance

a) Pression de sélection;

b) Génétique de la résistance;

c) Mécanismes de résistance;

d) Diversité génétique de l'espèce ciblée.

a) Pression de sélection

La sélection naturelle associée à l'usage de pesticides permet aux très rares individus naturellement adaptés, grâce aux gènes de résistance qu'ils possèdent, de survivre et de transmettre le caractère de résistance à leur progéniture. L'application répétée d'un même pesticide ou de produits ayant le même mode d'action sélectionne les individus résistants, lesquels prolifèrent, alors que les individus sensibles sont éliminés par le pesticide. Sous cette pression de sélection, les individus résistants finissent par être plus nombreux que les individus sensibles et le pesticide devient alors inefficace.

Trois principaux facteurs contribuent à l'intensité de la pression de sélection : l'efficacité du pesticide, la durée de son activité et la fréquence des traitements. L'efficacité d'un pesticide dépend de sa cible et de la mortalité relative causée par un traitement à une dose donnée. Pour ce qui est des mauvaises herbes, la réduction de la production de semences est également prise en compte. La durée d'activité d'un pesticide correspond à la période de temps pendant laquelle un pesticide est toxique pour un organisme nuisible particulier. En outre, l'efficacité et la durée d'activité d'un traitement pesticide sont à leur tour influencées par la région, la saison et les conditions météorologiques. La fréquence des traitements réfère au nombre de fois qu'un pesticide est utilisé dans un champ au cours d'une même saison de croissance ou au nombre d'années d'affilée qu'il a été utilisé dans un même champ.

Fait intéressant : Le premier facteur présenté, l'efficacité du pesticide, est un couteau à double tranchant. En effet, plus un pesticide est efficace à lutter contre un organisme nuisible, plus il est efficace à sélectionner les individus résistants. D'un autre côté, les pesticides très efficaces sont, d'une manière générale, utilisés plus fréquemment par les producteurs que ceux qui ont une efficacité modérée. D'une certaine façon, les pesticides efficaces sont victimes de leurs propres succès; les facteurs qui rendent leur usage répandu réduisent leur efficacité à long terme.

La résistance n'est pas un nouveau phénomène. La diminution de l'efficacité de certains pesticides a été signalée peu après leur introduction. Les tableaux 1 et 2 donnent un aperçu de l'état de la résistance des herbicides et des insecticides en Ontario. Il est évident que la résistance peut se manifester très tôt après l'introduction d'un produit, qu'elle touche de nombreux modes d'action et organismes nuisibles, et qu'elle est problématique autant dans les grandes cultures que dans les cultures horticoles.

Tableau 1. Cas de résistance aux herbicides en Ontario

Groupe WSSA	Mode d'action de l'herbicide	Mauvaise herbe		Année du 1er signalement	Principales cultures touchées
		Nom scientifique	Nom commun français		
1	Inhibition de l'ACCase	*Avena sativa*	Folle avoine	2005	Céréales
		Digitaria sanguinalis	Digitaire sanguine, panic pourpre	2011	Oignon
2	Inhibition de l'ALS	*Amaranthus powellii*	Amarante de Powell	1998	Soya; maïs
		Amaranthus retroflexus	Amarante à racine rouge	1998	Soya; maïs
		Solanum ptychanthum	Morelle noire de l'Est	2000	Soya; maïs
		Ambrosia artemisiifolia	Petite herbe à poux	2000	Soya; maïs
		Chenopodium album	Chénopode blanc, chou gras	2001	Soya; maïs
		Setaria viridis	Sétaire verte	2001	Soya; maïs
		Amaranthus tuberculatus (=A. rudis)	Amarante tuberculée	2002	Soya; maïs
		Setaria faberi	Sétaire géante	2003	Soya; maïs
4	Auxines synthétiques	*Daucus carota*	Carotte sauvage	1957	Bords de route

Tableau 1. Cas de résistance aux herbicides en Ontario

(suite)

Groupe WSSA	Mode d'action de l'herbicide	Mauvaise herbe		Année du 1er signalement	Principales cultures touchées
		Nom scientifique	Nom commun français		
5	Inhibition du photosystème II (triazines)	*Chenopodium album*	Chénopode blanc, chou gras	1973	Maïs
		Ambrosia artemisiifolia	Petite herbe à poux	1976	Maïs
		Chenopodium strictum	Chénopode strié	1976	Maïs
		Amaranthus powellii	Amarante de Powell	1977	Maïs
		Senecio vulgaris	Séneçon vulgaire	1977	Maïs
		Amaranthus retroflexus	Amarante à racine rouge	1980	Maïs
		Echinochloa crus-galli var. *crus-galli*	Pied-de-coq	1981	Maïs
		Panicum capillare	Panic capillaire	1981	Maïs
		Setaria pumila	Sétaire glauque	1981	Maïs
		Sinapis arvensis	Moutarde des champs	1983	Maïs
6	Inhibition du photosystème II (Nitriles)	*Amaranthus hybridus*	Amarante hybride	2004	Maïs de semence
		Amaranthus retroflexus	Amarante à racine rouge	2005	Maïs de semence
7	Inhibition du photosystème II (Urées)	*Amaranthus retroflexus*	Amarante à racine rouge	2001	Carotte
9	Inhibition de l'EPSP synthase	*Ambrosia trifida*	Grande herbe à poux	2008	Soya; maïs
		Conyza canadensis	Vergerette du Canada, érigéron du Canada	2010	Soya; maïs
14	Inhibition de la PPO	*Amaranthus tuberculatus*	Amarante tuberculée	2018	Soya
22	Déviation des électrons au niveau du photosystème I	*Conyza canadensis*	Vergerette du Canada, érigéron du Canada	1993	Vergers
		Lepidium virginicum	Lépidie de Virginie	1993	Vergers
		Solanum ptychanthum	Morelle noire de l'Est	2009	Bleuet

Tableau 1. Cas de résistance aux herbicides en Ontario

(suite)

Groupe WSSA	Mode d'action de l'herbicide	Mauvaise herbe		Année du 1er signalement	Principales cultures touchées
		Nom scientifique	Nom commun français		
Résistance multiple Au moins deux sites cibles résistants dans le même biotype					
2 & 5	Inhibition de l'ALS; inhibition du photosystème II	*Amaranthus powellii*	Amarante de Powell	1998	Soya; maïs
		Amaranthus tuberculatus	Amarante tuberculée	2002	Soya; maïs
2 & 9	Inhibition de l'ALS; inhibition de l'EPSP synthase	*Ambrosia trifida*	Grande herbe à poux	2011	Soya; maïs
		Conyza canadensis	Vergerette du Canada, érigéron du Canada	2011	Soya; maïs
		Ambrosia artemisiifolia	Petite herbe à poux	2012	Soya; maïs
		Amaranthus tuberculatus	Amarante tuberculée	2014	Soya; maïs
5 & 7	Inhibition du photosystème II (triazines et urées)	*Amaranthus powellii*	Amarante de Powell	1999	Maïs de semence
2, 5 & 9	Inhibition de l'ALS; inhibition du photosystème II; inhibition de l'EPSP synthase	*Amaranthus tuberculatus*	Amarante tuberculée	2014	Soya
2, 5, 9 & 14	Inhibition de l'ALS; inhibition du photosystème II; inhibition de l'EPSP synthase	*Amaranthus tuberculatus*	Amarante tuberculée	2018	Soya

Adaptation de Heap, I., The International Survey of Herbicide Resistant Weeds. Consulté le 6 juin 2018. Internet : <www.weedscience.org>

Tableau 2. Cas de résistance aux insecticides en Ontario qui touchent les grandes cultures et les cultures horticoles

Noms scientifiques et noms communs français des insectes	Cultures	Année du 1er signalement	Insecticide	Groupe IRAC
Argyrotaenia velutinana Tordeuse à bandes rouges	Pomme	1962	DDT	4A
		1965	D.D.D.	2A
Cydia pomonella Carpocaspe de la pomme	Arbres fruitiers	1960	DDT	4A
		2008	Méthoxyfénozide	18 *
Delia antiqua Mouche de l'oignon	Légumes	1959	HCH/cyclodiènes	2A
		1965	Aldrine	2A
		1972	Chlordane	2A
		1976	Carbofuran	1A
		1976	Chlorfenvinphos	1B
Delia brassicae Mouche du chou	Brassicacées	1965	Aldrine	2A
			HCH/cyclodiènes	2A
			Dieldrine	2A
			Heptachlore	2A
Delia florilega Mouche des légumineuses	Haricot	1961	Aldrine	2A
			Dieldrine	2A
Delia platura Mouche des semis	Céréales, grain, légumes	1962	HCH/cyclodiènes	2A
		1965	Aldrine	2A
			Dieldrine	2A
			Lindane	N/A
		1972	Chlordane	2A
Euxesta notata Drosophile à ailes tachetées	Oignon	1962	HCH/cyclodiènes	2A
			DDT	3B
Euxoa detersa Ver-gris arénicole	Maïs	1965	HCH cyclodiènes	2A

Tableau 2. Cas de résistance aux insecticides en Ontario qui touchent les grandes cultures et les cultures horticoles

(suite)

Noms scientifiques et noms communs français des insectes	Cultures	Année du 1er signalement	Insecticide	Groupe IRAC
Euxoa messoria Ver-gris moissonneur	Maïs	1965	Aldrine	2A
			Dieldrine	2A
			Heptachlore	2A
Euxoa ochrogaster Ver-gris à dos rouge	Céréales, canola, légumes, tournesol, luzerne	1976	DDT	4A
			Endrine	2A
			Méthoxychlore	3B
Euxoa scandens Ver-gris blanc		1977	HCH/cyclodiènes	2A
Helicoverpa armigera Ver de l'épi du maïs	Maïs, sorgho, tomate	1974	Azinphos-méthyl	1B
			Carbaryl	1A
Leptinotarsa decimlineata Doryphore de la pomme de terre	Aubergine, poivron, pomme de terre, tomate	1976	Aldrine	2A
			DDT	4A
			Deltaméthrine	3A
			Dieldrine	2A
			Endosulfan	2A
		1984	Cyperméthrine	3A
			Endrine	2A
			Fenvalérate	3A
		2008	Imidaclopride	4A †
Liriomyza trifolii Mouche mineuse américaine	Plantes ornementales et légumes de serre	1989	Chlorpyrifos	1B
			Deméton	1B
			Pyrazophos	N/A
Lissorhoptrus oregonensis Charançon aquatique du riz	Carotte	1975	HCH/cyclodiènes	2A

Tableau 2. Cas de résistance aux insecticides en Ontario qui touchent les grandes cultures et les cultures horticoles

(suite)

Noms scientifiques et noms communs français des insectes	Cultures	Année du 1er signalement	Insecticide	Groupe IRAC
Myzus persicae Puceron vert du pêcher	Plantes ornementales, arbres fruitiers, céréales, tabac, légumes	1974	Azinphos-méthyl	1B
			Malathion	1B
			Naled	1B
			Parathion	1B
Panonychus ulmi Tétranyque rouge du pommier	Arbres fruitiers	1959	Organophosphates	1B
		1973	Tétradifon	12D
		1974	Azinphos-méthyl	1B
			Deméton	1B
			Dicrotophos	1B
			Éthion	1B
			Fenthion	1B
			Malathion	1B
			Mevinphos	1B
			Parathion	1B
			Phosphamidon	1B
		1987	Cyhexatin	12B
		1989	Dicofol	UN
Phyllonorycter blancardella Mineuse marbrée	Pomme	1980	Azinphos-méthyl	1B
		1986	DDT	4A
			Tau-Fluvalinate	3A
		1990	Méthomyl	1B
			Oxamyl	1A

Tableau 2. Cas de résistance aux insecticides en Ontario qui touchent les grandes cultures et les cultures horticoles

(suite)

Noms scientifiques et noms communs français des insectes	Cultures	Année du 1er signalement	Insecticide	Groupe IRAC
Psilia rosae Mouche de la carotte	Carotte, céleri, persil, panais	1962	HCH/cyclodiènes	2A
Psylla pyricola Psylle du poirier	Poire	1965	Parathion	1B
Sitophilus granarius Charançon des grains	Grain entreposé	1972	Dibromure d'éthylène	8A
			Bromométhane	8A
Striacosta albicosta Ver-gris occidental du haricot	Maïs	2017	Protéine Cry1F du Bt	11A ‡
Tetranychus urticae Tétranyque à deux-points	Coton, fruits, légumes, noix de Grenoble, plantes ornementales	1965	Parathion	1B
		1957	Organophosphates	1B
Thrips palmi Thrips du melon	Melon	2005	Diazinon	1B
Thrips tabaci Thrips de l'oignons	Oignon	2005	Cyhalothrin-lambda Lambda-Cyhalothrin	3A
			Deltaméthrine	3A
			Diazinon	1B
Tribolium castaneum Tribolium rouge de la farine	Grain entreposé, arachide, sorgho	1984	Malathion	1B
Tribolium confusum Tribolium brun de la farine	Grain entreposé	1984	Malathion	1B
Trichoplusia ni Fausse-arpenteuse du chou	Brassicacées	1965	DDT	4A

Données répertoriées dans l'Arthropod Pesticide Resistance Database de l'Université du Michigan (https://www.pesticideresistance.org/index.php), sauf indication contraire :

** Grigg-McGuffin, K., Scott, I. M., Bellerose, S., Chouinard, G., Cormier, D. et Scott-Dupree, C. (2015). Susceptibility in field populations of codling moth,* Cydia pomonella *(L.)(Lepidoptera: Tortricidae), in Ontario and Quebec apple orchards to a selection of insecticides. Pest Management Science, 71, 234-242.*

† Scott, I. M., Tolman, J. H. et MacArthur, D. C. (2015). Insecticide resistance and cross-resistance development in Colorado potato beetle Leptinotarsa decemlineata Say *(Coleoptera: Chrysomelidae) populations in Canada 2008–2011. Pest Management Science, 71, 712-721.*

‡ Smith, J. L., Lepping, M. D., Rule, D. M., Farhan, Y. et Schaafsma, A. W. (2017). Evidence for field-evolved resistance of Striacosta albicosta *(Lepidoptera: Noctuidae) to Cry1F* Bacillus thuringiensis *protein and transgenic corn hybrids in Ontario, Canada. Journal of Economic Entomology, 110, 2217-2228.*

b) Génétique de la résistance

Les gènes d'un organisme déterminent la nature des protéines qui sont produites par l'organisme, ainsi que le moment et l'emplacement où elles sont produites. Cela est valide pour toutes les formes de vie sur terre, y compris les plantes, les insectes et les champignons. Les gènes varient légèrement d'un individu à l'autre au sein d'une même espèce. Les différentes formes (caractères) que peut prendre un gène s'appellent « allèles » et le phénotype est la manifestation physique des allèles. En règle générale, il existe deux allèles possibles pour chaque gène. Ces allèles peuvent être forts (dominants) ou faibles (récessifs) et ils sont transmis par les parents pendant la reproduction sexuée. Lorsqu'un individu possède deux allèles identiques pour un gène, on dit qu'il est « homozygote ». S'il s'agit d'allèles dominants, l'individu est alors « homozygote dominant » pour ce gène et il exprimera le phénotype dominant. Si, au contraire, l'individu possède deux allèles récessifs, on dit qu'il est « homozygote récessif » et il exprimera le phénotype récessif. Un individu ayant deux allèles différents est dit « hétérozygote ». Dans la documentation scientifique sur les pesticides, l'allèle de résistance est souvent indiqué par un « R » alors que l'allèle de sensibilité est indiqué par un « S ». En outre, dans la plupart des cas, l'allèle R est généralement dominant. Un individu hétérozygote (RS) possédant un allèle complètement dominant exprimera le même phénotype qu'un homozygote dominant (RR). Par contre, s'il possède un allèle qui n'est pas complètement dominant, il exprimera un phénotype qui se situera entre celui d'un homozygote résistant (RR) et celui d'un homozygote sensible (SS). Si l'allèle de résistance à un pesticide donné est récessif, seuls les individus homozygotes résistants (RR) survivront à un traitement de ce pesticide; les individus hétérozygotes (RS) auront la même réaction que les individus homozygotes sensibles (SS). La Figure 1 illustre ce qui se produit lors de la reproduction d'un papillon homozygote dominant avec un papillon homozygote récessif. La Figure 2 montre la progéniture de deux papillons hétérozygotes.

Figure 1

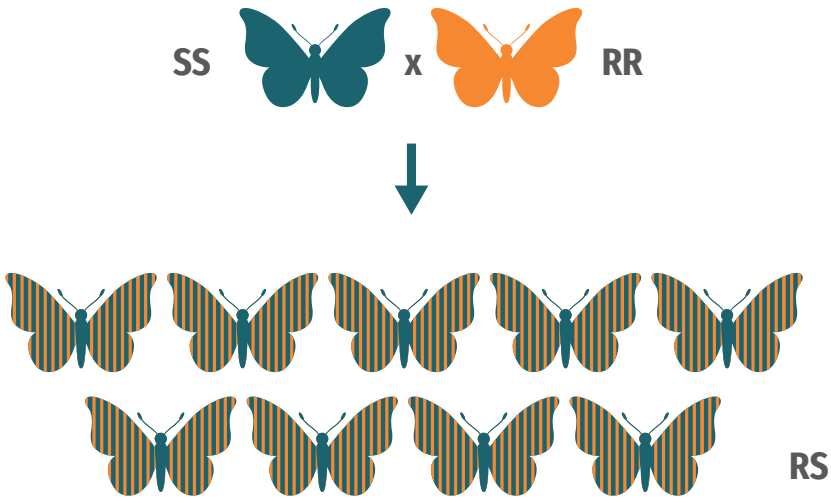

Figure 1 : Illustration de ce qui advient lorsqu'un individu homozygote résistant (RR) s'accouple avec un individu homozygote susceptible (SS). Les descendants héritent d'un allèle de chaque parent et sont donc tous hétérozygotes (RS). Si l'allèle R est dominant, les individus RS auront le même niveau de résistance que le parent RR; en cas d'allèle semi-dominant, les individus RS exprimeront une réponse intermédiaire.

