



Code international de conduite pour la distribution et l'utilisation des pesticides

Directives pour la prévention et la gestion de la résistance aux pesticides



Septembre 2012

Le Programme inter-organisation pour une gestion rationnelle des produits chimiques (IOMC) a été conçu en 1995 selon les recommandations effectuées par la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement, afin de renforcer la collaboration et accroître la coopération internationale dans le domaine de la sécurité chimique. Les organisations participantes sont l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), l'Organisation internationale du Travail (OIT), l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), l'Organisation des Nations Unies pour le développement industriel (ONUDI), l'Institut des Nations Unies pour la formation et la recherche (UNITAR) et l'Organisation mondiale de la santé (OMS). La Banque mondiale et le Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD) y participent en tant qu'observateurs. L'objectif de l'IOMC est d'encourager la coordination des politiques et des activités menées par les organisations participantes, en collaboration ou individuellement, afin de parvenir à une gestion rationnelle des produits chimiques en faveur de la santé humaine et de l'environnement.

Cette publication a été réalisée dans le contexte de l'IOMC. Son contenu ne reflète pas obligatoirement les opinions ou les politiques formulées par les différentes organisations adhérentes à l'IOMC.

Les appellations employées dans ce produit d'information et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) aucune prise de position quant au statut juridique ou au stade de développement des pays, territoires, villes ou zones ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites. La mention de sociétés déterminées ou de produits de fabricants, qu'ils soient ou non brevetés, n'entraîne, de la part de la FAO, aucune approbation ou recommandation desdits produits de préférence à d'autres de nature analogue qui ne sont pas cités.

Les opinions exprimées dans ce produit d'information sont celles du/des auteur(s) et ne reflètent pas nécessairement les vues ou les politiques de la FAO.

E-ISBN 978-92-5-207348-2 (PDF)

© FAO 2013

La FAO encourage l'utilisation, la reproduction et la diffusion des informations figurant dans ce produit d'information. Sauf indication contraire, le contenu peut être copié, téléchargé et imprimé aux fins d'étude privée, de recherches ou d'enseignement, ainsi que pour utilisation dans des produits ou services non commerciaux, sous réserve que la FAO soit correctement mentionnée comme source et comme titulaire du droit d'auteur et à condition qu'il ne soit sous-entendu en aucune manière que la FAO approuverait les opinions, produits ou services des utilisateurs.

Toute demande relative aux droits de traduction ou d'adaptation, à la revente ou à d'autres droits d'utilisation commerciale doit être présentée au moyen du formulaire en ligne disponible à www.fao.org/contact-us/licence-request ou adressée par courriel à <mailto:mcopyright@fao.org>.

Les produits d'information de la FAO sont disponibles sur le site web de la FAO (www.fao.org/publications) et peuvent être achetés par courriel adressé à [publications-mailto:msales@fao.org](mailto:msales@fao.org).

TABLE DES MATIERES

ABREVIATIONS	2
DEFINITIONS	3
1 INTRODUCTION	5
1.1 PORTEE DES DIRECTIVES.....	5
1.2 LE PROBLEME ET SES CAUSES	5
1.3 OBJECTIFS ET ENJEUX DE LA GESTION DE LA RESISTANCE.....	6
1.4 ÉDUCATION DES AGRICULTEURS.....	7
2 ÉVALUER LE RISQUE DE LA RESISTANCE.....	7
2.1 PRINCIPES FONDAMENTAUX DE LA RESISTANCE.....	7
2.2 MECANISMES DE LA RESISTANCE	9
2.3 FACTEURS CLES DANS LE DEVELOPPEMENT DE LA RESISTANCE	11
2.3.1 <i>Facteurs biologiques</i>	13
2.3.2 <i>Facteurs génétiques</i>	16
2.3.3 <i>Facteurs opérationnels</i>	19
2.4 RISQUE DE RESISTANCE AUX FONGICIDES	22
2.5 RISQUE DE RESISTANCE AUX HERBICIDES.....	26
2.6 RISQUE DE RESISTANCE AUX INSECTICIDES	28
2.7 RISQUE DE RESISTANCE AUX RODENTICIDES.....	30
3 PREVENTION ET GESTION DE LA RESISTANCE AUX PESTICIDES	31
3.1 CONCEPTION D'UN PLAN DE GESTION DE LA RESISTANCE.....	31
3.2 PRINCIPES GENERAUX.....	31
3.3 TOUS TYPES DE PESTICIDES - TACTIQUES DE GESTION DE LA RESISTANCE	34
3.4 TACTIQUES DE GESTION DE LA RESISTANCE AUX FONGICIDES.....	37
3.5 TACTIQUES DE GESTION DE LA RESISTANCE AUX HERBICIDES	39
3.6 TACTIQUES DE GESTION DE LA RESISTANCE AUX INSECTICIDES.....	41
3.7 TACTIQUES DE GESTION DE LA RESISTANCE AUX RODENTICIDES.....	43
4 DETECTION ET VERIFICATION DE LA RESISTANCE	44
4.1 OBJECTIFS DE LA DETECTION ET DE LA SURVEILLANCE DE LA RESISTANCE.....	44
4.2 METHODES DE VERIFICATION DE LA RESISTANCE	45
4.3 PROCEDURES D'ANALYSES	47
5 LA RESISTANCE ET LES CULTURES TRANSGENIQUES	48
5.1 INTRODUCTION	48
5.2 HISTORIQUE DU DEVELOPPEMENT DE LA RESISTANCE DANS LES CULTURES BT	48
5.3 TACTIQUES POUR PREVENIR LA RESISTANCE AUX TOXINES BT	50
6 RESISTANCE ET VECTEURS DE MALADIES	51
ANNEXE 1 – LECTURES CONSEILLEES ET REFERENCES	53
ANNEXE 2 – EXEMPLES APPLIQUES DE PLANS DE GESTION DE LA RESISTANCE	57
ANNEXE 3 – GROUPES D'EXPERTS	60

Abréviations

Bt	<i>Bacillus thuringiensis</i>
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
FRAC	Comité d'action pour la résistance aux fongicides
FRAG	Groupe d'action pour la résistance aux fongicides)
OGM	Organisme génétiquement modifié
HRAC	Comité d'action pour la résistance aux herbicides
IRAC	Comité d'action pour la résistance aux insecticides
IRAG	Groupe d'action pour la résistance aux insecticides
GID	Gestion intégrée des déprédateurs
kdr	Diminution de la résistance
OCP	Programme de lutte contre l'onchocercose
Individus R	Individus résistants
RMP	Plan d'action pour la gestion de la résistance
RR	Résistance homozygotique
RRAC	Comité d'action pour la résistance aux rodenticides
RS	Résistance hétérozygotique
Individus S	Individus sensibles
SS	Sensible à l'homozygotie
OMS	Organisation mondiale de la santé

Définitions

Résistance comportementale – toute modification du comportement du ravageur qui l'aide à éviter les effets mortels des pesticides. L'organisme ravageur est toujours sensible au pesticide et sera tué s'il est exposé à une dose létale. Par conséquent, les individus qui échappent à l'exposition survivent et se reproduisent. Cela peut engendrer une lignée au comportement résistant.

Résistance croisée – quand la résistance à un pesticide cause une résistance à un autre pesticide, même quand le ravageur n'a pas été exposé au second produit. La résistance croisée advient lorsque deux ou plusieurs composants agissent sur le même objectif et/ou sont affectés par le même mécanisme de résistance. La résistance croisée se développe le plus souvent quand les composants ont le même mode d'action et, généralement mais pas toujours, présentent une relation chimique liée au même groupe chimique. Elle peut être complète ou partielle (dans le cas où plus d'un mécanisme est responsable de la résistance).

Dose diagnostic – la dose utilisée pour déterminer si les ravageurs collectés et testés sont résistants au point que les échecs de la lutte au champ sont possibles.

Diploïde – lorsque l'on a deux chromosomes homologues en paires dans le noyau de sorte que le nombre d'haploïdes présents est double, généralement indiqué par $2n$.

Dose discriminante – la dose utilisée pour distinguer les individus résistants des individus sensibles, et qui n'est pas directement liée à l'efficacité sur le terrain.

Haploïde – lorsque l'on a un seul jeu de chromosomes non appariés dans une cellule somatique. L'haploïdie est une propriété des cellules sexuelles et germinales.

Résistance métabolique – résistance induite par un processus métabolique, par exemple chez les insectes qui sont capables de détoxifier ou de décomposer la toxine plus rapidement que les insectes sensibles, ou bien dont l'organisme se débarrasse rapidement des molécules toxiques. Les insectes se servent de leurs systèmes enzymatiques pour décomposer les insecticides, les lignées résistantes pouvant posséder des niveaux plus élevés de ces enzymes ou bien des enzymes plus efficaces en matière de détoxification. En outre, ces systèmes enzymatiques pourraient aussi avoir un ample spectre d'activité, c'est-à-dire qu'il sont en mesure de décomposer plusieurs pesticides différents.

Mode d'action (MOA) – le processus biochimique par lequel un pesticide rompt la biologie normale d'un ravageur, et qui en provoque généralement la mort. Normalement, il s'agit d'un site de liaison cible ou un processus biologique clé.

Résistance multiple – la présence simultanée de plusieurs différents mécanismes de résistance dans un même organisme. Les différents mécanismes de résistance peuvent se combiner pour offrir une résistance à des classes multiples de pesticides. Sur le terrain, il peut y avoir une résistance multiple et une résistance croisée, mais la première dérive d'une série d'événements distincts tandis que la seconde résulte de mécanismes de résistance partagés.

Composé multisite – un composé qui agit sur plus d'un site cible. Pour devenir résistant, l'organisme doit donc développer une résistance à plus d'un site cible, ce qui est plus difficile que de développer une résistance à un **composé à site unique** qui agit sur un seul site cible.

Résistance à la pénétration – un mécanisme de résistance principalement limité aux insectes, en vertu duquel la cuticule ralentit la pénétration du pesticide dans le corps de l'insecte. La résistance à la pénétration est généralement accompagnée par d'autres formes de résistance et la pénétration réduite augmente les effets des autres mécanismes.

Pesticide – toute substance ou association de substances, ou micro-organismes y compris les virus, destinée à repousser, détruire ou combattre les ravageurs, y compris les vecteurs de maladies humaines ou animales, les ravageurs nuisibles, les espèces indésirables de plantes ou d'animaux causant des dommages ou se montrant autrement nuisibles durant la production, la transformation, le stockage, le transport ou la commercialisation des denrées alimentaires, des produits agricoles, du bois et des produits ligneux, ou des aliments pour animaux, ou qui peut être administrée aux animaux pour combattre les insectes, les arachnides et les autres endo- ou ecto-parasites. Le terme inclut les substances destinées à être utilisées comme régulateur de croissance d'insectes ou de plantes, comme défoliant, comme agent de dessiccation, comme agent d'éclaircissage des fruits ou pour empêcher la chute prématurée de ceux-ci, ainsi que les substances appliquées sur les cultures, avant ou après la récolte, pour protéger les produits contre la détérioration durant l'entreposage et le transport. Ce terme inclut aussi les produits synergistes et détoxifiants des pesticides quand ils sont essentiels pour obtenir une prestation satisfaisante du pesticide

Résistance (technique) – un changement génétique dans un organisme en réponse à une sélection par les pesticides, ce qui pourrait compromettre la lutte sur le terrain.

Résistance (pratique) – un changement transmissible de la sensibilité d'une population de ravageurs qui se traduit par les échecs répétés (plus d'une fois) d'un produit à obtenir le niveau de lutte attendu, alors que ce produit est utilisé suivant les recommandations de l'étiquette et que les problèmes de stockage et d'application, et les conditions climatiques et environnementales inhabituelles peuvent être écartés comme causes de l'échec.

Mécanisme de résistance – processus biologique mis en place par le ravageur pour éviter l'action létale du pesticide. Les organismes résistants peuvent avoir plus d'un mécanisme de résistance.