Figure 2

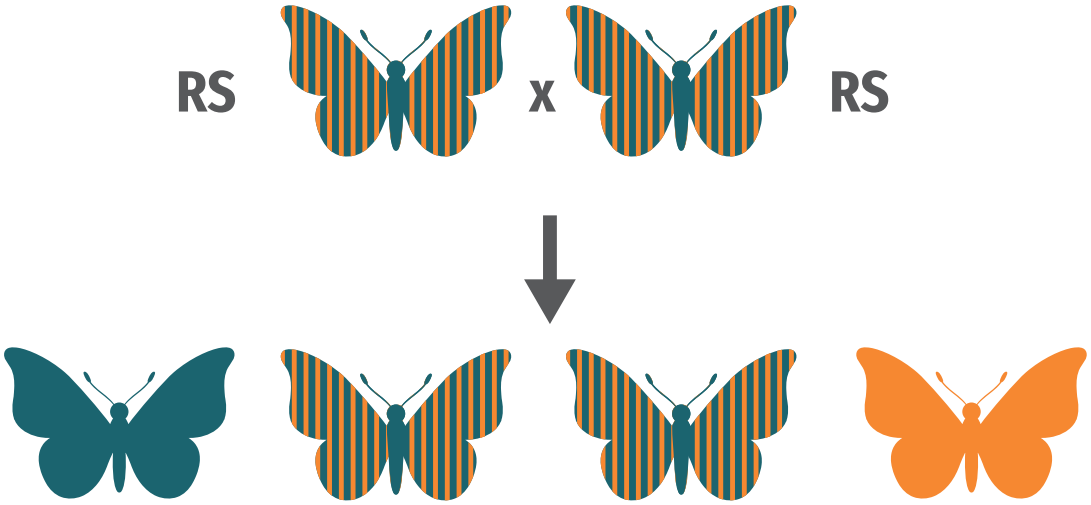

Figure 2 : La reproduction de deux individus hétérozygotes (RS) pour le gène de résistance montre une ségrégation chez la progéniture, c'est-à-dire que les descendants peuvent être hétérozygotes, homozygotes dominants (R) ou homozygotes récessifs (S). En outre, selon la loi de Mendel, le ratio des différents types sera 1:2:1 (RR:RS:SS).

De nos jours, la plupart des pesticides ont un mode d'action très précis et une seule mutation est généralement nécessaire chez l'organisme nuisible ciblé pour qu'il acquière une résistance élevée à un pesticide. L'évolution de la résistance à un pesticide dans une population s'explique par la relation de dominance entre les allèles du gène en question. Une résistance à un pesticide exprimée par un allèle dominant évolue rapidement dans une population comparativement à une résistance exprimée par un allèle récessif. Dans le second cas, la résistance évolue lentement puisque les individus sensibles hétérozygotes et homozygotes peuvent être éliminés par le pesticide auquel la résistance s'est développée. Il n'est donc pas surprenant que la majorité des cas de résistance aux pesticides résultent de la mutation d'un seul allèle dominant. Les cas de résistance attribuables à des allèles récessifs sont rares. Des cas de résistance polygénique causés par des gènes mineurs sont possibles, mais leur évolution est très lente en raison de la discrimination génotypique inadéquate en faveur de la résistance. Ces observations ont été faites lors d'études en laboratoire en raison du fait que le degré de dominance d'un allèle de résistance à un pesticide ne peut pas être connu jusqu'à ce qu'un tel allèle soit identifié et que des croisements appropriés soient effectués (Georghiou et Taylor, 1977).[1]

Une résistance attribuable à la mutation d'un seul gène ou d'un « gène majeur » est appelée mutation « en une seule étape » et, lorsqu'elle est introduite dans une population, elle devient généralement stable. Une telle mutation ponctuelle entraîne un seul changement d'acide aminé au site cible et est responsable du phénotype de résistance manifesté par l'agent pathogène, l'insecte ou la mauvaise herbe. Dans un pareil cas, les organismes nuisibles sensibles et résistants sont clairement distincts. Si le pesticide n'est plus utilisé ou s'il est utilisé que rarement dans un même champ, la population de l'agent pathogène, de l'insecte ou de la mauvaise herbe porteuse de la mutation peut demeurer résistante pendant de nombreuses années. Le champignon *Cercospora betae* (responsable de la tache cercosporéenne de la betterave à sucre) résistant au fongicide benzimidazole en Grèce (Dovas et al. 1976)[2] est un exemple bien documenté de résistance durable.

[1] Georghiou G. P. et Taylor C. E. (1977) Operational influences in the evolution of insecticide resistance. *Journal of Economic Entomology*, 70: 653-658.
[2] Dovas C., Skylakakis G. et Georgopoulos S.G. (1976) The adaptability of the benomyl resistant population of *Cercospora beticola* in Northern Greece. *Phytpathology* 66: 1452-1456.

Dans certains cas, la résistance évolue graduellement. La résistance au fongicide éthirimol est un bon exemple d'évolution graduelle. Des tests de surveillance ont révélé une réduction à la fois du contrôle et de la sensibilité de l'organisme nuisible, et cette réduction devient graduellement perceptible à des degrés partiels et variables. Une telle résistance est appelée résistance « cumulative » ou « à étapes multiples » et la population peut redevenir rapidement sensible dans des circonstances où, par exemple, on commence à moins utiliser le fongicide concerné et on a recours à d'autres fongicides pour supprimer le même agent pathogène (source en ligne : http://www.frac.info/docs/default-source/publications/monographs/monograph-1.pdf).

La résistance cumulative ou à étapes multiples qui se développe le plus souvent chez les champignons, par exemple, résulte probablement d'un changement polygénique à l'ADN du champignon. À l'instar d'une résistance impliquant un seul gène, la résistance à étapes multiples découle de la sélection de mutants, mais cette fois-ci, ces mutants sont porteurs de plusieurs mutations impliquant différents gènes et chacune de ces mutations produit un effet de résistance mineur. Seules, ces mutations ont un effet limité sur l'agent pathogène et elles ne lui permettent pas de résister fortement à un fongicide donné. Cela dit, lorsque plusieurs mutations sont combinées, la résistance au pesticide peut devenir beaucoup plus forte et permettre à l'agent pathogène de survivre. En fait, plus il y a de mutations causant la résistance, plus la résistance est forte (*ibid*). Les cas de résistance cumulative sont toutefois rares au champ. L'un de ces cas est le blanc des céréales, une maladie pour laquelle les données biochimiques démontrent une résistance polygénique aux fongicides de la famille des azoles (DMI) impliquant plusieurs mécanismes de résistance (source en ligne : Fungicide resistance — The assessment of risk. 2007. Brent KJ et Hollomon DW http://www.frac.info/docs/default-source/publications/monographs/monograph-2.pdf)

c) Mécanismes de résistance

Dès qu'une mutation à seule étape ou à étapes multiples se produit dans une population, le changement physique (phénotype) peut se manifester de différentes manières selon l'endroit où les allèles mutés sont exprimés dans l'organisme nuisible. Les mécanismes de résistance représentent des adaptations mesurables utilisées par la mauvaise herbe, l'insecte ou l'agent pathogène pour survivre à un pesticide; ils sont la cause de la résistance. Le Tableau 3 liste tous les mécanismes de résistance connus qui sont utilisés par les organismes nuisibles pour résister aux pesticides et présente des exemples de cas trouvés sur le terrain. Divers mécanismes physiologiques existent et il y a des similitudes frappantes entre les mécanismes utilisés par les mauvaises herbes, les agents pathogènes et les insectes. Ce qu'il faut retenir, c'est que les organismes nuisibles ont une grande capacité d'adaptation et la pression de sélection exercée par les pesticides peut favoriser tout mécanisme de résistance permettant la survie. En outre, un organisme nuisible peut avoir recours à plusieurs mécanismes de résistance lorsqu'il est soumis à une sélection ou des croisements continus, ce qui entraîne des niveaux plus élevés de résistance ou des résistances multiples (d'une manière analogue à l'empilage de gènes).

Tableau 3. Résumé des mécanismes de résistance aux herbicides, aux fongicides et aux insecticides

Mécanismes	Explication	Exemples		
		Herbicides	Fongicides	Insecticides
Résistance liée à la cible (RLC)				
Modification de la cible	Le changement d'un seul nucléotide au gène codant l'enzyme ciblé par le pesticide prévient ou réduit l'inhibition, conférant une protection	Résistance à l'imazathapyre (Pursuit) et à d'autres inhibiteurs de l'ALS (groupe WSSA 2) chez plusieurs espèces (amarantes, morelle, folle avoine, etc.) en Ontario, laquelle est attribuée à une modification de l'ALS Résistance au linuron (groupe WSSA 7) chez des amarantes dans des champs de carottes en Ontario, laquelle est attribuée à une modification du gène *psbA*	Résistance à la pyraclostrobine (QoI du groupe FRAC 11) à la tache cercosporéenne dans les betteraves à sucre en Ontario, laquelle est attribuée à une mutation ponctuelle du gène *cyt b*	Résistance aux insecticides à base d'organophosphates et de carbamates (groupes IRAC 1B et 1A) chez le doryphore de la pomme de terre au Michigan, laquelle est attribuée à une mutation du gène codant l'acétylecholine estérase Résistance au phosmet (Imidan) (*AChE*, groupe IRAC 1B) chez la tordeuse orientale dans les pêchers de l'Ontario, laquelle est attribuée à une mutation du gène *AChE*
Amplification ou surexpression de la cible	La surproduction de l'enzyme ciblée surcharge la capacité inhibitrice du pesticide	Résistance au glyphosate (groupe WSSA 9) chez l'amarante de Palmer aux É.-U., laquelle est attribuée à la présence de multiples copies du gène *EPSPS* Résistance aux herbicides DIM et FOP (groupe WSSA 1) chez la digitaire sanguine dans des champs d'oignon de l'Ontario, laquelle est attribuée à la présence de multiples copies des gènes codant l'ACCase	Résistance au fenboconazole (Indar) (DMI, groupe FRAC 3) chez *Blumeriella jaapii*, le champignon qui cause la tache des feuilles du cerisier au Michigan; cette résistance est attribuée à la surexpression du gène *Cyp51*	Résistance aux insecticides organophosphatés (groupe IRAC 1B) chez le tétranyque à deux points, laquelle est attribuée au nombre accru de copies du gène *AChE* **Une résistance causée par l'amplification de la cible n'est pas commune chez les insectes**

Tableau 3. Résumé des mécanismes de résistance aux herbicides, aux fongicides et aux insecticides

(suite)

Mécanismes	Explication	Exemples		
		Herbicides	Fongicides	Insecticides
Mécanismes de résistance non liés à la cible (RNLC)				
Détoxication par métabolisme du pesticide	**Des processus dépendants de l'énergie transforment la matière active et la rendent non toxique**			
Dégradation du pesticide	Différents types d'enzymes « s'attaquent » à la molécule du pesticide. La structure modifiée de la molécule rend le pesticide non toxique	Le Muster (éthametsulfuron-méthyle), un inhibiteur de l'ALS appartenant au groupe WSSA 2, est dégradé par les enzymes du cytochrome P450, conférant une résistance chez la moutarde des champs dans le canola (Ouest du Canada)	Résistance au propiconazole (Tilt) (DMI, groupe FRAC 3) chez *Monilinia fructicola* (pourriture brune), laquelle est attribuée à une dégradation accrue du fongicide par les enzymes du cytochrome P450	Détoxification de l'imidaclopride par les enzymes du cytochrome P450 du doryphore de la pomme de terre Résistance du thrips des petits fruits à quatre classes d'insecticides (groupes IRAC 1A, 1B, 2A et 3A), laquelle est attribuée aux enzymes du cytochrome P450
		Il n'existe pas de cas documenté de dégradation d'herbicides ou de fongicides catalysés par des estérases		Résistance aux pyréthroïdes et aux carbamates (groupes IRAC 4 et 1A), laquelle est attribuée à l'activité d'estérases chez le thrips des petits fruits
Conjugaison du pesticide	Des enzymes comme les glutathion S-transférases (GST) conjuguent (ajoutent) le peptide glutathion au pesticide, rendant le pesticide non toxique	Résistance aux triazines (groupe WSSA 5) chez certaines populations d'abutilon aux États-Unis, laquelle est attribuée à la conjugaison catalysée par la GST	**Il y a peu ou pas de preuve que des agents pathogènes ont acquis une résistance à des fongicides par voie de conjugaison catalysée par des GST**	Résistance aux carbamates (groupe IRAC 1) conférée par les glutathion S-transférases chez le thrips des petits fruits

Tableau 3. Résumé des mécanismes de résistance aux herbicides, aux fongicides et aux insecticides

(suite)

Mécanismes	Explication	Exemples		
		Herbicides	Fongicides	Insecticides
Mécanismes d'exclusion	**La réduction de la concentration cellulaire ou subcellulaire du pesticide empêche le pesticide d'inhiber la cible**			
Efflux cellulaire amélioré	Des transporteurs membranaires déplacent les molécules de pesticide à l'extérieur de la cellule plus rapidement qu'elles peuvent pénétrer à l'intérieur de la cellule	**Résistance théorique chez les mauvaises herbes**	Résistance à plusieurs fongicides (groupes FRAC 1, 2, 3, 7, 9 et 12) du *Botrytis cinerea*, lequel cause la moisissure grise de plusieurs fruits	L'efflux cellulaire contribue à la résistance aux organophosphates, à l'endosulfan et aux pyréthroïdes (groupes IRAC 1B, 2A et 3A) chez la noctuelle de la tomate (*Helicoverpa armigera*)
Séquestration/ compartimentation	Le pesticide est stocké dans un compartiment subcellulaire ou à l'extérieur de la cellule	Séquestration vacuolaire du glyphosate (groupe WSSA 9) chez la vergerette du Canada	**Aucun cas de résistance à des insecticides ou à des fongicides attribuables à ce mécanisme n'a été documenté**	
Absorption, pénétration ou entrée réduite	Le pesticide n'atteint pas la cible parce que l'absorption est entravée par la cuticule. La pénétration réduite est souvent observée en association avec d'autres mécanismes de résistance et elle intensifie l'effet de ces autres mécanismes	La diminution de l'absorption et de la rétention du glyphosate (groupe WSSA 9) sur les feuilles de l'ivraie multiflore (*Lolium multiflorum*) du Chili contribue à la résistance	**Aucun cas de résistance à des fongicides attribuable à ce mécanisme n'a été documenté**	La pénétration réduite des néonicotinoïdes (groupe IRAC 4a) confère une résistance au puceron vert du pêcher *(Myzus persicae)*

Tableau 3. Résumé des mécanismes de résistance aux herbicides, aux fongicides et aux insecticides

(suite)

Mécanismes	Explication	Exemples		
		Herbicides	Fongicides	Insecticides
Mécanismes d'exclusion	**La réduction de la concentration cellulaire ou subcellulaire du pesticide empêche le pesticide d'inhiber la cible**			
Translocation modifiée	Chez les plantes, le mouvement réduit ou modifié d'un herbicide systémique prévient l'accumulation de l'herbicide dans les points de croissance	La réduction de la translocation vers les points de croissance et de l'accumulation dans la pointe des feuilles confère une résistance au glyphosate (groupe WSSA 9) chez l'ivraie raide (*Lolium rigidum*)	**Ne s'applique pas aux fongicides et aux insecticides**	
Modification du comportement	L'organisme nuisible reconnaît le pesticide et change son comportement ou modifie son cycle de vie pour limiter son exposition	**Des expériences ont démontré qu'en présence de mesures de désherbage, les graines de mauvaises herbes peuvent retarder leur germination ou modifier leurs exigences en matière de dormance. Aucun cas n'a été signalé au champ**	**Ne s'applique pas aux fongicides**	La fausse-teigne des crucifères peut pondre plus d'œufs à la base des tiges plutôt que sur les feuilles pour éviter qu'ils soient exposés aux insecticides

d) Diversité génétique de l'espèce ciblée

La diversité génétique d'une population de mauvaises herbes ou de tout autre organisme nuisible peut avoir un effet sur la capacité de l'espèce à développer une résistance lorsqu'elle est soumise à une pression de sélection. L'un des principaux facteurs influençant la diversité génétique chez une espèce végétale est son **mode de reproduction**. Les populations d'espèces allogames (celles qui se reproduisent par pollinisation croisée) comme la petite herbe à poux, la grande herbe à poux, l'ivraie multiflore, l'ivraie vivace et l'amarante tuberculée sont génétiquement plus diversifiées comparativement aux populations d'espèces autogames (celles qui s'autoféconden) comme le chénopode blanc, la folle avoine et l'amarante à racine rouge. Les organismes nuisibles qui sont génétiquement plus diversifiés sont généralement plus susceptibles de développer une ou plusieurs résistances. Outre la diversité génétique, la rapidité de l'évolution de la résistance est influencée par le **flux génétique**, la **valeur sélective** et la **dormance des semences**.

Mode de reproduction : Le fait qu'une plante soit autogame stricte ou allogame a un effet déterminant sur la rapidité de l'évolution de la résistance, particulièrement sur l'accumulation des mécanismes de résistance. Chaque génération d'une plante allogame a une nouvelle combinaison de gènes alors que les plantes autogames conservent à peu près le même génome d'une génération à l'autre.

Flux génétique : Il s'agit de l'efficience de l'échange d'allèles de résistance d'une population à une autre, ce qui a un effet important sur la progression de la résistance chez une espèce donnée.

Valeur sélective : Aussi appelée succès reproducteur, la valeur sélective est la capacité d'un individu à transmettre ses gènes à la prochaine génération. Dans bien des cas, les individus qui sont résistants souffrent d'une valeur sélective réduite par rapport aux individus porteurs du gène sauvage. Ce phénomène est un effet secondaire du mécanisme de résistance.

Dormance des semences : La plupart des mauvaises herbes produisent des semences qui peuvent survivre longtemps en dormance dans le sol, constituant ainsi la banque de semences du sol. La dormance modère l'évolution de la résistance. Les espèces produisant des semences ayant une longévité accrue ont des individus résistants et sensibles qui germent en même temps, ce qui dilue le processus de sélection. En revanche, chez les espèces dont les semences ont une courte longévité, la résistance évolue plus rapidement puisque les individus sensibles sont normalement éliminés.

À l'instar des mauvaises herbes, les populations de champignons pathogènes et d'insectes qui ont un mode de reproduction sexuée sont génétiquement plus diversifiées. En règle générale, il est plus probable qu'une résistance à un fongicide ou à un insecticide se manifeste au sein d'une population génétiquement diverse qu'au sein d'une population génétiquement homogène. Le temps de génération est un autre facteur qui influe sur le développement de la résistance à un fongicide ou à un insecticide. Un temps de génération court donne lieu à un plus grand nombre d'isolats ou insectes au cours de la saison de croissance, ce qui accroît la diversité génétique et le taux de mutations naturelles qui pourraient causer l'apparition d'allèles de résistance à un insecticide ou à un fongicide. Les champignons qui peuvent produire un grand nombre de spores sont également plus susceptibles de développer une résistance.

2. Facteurs influençant le développement et l'évolution de la résistance :

a) Rotation et combinaison de pratiques de gestion optimales (PGO);

b) Stade de développement de l'organisme nuisible, gravité de l'infestation, fréquence des traitements;

c) Mécanismes de dispersion de l'organisme nuisible;

d) Recours à un seul mode d'action;

e) Doses réduites ou non indiquées;

f) Emploi non conforme des pesticides.

a) Rotation et combinaison de pratiques de gestion optimales (PGO)

En utilisant diverses techniques de gestion des cultures, les producteurs peuvent réduire l'apparition et la prolifération de mauvaises herbes, d'insectes et d'agent pathogènes résistants aux pesticides. En règle générale, on suppose qu'un cycle de rotation comportant plusieurs cultures différentes aide à réduire le risque de développement d'une résistance puisque différents pesticides seront utilisés dans les différentes cultures du cycle de rotation. Il convient pourtant de noter que ce n'est pas toujours le cas; certaines technologies permettent l'utilisation du même pesticide dans différentes cultures et, par conséquent, la même pression de sélection est exercée pendant les différentes phases du cycle de rotation. Pour cette raison, il est important d'être attentif non seulement aux cultures produites, mais bien au programme de pesticides dans son ensemble ainsi qu'aux autres PGO. Le Tableau 4 montre la relation entre l'utilisation des PGO et le développement de la résistance. La mise en œuvre de plusieurs PGO se traduit généralement par un risque réduit de développement d'une résistance aux pesticides.

Tableau 4. Effet des PGO sur le risque de développement d'une résistance

Méthode	Risque de développement d'une résistance		
	Faible	Modéré	Élevé
Rotation de cultures	Cycle de rotation diversifié	Rotation irrégulière ou limitée	Aucune rotation
Nombre de modes d'action utilisés en rotation	Plus de deux modes d'action	Deux modes d'action	Un seul mode d'action
Méthodes utilisées pour supprimer les organismes nuisibles	Méthodes culturales, mécaniques et chimiques	Méthodes mécaniques et chimiques	Méthodes chimiques seulement
Nombre de traitements ayant le même mode d'action effectués par saison de production	Un seul traitement	Plus d'un traitement	Plusieurs traitements pendant une même saison de production
État de la résistance au mode d'action	Résistance indéterminée	Résistance limitée	Résistance répandue
Gravité de l'infestation	Faible infestation	Infestation modérée	Forte infestation
Suppression de l'organisme nuisible au cours des trois dernières années	Bonne suppression	Suppression limitée	Suppression faible

Adaptation de HRAC Global : http://hracglobal.com/prevention-management/best-management-practices

b) Stade de développement de l'organisme nuisible, gravité de l'infestation, fréquence des traitements

- Il existe une forte corrélation entre la fréquence des traitements et le développement de la résistance tel qu'indiqué au tableau précédent.
- Le stade de développement de l'organisme nuisible peut également avoir un impact sur l'évolution de la résistance. Par exemple, chez les insectes, la résistance au DDT chez l'*Anopheles gambiae* (moustique) diminue avec l'âge, ce qui a des conséquences pour les tests et les diagnostics étant donné la possibilité de détection de faux négatifs. Pour ce qui est des mauvaises herbes, plus les plantes sont à un stade avancé au moment du traitement, moins elles tendent à être sensibles aux herbicides de postlevée, ce qui a pour effet de diminuer la pression de sélection. Dans la plupart des cas, les traitements tardifs sont peu recommandables puisque la culture a déjà subi l'impact négatif de la concurrence et les mauvaises herbes sont alors plus difficiles à éliminer.

  Le stade de maturité est également un facteur qui influence la résistance chez les insectes. Par exemple, les larves d'aleurodes sont plus sensibles aux insecticides organophosphatés que les adultes. À dose égale, l'application de l'insecticide exercera une plus grande pression de sélection d'individus résistants chez une population immature que chez une population adulte.
- L'évolution de la résistance dépend également des facteurs suivants : la durée du cycle de reproduction des insectes, les mouvements de migration, la gamme de plantes hôtes de l'insecte et la présence de populations sensibles à proximité. Il n'est pas surprenant que la résistance évolue plus rapidement dans les serres où les insectes et les tétranyques se reproduisent rapidement et où il y a peu ou pas d'individus sensibles qui entrent dans les serres (source : IRAC).

c) Mécanismes de dispersion de l'organisme nuisible

La dispersion joue un rôle prépondérant dans l'évolution et la propagation d'une résistance. Chez les insectes, la dispersion est un mécanisme fondamental par lequel les gènes de résistance sont introduits dans de nouveaux champs. D'un autre côté, lorsqu'un insecte résistant est déjà présent dans un champ, la propagation de la résistance peut être ralentie par l'arrivée d'individus sensibles dans le champ touché. Ce principe sous-tend d'ailleurs l'établissement d'un refuge de maïs sensible à proximité d'une culture de maïs Bt. La présence d'hybrides de maïs ordinaire (non-Bt) aide les insectes sensibles à survivre et à se reproduire avec les insectes résistants, ce qui retarde la capacité des insectes à développer une population résistante. Dans un cas comme dans l'autre, la diminution de la fréquence des allèles de résistance est souhaitable.

En ce qui concerne les champignons, les spores possédant des allèles de résistance peuvent être aéroportées sur de longues distances par le vent ou par tout mouvement d'air causé par les humains ou les animaux. L'inoculum peut également être disséminé par l'équipement agricole ou par la semence.

Chez les mauvaises herbes, les mécanismes de dispersion ont également un rôle important dans le développement de la résistance. Pour ces organismes nuisibles, il existe quatre types de mécanismes de dispersion :

1. **Équipement :** La machinerie agricole est le plus important mécanisme de dispersion de graines de mauvaises herbes résistantes d'un champ à l'autre. Les graines de mauvaises collent facilement à toute pièce d'équipement agricole pendant la saison de croissance.
2. **Semence, grain, mélanges de semences :** Si les lots de semence utilisés ont été produits dans une région agricole où il y a des mauvaises herbes résistantes, la semence peut être contaminée par des graines de mauvaises

herbes résistantes. De même, les producteurs qui produisent leur propre semence peuvent disséminer des graines résistances d'une zone infestée aux zones propres de leur ferme.

3. **Animaux et aliments pour animaux :** Les herbivores mangent plusieurs espèces de plantes. Le fumier qu'ils produisent est souvent transporté sur de longues distances et peut contenir des graines de mauvaises herbes. L'amarante est un exemple de plante dont les graines peuvent germer après avoir été excrétées par les animaux.

4. **Dispersion par le vent ou le mouvement :** Les graines et le pollen résistants peuvent être dispersés par le vent d'un champ à un champ voisin. Le kochia à balai est un exemple typique de plante virevoltante qui peut être transportée sur de longues distances en laissant échapper des graines le long de sa trajectoire. Les graines de populations résistantes peuvent également être transportées d'un champ à l'autre sur la fourrure des animaux.

d) Recours à un seul mode d'action

Le recours à un seul mode d'action est le plus important facteur qui favorise le développement de la résistance à tout type de pesticides. Il convient de souligner que l'emploi de différents pesticides ayant le même mode d'action exerce la même pression de sélection que si un seul produit était utilisé de façon répétitive. Par exemple, des traitements séquentiels de Pinnacle (thifensulfuron), Classic (chlorimuron), Accent (nicosufuron) et Broadstrike (flumetsulam) auraient le même effet que si un seul de ces produits était utilisé quatre fois de suite puisque ces quatre herbicides ont le même mode d'action (ALS, groupe WSSA 2). Le manque de diversité de mode d'action est indiqué dans le tableau 4 des PGO (Tableau 4) comme étant l'un des principaux risques de développement d'une résistance.

e) Doses réduites ou non indiquées

L'emploi de doses réduites ou non indiquées qui n'éliminent pas les organismes nuisibles de façon satisfaisante exerce une pression de sélection favorisant les individus résistants de certaines espèces. Cette résistance peut être polygénique et sera plus facilement sélectionnée chez les plantes allogames. Par exemple, les espèces allogames strictes comme l'ivraie, l'amarante tuberculée et l'herbe à poux sont capables d'échanger des gènes mineurs de résistance qui peuvent s'accumuler dans la progéniture et conférer une résistance plus élevée. Le traitement d'herbe à poux à une dose réduite d'herbicide peut permettre la survie de quelques plantes ayant une résistance faible. En revanche, un traitement d'herbicide à une dose plus forte élimine ces plantes, ce qui prévient l'accumulation d'allèles de résistance faible dans la progéniture. Si les plantes de la progéniture possèdent suffisamment d'allèles de résistance faible, elles pourront survivre à une dose élevée. Contrairement aux plantes allogames, les plantes autogames, comme la folle avoine, le chénopode et la sétaire verte, n'ont pas la capacité de développer graduellement une résistance.

La plupart des espèces d'insectes se reproduisent sexuellement. Les cas de résistance aux insecticides sont généralement associés à des gènes qui confèrent une résistance élevée lorsque l'individu est homozygote (RR) pour le gène concerné, et une résistance faible lorsque l'individu est hétérozygote (RS). Au début du développement de la résistance, la plupart des individus sont hétérozygotes (RS) et sont éliminés par la dose d'insecticide indiquée sur l'étiquette. Un traitement insecticide à une dose plus faible permet à certains insectes hétérozygotes de survivre et de se reproduire. À son tour, cette progéniture peut produire des individus homozygotes (RR) qui ne seront pas éliminés par un traitement à une dose plus élevée. Bien que la plupart des insectes soient diploïdes et se reproduisent sexuellement,

certaines espèces comme les pucerons peuvent également se reproduire par parthénogenèse et sont toujours homozygotes RR. Dans un tel cas, un traitement insecticide, qu'il soit à faible ou à forte dose, n'aura pas d'effet.

f) Emploi non conforme des pesticides

Un traitement effectué à un stade de développement autre que les stades recommandés peut avoir un effet sur l'évolution de la résistance. Toutefois, un tel traitement ralentirait probablement l'évolution de la résistance plutôt que de l'accélérer, particulièrement si la résistance est conférée par des gènes majeurs. En théorie, la résistance est plus efficacement sélectionnée lorsqu'il y a un grand écart de réaction entre les individus possédant les allèles de résistance (RR et RS) et ceux qui ne les possèdent pas (SS). En présence d'un écart important, seules les mauvaises herbes résistantes peuvent survivre et enrichir la prochaine génération de leurs allèles R. Si le traitement est effectué lorsque les mauvaises herbes sont à un stade de développement où elles sont moins sensibles, on observera un taux de survie plus élevé des plantes SS. Par conséquent, le désherbage sera moins efficace et la population retiendra une plus grande proportion de plantes SS.

En revanche, chez les espèces capables de reproduction croisée (insectes et plantes allogames) qui possèdent une résistance conférée par des gènes mineurs (résistance polygénique), un traitement non conforme effectué à un stade de développement où le pesticide est moins efficace peut permettre la survie de certains individus alors que le même traitement effectué au bon moment les aurait supprimés. Cela peut contribuer au développement de la résistance seulement si la génétique de l'organisme nuisible peut permettre sa survie.

Autres cas d'utilisation non conforme :

- **Utilisation d'un pesticide pour supprimer un organisme nuisible qui ne figure pas sur l'étiquette :** cela peut entraîner ou non une résistance selon la sensibilité.
- **Utilisation d'un additif non recommandé (comme un adjuvant) :** si l'additif réduit l'efficacité du produit, des individus possédant des gènes de résistance mineurs pourraient survivre, menant à une résistance quantitative (voir ci-dessus).

DOMAINE DE COMPÉTENCE 2

Reconnaître la résistance

1. Raisons possibles de l'échec des traitements de pesticides

Dans les principales cultures en champ et en serre, plusieurs facteurs autres que la résistance peuvent rendre les pesticides inefficaces, y compris :

- un dépistage inadéquat des organismes nuisibles;
- une mauvaise identification de l'organisme nuisible;
- un mauvais choix de pesticide;
- une utilisation incorrecte du pesticide (exemple : dose inadéquate, utilisation non conforme, dégradation de la matière active en raison d'un entreposage trop long, etc.);
- une préparation inadéquate de la bouillie (exemple : mélange en cuve, adjuvants, pH, concentration, etc.);
- une pulvérisation mal effectuée ou effectué au mauvais moment (exemple : moment de la journée, conditions environnementales, etc.);
- un équipement défectueux (exemple : mauvaise calibration, entretien déficient, irrégularités, buses usées, pression trop faible, etc.);
- une couverture inadéquate ou insuffisante de la culture;
- un délai de traitement trop long (exemple : les organismes nuisibles sont trop nombreux ou ne sont pas au bon stade de développement);
- l'absence d'un programme de lutte intégrée.

2. Raisons possibles de la défaillance de la génétique ou des caractères technologiques des plantes

Défaillance de la génétique et des caractères technologique des plantes

Comme les plantes sont continuellement exposées à des agents pathogènes et des insectes, elles ont développé des mécanismes de défense pour assurer leur survie et leur prolifération. Certains caractères permettent aux plantes de résister ou de tolérer ces attaques continuelles. Les termes « tolérance » et « résistance » ont des significations différentes lorsqu'on parle d'insectes et d'agents pathogènes; le tableau qui suit explique cette différence.

Tableau 5. Différence entre résistance et tolérance aux organismes nuisibles (agents pathogènes, insectes)

	Agents pathogènes	Insectes
Résistance	La plante a recours à des mécanismes physiques et biochimiques pour ralentir activement la prolifération de l'agent pathogène (exemples : production de toxines, de pubescence, d'une cuticule épaisse, etc.). L'agent pathogène est incapable d'infecter la plante.	**Une action de la plante nuit aux insectes.** **Antibiose :** des facteurs biochimiques ou biophysiques (exemples : toxines, manque d'éléments nutritifs, cuticule épaisse, poils, etc.) de la plante hôte ont un effet négatif sur le développement de l'insecte. **Antixénose :** des facteurs modifient le comportement de l'insecte nuisible de sorte que l'insecte nuisible préfère s'attaquer à une plante sensible plutôt qu'à une plante résistante.
Tolérance	Une charge pathogène importante dans la plante a peu ou pas d'effet, même lorsque l'agent pathogène se multiplie dans la plante.	La plante survit malgré les attaques d'insectes. La plante a la capacité de pousser à nouveau ou de produire de nouvelles pousses ou branches à partir de ses réserves.

Les caractères de résistance requièrent des ressources et, par conséquent, ils représentent un compromis pour les plantes. En investissement des ressources dans des caractères de résistance, il reste moins de ressources à investir dans la croissance et la reproduction. Toutefois, l'investissement dans les caractères de défense permet à la plante de survivre; autrement, elle pourrait mourir. C'est donc avantageux du point de vue évolutif pour les plantes de développer (d'investir) dans ce genre de caractères lorsque les attaques d'agents pathogènes ou d'insectes sont soutenues ou intenses.