Résistance sélective – la survie des individus résistants d'une population, tandis que les individus sensibles sont tués par le traitement pesticide. Les individus résistants sont "sélectionnés" pour survivre et produire une progéniture résistante. Le résultat net est que l'utilisation continue d'un pesticide "sélectionne" une population de ravageurs, qui devient de moins en moins sensible au pesticide. Le processus de sélection peut être rapide, une ou deux saisons, ou se développer sur un certain nombre d'années, selon le ravageur, son exposition au pesticide, et la génétique de sa résistance à un pesticide donné.

Directives pour la prévention et la gestion de la résistance aux pesticides

1 Introduction

1.1 Portée des directives

Les présentes directives étudient le problème de la résistance aux pesticides en agriculture et la manière d'en limiter le développement, tout en continuant à protéger les cultures contre les ravageurs. Ces directives s'adressent aux experts scientifiques, techniciens et politiques qui préparent ou évaluent les plans d'action pour la gestion de la résistance aux pesticides, ainsi qu'aux responsables de la réglementation qui évaluent le risque du développement d'une résistance, pendant l'homologation de nouveaux pesticides ou le renouvellement de produits déjà approuvés.

Les présentes directives sont organisées de la façon suivante:

- ce chapitre décrit brièvement le problème et ses causes, et identifie les objectifs et les enjeux que présente la gestion de la résistance aux pesticides;
- le chapitre 2 décrit les facteurs qui influent sur le développement de la résistance et indique comment évaluer le risque ou la probabilité qu'une résistance à un pesticide se développe;
- le chapitre 3 décrit les pratiques et les stratégies pour prévenir et gérer la résistance;
- le chapitre 4 explique comment détecter et vérifier la résistance sur le terrain;
- le chapitre 5 décrit comment la résistance a été prévenue dans les cultures *Bt*;
- le chapitre 6 aborde brièvement la résistance chez les vecteurs de maladies humaines;
- l'annexe 1 donne une liste de lectures supplémentaires et de documentation en ligne;
- l'annexe 2 indique une série de liens internet fournissant des exemples vécus de plans de gestion de la résistance.

Ces directives se concentrent sur la gestion de la résistance aux pesticides chimiques en agriculture (y compris les cultures transgéniques), chez les insectes, les mauvaises herbes, les maladies fongiques et les rongeurs. Bien que nombre des principes ici décrits soient également valides dans le cas de pesticides utilisés à des fins différentes, comme en santé publique ou en foresterie, ces autres usages ne sont pas étudiés en détail, car les conseils en matière de gestion de la résistance aux pesticides dans les domaines de la santé publique et des vecteurs de maladies sont disponibles ailleurs.

1.2 Le problème et ses causes

La résistance est une propriété d'origine génétique qui permet à un organisme de survivre à l'exposition à une dose de pesticide qui normalement l'aurait tué. Les gènes de la résistance se manifestent naturellement chez certains individus dans une population de ravageurs à cause de mutations génétiques ou par transmission du patrimoine génétique. Ils se propagent dans la population de ravageurs à cause d'un processus de sélection engendré par l'utilisation répétée du pesticide. Les populations résistantes se développent parce que les individus résistants survivent et se reproduisent, et la caractéristique de la résistance est "sélectionnée" dans la

génération suivante, tandis que les individus sensibles sont éliminés par le traitement pesticide. Si le traitement se poursuit, le pourcentage de survivants sélectionnés augmentera et la sensibilité de la population déclinera jusqu'à ce que le pesticide ne procure plus un niveau de lutte acceptable.

Il a été démontré que certaines pratiques de lutte contre les ravageurs ont aggravé la perte de populations sensibles de ravageurs et accentué le développement d'une résistance.

Ces pratiques comprennent:

- utilisation continue et fréquente d'un même pesticide ou de pesticides étroitement liés, sur une population de ravageurs;
- taux d'application inférieurs ou supérieurs à ceux recommandés sur l'étiquette;
- couverture insuffisante de la superficie traitée;
- traitement fréquent d'organismes à population nombreuses et cycles de reproduction courts;
- non-recours à des pratiques de lutte différentes des pesticides lorsque cela est possible; et
- traitement simultané des stades larvaire et adulte avec un même composé ou des composés semblables.

En outre, la non-application des bonnes pratiques agricoles, comme la rotation des cultures, le nettoyage soigneux des équipements agricoles qui aide à prévenir la diffusion des semences et des spores nuisibles, sont autant de facteurs qui peuvent aggraver la propagation de la résistance.

1.3 Objectifs et enjeux de la gestion de la résistance

L'objectif de la gestion de la résistance est de prévenir ou, tout au moins, de ralentir la prolifération d'individus résistants dans les populations de ravageurs, de manière à préserver l'efficacité des pesticides disponibles. On peut aussi considérer la gestion de la résistance comme une gestion de la sensibilité, puisque le but est de maintenir un pourcentage élevé de gènes sensibles dans la population de ravageurs tout en gardant à un niveau minimum les gènes résistants. Le défi est de réduire la pression sélective qui vise à la résistance, tout en conservant le niveau de protection nécessaire aux cultures.

Si le principe de la gestion de la résistance est relativement simple, le mettre en pratique pour une culture ou un ravageur donné ne l'est pas toujours. Malheureusement, il n'existe pas de recette unique pour la gestion de la résistance qui puisse s'appliquer totalement à tous les pesticides, les ravageurs et les cultures. Et la résistance n'est pas seulement un problème technique qui peut être résolu avec le nouveau pesticide qui convient, avec un nouveau mode d'action, ou en ajustant la manière d'utiliser les pesticides conventionnels.

Pour gérer la résistance, il faut: tout d'abord avoir recours à des stratégies rationnelles de lutte contre les ravageurs fondées sur les principes de la gestion intégrée des ravageurs et des vecteurs, ce qui permet de réduire l'utilisation des pesticides et donc, la pression de la sélection visant à la résistance. Deuxièmement, mettre en œuvre un Plan d'action global et spécialement conçu pour la gestion de la résistance (RMP), adapté au ravageur, à la culture et à la région, et qui fasse partie intégrante de la stratégie de la Gestion intégrée des déprédateurs (GID) pour le système de culture. Un principe clé de la GID est d'utiliser les pesticides seulement en cas d'absolue nécessité, et d'avoir recours quand cela est possible à des techniques alternatives de gestion des ravageurs. La GID constitue donc une approche

fondamentale à la gestion de la résistance en réduisant au minimum la pression sélective qui conduit à la résistance.

1.4 Éducation des agriculteurs

Tout plan de gestion de la résistance subit l'influence de facteurs socio-économiques et infrastructurels. Les coûts constituent toujours une préoccupation. Pour tous les pesticides, la préférence est presque toujours orientée vers le produit le moins cher. Bien qu'il semble évident que la meilleure solution est de prévenir le développement d'une résistance, les cultivateurs n'en sont pas toujours conscients, surtout si le pesticide utilisé est relativement bon marché et si la résistance met longtemps à se manifester. En revanche, s'il est clair que suivre la GID et un plan de gestion de la résistance bien conçu permettra d'augmenter la rentabilité, alors les cultivateurs seront plus enclins à appliquer ces pratiques. Mais s'ils n'observent aucun avantage dérivant de l'application de ces programmes ou bien s'ils ne peuvent pas se permettre d'appliquer ces recommandations, alors il est peu probable qu'elles ne soient mises en œuvre et les probabilités qu'une résistance se développe sont élevées. Par conséquent, l'éducation des cultivateurs et leur accès à l'information sont des éléments critiques pour la mise en œuvre de tout plan de gestion de la résistance. Il faut que les cultivateurs sachent quoi faire pour mettre en pratique la GID et prévenir le développement d'une résistance, et ils doivent savoir pourquoi cela est important. Ils doivent avoir un large accès à l'information et à sa compréhension.

2 Évaluer le risque de la résistance

Pour prévenir et gérer efficacement la résistance, il faut bien comprendre les principes de base à l'origine de la résistance et les facteurs qui peuvent influencer son développement et sa diffusion.

2.1 Principes fondamentaux de la résistance

Qu'est-ce que la résistance ?

On définit la résistance comme un changement génétique dans un organisme en réponse à une sélection induite par des substances toxiques. Le développement de la résistance ne signifie pas automatiquement un affaiblissement de la lutte contre les ravageurs. Par exemple, un petit niveau de résistance peut être observé en laboratoire, sans que ne surgissent des problèmes sur le terrain. Toutefois, il faut encourager la prévention: l'apparition d'une résistance doit être détectée et affrontée au tout premier stade, avant qu'un échec de la lutte contre les ravageurs ne se manifeste sur le terrain.

Lorsque la lutte contre les ravageurs échoue sur le terrain à cause d'une résistance aux pesticides, on parle de "résistance pratique". Il s'agit d'un changement transmissible de la sensibilité d'une population de ravageurs qui se traduit par les échecs répétés (plus d'une fois) d'un produit à obtenir le niveau de lutte attendu, alors que ce produit est utilisé suivant les recommandations de l'étiquette et que les problèmes de stockage et d'application, et les conditions climatiques et environnementales inhabituelles peuvent être écartés comme causes de l'échec. Cette seconde définition est donc plus étroite que la première et, bien que ce soit à ce stade seulement que des problèmes d'ordre économique dus à la résistance puissent surgir, il pourrait être trop tard pour mettre en place des mesures de gestion de la résistance.

Base génétique de la résistance

La résistance survient lorsque des mutations génétiques d'origine naturelle permettent à une petite proportion de la population de résister et de survivre aux effets du pesticide. Si cet avantage se poursuit suite à l'utilisation continue du même pesticide, les organismes résistants se reproduiront et les changements génétiques qui causent la résistance seront transmis des parents à la progéniture. À travers ce "processus de sélection", les organismes résistants finiront par devenir nombreux et la lutte au moyen du pesticide pourrait échouer (figure 1). Il ne faut pas confondre la résistance avec la tolérance laquelle peut se manifester après une exposition sublétales aux insecticides, mais n'est pas transmise génétiquement à la progéniture.

Le développement de la résistance est un processus génétique. La caractéristique ou "trait" qui occasionne la résistance est contenue dans un ou plusieurs gènes. Un gène est une partie de chromosome dans une cellule de l'organisme. Lorsque l'individu se reproduit, il transmet des combinaisons uniques de gènes à sa progéniture. Un allèle est l'un de deux ou plusieurs variétés de gènes. Par exemple, un allèle peut représenter le trait résistant (R) et l'autre le trait sensible (S).

La plupart des organismes multicellulaires possèdent deux lots de chromosomes, c'est-à-dire qu'ils sont diploïdes. Les organismes diploïdes ont une copie de chaque gène (et donc un allèle) sur chaque chromosome. Si les deux allèles sont pareils, ils sont homozygotes. S'ils sont différents, ils sont hétérozygotes. Certains organismes (par exemple de nombreux champignons, pendant la partie végétative de leur cycle de vie) sont haploïdes; ayant un seul lot de chromosomes non appariés.

Les allèles de la résistance peuvent être dominants, semi-dominants ou récessifs. S'ils sont dominants ou semi-dominants, il suffit qu'un seul parent possède cette caractéristique pour qu'elle se manifeste pleinement ou partiellement dans la progéniture. S'ils sont récessifs, les deux parents doivent posséder le trait. Fort heureusement, la plupart des mécanismes de résistance sont contrôlés par des allèles récessifs ou semi-dominants, ce qui ralentit leur diffusion dans la population.

Le trait génétique qui permet à l'organisme de survivre à l'exposition au pesticide se trouvera dans un ou dans les deux allèles du gène. Lorsque le trait se trouve dans les deux allèles (symbole RR), le ravageur est dit résistant homozygote; il sera probablement hautement résistant au pesticide et transmettra un allèle résistant (R) à sa progéniture. Si cette dernière reçoit aussi un R de l'autre parent, elle sera aussi RR. Si le trait de la résistance se trouve dans un seul des allèles du gène (RS), le ravageur est résistant hétérozygote, il sera moins résistant au pesticide, et peut ou non transmettre le gène de la résistance à la génération suivante. Les individus sensibles homozygotes (SS), sont sensibles au pesticide.