Ces caractères de résistance (résistance de la plante hôte ou RPH) peuvent être contrôlés par des gènes majeurs (résistance qualitative) ou par plusieurs gènes (résistance quantitative). Une résistance qualitative, laquelle se manifeste par une défense pointue et très efficace, est héritée par mode de transmission mendélienne. En revanche, une résistance qualitative est conférée par plusieurs gènes qui ont chacun un effet restreint, mais dont la combinaison permet une défense efficace. La résistance qualitative est également appelée « résistance verticale » (efficace contre des biotypes ou des souches spécifiques de l'organisme nuisible) alors que la résistance quantitative est aussi appelée « résistance horizontale » (efficace contre toutes les souches ou biotypes de l'organisme nuisible).

Dans le but d'améliorer la RPH à divers insectes et agents pathogènes, les sélectionneurs introduisent des caractères de défense dans diverses cultures tout en prenant soin de maintenir les autres caractères souhaitables (par exemple, rendement, qualité, etc.). Traditionnellement, ils préfèrent sélectionner des caractères de résistance monogénique qualitative parce que ces caractères confèrent une résistance élevée et ont un mode de transmission héréditaire simple.

Les avantages de cette approche sont les suivants :

- Effet limité à un seul organisme nuisible
- Maintien de l'efficacité du caractère de résistance chez plusieurs générations successives
- Réduction de l'utilisation de pesticides
- Adoption facile puisque le caractère est présent dans la semence
- Résistance élevée

Malgré ces avantages, cette approche comporte également des inconvénients :

- La mise au point d'une nouvelle variété possédant le caractère voulu prend beaucoup de temps, généralement de trois à 10 ans.
- Le caractère peut ne pas être présent dans les réserves de ressources génétiques de l'espèce et doit donc être introduit à partir d'une autre espèce apparentée.
- Des biotypes ou souches de l'organisme nuisible peuvent développer une immunité au caractère présent dans la plante, dans quel cas ils pourraient infecter ou attaquer la plante.

Ce dernier inconvénient est celui qui est le plus préoccupant et explique la défaillance éventuelle du caractère de résistance de la plante. Cette défaillance est analogue au développement de la résistance aux insecticides ou aux fongicides chez les organismes nuisibles.

Les caractères RPH majeurs peuvent exercer une forte pression de sélection favorisant les variantes d'une population d'organismes nuisibles qui ont la capacité génétique de déjouer la résistance. L'exemple qui suit illustre la nécessité de considérer la RPH comme étant une ressource épuisable.

Le pourridié phytophthoréen (PP) dans le soya est une maladie importante causée par *Phytophthora sojae*. Ce champignon est responsable de pertes substantielles de rendement dans cette culture. Les sélectionneurs ont introduit des gènes appelés « *Rps* » dans divers cultivars de soya pour conférer une RPH, mais les différents gènes *Rps* agissent seulement contre des races précises de *P. sojae*. Ces gènes sont identifiés par des lettres et des chiffres comme *Rps-1a*, *Rps-1b*, *Rps-3a*, *Rps-6*, *Rps-7*, etc.

Il existe plusieurs races de *P. sojae*, lesquelles sont définies par leur capacité à déjouer les gènes *Rps* et donc à infecter les plants de soya. Cette situation est d'autant plus compliquée par le fait que certaines races de *P. sojae* peuvent déjouer plus d'un gène *Rps* et que, dans la plupart des champs, plusieurs races de *P. sojae* sont présentes.

Des échantillons prélevés en Ontario entre 2010 et 2012 ont révélé la présence de 22 races dans différents champs. La race 25 semble la plus prépondérante en Ontario. Elle peut infecter les cultivars dotés des gènes *Rps-1a*, *Rps 1b*, *Rps-1k* et *Rps-7*, mais pas ceux contenant les gènes *Rps-1d* ou *Rps-6*. Certaines races de *P. sojae* peuvent déjouer seulement deux gènes *Rps* alors que d'autres peuvent en déjouer 6, 7 ou même 8; c'est donc dire que ces races peuvent donc infecter un grand nombre de cultivars.

Caractères de RPH génétiquement modifiés

Bien que les exemples donnés ci-dessus se rapportent à la RPH et à l'amélioration génétique classique, il est également possible d'avoir recours au génie génétique pour améliorer les cultures, particulièrement lorsque des gènes majeurs contrôlent les caractères de résistance. La mise au point des cultures Bt en est un bon exemple.

Des gènes isolés de la bactérie *Bacillus thuringiensis* codent la synthèse de protéines entomotoxiques (protéines Bt) qui causent la mort de nombreuses espèces d'insectes lorsqu'elles sont ingérées. Les plantes auxquelles on a inséré ces gènes à l'aide des techniques moléculaires expriment ces protéines entomotoxiques dans leurs tissus. En fait, les cultures ainsi transformées peuvent lutter contre les infestations d'insectes en produisant leur propre insecticide. Les cultures Bt comme le maïs Bt préviennent si efficacement les infestations d'insectes qu'elles ont été rapidement adoptées par les producteurs. L'inconvénient, c'est que les cultures Bt sont si répandues qu'elles créent une pression de sélection favorisant le développement de la résistance chez les insectes ciblés. En effet, les insectes peuvent devenir résistants aux protéines Bt de la même manière qu'ils peuvent développer une résistance aux insecticides.

Le potentiel de développement de la résistance a été très tôt reconnu dans le processus de développement des cultures Bt et des règles ont été imposées pour aider les producteurs à réduire la pression de sélection. Ces règles stipulent que tout cultivar doté du caractère Bt doit être produit à proximité d'un

cultivar de la même espèce qui ne possède pas ce caractère ou encore être mélangé à un tel cultivar. Cette stratégie de gestion de la résistance aux insecticides s'appelle la stratégie de refuge. Elle est fondée sur le principe selon lequel les premiers individus qui auront développé une résistance auront seulement une copie de l'allèle de résistance. Ces individus seront donc RS, c'est-à-dire qu'ils seront porteurs d'un allèle de résistance et d'un allèle de sensibilité, tandis que les individus normaux sensibles auront deux copies de l'allèle de sensibilité et seront réputés être SS.

L'allèle qui confère la résistance au caractère Bt est récessif et confère seulement une protection faible. En pratique, lorsque le maïs Bt produit une grande quantité de protéines Bt, la toxicité élevée nuit gravement à la survie des individus RS. D'autre part, les insectes homozygotes résistants (RR) auront une immunité totale contre les toxines Bt. La stratégie de refuge est donc essentielle pour maintenir une proportion élevée d'individus SS afin que les individus RS aient de bonnes chances de s'accoupler avec des individus sensibles. Cette approche garantit que le caractère de résistance demeure à l'état hétérozygote (RS) chez les insectes et que les insectes résistants ne causent que des dommages minimes à la culture. Si un producteur plantait seulement une culture Bt sans inclure de plantes sensibles dans un champ, tous les insectes SS seraient tués et les quelques individus RS qui survivraient se reproduiraient entre eux. Leur progéniture comporterait 25 % d'individus RR qui exprimeraient une résistance très élevée au Bt, ce qui entraînerait une croissance exponentielle d'insectes résistants.

Par exemple, si deux pyrales du maïs RS s'accouplent et que la femelle pond 200 œufs, 50 de ces œufs seront RR, 100 seront RS, et 50 seront SS. Les 50 individus RR (en supposant que la proportion des sexes est équilibrée) produiront 5 000 individus RR à la prochaine génération, et ces derniers en produiront 500 000 à la génération suivante. Cette croissance exponentielle de la résistance illustre la nécessité de prendre des mesures préventives de gestion de la résistance.

Les règles actuelles exigent que les producteurs sèment 20 % de la superficie de chaque champ occupé par un hybride Bt avec un autre hybride qui ne possède pas le caractère Bt. Ces plantes sensibles forment le refuge dans lequel des individus SS peuvent se reproduire et assurer le maintien d'une réserve de l'allèle sensible. Une autre approche permise est d'utiliser des semences Bt qui sont mélangées à des semences non-Bt par le fabricant de semences; dans un tel cas, chaque sac de semences contient deux hybrides et la proportion de l'hybride non-Bt varie entre 5 et 10 %. Le respect des règles sur le refuge assure que le caractère Bt demeure efficace dans les autres régions productrices de maïs Bt ainsi que dans d'autres cultures Bt. Une troisième approche consiste à empiler différents gènes Bt dans un même hybride; cette stratégie réduit les probabilités d'émergence d'une résistance. Des renseignements supplémentaires sont fournis à www.cornpest.com (en anglais seulement).

Tableau 6. Stratégie de refuge

Avantages	Inconvénients
Garantit que la fréquence de l'allèle de résistance au sein de la population d'insectes demeure faible	De 5 à 20 % de la superficie de culture est ensemencée avec une variété sensible, laquelle peut subir des dommages d'insectes et des pertes de rendement
Préserve l'allèle de sensibilité dans la population d'insectes	Exige un taux de conformité élevé : si des producteurs ne respectent pas les règles, la résistance peut se développer et des insectes RR infesteront les champs voisins où la stratégie de refuge avait été adoptée
Facile à adopter, particulièrement lorsque les semences de refuge sont incorporées dans le sac de semences Bt	

3. Processus d'identification de la résistance aux pesticides

Si la résistance est toujours soupçonnée après avoir considéré toutes les causes possibles de l'échec des traitements de pesticides (présentées à la section 2.2), le conseiller et le producteur devraient revoir l'historique du champ et se questionner sur les points suivants :

- Le producteur a-t-il utilisé le même pesticide ou des pesticides ayant le même mode d'action au cours des dernières saisons de cultures?
- Au cours des dernières années, le même pesticide parvenait-il à gérer efficacement l'organisme nuisible?
- Après le traitement, l'organisme nuisible (mauvaise herbe, insecte, agent pathogène) a-t-il continué de croître et de proliférer?
- Le producteur a-t-il remarqué un certain taux de mortalité?
- Y a-t-il eu une diminution de l'efficacité du contrôle de l'organisme nuisible au cours des dernières années?
- Y a-t-il eu des cas confirmés de résistance chez cet organisme nuisible dans la région?
- Les fermes avoisinantes parviennent-elles à bien gérer l'organisme nuisible?

Si la plupart des réponses à ces questions sont « oui », le conseiller devrait prélever des échantillons de l'organisme nuisible (comme piéger des insectes ou recueillir des œufs, des plantes, des semences, des tissus infectés, etc.) et les faire analyser afin de confirmer la résistance.

Figure 3

Figure 3 : Étapes pour le prélèvement et la soumission d'échantillons à des fins de tests de résistance. (Source : http://hracglobal.com/prevention-management/best-management-practices, en anglais seulement)

4. Méthodologie pour tester des organismes nuisibles soupçonnés d'être résistants à un pesticide et confirmer la résistance

Pour confirmer la résistance d'une mauvaise herbe à un herbicide, des tests en laboratoire doivent être effectués d'une manière scientifique et impartiale. Des spécimens résistants et sensibles de la même espèce de plante sont soumis à un essai pour évaluer la réponse dose-effet dans un environnement contrôlé. L'essai est répété plusieurs fois pour éliminer les possibilités d'erreurs. En outre, lorsque des cas de résistance ont déjà été confirmés pour une espèce donnée, des doses diagnostiques ou des tests moléculaires (à l'aide de réactions en chaîne de la polymérase et d'amorces précises) sont utilisés pour confirmer la résistance dans le champ du producteur.

Idéalement, lorsque la résistance soupçonnée implique une nouvelle combinaison organisme nuisible/pesticide, un essai dose-réponse doit être effectué dans des conditions identiques à celles de futurs tests diagnostiques. Dans un essai dose-réponse, plusieurs individus de l'organisme nuisible reçoivent différentes doses de pesticide (par pulvérisation, par application sur la surface d'une boîte de Pétri ou sur un médium de croissance, par immersion, etc.), puis la réponse est mesurée. Selon le type d'organisme nuisible, cette réponse peut être exprimée en fonction du taux de survie ou de mortalité, du taux de croissance, de l'accumulation de la biomasse, etc. Dans la majorité des cas, la réponse à la dose suit une courbe sigmoïde et les résultats peuvent être décrits selon une équation log-logistique (Figure 4). Essentiellement, cela veut dire qu'à très faible dose, un pesticide n'a à peu près pas d'effet (voir la Figure 4); la réponse tend alors à se rapprocher de 100 %. À forte dose, le pesticide a un effet maximal et la réponse tend à être 0 %. Évidemment, il y a une plage de doses où la réponse varie considérablement, passant très rapidement de la limite maximale à la limite minimale. Cette plage est biologiquement intéressante puisqu'elle permet de comparer précisément les différents organismes nuisibles, biotypes, populations, doses ou pesticides. La dose qui provoque une réponse de 50 % est souvent utilisée comme point de référence en vue de faire des comparaisons. Cette dose est souvent appelée par l'un des termes suivants : DL_{50}, CL_{50}, DE_{50}, RC_{50}, I_{50}[3] selon la variable utilisée pour mesurer la réponse.

Figure 4

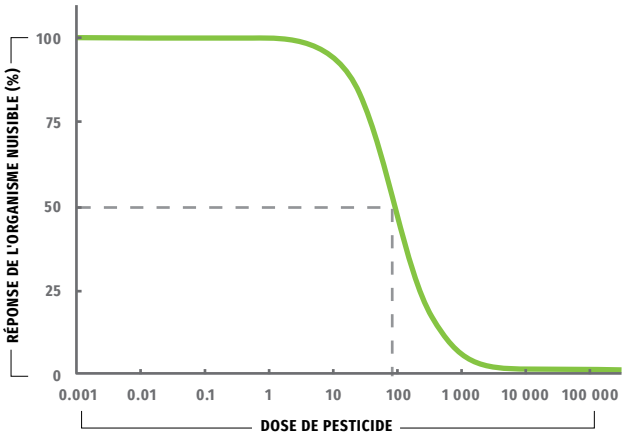

Figure 4 : Exemple d'une courbe de dose-réponse typique mesurant l'effet d'un pesticide sur un organisme nuisible. En augmentant la dose, on observe une réponse aigüe dès que la dose seuil est atteinte. À dose très faible, il n'y a virtuellement aucune réponse alors qu'à dose très élevée, la réponse est entière. Le point d'inflexion de la courbe (à mi-chemin entre la limite supérieure et la limite inférieure) aide à déterminer certains paramètres comme la DL_{50}. Dans cet exemple, la réponse 50 % est atteinte lorsque la dose est près de 100.

[3] DL_{50} = dose létale 50, CL_{50} = concentration létale, DE_{50} = dose efficace, RC_{50} = réduction de la croissance, I_{50} inhibition.

L'établissement des courbes dose-réponse d'une population ou d'une lignée sensible et de lignées résistantes (Figure 5) est une procédure standard de tout laboratoire de diagnostic. En comparant la dose qui entraîne une réponse de 50 % chez les différentes lignées, il est possible de déterminer le degré de résistance des lignées par rapport au témoin sensible. Dans la Figure 5, la réponse de 50 % est atteinte dans la lignée sensible (S), la lignée résistante 1 (R1) et la lignée résistante 2 (R2) à des doses de 0,5, 90, et 500, respectivement. En divisant la dose de 50 % des lignées R1 et R2 par celle de la lignée S, on obtient un indice de résistance. Dans le présent exemple, la lignée R1 est 180 fois plus résistante que la lignée S alors que la lignée R2 est 1 000 fois plus résistante que la lignée S.

Figure 5

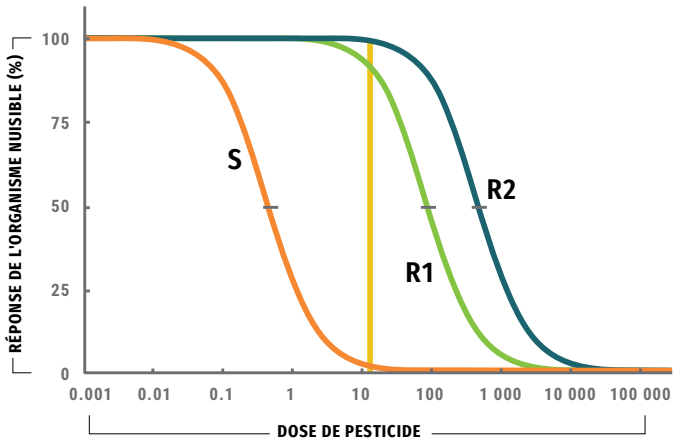

Figure 5 : Courbes dose-réponse théoriques qu'une lignée sensible S et de deux lignées résistantes (R1 et R2). Les tirets indiquent une réponse de 50 %. La ligne verticale montre la dose diagnostique.

En outre, l'établissement des courbes dose-réponse permet de déterminer la dose diagnostique. Cette dose peut être utilisée dans de futurs tests et permet d'établir un diagnostic beaucoup plus rapidement sans avoir à mener un essai dose-réponse. La dose diagnostique permet également de déterminer la plus grande différence verticale entre la réponse de la lignée S et celle de la lignée R. Idéalement, elle contrôle ou inhibe complètement la lignée S tout en ayant peu ou pas d'effet sur les lignées R. Dans l'exemple ci-dessus, la dose diagnostique serait un peu plus de 10 (Figure 5).