En général, les populations d'organismes qui n'ont jamais été exposés aux pesticides sont totalement sensibles, et les gènes de la résistance dans ces populations sont très rares. Cela est dû à un "coût de la valeur adaptative", ce qui signifie que les organismes résistants sont dépourvus d'un attribut quel qu'il soit, qui a été en quelque sorte "compensé" par le trait de résistance. Par exemple, dans les organismes résistants on peut trouver une réduction de la fécondité ou de la vigueur générale. À cause de ce "coût de la valeur adaptative" les organismes résistants sont désavantagés par rapport aux organismes sensibles, une fois le pesticide supprimé. Les organismes sensibles auront donc l'avantage sélectif et la population de ravageurs retournera à l'état sensible.

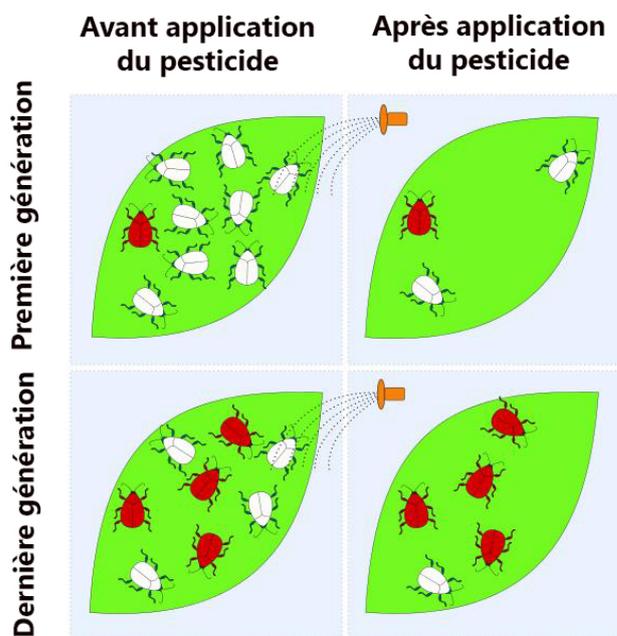


Figure 1 Les applications de pesticides peuvent conduire à la sélection de ravageurs résistants. Dans cette figure, la première génération présente un insecte possédant une résistance élevée à un pesticide (en rouge). Après l'application du pesticide, ses descendants constituent la plus grande partie de la population, car les ravageurs sensibles (en blanc) ont été sélectivement tués. Après plusieurs applications, les pesticides résistants constituent la majorité de la population. (source: Wikipedia; 11 Jan 2012)

On suppose que ce retour à la sensibilité à la base de la gestion de la résistance. Mais la vitesse de ce processus est très variable et il peut être très lent, en particulier si le pesticide a été utilisé pendant des années. Cela explique pourquoi il vaut mieux prévenir le développement de la résistance, plutôt que d'essayer d'y porter remède après qu'elle s'est développée.

2.2 Mécanismes de la résistance

Les ravageurs agricoles ont recours à une variété de mécanismes pour survivre à l'exposition à des agents toxiques. La résistance se développe plus facilement quand deux ou plusieurs de ces mécanismes entrent en fonction en même temps. Les mécanismes de résistance se répartissent dans les catégories générales suivantes:

Détoxification métabolique (enzymatique)

La résistance à travers la détoxification métabolique se manifeste le plus souvent chez les insectes et elle moins fréquente chez les adventices et les agents pathogènes. Elle est fondée sur les systèmes enzymatiques que les insectes possèdent pour détoxifier naturellement les toxines existantes dans la plante hôte, et dans le sang ingéré chez les insectes qui se nourrissent de sang. Ces systèmes comprennent les estérases, les mono-oxygénases du cytochrome P450 et les glutathion-S-transférases. Les insectes résistants peuvent avoir des niveaux élevés d'un enzyme particulier, ou posséder des formes altérées de l'enzyme qui métabolise le pesticide beaucoup plus rapidement que la forme non altérée.

La résistance métabolique peut aller de la résistance à un composé spécifique à la résistance à une vaste série de composés. De même, la résistance fournie à l'insecte varie d'un niveau très faible à un niveau très élevé et varie aussi d'un composé à l'autre. Souvent ce mécanisme clive la molécule du pesticide ou ajoute des molécules au pesticide, par exemple la glutathion

transférases qui détoxifient le composé.

Chez les mauvaises herbes, le métabolisme accru est un moyen de résistance commun. Par exemple, on a constaté des taux de métabolisme accru des herbicides acétyl-CoA carboxylase (ACCase), acétolactate-synthétase (ALS), et photosystème 2 (PS2).

Sensibilité réduite au site cible

Avec ce mécanisme, le site de fixation du pesticide est modifié de sorte qu'il ne peut plus se lier effectivement au site cible, supprimant ainsi ou réduisant de façon significative l'efficacité du pesticide. C'est le mécanisme le plus courant chez les champignons et les mauvaises herbes et on le trouve aussi très communément chez les insectes. Il y a quatre catégories générales de résistance du site cible chez les insectes:

- *kdr* (knock-down resistance) interfère avec le canal sodium dans les cellules nerveuses. Il s'agit d'un mécanisme habituel utilisé pour la résistance au DDT et aux pyréthroïdes, par exemple chez *Anopheles gambiae*, *Blattella germanica*. Plusieurs mutations produisent la *kdr* et la super *kdr*.
- *MACE* (acétylcholinestérase modifiée) modifie la structure de l'acétylcholinestérase de sorte qu'elle ne soit plus touchée par l'insecticide. Cela est, par exemple, le mécanisme de la résistance au pirimicarbe chez *Phorodon humuli* et est la cause de la résistance chez *Tetranychus urticae*.
- *Rd* (résistance à la dieldrine) est une mutation ponctuelle qui diminue la fixation de la dieldrine au récepteur GABA. Elle est la cause de la résistance à la dieldrine chez les moustiques *Anopheles quadrimaculatus* et chez la mouche à viande *Lucilia cuprina*.
- *Bt* : La résistance *Bt* a lieu à travers la perte de cadhérine, qui joue un rôle important dans l'adhésion cellulaire, en assurant l'adhérence des cellules entre elles dans les tissus. On trouve ce mécanisme de résistance *Bt* chez la teigne des choux (*Plutella xylostella*).