DOMAINE DE COMPÉTENCE II

PRATIQUES DE GESTION OPTIMALES POUR GÉRER LA RÉSISTANCE

DOMAINE DE COMPÉTENCE 1

Rôle de la cible ou du mode d'action

1. Cible ou mode d'action efficace dans la lutte contre :

a) les insectes;

b) les mauvaises herbes;

c) les maladies.

Pourquoi est-il important de connaître le mode d'action?

Les pesticides appartenant à un même groupe selon les systèmes de classification du HRAC, du FRAC, de l'IRAC, de la WSSA ou de l'ARLA ont des structures chimiques ou des propriétés similaires et partagent le même mode action (cible). L'industrie a créé ces groupes afin de pouvoir distinguer facilement les produits selon leurs modes d'action. Le mode d'action d'un pesticide représente la façon dont le pesticide interfère avec les fonctions physiologiques de l'organisme nuisible ciblé. Les pesticides appartenant à différents groupes agissent de manière différente et chaque groupe présente des risques et des problèmes qui lui sont propres. En revanche, les pesticides appartenant à un même groupe agissent de façon similaire et présentent généralement des avantages et des inconvénients communs entre eux.

Il est très important de connaître le mode d'action des pesticides pour éviter d'utiliser des pesticides possédant le même mode d'action plusieurs années d'affilée ou encore plusieurs fois au cours de la même saison de production. Les producteurs et les conseillers qui connaissent bien les particularités des différents groupes de pesticides prennent de meilleures décisions de traitement compte tenu des circonstances.

Est-ce utile de savoir que certains pesticides ont une cote de risque de développement d'une résistance plus élevée que d'autres?

Le risque de développement d'une résistance varie d'un pesticide à l'autre. D'ailleurs, le FRAC et l'HRAC ont établi des cotes de risque de développement d'une résistance en fonction du mode d'action (Tableaux 7 et 8). Conséquemment, l'ARLA encourage l'étiquetage volontaire des groupes FRAC, IRAC ou WSSA afin de faciliter l'adoption de bonnes pratiques de prévention et de gestion de la résistance. Des exemples d'étiquettes contenant ces renseignements sont présentés ci-dessous :

Figure 6

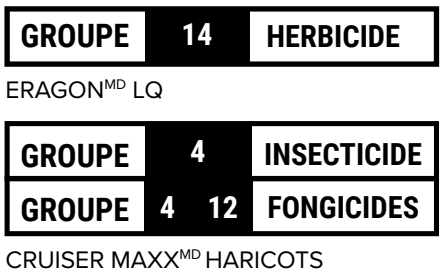

Figure 6 : Deux exemples d'étiquettes de pesticides utilisés au Canada sur lesquelles sont indiqués les numéros de groupes correspondant aux modes d'action.

Les herbicides et les fongicides sont cotés en fonction du risque de développement d'une résistance qu'ils présentent. Un pesticide pour lequel une résistance peut se manifester après seulement quelques traitements est dit « à risque élevé ». Les herbicides des groupes 1 et 2 en sont de bons exemples puisqu'il est commun que des cas de résistance soient signalés après seulement quatre ou cinq traitements. D'autre part, les pesticides « à risque faible » sont ceux pour lesquels la résistance tend à se manifester après de nombreux traitements, de l'ordre de 20 et plus. Les cotes de risque de développement de la résistance pour les différents groupes d'herbicides et de fongicides sont indiquées aux tableaux 7 et 8.

Tableau 7. Risque de développement d'une résistance à un herbicide en fonction de son mode d'action

Groupe d'herbicide	Fréquence des traitements				
	6 ou moins	7-10	11-20		>20
	Risque élevé	Risque modéré à élevé	Risque modéré	Risque modéré à faible	Risque faible
1	✔				
2	✔				
3			✔		
4					✔
5				✔	
6					✔
7		✔			
8			✔		
9					✔
10					✔
22		✔			
27		✔			

Adaptation de Beckie H.J. Herbicide resistance weeds: management and practice (2006) Weed Technol. 20:793-814

Tableau 8. Risque de développement d'une résistance à un fongicide en fonction de son mode d'action

Groupe FRAC	Risque élevé	Risque modéré à élevé	Risque modéré	Risque modéré à faible	Risque faible	Risque inconnu
1	✔					
2		✔				
3			✔			
4	✔					
5				✔		
6				✔		
7		✔				
8			✔			
9			✔			
10	✔					
11	✔					
12				✔		
13			✔			
14			✔			
16.1						✔
16.2			✔			
16.3						✔
17				✔		
18						✔
19			✔			
20						✔
21		✔				
22				✔		
23				✔		
24			✔			
25	✔					
27				✔		
28				✔		
29					✔	

Tableau 8. Risque de développement d'une résistance à un fongicide en fonction de son mode d'action

Groupe FRAC	Risque élevé	Risque modéré à élevé	Risque modéré	Risque modéré à faible	Risque faible	Risque inconnu
30				✔		
31						✔
32						✔
34						✔
35						✔
36						✔
37						✔
38					✔	
39						✔
40				✔		
41	✔					
43						✔
44						✔
45		✔				
46						✔
47		✔				
48						✔
49		✔				
50			✔			
M01-M12					✔	
P01-P06						✔
P07					✔	
U06					✔	
U12				✔		
U13						✔
U14						✔
U16			✔			
U17						✔
U18						✔

Le fait de connaître la cote de risque de développement de la résistance permet de mieux planifier les rotations de cultures ainsi que les séquences et les mélanges de pesticides. Il n'est pas judicieux de recommander l'usage excessif d'un pesticide initialement très efficace si le risque de développement d'une résistance est élevé. Plus un pesticide est efficace, plus le risque de développement de la résistance est élevé. Le fait qu'un pesticide supprime extrêmement bien un organisme nuisible est un bon indicateur que son utilisation pourrait entraîner des cas de résistance dans un avenir proche.

En outre, même les pesticides à faible risque ne sont pas « sans risque ». Lorsque les conditions sont favorables, tout pesticide exerce une pression de sélection en faveur de la résistance. Les pesticides à risque élevé sont ceux pour lesquels la résistance survient plus rapidement.

Il convient de noter que lorsqu'un pesticide est introduit sur le marché, le niveau de risque de développement de la résistance est alors inconnu. En effet, le niveau de risque est établi *a posteriori*, c'est-à-dire suivant l'observation du développement de la résistance dans une région ou un champ donné après le premier traitement. Comme mentionné précédemment, les herbicides pour lesquels la résistance se manifeste après seulement quelques traitements ont une cote de risque élevée (par exemple, les groupes 1 et 2). Parallèlement, les fongicides des groupes FRAC 1, 4, 10, 11 et 25 ont aussi une cote de risque élevée puisqu'ils exercent une forte pression en faveur de la résistance.

Il est également important de reconnaître que ces cotes ne sont pas coulées dans le béton et qu'elles servent seulement de lignes directrices. L'évaluation du risque de développement d'une résistance peut changer si le profil d'utilisation du pesticide change substantiellement. Beaucoup connaissent l'exemple du glyphosate. Cet herbicide a été commercialisé pour la première fois en 1974 et aucun cas de résistance n'a été signalé pendant plus de 20 ans malgré son utilisation très répandue. L'introduction des cultures résistantes au glyphosate du milieu à la fin des années 1990 a soulevé des préoccupations quant au risque de développement de mauvaises herbes résistantes. Même si certains étaient d'avis que le glyphosate posait peu de risques étant donné qu'aucun cas n'avait été signalé jusque-là, d'autres avaient souligné, à juste titre, que le changement de profil d'utilisation augmenterait la pression de sélection et que le glyphosate ne devrait plus être considéré comme un pesticide à faible risque. Il est également vrai que nombreux champs ont été traités à maintes reprises avec ce produit et que, dans ces cas, le seuil de risque a été dépassé. Il ne faut pas oublier que « risque faible » n'équivaut pas à « aucun risque ».

2. Rôle de la cible ou du mode d'action dans :

a) le retardement du développement de la résistance chez les organismes nuisibles;

b) l'accélération du développement de la résistance chez les organismes nuisibles.

a) La connaissance des cibles ou modes d'action des pesticides peut contribuer à ralentir l'évolution de la résistance

L'alternance de pesticides ayant différents modes d'action ainsi que les mélanges en cuve de tels pesticides peut ralentir considérablement l'évolution de la résistance. Il est prouvé que l'utilisation d'au moins deux pesticides ayant des modes d'action différents et une efficacité similaire contre un organisme nuisible aide à supprimer tout individu possédant un allèle de résistance. Chaque mode d'action cible un site particulier dans l'organisme nuisible qui, en entravant des fonctions physiologiques de l'organisme, cause sa mort. Le fait de connaître le mode d'action ou la matière active d'un pesticide aident les producteurs à différencier les pesticides. La classification des pesticides selon leur mode d'action permet aux producteurs de prendre des décisions éclairées sur les mélanges et les séquences de pesticides à utiliser contre des organismes nuisibles précis.

b) La méconnaissance ou l'ignorance des cibles ou modes d'action des pesticides peut accélérer l'évolution de la résistance

Il a été démontré que l'utilisation répétée de pesticides ayant le même mode d'action est le plus important facteur contribuant à l'évolution rapide de la résistance aux pesticides partout dans le monde. L'utilisation de différentes marques de pesticides qui contiennent la même matière active ou des matières actives différentes mais ayant le même mode d'action accroît la pression de sélection puisque la cible est la même. Il est essentiel de réduire la pression de sélection pour retarder le développement de la résistance ou, tout au moins, ralentir son évolution. Voilà pourquoi il est primordial que les producteurs comprennent la classification des modes d'action des différents organismes (à savoir l'HRAC, la WSSA, l'IRAC et le FRAC).

3. Évaluation de l'importance d'alterner les groupes de pesticides en fonction des classifications de modes d'action de l'IRAC, du FRAC, de la WSSA ou de l'HRAC

Voir la table des matières pour la signification des sigles.

L'IRAC, le FRAC, et la WSSA/HRAC sont des comités ou organismes qui ont établi des systèmes de classification des insecticides, des fongicides et des herbicides, respectivement, en vue d'assurer l'utilisation durable de ces produits. Pour ce qui est des herbicides, il existe deux systèmes de classification couramment utilisés. Au milieu des années 1990, la WSSA a créé son propre système de classification des herbicides utilisés en Amérique du Nord. Plus tard, l'HRAC a adopté un système de classification similaire pour assurer un étiquetage standard à l'échelle internationale. Ces deux systèmes sont actuellement acceptés et sont très similaires en principe. La principale différence est que la WSSA a adopté un système à numéros alors que le système de l'HRAC utilise des lettres. (https://pesticidestewardship.org/wp-content/uploads/sites/4/2016/07/HerbicideMOAClassification.pdf). L'objectif de ces systèmes de classification est d'harmoniser la classification des cibles des pesticides dans le plus grand nombre de pays possible. Le système de classification repose sur la cible ou le mode d'action de chaque pesticide. La recommandation générale est d'alterner ou de mélanger en cuve des pesticides ayant différents modes d'action, mais qui suppriment le même organisme nuisible. Le fait de changer de produits n'implique pas nécessairement que différents modes d'action sont utilisés. Par exemple, les fongicides propiconazole et triadiméfon ont le même mode d'action. Lorsqu'un producteur traite une culture avec ces deux produits, soit en rotation ou en mélange, une seule fonction physiologique de l'organisme nuisible est entravée. Par conséquent, au lieu de potentiellement retarder le développement de la résistance, la pression de sélection est accrue.

Le principal avantage de ces systèmes de classification est de faciliter la planification de la rotation des modes d'action sans avoir à connaître le mode d'action exact de tous les pesticides qui seront utilisés dans la culture. Chaque étiquette d'herbicide, par exemple, a un numéro ou une lettre qui correspond à son mode d'action. Un producteur qui veut utiliser deux produits ayant le même code sur leurs étiquettes ne devrait pas les mélanger ou les utiliser l'un après l'autre afin de retarder l'émergence de populations de mauvaises herbes résistantes. Évidemment, cette approche est la même pour les fongicides et les insecticides puisque le FRAC et l'IRAC ont également assigné des numéros ou des lettres à chaque mode d'action. De plus, ces deux comités émettent des recommandations sur la manière d'alterner les groupes de pesticides. Les tableaux 9, 10 et 11 présentent les systèmes de classification des modes d'action des pesticides des trois comités d'action. En plus des codes créés par l'HRAC, le tableau des herbicides montre également les codes de la WSSA comme référence (les codes de la WSSA sont plus souvent utilisés en Amérique du Nord alors que les codes de l'HRAC tendent à être plus utilisés en Europe, en Asie et en Amérique du Sud; l'Australie a son propre système de classification d'herbicides).

Tableau 9. Classification des fongicides selon leur mode d'action :

Les groupes FRAC, les modes d'action, les groupes chimiques et des exemples de produits commerciaux sont indiqués (remarque : seuls les groupes pour lesquels au moins un produit est homologué en Ontario pour les grandes cultures ou les cultures maraîchères ou fruitières figurent au tableau.)

N° de groupe	Mode d'action (cible)	Nom du groupe	Nom du produit chimique (nom commercial)
1	Mitose et division cellulaire (assemblage de la ß-tubuline)	MBC (méthyl benzimidazole-carbamates)	Thiophanate-méthyl (Senator)
2	Transduction de signal (MAP/Histidine-kinase)	Dicarboximides	Iprodione (Rovral)
3	Synthèse des stérols dans les membranes (C14-déméthylase)	IDM (inhibiteurs de la déméthylation)	Propiconazole (Tilt)
4	Synthèse des acides nucléiques (ARN polymérase)	Phénylamide	Métalaxyl (Ridomil Gold)
5	Δ14-réductase et Δ8→Δ7- isomérase dans la biosynthèse des stérols	Amines (morpholine)	Spiroxamine (Priwen)
7	Respiration (complexe II : succinate-déshydrogénase)	SDHI (inhibiteurs de la succinate déshydrogénase)	Boscalid (Cantus)
9	Synthèse des acides aminés et des protéines (méthionine)	AP (anilinopyrimidines)	Pyriméthanil (Scala)
11	Respiration (complexe III : cytochrome bc1)	QoI (inhibiteurs de la quinone extérieure)	Pyraclostrobine (Cabrio)
12	Transduction de signal (MAP/Histidine-kinase)	Phénylpyrroles	Fludioxonil (Scholar)
13	Transduction de signal	Aza-naphthalènes	Quinoxyfen (Quintec)
17	Biosynthèse des stérols dans les membranes	Hydroxyanilides	Fenhexamid (Elevate)

Tableau 9. Classification des fongicides selon leur mode d'action *(suite)*

N° de groupe	Mode d'action (cible)	Nom du groupe	Nom du produit chimique (nom commercial)
21	Respiration (complexe III : cytochrome bc1)	QiI (inhibiteurs de la quinone intérieure)	Cyazofamide (Ranman)
22	Mitose et division cellulaire (assemblage de la ß-tubuline)	Benzamides	Zoxamide (Gavel)
24	Synthèse des acides aminés et des protéines	Antibiotiques hexopyranosyls	Kasugamycine (Kasumin)
25	Synthèse des protéines (ribosome, étape d'initiation)	Antibotiques glucopyranosyls	Streptomycine (Streptomycine)
27	Inconnu	Cyanoacétamides oxime	Cymoxanil (Tanos)
29	Respiration (découplant de la phosphorylation oxydative)	2,6-dinitroaniline	Fluazinam (Allegro)
P07	Inconnu	Phosphonates	Fosétyl-Al (Aliette)
40	Synthèse de la paroi cellulaire (cellulose synthase)	Amide de l'acide carboxylique	Diméthomorphe (Acrobat)
43	Mitose et division cellulaire (délocalisation des protéines semblables à la spectrine)	Benzamides	Fluopicolide (Presidio)
44	Synthèse des lipides et intégrité des membranes (perturbateurs microbiens des cellules pathogènes)	Microbes	*Bacillus subtillis* souche QST 713 (Serenade OPTI)
45	Respiration (complexe III : cytochrome bc1)	QoSI (inhibiteurs de la quinone extérieure)	Amétoctradine (Zampro)

Tableau 9. Classification des fongicides selon leur mode d'action *(suite)*

N° de groupe	Mode d'action (cible)	Nom du groupe	Nom du produit chimique (nom commercial)
46	Perturbation des membranes cellulaires (proposé)	Extraits de plante	Huile d'arbre à thé (Timorex Gold)
49	Inhibition de la protéine de liaison oxystérol (proposé)	Pipéridinyl-thiazole-isoxazolines	Oxathiapiproline (Orondis Ultra B)
M1	Multi-sites	Matières inorganiques	Sulfate de cuivre tribasique (Cuivre 53W)
M2	Multi-sites	Matières inorganiques	Soufre (Soufre Microscopique)
M3	Multi-sites	Dithiocarbamates	Mancozeb (Dithane Rainshield)
M4	Multi-sites	Phthalimides	Captan (Maestro)
M5	Multi-sites	Chloronitriles	Chlorothalonil (Bravo ZN)
U8	Perturbateur de l'actine	Aryl-phényl-kétone	Metrafénone (Vivando)
P1	Induction du système de défense de la plante hôte (métabolisme de l'acide salicylique)	Nenzo-thiadiazole	Acibenzolar-S-méthyl (Actigard)
P5	Induction du système de défense de la plante hôte	Extrait de plante	Extrait de *Reynoutria sachalinensis* (Regalia Maxx)
NC	Non classifié (inconnu)	Divers (biologique, bicarbonate, huile)	*Streptomyces lydicus* (Actinovate), potassium bicarbonate (MilStop), huile minérale (Green Spray Oil 13E)