Il y a de nombreux exemples de résistance au site cible chez les mauvaises herbes. Parmi les plus importants on compte les inhibiteurs de:

- *ALS* (acétolactate-synthétase) qui provoque un changement dans l'enzyme ALS du site cible
- *ACCase* (acétyl-CoA carboxylase)
- *PS2* (Photosystème 2)

Pénétration réduite

Ce mécanisme ralentit la pénétration du pesticide à travers la cuticule des insectes résistants. Ce mécanisme seul ne produit que des niveaux faibles de résistance. Toutefois en ralentissant la pénétration de la substance toxique à travers la cuticule, il peut accroître énormément l'impact d'autres mécanismes de résistance. Par exemple, un insecte n'ayant aucune résistance à la pénétration peut présenter un degré de résistance 25, tandis que si la pénétration du pesticide était réduite de moitié, sa résistance totale pourrait atteindre 50.

Séquestration

Chez les plantes, le pesticide est emporté des parties sensibles de l'organisme et transféré vers un site tolérant, comme une vacuole, où il est effectivement inoffensif pour l'organisme cible. Ce genre de résistance a été démontrée pour les herbicides glyphosate, paraquat et 2,4-D. Chez les insectes, (aphides, moustiques *Culex*, etc.) les enzymes métaboliques sont amplifiés de manière significative (jusqu'à 15 pour cent des protéines totales de l'organisme) et se lient à l'insecticide, mais l'insecticide n'est pas métabolisé, c'est-à-dire qu'il est séquestré.

Résistance comportementale

La résistance comportementale est limitée aux insectes, aux acariens et aux rongeurs. Elle se rapporte à toute modification du comportement de l'organisme visant à éviter l'effet létal des pesticides. On a observé ce mécanisme de résistance pour plusieurs classes d'insecticides, y compris les organochlorés, les organophosphorés, les carbamates et les pyréthroïdes. S'ils rencontrent certains insecticides, les insectes peuvent simplement cesser de se nourrir, ou abandonner la zone aspergée (par exemple, ils se déplacent sur l'envers d'une feuille qui a été aspergée, ou plus profondément dans le feuillage d'une culture, ou s'envolent loin de la zone ciblée). On a observé une résistance comportementale également chez les souris.

La résistance comportementale n'a pas la même importance que les mécanismes de résistance physiologique illustrés plus haut, mais elle peut être considérée comme un facteur contribuant à éviter les doses létales d'un pesticide.

2.3 Facteurs clés dans le développement de la résistance

Le risque de développer une résistance est plutôt variable entre et au sein des groupes de pesticides et des espèces de ravageurs, mais il est particulièrement élevé pour nombre de pesticides sélectifs ayant des modes d'action spécifiques, utilisés de nos jours. Généralement, les pesticides ayant un site cible unique, appliqués de nombreuses fois à une vaste population de ravageurs dont le renouvellement de population est élevé, risquera plus facilement de développer une résistance que les pesticides qui s'attaquent à plusieurs sites cibles, qui sont utilisés moins fréquemment et sur un ravageur ayant un faible taux de renouvellement de population. Dans le premier cas, la pression sélective serait extrêmement élevée, et dans le second notablement inférieure. Cela dit, la résistance ne se développe pas toujours comme prévu.

En ce qui concerne les pesticides couramment utilisés, on dispose d'une grande quantité d'informations relatives à la résistance pour toute une variété de cultures et de ravageurs. Ces informations peuvent être utiles pour évaluer les risques de développement d'une résistance en cas de nouvelles utilisations et dans de nouveaux emplacements géographiques. Toutefois, en ce qui concerne les nouveaux pesticides, surtout s'ils représentent de nouveaux groupes chimiques, il est plus difficile d'évaluer le risque du développement d'une résistance. L'expérience acquise avec des produits chimiques et des ravageurs similaires, ainsi que le mode d'action du composé, pourra fournir quelques indications. Malgré cela, il y a encore beaucoup à apprendre. À l'heure actuelle, la seule évaluation possible du risque de développement d'une résistance, est d'estimer si ce risque est faible, moyen ou élevé.

Les facteurs qui influent sur le développement d'une résistance peuvent être groupés en trois catégories: le bagage génétique du ravageur, sa biologie et des "facteurs opérationnels", y compris les pratiques culturales et les caractéristiques du pesticide et de son application (voir tableau 1). Alors qu'il n'est pas possible de prédire avec précision si un composé particulier donnera lieu à une résistance, on peut évaluer le risque général en évaluant ces facteurs pour chaque situation donnée pesticide-ravageur-culture. C'est pourquoi il est important de collecter le plus grand nombre d'informations possibles en ce qui concerne la biologie du ravageur, les caractéristiques du composé, son utilisation, et les conditions spécifiques dans lesquelles il sera utilisé. Il pourra y avoir des similitudes entre les composés, les ravageurs et les utilisations, mais chaque situation sera différente. Il conviendra, au moment d'étudier un programme de gestion de la résistance, de prendre en considération tous ces facteurs, pour s'engager certainement dans la voie de la réussite.

Tableau 1 Facteurs biologiques, génétiques et opérationnels dans le développement de la résistance.

Facteur	Potentiel pour le développement d'une résistance	
	Faible	Élevé
Facteurs biologiques		
Taille de la population	Petite	Grande
Potentiel reproductif	Faible	Élevé
Renouvellement générationnel	une génération ou moins par an	Plusieurs générations par an
Type de reproduction	Sexuée	Asexuée
Dispersion	Faible	Importante
Banque de semences	Grande	Petite ou absente
Métabolisme du pesticide	Difficile	Facile
Nombre de sites cibles du pesticide	Sites multiples	Unique, spécifique
Gamme d'hôtes du ravageur	Étroite	Large
Facteurs génétiques		
Apparition de gènes de résistance	Absents	Présents
Nombre de mécanismes de résistance	Un seul	Plusieurs
Fréquence des gènes	Basse	Élevée
Dominance des gènes de résistance	Récessive	Dominante
Valeur adaptative des individus "R"	Médiocre	Bonne
Protection induite par le gène "R"	Médiocre	Bonne
Résistance croisée	Négative ou absente	Positive
Sélection antérieure	Aucune	Significative
Gènes modificateurs	Absents	Présents
Facteurs opérationnels		
Spectre d'activité du pesticide	Étroit	Large
Taux d'application du pesticide	Selon l'étiquette, hétérozygotes tués (Si le gène R n'est pas complètement dominant)	Moins que l'étiquette: hétérozygotes survivent Plus que l'étiquette: seuls quelques individus résistants homozygotes survivent et se reproduisent (surtout si l'immigration est minime)
Couverture de l'application	Bonne	Médiocre
Systémie	Effet du facteur variable; peut accroître ou diminuer le risque de résistance	
Fréquence des traitements	Basse	Élevée
Présence de ravageurs secondaires	Absents (seul le ravageur ciblé est traité)	Présents (Les ravageurs (potentiels) non ciblés sont aussi traités)
Stades de vie traités par les pesticides relatifs	Unique	Multiples

Facteur	Potentiel pour le développement d'une résistance	
	Faible	Élevé
Proportion de la population traitée	Effet du facteur variable; peut accroître ou diminuer le risque de résistance	
Persistance	de courte durée	de longue durée
Nombre de cultures traitées	Une	Plusieurs
Séquence de la culture	Cultures séparées par le temps ou la géographie	Cultures intercalaires; pas d'intervalles entre les semis; en continu
Tactiques de lutte contre les ravageurs	Tactiques de lutte multiples (chimique, biologique, culturale)	Utilisation continue d'une seule méthode ou d'un seul composé
Effets sur les éléments non ciblés	Activité sélective, pas d'effet sur les ennemis naturels	Non sélective, les ennemis naturels sont tués aussi

2.3.1 Facteurs biologiques

Taille de la population

La taille de la population est un élément majeur dans le processus de développement de la résistance. Chez les insectes, plus la population est nombreuse, plus grandes sont les probabilités de voir se développer une résistance. Si la population est nombreuse, même si le pourcentage d'individus est faible, le nombre de survivants après une application de pesticide sera plutôt important. Si les applications répétées de pesticide élimine la plupart des individus sensibles, les probabilités que les survivants résistants se reproduisent et transmettent les gènes de la résistance sont extrêmement favorables. En revanche, si la population du ravageur est petite, les probabilités qu'ont les rares survivants résistants de se reproduire sont très basses, et le développement de la résistance s'en trouvera ralenti.

La situation est semblable pour les populations fongiques. La plupart des populations "naturelles" d'agents pathogènes fongiques contient une petite proportion d'individus résistants. L'application d'un fongicide mènera à la sélection de ces individus, tout en n'éliminant pas complètement les individus sensibles (à cause du caractère inadéquat des pulvérisations). Ainsi, la population restante après l'application d'un fongicide contiendra une plus grande proportion d'individus résistants, mais ne sera pas entièrement résistante. En l'absence d'un plan de gestion de la résistance, chaque application ultérieure donnera lieu à la répétition de ce processus, jusqu'à ce que la population du ravageur contienne assez d'individus résistants pour devenir un problème. Ce processus peut être freiné, en introduisant des individus sensibles prélevés hors de la zone d'application.

En fin de compte, la gestion de la résistance est une question de chiffres. L'étendue de la lutte contre les ravageurs est directement liée au nombre d'individus résistants. Si l'infestation par un ravageur est faible (c'est-à-dire un nombre relativement bas d'individus), il est improbable de rencontrer un problème de lutte, même si on est en présence d'un niveau élevé de résistance (c'est-à-dire si les individus résistants sont fortement résistants). Au contraire, si l'infestation est importante, il y aura un problème évident de lutte sur le terrain, même si le niveau de résistance est modéré.

Potentiel reproductif

Le potentiel reproductif, c'est-à-dire le nombre de descendants, de graines ou de spores par "parent", a un effet significatif sur le développement de la résistance dans les populations de ravageurs. Chez tous les ravageurs à reproduction sexuée ciblés par les pesticides, tous les autres facteurs étant égaux, plus élevé est le nombre de descendants par organisme, plus sera

élevé le nombre d'individus résistants.

Chez les insectes, cela s'explique par le fait qu'une progéniture nombreuse accroît les chances qu'il y ait plus d'individus possédant le gène de la résistance, et par conséquent, si l'utilisation du pesticide se poursuit, que des individus ayant un ou deux allèles résistants soient sélectionnés. Plus grand est le nombre de survivants porteurs des gènes résistants, plus grande est la possibilité que des individus homozygotes ou hétérozygotes s'accouplent. Cela mène à l'accroissement de la fréquence des gènes de la résistance dans la population.

Chez les mauvaises herbes, les espèces annuelles dont la production de semence est élevée et porteuses d'une diversité génétique, ont plus de probabilité de développer une résistance que les espèces ayant une production de semence et une diversité génétique plus faibles.

Chez les champignons, la propagation se fait le plus souvent à travers des spores asexuées, transmises par les projections d'eau ou le vent au cours de la saison, chaque lésion pathologique pouvant relâcher un très grand nombre de spores. Ces dernières peuvent voyager sur des distances allant de quelques mètres à plusieurs centaines de kilomètres, selon l'agent pathogène. Les spores sexuées, lorsqu'elles sont produites, sont généralement formées tard dans la saison et relâchées à la saison suivante, après l'hibernation. Elles peuvent être à l'origine de nouvelles variations dans le champignon, mais leur rôle dans le développement de la résistance n'est pas connu.