Tableau 10. Classification des insecticides selon leur mode d'action :

Les groupes IRAC, les modes d'action, les sous-groupes chimiques et des exemples de produits commerciaux sont indiqués (remarque : seuls les groupes pour lesquels au moins un produit est homologué en Ontario pour les grandes cultures ou les cultures maraîchères ou fruitières figurent au tableau)

Groupe principal et cible primaire	**Sous-groupe de produits chimiques ou exemple de matière active**	**Exemple de produit commercial** (matière active)
1 Inhibiteurs de l'acétylcholinestérase *(AChE)* **Système nerveux**	**1A** Carbamates	Sevin (carbaryl) Lannate (méthomyle)
	1B Composés organophosphorés	Lorsban (chlorpyrifos) Cygon (diméthoate)
2 Antagonistes du canal ionique chlorure du GABA **Système nerveux**	**2A** Cyclodiènes/hydrocarbures chlorés	Thionex (endosulfan)
3 Perturbateurs du canal sodium **Système nerveux**	**3A** Pyréthroïdes	Ambush (perméthrine) Force (téfluthrine)
4 Antagonistes des récepteurs nicotiniques de l'acétylcholine (nAChR) **Système nerveux**	**4A** Néonicotinoïdes	Poncho (clothianidine) Admire (imidaclopride)
	4C Sulfoximines	Closer (sulfoxaflor)
	4D Buténolides	Sivanto Prime (flupyradifurone)
5 Activateurs des récepteurs nicotiniques de l'acétylcholine (nAChR) **Système nerveux**	Spinosynes	Radiant (spinétoram) Success (spinosad)

Tableau 10. Classification des insecticides selon leur mode d'action *(suite)*

Groupe principal et cible primaire	Sous-groupe de produits chimiques ou exemple de matière active	Exemple de produit commercial (matière active)
6 Activateurs des canaux chlorure glutamate-dépendants (GluCl) **Système nerveux**	Avermectines, milbémycines	Agri-Mek (abamectine)
8 Inhibiteurs multi-sites	**8B** Chloropicrine	Chloropicrin 100 (chlorpicrin)
	8F Générateur d'isothiocyanate de méthyle	Basamid (dazomet)
9 Perturbateurs du canal TRPV de l'organe chordotonal **Système nerveux**	**9B** Dérivés de la pyridine d'azométhine	Fulfill (pymétrozine)
10 Inhibiteurs de croissance des acariens **Régulation de la croissance**	**10A** Clofentézine	Apollo SC (clofentézine)
11 Perturbateurs microbiens des membranes de l'intestin moyen des insectes	**11A** *Bacillus thuringiensis* et les protéines insecticides qu'il produit	Dipel (*Bacillus thuringiensis* var. kurstaki)
15 Inhibiteurs de la biosynthèse de la chitine, type 0 **Régulation de croissance**	Benzoylurées	Rimon (novaluron)
17 Perturbateurs de mue (diptères)	Cyromazine	Citation (cyromazine)

Tableau 10. Classification des insecticides selon leur mode d'action *(suite)*

Groupe principal et cible primaire	Sous-groupe de produits chimiques ou exemple de matière active	Exemple de produit commercial (matière active)
18 Antagonistes des récepteurs de l'ecdysone **Régulation de croissance**	Diacylhydrazines	Intrepid (méthoxyfénozide)
20 Inhibiteurs du transporteur d'électron du complexe mitochondrial III **Métabolisme énergétique**	**20B** Acéquinocyl	Kanemite (acéquinocyl)
	20D Bifénazate	Acramite (bifénazate)
21 Inhibiteurs du transporteur d'électron du complexe mitochondrial I **Métabolisme énergétique**	**21A** Acaricides et insecticides METI	Nexter (pyridabène)
23 Inhibiteurs de l'acétyl CoA carboxylase **Synthèse des lipides et régulation de croissance**	Dérivés des acides tétronique et tétramique	Movento (spirotétramate)
25 Inhibiteurs du transporteur d'électron du complexe mitochondrial II **Métabolisme énergétique**	**25A** Dérivés du β-ketonitrile	Nealta (cyfluméofène)
28 Modulateurs des récepteurs de la ryanodine **Systèmes nerveux et musculaire**	Diamides	Altacor (chlorantraniliprole)
29 Modulateurs de l'organe chordotonal **Système nerveux** (distinct du groupe 9)	Flonicamide	Beleaf (fonicamide)
Non classifié	Sans objet	Savon insecticide (sels de potassium d'acides gras)

Tableau 11. Classification des herbicides selon leur mode d'action :

Les codes WSSA et HRAC, les modes d'action, les groupes de produits chimiques et des exemples de produits commerciaux sont indiqués (remarque : seuls les groupes pour lesquels au moins un produit est homologué en Ontario pour les grandes cultures ou pour les cultures maraîchères ou fruitières figurent au tableau)

Groupe WSSA	**Groupe HRAC**	**Mode d'action**	**Famille de produit chimique** (groupe)	**Exemple de produit commercial** (matière active)
1	A	Inhibition de l'acétyl CoA carboxylase (ACCase)	Aryloxyphénoxypropionate (FOP)	Excel Super (fénoxaprop-éthyl)
			Cyclohexanédione (DIM)	Poast Ultra (séthoxydime)
			Phénylpyrazoline (DEN)	Axial (pinoxaden)
2	B	Inhibition de l'acétolactate synthase (ALS) (acétohydroxyacide synthase - AHAS)	Sulfonylurées (SU)	Accent (nicosulfuron)
			Imidazolinone (IMI)	Pursuit (imazéthapyr)
			Triazolopyrimidine	FirstRate (coransulam)
			Pyrimidinyl (thio) benzoate	Velocity (bispyribac)
			Sulfonyl-amino-carbonyl triazolinone	Vios G3 (en partie) (thiencarbazone)
3	K1	Inhibition de l'assemblage des microtubules	Dinitroaniline	Prowl (pendiméthaline)
			Benzamide	Kerb (pronamide)
			Acide benzoïque	Dacthal (chlorthal-diméthyle)
4	O	Substances de croissance agissant comme l'acide 3-indole-acétique (auxines synthétiques)	Acide phénoxyvarbonique	2,4-D
			Acide benzoïque	Banvel (dicamba)
			Acide pyridine-carbonique	Lontrel (clopyralide)
			Cyclopropylpyrimidine	Method (aminocyclopyrachlor)
5	C1	Inhibition du photosystème II	Triazine	AAtrex (atrazine)
			Triazinone	Sencor (métribuzine)
6	C3	Inhibition du photosystème II	Nitrile	Pardner (bromoxynil)
			Benzothiadiazinone	Basagran (bentazon)
7	C2	Inhibition du photosystème II	Urée	Linuron

Tableau 11. Classification des herbicides selon leur mode d'action *(suite)*

Groupe WSSA	Groupe HRAC	Mode d'action	Famille de produit chimique (groupe)	Exemple de produit commercial (matière active)
8	N	Inhibition de la synthèse des lipides - autre que l'inhibition de l'ACCase	Thiocarbamate	Eptam (EPTC)
			Benzofurane	Nortron (éthofumesate)
9	G	Inhibition de l'EPSP	Glycine	Roundup (glyphosate)
10	H	Inhibition de la glutamine synthétase	Acide phosphinique	Liberty (glufosinate)
13	F4	Inhibition de la DOXP synthase	Isoxazolidinone	Command ME (clomazone)
14	E	Inhibition de la protoporphyrinogène oxydase (PPO)	Diphényl-éther	Reflex (fomesafène)
			Phénylpyrazole	Blackhawk (en partie) (pyraflufen-éthyl)
			N-phénylphthalimide	Valtera (flumioxazine)
			Triazolinone	Authority (sulfentrazone)
15	K	Inhibition de la synthèse des acides gras à très longue chaîne	Chloroacetamide	Dual (métolachlor)
			Acétamide	Devrinol (napropamide)
			Oxyacétamide	Define (flufenacet)
19	P	Inhibition du transport des auxines	Phthalamate semicarbazone	Distinct (en partie) (diflufenzopyr-Na)
21	L	Inhibition de la synthèse de la cellulose des parois cellulaires	Benzamide	Gallery (isoxaben)
29			Fluoroalkyltriazine	Allion (indaziflam)
22	D	Déviation des électrons au niveau du photosystème I	Bipyridylium	Reglone (diquat)
27	F2	Inhibition de la 4-hydroxyphénylpyruvate dioxygénase (HPPD)	Tricétone	Callisto (mésotrione)
			Isoxazole	Converge (isoxaflutole)
			Pyrazolone	Armezon (topramézone)

Dans l'ensemble, ces systèmes de classification sont très utiles aux producteurs et à toute personne travaillant dans le domaine de l'agriculture, mais il existe des cas où l'organisme nuisible est résistant à plusieurs groupes de pesticides. Dans de telles situations, l'utilité du système de classification est amoindri. C'est pourquoi il est important de souligner que ces systèmes de classification ne se veulent pas des systèmes de cotes de risque du développement de la résistance, mais bien des outils qui aident les producteurs et leurs conseillers à faire des choix de traitements judicieux qui tiennent compte des modes d'action des pesticides afin que les mélanges en cuve et l'alternance des matières actives se complètent.

4. Cadre de lutte intégrée qui comprend plusieurs cibles/modes d'action ou des méthodes qui retardent le développement de la résistance

- Considérer tous les pesticides offerts sur le marché, y compris ceux qui sont appliqués en présemis, en postlevée et post-récolte.
- Lire et suivre les directives indiquées sur les étiquettes de produits, notamment en ce qui a trait à la dose, à la période propice au traitement et à l'équipement de pulvérisation recommandé.
- Développer une connaissance approfondie des mauvaises herbes, des insectes et des agents pathogènes qui sont présents dans les champs des producteurs et dans les zones adjacentes non cultivées pour créer un programme de lutte adapté aux densités d'organismes nuisibles et aux seuils économiques.
- Considérer l'utilisation de variétés hâtives ou tolérantes aux organismes nuisibles pour minimiser le recours aux insecticides et aux fongicides.
- Utiliser la pleine dose recommandée pour tout pesticide. L'utilisation d'une dose faible sélectionne rapidement les populations possédant une tolérance moyenne. D'un autre côté, les doses trop fortes peuvent exercer une sélection de pression excessive.
- S'assurer que l'équipement de pulvérisation est bien entretenu. Les dilutions, les pressions de pulvérisation et les conditions environnementales recommandées doivent être respectées pour obtenir une couverture optimale.
- Suivre les recommandations de l'étiquette en matière d'alternance ou de séquence des groupes de modes d'action.
- Lorsque plusieurs traitements par saison de culture sont nécessaires, utiliser en alternance des produits ayant différents modes d'action.
- Lors d'un mélange en cuve, sélectionner des produits qui appartiennent à des groupes de mode d'action différents et utiliser préférablement la pleine dose pour tous les produits.
- Diversifier les méthodes de gestion de la résistance en employant des pratiques mécaniques, culturales et biologiques (voir la partie qui suit); les rotations et les mélanges de pesticides sont certes essentiels, mais il est inacceptable de se fier uniquement à cette méthode.
- Dans la mesure du possible, sélectionner des pesticides et d'autres méthodes de gestion des organismes nuisibles qui préservent les organismes bénéfiques.
- Lorsqu'un traitement n'est pas efficace, ne pas traiter de nouveau avec le même pesticide; traiter avec un pesticide d'un autre groupe pour lequel aucun cas de résistance n'a été observé dans la zone avoisinante.

- Effectuer une surveillance régulière dans les grandes zones agricoles pour dépister les cas de résistance et évaluer l'efficacité des traitements effectués.
- Éviter d'utiliser un produit pour lequel une résistance a été observée jusqu'à ce que la sensibilité soit revenue; cette approche est valable si des pesticides d'autres groupes sont efficaces contre l'organisme nuisible visé.
- Tenir des registres détaillés des fongicides, des insecticides et des herbicides utilisés dans les champs ou les serres pour chaque cycle de production.
- Les conseillers en cultures devraient bien connaître les recommandations actuelles en matière de lutte intégrée contre les mauvaises herbes, les insectes et les agents pathogènes.

DOMAINE DE COMPÉTENCE 2

Gestion de la résistance

1. Créer un plan de gestion de la résistance :

a) dépistage et évaluation avant et après le traitement;

b) identification;

c) méthodes de lutte :

i) biologique

ii) chimique

iii) culturale

iv) mécanique;

d) assainissement;

e) tenue de registres, évaluation et suivi.

a) Dépistage et évaluation avant et après le traitement

Le dépistage régulier des organismes nuisibles aide à établir un programme de gestion adapté à chaque champ. Le dépistage permet d'identifier les espèces d'organismes nuisibles présentes dans le champ, de noter l'endroit où les organismes nuisibles se trouvent et d'évaluer la sévérité de l'infestation.

Dépister tôt et souvent : En général, plus un organisme nuisible est à un stade de maturité avancé, plus il est difficile de le supprimer. Le dépistage devrait donc commencer tôt et être effectué régulièrement pendant la saison de croissance afin de détecter les mauvaises herbes ou les insectes lorsqu'ils sont jeunes ou au stade de larve. Les insecticides et les herbicides sont souvent plus efficaces lorsque les organismes nuisibles sont jeunes. Certaines mauvaises herbes difficiles à supprimer comme la vergerette du Canada ou l'amarante tuberculée doivent être traitées avant qu'elles atteignent 10 cm de hauteur afin de maximiser l'efficacité du traitement.

Méthodes de dépistage

Les méthodes de dépistage varient en fonction de la culture et des types d'organismes nuisibles. La partie 3 du *Ontario Certified Crop Advisor Study Guide* (en anglais) explique en détail comment effectuer le dépistage de différents organismes nuisibles (p. 121 à 128). D'autres ressources sont également utiles comme l'Integrated Weed Management (Resource Center (http://integratedweedmanagement.org) (en anglais seulement), le guide du MAAAR pour le dépistage des insectes dans la pomme de terre (http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/facts/potato_insects.htm) ainsi que celui pour le dépistage des insectes dans les vergers (http://www.omafra.gov.on.ca/IPM/french/apples/ipm-basics/how-to-scout.html).

Pour les **mauvaises herbes**, les champs devraient être dépistés avant les semis dans le but :

- de traiter les mauvaises herbes problématiques avant qu'elles ne deviennent trop grosses pour être supprimées avec des herbicides;
- d'évaluer la nécessité d'employer d'autres stratégies de gestion des mauvaises herbes avant les semis comme le travail du sol;
- d'assurer que les champs sont exempts de mauvaises herbes au moment des semis.

Les **insectes** et les **maladies** devraient être dépistés dans les champs Bt et non Bt (refuge) pour détecter tout signe d'activité trophique par les insectes cibles. Le dépistage dans les champs Bt et non Bt est crucial à tout plan de gestion de la résistance. Des scientifiques partout en Amérique du Nord estiment que la pyrale du maïs et la chrysomèle des racines du maïs pourraient devenir résistantes aux cultures Bt lorsque ces cultures sont produites continuellement. Il est également important de dépister les insectes et les maladies non contrôlées par le Bt, comme le ver fil-de-fer, le ver blanc, la mouche des semis, le carabe du maïs, les altises, les pucerons, les tétranyques ainsi que la pourriture de la tige et les maladies foliaires.

Le dépistage post-traitement est tout aussi important pour déterminer l'efficacité du traitement et décider si d'autres traitements sont nécessaires. Les mêmes méthodes de dépistage devraient être utilisées et les résultats devraient être comparés à ceux du dépistage effectué avant le traitement. Il ne faut jamais tenir pour acquis que le traitement a adéquatement supprimé l'organisme nuisible; c'est pourquoi le dépistage post-traitement est si important à tout plan de gestion de la résistance.

Dépister les organismes nuisibles résistants

En règle générale, le dépistage devrait viser toutes les espèces pour lesquelles des cas de résistance ont déjà été signalés en Ontario ou dans les provinces ou les états avoisinants. Pour les mauvaises herbes, le Tableau 1 fournit une liste de toutes les espèces résistantes en Ontario. Le site Web de l'International Survey of Herbicide Resistant Weeds (http://www.weedscience.org/default.aspx, en anglais seulement) fournit également une liste qui est régulièrement actualisée. Des malherbologistes de plus de 80 pays collaborent à ce site, lequel répertorie tous les nouveaux cas de résistance aux herbicides. On peut y effectuer des recherches par pays : en cliquant sur Canada, les utilisateurs peuvent trouver rapidement des informations détaillées sur les nouveaux cas de résistance au pays et en Ontario. Le site a été créé pour assurer l'exactitude scientifique dans le signalement des mauvaises herbes résistantes à l'échelle mondiale et il est financé par l'HRAC et CropLife International.

En cas d'échec d'un traitement pesticide

Le constat de l'échec d'un traitement pesticide lors du dépistage post-traitement n'implique pas nécessairement que l'organisme nuisible est résistant. La résistance génétique doit être confirmée par des tests en laboratoire; toutefois, les signes suivants peuvent être indicateur d'une résistance.

- La zone d'infestation ou d'infection d'une seule espèce d'organisme nuisible s'est agrandie.
- Le traitement pesticide n'a pas supprimé une espèce d'organisme nuisible qu'il supprimait bien dans le passé, particulièrement si le traitement a été efficace contre les autres espèces ciblées.
- Une seule espèce d'organisme nuisible ciblée a survécu au traitement (c'est-à-dire une espèce a recommencé à croître et à adopter des comportements normaux alors que les autres espèces ont été supprimées).

b) Identification

Pour confirmer une résistance soupçonnée, l'historique du champ doit être minutieusement analysé. Les questions présentées à la partie I.2.3 (Processus d'identification de la résistance aux pesticides) aideront le conseiller et le producteur à déterminer s'il s'agit effectivement d'un cas de résistance et si des échantillons devraient être envoyés à un laboratoire approprié à des fins d'analyse et de confirmation.

c) Méthodes de lutte

La combinaison de plusieurs stratégies de lutte pour gérer la résistance et prévenir de nouveaux cas donne des résultats supérieurs et plus durables que l'utilisation d'une seule stratégie. Un programme de gestion de la résistance devrait comprendre des méthodes chimiques, mécaniques, culturales et biologiques. Il est essentiel de ne pas se fier excessivement à une seule méthode. Une approche globale recourant aux méthodes suivantes aidera à réduire la sélection de pression et à éliminer la dominance des organismes nuisibles résistants.

i) Lutte biologique :

La lutte biologique utilise les ennemis naturels pour supprimer les organismes nuisibles. Les organismes bénéfiques sont divisés en trois groupes :

Les prédateurs : acariens prédateurs, punaises, coléoptères et cécidomyies

Les prédateurs : guêpes et mouches parasitiques

Les microorganismes : nématodes, champignons, bactéries et virus

Dans la mesure du possible, les recommandations suivantes devraient être suivies lorsque des organismes bénéfiques sont utilisés :

- Connaître la biologie des organismes nuisibles et celle de leurs ennemis naturels.
- Introduire les organismes bénéfiques le plus tôt possible pour maximiser la suppression; en les introduisant lorsque l'infestation est encore relativement faible, l'utilisation de pesticides peut être minimisée, ce qui favorise l'établissement des organismes bénéfiques dans la culture.
- Utiliser du matériel de première qualité acheté d'un fournisseur reconnu qui garantit la qualité et la quantité du matériel.
- Entreposer les organismes bénéfiques à la température recommandée et les utiliser avant la date de péremption.
- Aider les ennemis naturels à coloniser la culture en créant des conditions optimales à leur croissance.
- Tirer profit des plantes de refuge, le cas échéant, puisqu'elles peuvent être une bonne source de prédateurs et de parasites.
- Limiter les travaux effectués dans la culture (exemples : récolte, taille, pulvérisation) qui peuvent réduire la population d'organismes bénéfiques ou d'ennemis naturels.
- En ce qui a trait aux mauvaises herbes, faire pâturer les animaux après la récolte pour réduire la banque de graines de mauvaises herbes dans le sol.

ii) Lutte chimique :

Tout traitement pesticide fait partie de la lutte chimique. Afin de gérer la résistance, les pesticides devraient être utilisés comme mesure corrective dans le cadre d'une approche à volets multiples et non pas comme seule méthode de lutte. Dans la mesure du possible, les recommandations suivantes devraient être suivies lorsque les pesticides sont utilisés dans un plan de gestion de la résistance :

- Toujours privilégier un pesticide sélectif. La plupart des pesticides sélectifs sont formulés pour être non toxiques ou très peu toxiques pour les organismes bénéfiques. Ils ne nuisent généralement pas à leur développement ou à leur reproduction.

- Dans la mesure du possible, choisir une technique d'application qui ne nuira pas trop aux populations d'organismes bénéfiques. Même si un pesticide n'est pas sécuritaire pour les organismes bénéfiques, la technique d'application peut grandement réduire les effets négatifs. Le traitement par système de goutte-à-goutte, le traitement des semences et le traitement des jeunes plants seulement sont des exemples de techniques d'application moins dommageables aux organismes bénéfiques.
- Si possible, effectuer des traitements ponctuels, des traitements tampons ou des traitements en bandes pour mieux cibler les populations d'organismes nuisibles ou la zone où un traitement est nécessaire.
- Selectionner un pesticide non résiduaire. Certains pesticides sont très toxiques au moment du traitement, mais ils ne le demeurent pas longtemps, ce qui permet aux organismes bénéfiques ou aux ennemis naturels de proliférer peu après le traitement. En revanche, les pesticides résiduaires nuisent au développement des organismes bénéfiques et des ennemis naturels pendant une longue période.
- S'il est nécessaire d'utiliser un pesticide résiduaire, éviter de l'appliquer juste avant d'utiliser un moyen de lutte biologique.
- Garder à l'esprit que les pesticides et leurs vapeurs peuvent être projetés hors de la zone ciblée et atteindre un autre champ sous contrôle biologique.

iii) Lutte culturale :

La lutte culturale comprend les pratiques agricoles qui protègent les cultures en perturbant l'environnement des organismes nuisibles ou en empêchant le déplacement des organismes nuisibles. Les bonnes pratiques culturales visent à accroître la résistance de la culture aux organismes nuisibles ou à rendre la culture plus concurrentielle que les mauvaises herbes. Les recommandations suivantes aident à atteindre cet objectif :

- Optimiser la croissance de la culture : la culture résiste mieux aux dommages d'organismes nuisibles si la fertilisation, l'irrigation, le pH, la conductivité électrique, les conditions climatiques et d'autres facteurs sont optimaux à la croissance. Les plantes sont plus sensibles aux maladies et concurrencent moins bien les mauvaises herbes lorsqu'elles subissent un stress. Elles deviennent plus vulnérables lorsque les facteurs de croissance ne sont pas optimaux.
- Si possible, choisir des variétés résistantes (ou tolérantes) aux attaques d'organismes nuisibles.
- Si une variété sensible est utilisée, la cultiver préférablement à une période où le risque d'infestation est plus faible.
- Modifier la date de semis, l'espacement entre les rangs et le moment de la récolte de façon à perturber le cycle de croissance des mauvaises herbes ou le cycle de reproduction des autres organismes nuisibles. Accroître la densité de population est l'un des moyens de rendre la culture plus concurrentielle par rapport aux mauvaises herbes; toutefois, une culture trop dense tend à produire des plantes frêles qui sont plus sensibles aux organismes nuisibles et aux maladies.
- Acheter des semences certifiées, exemptes de graines de mauvaises herbes.
- Semer des cultures de couverture pour étouffer les mauvaises herbes et encourager les organismes bénéfiques.
- Récolter les cultures horticoles à intervalles réguliers pour éviter d'affaiblir les plantes et de les rendre ainsi plus sensibles aux organismes nuisibles.
- Effectuer des rotations de cultures. Lorsque des cultures sensibles à certains organismes nuisibles sont produites en rotation avec des cultures qui sont sensibles à d'autres organismes nuisibles, les niveaux d'infestation demeurent relativement faibles.

iv) Lutte physique (y compris la lutte mécanique) :

Les méthodes de lutte fondées sur la physique (c'est-à-dire les méthodes qui dépendent de l'énergie et de forces) sont parmi les plus anciennes méthodes utilisées pour supprimer les organismes nuisibles. Elles comprennent la transformation d'énergie (chaleur), les obstacles au mouvement (pièges, paillis) ainsi que l'utilisation de machines et d'outils (lutte mécanique). Plusieurs méthodes physiques peuvent être utilisées conjointement pour éliminer les organismes nuisibles; le choix dépend de la culture, de l'environnement, des conditions géographiques et des coûts. La lutte mécanique consiste à l'utilisation de dispositifs ou de machines pour supprimer les organismes nuisibles ou modifier leur environnement. Les pièges, les écrans, les barrières, les clôtures, les filets sont des exemples de dispositifs utilisés pour prévenir l'activité des organismes nuisibles ou les éliminer d'un endroit.

- **Piégeage d'insectes :** Il est possible de piéger les insectes volants à l'aide de pièges collants, de pièges sexuels et de plantes-pièges afin de réduire le niveau d'infestation et le taux de reproduction. Des filets spéciaux permettent également de piéger plusieurs types d'insectes, notamment les pucerons, les papillons, les punaises, les mouches, les thrips, etc.
- **Solarisation :** Cette méthode permet de supprimer les mauvaises herbes, les insectes, les nématodes et les champignons. Selon l'Université de la Californie (Division de l'agriculture et des ressources naturelles), cette méthode non chimique de lutte contre les organismes nuisibles du sol consiste à étaler des bâches en plastique sur le sol pendant des périodes de chaleur. Les bâches emprisonnent l'énergie rayonnante du soleil dans le sol et réchauffent les horizons de surface. Effectuée pendant les mois chauds d'été, la solarisation permet de chauffer suffisamment le sol pour tuer de nombreux agents pathogènes et nématodes ainsi que les graines et plantules de plusieurs espèces de mauvaises herbes. La solarisation ne laisse aucun résidu toxique et peut être employée aussi bien à petite échelle qu'à grande échelle. Une couverture en bande est généralement plus pratique et économique qu'une pleine couverture, tout en étant efficace contre les mauvaises herbes. Pour ce qui est des nématodes et des agents pathogènes, une pleine couverture est souvent nécessaire en cas de forte infestation.
- **Élimination du matériel végétal infesté et des mauvaises herbes :** Cette méthode consiste à enlever manuellement les plants malades et à sarcler ou travailler le sol pour éliminer les plantules de mauvaises herbes. Les plants éliminés sont placés dans des sacs, puis détruits.
- **Flammage ou incinération :** Ces méthodes de lutte éliminent les organismes nuisibles ou leurs sites de reproduction. Les insectes qui passent l'hiver cachés dans les graminées ou le chaume des céréales peuvent être éliminés par ces méthodes avant l'ensemencement d'une nouvelle culture.
- **Pasteurisation du sol, du terreau ou du substrat de croissance :** Cette méthode utilisée en serriculture élimine les maladies et les insectes du sol.
- **Autres méthodes physiques de lutte :** Elles comprennent les nouvelles méthodes, notamment les destructeurs de semences, le désherbage robotique, le désherbage de précision entre les rangs et les sarcleurs équipés d'outils pour le désherbage sur le rang.

d) Assainissement :

L'assainissement des cultures vise à prévenir ou à éliminer les sources d'organismes nuisibles et les vecteurs de maladies. Un bon assainissement réduit les populations d'organismes nuisibles, ce qui diminue la nécessité de recourir aux pesticides, lesquels accroissent la pression de sélection. De plus, l'assainissement accroît l'efficacité de la lutte biologique.

Il est commun qu'un organisme nuisible problématique ou résistant envahisse un champ avoisinant en raison d'un

assainissement déficient. Le déplacement de l'équipement agricole d'un champ à l'autre peut être une source constante de contamination. L'équipement agricole peut disperser très efficacement les graines de mauvaises herbes et les agents pathogènes, à l'insu des ouvriers. Les organismes nuisibles peuvent être déplacés sur de longues distances par l'équipement souillé et infester ainsi d'autres champs.

Voici quelques conseils pour aider les producteurs à améliorer l'assainissement :

Les cultures :

- Commencer avec une zone de croissance propre. Le sol ou tout autre substrat comme les vergers ne devraient pas être fortement infestés par un organisme nuisible particulier. C'est pour cette raison que les rotations de culture et d'autres méthodes de lutte sont fortement recommandées.
- Acheter du matériel végétal propre. En grande culture comme en horticulture, acheter des semences ou des transplants qui sont exempts de graines de mauvaises herbes ou d'autres organismes nuisibles.
- Dépister la culture régulièrement durant tout le cycle de croissance pour détecter toute population d'organismes nuisibles qui pourrait entraîner une grave infestation.
- Désherber la culture. En plus de réduire le rendement, certaines mauvaises herbes peuvent soutenir des organismes nuisibles et permettent à une infestation d'être transmise à une nouvelle culture.
- Dans la mesure du possible, éviter tout dommage à la culture principale. Les lésions constituent des points d'entrée faciles pour certaines infestations.
- Dans la mesure du possible, éliminer et détruire les résidus de culture. Ne pas accumuler des tas de résidus ou d'autres sources potentielles d'infestation.
- Organiser la main-d'œuvre de façon à ce que les employés et l'équipement passent d'une zone ou d'un champ propre vers les zones infestées.

L'équipement :

Divers types d'équipements peuvent entrer en contact avec de la terre, des semences ou des résidus de cultures porteurs de graines de mauvaises herbes, d'insectes, de champignons et d'autres agents pathogènes.

ÉQUIPEMENTS AGRICOLES SUSCEPTIBLES D'ÊTRE CONTAMINÉS AVEC DES ORGANISMES NUISIBLES

- **Équipement de travail du sol (charrues, cultivateurs, sous-soleuses, herses, rouleaux)**
- **Épandeurs d'engrais et pulvérisateurs de pesticides**
- **Semoirs et planteuses**
- **Tracteurs, camions de grains, camionnettes, voitures, véhicules tout-terrain**
- **Andaineurs, moissonneuses-batteuses**
- **Équipement de manutention du grain (vis à grain, séchoirs)**
- **Équipement de récolte des fourrages**
- **Autres équipements divers pour échantillonner le sol, creuser des fossés, débroussailler, etc.**

- Enlever la terre et les débris végétaux de tout équipement en grattant, en brossant ou en faisant tomber les mottes.
- La terre résiduelle ou les petits débris peuvent être nettoyés à la pression, à la vapeur ou l'air comprimé.
- Pour aider à tuer les agents pathogènes, pulvériser une solution désinfectante (javellisant dilué) sur les surfaces nettoyées.
- De même, nettoyer les bottes, les chaussures et les gants puisqu'ils peuvent également être une importante source de contamination.

e) Présentation de rapports, évaluation et suivi

Les conseillers en cultures agréés devraient informer leur employeur et les producteurs agricoles de leurs constats et créer le plan de gestion de la résistance le plus approprié afin de minimiser tout risque additionnel. La confirmation de cas de résistance devrait être traitée dans la plus stricte confidentialité. Après la mise en œuvre du plan de gestion, le conseiller devrait effectuer un suivi auprès du producteur pour s'assurer que ses recommandations sont suivies et qu'elles donnent les résultats escomptés. Le conseiller devrait également s'assurer que tout changement aux conditions locales, régionales ou réglementaires qui pourrait diminuer l'efficacité du plan soit pris en considération et que des mesures alternatives soient mises en place, si nécessaire, après en avoir discuté avec le producteur. Le plan de gestion devrait être évalué au cours des mois et même des années qui suivent pour s'assurer que les conditions à l'origine du problème ne se produisent pas à nouveau. Les évaluations devraient être documentées, et les plans de gestion de la résistance, mis à jour, au besoin. La gestion de la résistance devrait être une approche dynamique pour qu'elle soit efficace et pratique pour le producteur.

2. Le rôle du contexte et des besoins locaux dans l'élaboration de plan de gestion de la résistance

Homologation des pesticides

Les gouvernements ont le droit de restreindre l'utilisation des pesticides, ce qui peut avoir un impact sur les plans de gestion de la résistance. Les principaux impacts sont le retrait de produits et les restrictions placées sur certains produits. Ces décisions sont généralement du ressort fédéral, l'ARLA étant responsable de l'homologation des pesticides au Canada. Toutefois, les gouvernements provinciaux et les administrations municipales ou régionales peuvent émettre des restrictions sur l'utilisation de certains produits. En règle générale, ces restrictions sont justifiées par les risques qu'ils posent à l'environnement ou à la santé humaine. Elles peuvent toutefois avoir des répercussions considérables sur la gestion de la résistance en limitant l'offre de produits, restreignant ainsi les moyens chimiques de gérer les organismes nuisibles.

Zones tampons et bandes de végétation

Les exigences en matière de zones tampons pour les traitements pesticides visent à limiter l'impact des pesticides sur les habitats sensibles comme les cours d'eau. La préservation de zones tampons peut avoir un impact sur la gestion de la résistance. Les zones non traitées abritent parfois des mauvaises herbes ou des insectes nuisibles qui peuvent infester les champs à un moment ultérieur. Certains spéculent que la présence de zones tampons peut accélérer le développement de la résistance. Bien que les zones tampons ne soient pas traitées directement, il est possible que les pesticides puissent les atteindre. Même sous des conditions idéales de traitement, il y a toujours une bande entre la zone traitée et la zone tampon où la dose de pesticide passe graduellement d'une pleine dose à une dose nulle. À l'intérieur de cette bande, les mauvaises herbes, les insectes et les maladies sont exposés à des doses inférieures aux doses recommandées, créant une pression de sélection en faveur des gènes mineurs de résistance et de la résistance polygénique (se référer à la partie I). En se reproduisant, les espèces allogames échangent ces gènes mineurs et leurs progénitures s'en trouvent d'autant plus résistantes jusqu'au point où elles peuvent résister à une pleine dose. En Ontario, certains ont émis l'hypothèse que la grande herbe à poux, une plante très commune dans les fossés, a développé une résistance au glyphosate en étant exposée à des doses sublétales. Les individus porteurs de gènes conférant une faible résistance se sont reproduits entre eux, ce qui a produit des plantes complètement résistantes, lesquelles ont pu survivre et envahir les champs.

Communauté

Le fait d'être au courant de cas de résistance dans la communauté peut influencer les décisions des producteurs et, jusqu'à un certain point, celles des conseillers. Par exemple, un producteur sera plus enclin à modifier ses pratiques et à adopter des mesures préventives suivant la confirmation de cas de résistances dans les champs de ses voisins puisque cela lui sert constamment de rappel des conséquences de la résistance.

3. Effets des pratiques de gestion optimales de la résistance sur la gestion responsable et la production en ce qui concerne les facteurs suivants :

a) Les pratiques de conservation du sol;

b) Les pratiques de protection des eaux superficielles et souterraines;

c) Les espèces en péril;

d) La réduction ou l'atténuation de l'impact sur les pollinisateurs et organismes bénéfiques non ciblés.

a) Les pratiques de conservation du sol

Les pratiques de conservation du sol visent à minimiser la dégradation du sol et à accroître la teneur en matière organique du sol. Les principales pratiques utilisées sont la rotation des cultures, le paillage, les cultures de couverture et le travail réduit du sol.

Les rotations, le paillage et les cultures de couverture augmentent la teneur en matière organique du sol, améliorent la structure du sol et accroissent la profondeur de l'enracinement et la biodiversité des insectes des microorganismes du sol. Ces avantages vont de pair avec les pratiques de gestion optimales de la résistance en favorisant la santé de la culture et la biodiversité afin d'éviter des infestations et, par conséquent, l'utilisation excessive de pesticides.

Le travail réduit du sol est une pratique très encouragée pour minimiser l'érosion et la compaction du sol. Le travail du sol, qu'il consiste au labour à l'aide d'une charrue à socs et versoirs ou à un travail plus léger effectué par un cultivateur à disques ou à éperons, remplit plusieurs fonctions, y compris le désherbage. Bien que le travail réduit du sol soit bénéfique pour le sol, il comporte aussi des inconvénients, notamment son impact sur les populations de mauvaises herbes. Le semis direct en sol intact ainsi que les techniques de travail réduit du sol qui laissent au moins 30 % des résidus de culture sont acceptables pour les producteurs seulement s'ils disposent d'herbicides très efficaces. La réduction considérable du travail du sol nécessite une solution de rechange pour lutter contre les mauvaises herbes et cette solution a toujours consisté à l'utilisation d'herbicides. Pour que les systèmes de production qui conservent le sol soient efficaces, ils nécessitent l'application d'un herbicide de contact non sélectif, notamment le glyphosate, ainsi que l'application d'herbicides sélectifs dans la culture. Ces outils procurent un excellent désherbage tout en conservant le sol; toutefois, s'ils sont mal utilisés, ils peuvent exercer une pression de sélection sur les mauvaises herbes résistantes. Comme les cas de résistance aux herbicides n'ont pas cessé d'augmenter au cours des dernières décennies, plusieurs solutions de rechange ont été étudiées. Afin de réduire la dépendance aux herbicides et de diminuer la pression de sélection qu'imposent les herbicides, certaines agronomes proposent un retour au travail du sol pour supprimer les mauvaises herbes résistantes et prévenir leur sélection. Cette suggestion laisse les spécialistes en science du sol sceptiques, mais la réalité est telle qu'il est important que les conseillers en cultures explorent toutes les solutions possibles pour réduire la pression de sélection sans compromettre les gains réalisés en conservation du sol. L'une des méthodes permettant de réduire la dépendance aux herbicides tout en conservant le sol consiste à pratiquer un travail réduit du sol

qui laisse suffisamment de résidus au sol et à planter une culture de couverture qui réduit la croissance des mauvaises herbes. Pour obtenir des précisions à ce sujet, consulter http://www.cast-science.org/download.cfm?PublicationID =274097&File=1e30c0f2e3b1b907dc442c724c53e2e5f1f5TR ou http://www.cast-science.org/download.cfm? PublicationID= http://www.cast-science.org/download.cfm? PublicationID=52723&File=7F1320FC85FB7 http://www.cast-science.org/download.cfm? PublicationID=52723&File =7F1320FC85FB7 62965336E0A16948F7C.cfusion (en anglais seulement).

b) Les pratiques de protection des eaux superficielles et souterraines

Les pesticides peuvent atteindre les eaux superficielles et souterraines par divers moyens :

- **Eau de ruissellement :** Les pesticides solubles se dissolvent dans l'eau alors que les pesticides insolubles adsorbés aux particules de sol sont transportés en suspension dans l'eau. Une fois dans l'eau de ruissellement, les pesticides peuvent rapidement atteindre et contaminer des étangs, des lacs et des rivières.
- **Érosion :** Des pluies abondantes ou une irrigation excessive peuvent entraîner le déplacement de particules de sol. Si des molécules de pesticide sont adsorbées aux particules de sol, le pesticide est lui aussi transporté ailleurs et peut contaminer les cours d'eau.
- **Lessivage :** le mouvement des pesticides dans le sol dépend des facteurs suivants :
  - la solubilité du pesticide dans l'eau
  - l'abondance de pluies ou de l'irrigation
  - la texture du sol
  - la teneur en matière organique du sol
  - le potentiel des molécules de pesticide d'être adsorbées aux particules de sol
  - la quantité de pesticide appliquée

Le risque de contamination de l'eau souterraine est beaucoup plus grand lorsqu'on applique une dose élevée d'un pesticide très soluble ayant un faible potentiel d'être adsorbé aux particules de sol dans un champ où le sol est grossier et a une faible teneur en matière organique, particulièrement pendant des périodes de pluies abondantes. À l'inverse, le risque de lessivage est faible lorsque le pesticide est appliqué à faible dose dans un sol à texture fine ou à teneur élevée en matière organique. La dégradation du pesticide dans le sol par les microorganismes diminue également le risque de lessivage dans la nappe phréatique.

De nombreuses pratiques de gestion optimales de la résistance peuvent avoir un impact positif sur la protection de la qualité de l'eau :

- La réduction globale de l'utilisation de pesticides pour réduire la pression de sélection diminue également le risque de contamination des eaux superficielles ou souterraines par le ruissellement, l'érosion et le lessivage.
- Les pratiques culturales qui améliorent la santé du sol et la biodiversité, notamment le travail réduit du sol et les cultures de couverture, accélèrent également la dégradation des pesticides en raison de l'activité microbienne accrue. Ces pratiques peuvent également prévenir le déplacement des pesticides par le ruissellement ou l'érosion.

Lors de la prise de décision entourant les pesticides à utiliser en rotation, les producteurs devraient privilégier les produits qui ont le moins grand impact environnemental sans toutefois compromettre l'efficacité des traitements. Le quotient d'impact environnemental (EIQ https://nysipm.cornell.edu/eiq, en anglais seulement) permet de comparer l'impact environnemental des produits. De plus amples renseignements se trouvent sur le site Web https://nysipm.cornell.edu/eiq.

c) Les espèces en péril

Les pratiques de gestions optimales de la résistance peuvent avoir des effets positifs ou négatifs sur les espèces en péril.

Il est attendu que les pratiques de gestion optimales qui entraînent une réduction de l'utilisation de pesticides n'aient aucun effet négatif sur les espèces en péril. Par contre, si un pesticide est remplacé par un pesticide plus toxique pour les espèces en péril, un effet négatif est possible. Comme il a déjà été mentionné, un pesticide à toxicité élevée qui se dégrade rapidement peut être avantageux comparativement à un pesticide à faible toxicité qui persiste plus longtemps dans l'environnement. Le conseiller en cultures devrait toujours soupeser les avantages et les inconvénients de l'utilisation d'un pesticide moins toxique en fonction du contexte particulier.

d) La réduction ou l'atténuation de l'impact sur les pollinisateurs et organismes bénéfiques non ciblés

Les pratiques de gestion optimales de la résistance peuvent avoir des effets positifs ou négatifs sur les pollinisateurs et les organismes bénéfiques.

Il est attendu que les pratiques de gestion optimales qui entraînent une réduction de l'utilisation de pesticides n'aient aucun effet négatif sur les pollinisateurs et les organismes bénéfiques. Par contre, si un pesticide pour lequel une résistance a été développée est remplacé par un pesticide plus toxique pour les pollinisateurs et les organismes bénéfiques, on peut s'attendre à un effet négatif. Encore une fois, un pesticide à toxicité élevée qui se dégrade rapidement peut être avantageux comparativement à un pesticide à faible toxicité qui persiste plus longtemps dans l'environnement. Le conseiller en cultures devrait toujours soupeser les avantages et les inconvénients de l'utilisation d'un pesticide moins toxique en fonction du contexte particulier.

En outre, il est possible que le producteur veuille maintenir la biodiversité dans les bordures de champ, les bandes tampons, les fossés, etc. Bien que cette pratique soit louable et favorable à de nombreuses espèces, y compris les pollinisateurs et les organismes bénéfiques, elle nécessite un dépistage régulier. Les bandes tampons peuvent devenir infestées d'espèces résistantes et servir de point d'entrée à des organismes nuisibles (insectes, spores, graines), lesquels peuvent alors causer une infestation dans les champs adjacents et s'étendre ensuite au-delà de ces champs. Le conseiller en cultures devrait évaluer ces possibilités en fonction de la situation particulière du producteur avant d'émettre des recommandations.

DOMAINE DE COMPÉTENCE III

COMMUNICATION PROFESSIONNELLE ET PARTAGE DE L'INFORMATION

DOMAINE DE COMPÉTENCE 1

COMMUNICATION ET GESTION DE LA RÉSISTANCE

1. Importance de reconnaître et déclarer les cas de résistance et procédure à suivre pour le faire

Le nombre d'espèces d'organismes nuisibles résistantes a crû considérablement au cours des 20 dernières années partout dans le monde et de nouveaux cas sont régulièrement signalés. La résistance change la donne pour le secteur agricole puisqu'elle représente une menace aux pratiques agricoles actuelles. Les intervenants du secteur agricole doivent la confronter avec beaucoup de détermination. Il est crucial de déclarer les nouveaux cas de résistance pour que les gouvernements, les entreprises et les agriculteurs puissent être avisés des changements qui s'opèrent dans leur région ou province. Des pratiques de gestion optimales peuvent alors être mises en œuvre plus efficacement afin d'affronter la situation le plus tôt possible et de s'assurer qu'elle demeure gérable. La déclaration des nouveaux cas en temps opportun permet aux autorités réglementaires et aux organismes de financement d'adapter leurs politiques et leurs priorités de financement, ce qui devrait aider à résoudre le problème plus rapidement. Il est crucial tant pour les producteurs que pour l'environnement et la société de détecter et de signaler les cas de résistance afin de prévenir l'utilisation excessive de pesticides inefficaces. La partie I.2 – Reconnaître la résistance – explique le processus d'identification et de déclaration des cas de résistance. Le conseiller en cultures agréé joue un rôle important dans la communication de toute nouvelle information sur la gestion de la résistance puisqu'il est souvent le principal point de contact entre les producteurs et les gouvernements et organismes publics et privés.

2. Avantages des réseaux actifs, des systèmes d'information actualisés et des autres moyens de communication

On n'insistera jamais assez sur l'utilité d'avoir accès à des réseaux actifs, à des systèmes d'information actualisés et aux sites Web publics. Il en va de même pour la participation aux ateliers organisés par l'industrie et les gouvernements à l'intention des producteurs et des conseillers. La détection d'un cas de résistance dans le champ d'un producteur n'implique pas que le producteur est incompétent.

Le problème de la résistance aux pesticides et sa gestion est complexe; il est important d'en prendre conscience. Plus les producteurs se renseignent en participant à des ateliers ou des événements de l'industrie ou en consultant les sites Web maintenus par le MAAARO, le FRAC, la WSSA, le HRAC, l'IRAC ou l'ARLA, par exemple, plus vite ils réaliseront que la résistance aux pesticides n'est pas près de disparaître. Il s'agit indéniablement d'un problème que les producteurs devront affronter pendant de nombreuses années à venir. Pour les conseillers en cultures, les principaux avantages d'avoir accès à une grande quantité d'informations sont les suivants :

- faire connaître la résistance aux pesticides aux différentes parties intéressées;
- être au courant des nouveaux cas de résistance;
- apprendre comment gérer ou retarder la résistance;
- être conscient des facteurs socioéconomiques de la gestion de la résistance;
- projeter une image positive du secteur agroalimentaire.

3. Rôle des organismes publics, des organismes sans but lucratif et du secteur privé dans la promotion d'une gestion durable de la résistance s'inscrivant dans le cadre de la lutte intégrée

Le nombre croissant de cas de résistance d'organismes nuisibles est un problème très important pour tous les intervenants du secteur agricole, y compris les producteurs, les propriétaires fonciers, les conseillers en cultures, les chercheurs, les organismes de réglementation des pesticides et les fabricants de pesticides. La résistance menace les systèmes de production agricole dans le monde entier. Étant donné que les pesticides permettent de protéger efficacement les cultures, il est impératif de protéger leur efficacité à long terme afin d'éviter une hausse des coûts de production des aliments, ce qui aurait un impact négatif sur les consommateurs. La résistance est un problème coûteux : lorsqu'un cas est détecté, d'autres moyens de lutte doivent être adoptés et ces moyens sont souvent plus dispendieux et moins efficaces. Ces répercussions sont des motifs valables de promouvoir des mesures de prévention et de gestion de la résistance qui sont durables. Tous les intervenants du secteur agricole ont la responsabilité de sensibiliser les producteurs au problème de la résistance et de leur faire comprendre que ce problème ne disparaîtra pas de lui-même.

De nombreux producteurs n'ont toujours pas adopté de plan de gestion de la résistance. Voici les principales raisons de leur inaction :

- manque d'informations;
- plans de gestion qui semblent trop complexes;
- manque de temps;
- coûts prohibitifs.

La majorité des producteurs hésitent à mettre en œuvre un plan de gestion de la résistance pour des raisons économiques, particulièrement s'ils doutent des avantages futurs que comporte un tel plan. Les intervenants doivent travailler de concert pour transmettre de façon claire et cohérente l'importance d'agir de façon proactive afin de prévenir la résistance et d'éviter d'avoir éventuellement un problème beaucoup plus important, c'est-à-dire celui d'éliminer des organismes résistants une fois qu'ils se sont multipliés et dispersés. La gestion réactive est beaucoup plus coûteuse sur les plans financier et social que la gestion proactive ou la prévention.

4. Importance de communiquer l'effet des moyens de lutte intégrée sur la résistance aux groupes suivants :

a) le public;

b) les propriétaires fonciers;

c) les producteurs;

d) les médias.

a) Le public

Au cours des dernières années, le grand public est devenu plus exigeant, sinon méfiant, du secteur agricole. Les gens sont préoccupés entre autres par l'utilisation des pesticides, la durabilité et d'autres impacts environnementaux de l'agriculture. En encourageant une gestion durable de la résistance, les conseillers en cultures peuvent contribuer à promouvoir un secteur agricole responsable et réceptif aux appréhensions du grand public.

b) Les propriétaires fonciers

Les propriétaires fonciers qui louent leurs terres peuvent devenir méfiants lorsque des organismes nuisibles résistants apparaissent dans leurs champs, car cela peut indiquer que le locataire ne prend pas bien soin des terres. Lorsque les problèmes de résistance deviennent impossibles à gérer, les terres peuvent perdre de leur valeur puisqu'elles sont plus difficiles à cultiver et qu'elles risquent de contaminer les champs avoisinants (par l'équipement, le vent, etc.). Les producteurs ne seront pas disposés à payer un prix élevé pour louer un champ infesté d'une mauvaise herbe résistante à plusieurs herbicides puisque la gestion sera coûteuse. Il est avantageux de communiquer et de promouvoir les pratiques de lutte intégrée qui préviennent le développement de la résistance aux propriétaires fonciers puisque cela favorisera le maintien de la valeur des terres ainsi que des pratiques durables et bénéfiques à l'environnement.

c) Les producteurs

Lorsque les producteurs découvrent un cas de résistance, ils cherchent initialement la solution la plus simple, laquelle consiste souvent à effectuer un autre traitement avec un produit différent. Bien qu'un tel traitement puisse être efficace à court terme, il peut également compliquer les choses en entraînant le développement d'une résistance à plusieurs herbicides à long terme. Il est crucial d'expliquer aux producteurs l'importance d'une gestion intégrée afin d'aider à soutenir le secteur agricole.

d) Les médias

Les médias jouent un rôle essentiel dans la sensibilisation aux avantages des pratiques de gestion optimales et de l'approche proactive adoptée par divers intervenants pour prévenir et gérer la résistance. Plusieurs médias peuvent diffuser ce genre d'informations. Les médias sociaux comme Facebook, Twitter et Instagram fournissent rapidement des réponses aux questions et permettent aux conseillers en cultures d'obtenir de la rétroaction concernant des problèmes immédiats. Les médias sociaux peuvent également diriger les usagers vers des sources qui fournissent des informations permanentes, précises et stables comme des sites Web et des blogues spécialisés. Bon nombre de médias spécialisés dans l'agriculture transmettent des informations destinées aux producteurs, aux conseillers, aux associations de producteurs, aux représentants des gouvernements et aux partenaires de l'industrie. Les médias ont le pouvoir d'orienter l'opinion publique et, par conséquent, d'influencer les décisions des décideurs en ce qui a trait à la réglementation et au financement, ce qui peut avoir un impact positif ou négatif sur le secteur agricole.