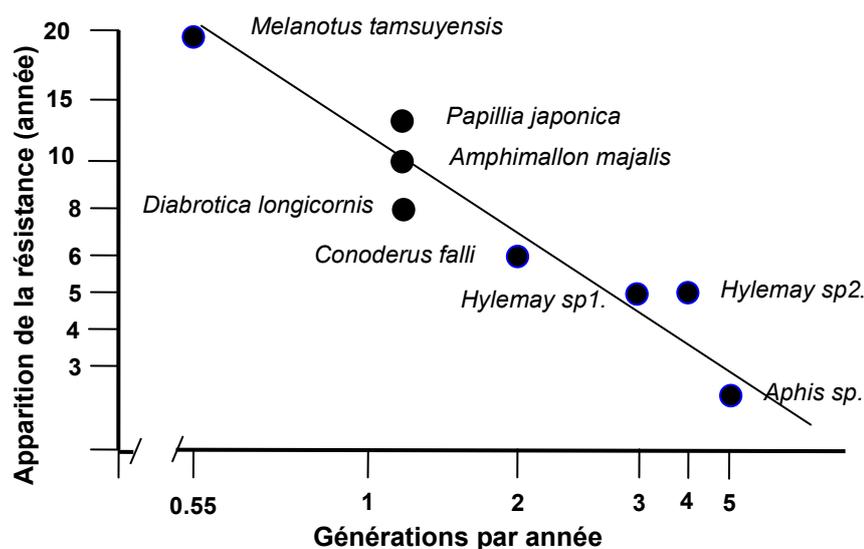


Figure 2 Relation entre le nombre de générations par année d'un insecte ravageur et l'apparition d'une résistance, sélectionnée par l'application au sol d'aldrine/dieldrine [Source: NRC (1986)]

Renouvellement générationnel

Le renouvellement générationnel a un rôle important dans la rapidité avec laquelle se développe la résistance. Chez les insectes, les mauvaises herbes et les agents pathogènes des plantes la résistance se développera plus lentement s'il n'y a qu'une seule génération par an, car la population du ravageur est sélectionnée une fois par an seulement. La figure 2 compare les taux de développement d'une résistance à l'insecticide aldrine/dieldrine, chez différentes populations d'insectes, allant de 2 ans pour les aphides qui présentent cinq générations par an, jusqu'à 20 ans pour *Melanotus tamsuyensis*, un insecte ayant un cycle de vie de deux ans.

Type de reproduction

Les deux types de reproduction, sexuée et asexuée, peuvent contribuer au développement de la résistance. La reproduction sexuée stimule des réarrangements du génome. Toutefois, une fois sélectionnée la résistance, il est plus probable qu'elle se propage rapidement par la reproduction asexuée. Par exemple, chez les aphides la reproduction est le plus souvent asexuée tout au long de l'année, et la plupart des agents pathogènes fongiques se propagent à travers des spores asexuées. Essentiellement, les progénitures sont des clones de leurs parents. Si une partie de population d'aphides ou de champignons possède un gène de la résistance, cette partie survivra, tandis que la partie de population sensible sera éliminée par une application intensive de pesticide. La partie résistante survivante se multipliera vite, et conduira à un développement rapide de la résistance à moins qu'un programme de gestion de la résistance ne soit mis en place.

On considère souvent que la présence d'un cycle sexué chez les agents pathogènes des plantes accroît la possibilité de développement d'une résistance à travers la formation de nouvelles combinaisons de gènes. Mais le contraire peut être vrai aussi: il est possible qu'une telle recombinaison rompe la séquence des gènes et conduise à une perte des facteurs de résistance. Pratiquement, il semble que la résistance à la plupart des fongicides est présente dans les populations pathogènes non traitées, mais à un niveau très faible. L'exposition au fongicide induit la sélection de cette résistance. Chez les mauvaises herbes, la possibilité de diffusion de la résistance est plus faible chez les espèces auto-pollinisatrices ou dont la reproduction est végétative, que chez les espèces à pollinisation croisée.

Dispersion

Dans un champ ou une zone, la sensibilité d'une population donnée peut être touchée par l'amplitude des mouvements des ravageurs, aussi bien sur la longue distance que sur les distances relativement courtes. Les insectes, les spores et les semences peuvent être dispersés par le vent, introduits avec les semences, le sol, les équipements, les racines des plantes, les récipients, les produits végétaux, etc. ou, dans le cas des insectes, ils peuvent s'envoler vers de nouvelles zones. En ce qui concerne les mauvaises herbes, leur potentiel de résistance à persister ou à se répandre est bien plus élevé chez les espèces dont les semences peuvent être propagées par le vent. Quant aux insectes et aux maladies, en général, l'arrivée d'individus hétérozygotes ou sensibles permettra de diluer la résistance dans la population concernée, car les insectes introduits peuvent s'accoupler avec les survivants aux traitements et les spores pathogènes des plantes introduites peuvent manifester des lésions et produire de nouvelles colonies de types sensibles. Cela constitue la base de l'utilisation des refuges pour entretenir les populations de ravageurs sensibles. D'autre part, les gènes de la résistance peuvent être introduits dans une population par des individus qui migrent d'une zone où la résistance est un problème. Par exemple, une lignée résistante d'insectes sélectionnée en serre, peut émigrer vers les champs environnants et introduire le gène résistant dans la population du champ.

Là où la résistance est récessive du point de vue opérationnel, seuls quelques individus homozygotes résistants (RR) survivront après un traitement insecticide. Au fur et à mesure que les individus homozygotes sensibles (SS) pénètrent dans la zone et s'accouplent avec les survivants, nombres de lignées auront des individus hétérozygotes (RS) ou sensibles (SS). Si l'on pratique un traitement, en utilisant les doses appropriées et en assurant une bonne couverture de l'application, les individus SS et la plupart, sinon tous, les individus RS seront tués. Toutefois, si le taux d'application est trop faible et/ou si la couverture est médiocre, les applications suivantes auront pour résultat la survie de plusieurs individus RS et la sélection plus rapide d'une population résistante.

Banque de semences

La résistance apparaîtra plus lentement chez les espèces de mauvaises herbes ayant un niveau plus élevé de dormance des semences, c'est-à-dire un plus grand nombre de semences qui peuvent lever dans le temps. Alors que les semences produites après chaque application d'un herbicide peuvent contenir une proportion plus élevée d'individus résistants, les semences sensibles provenant de la banque de semences dilueront les niveaux de résistance.

Métabolisme du pesticide

Dans certains organismes, en particulier les insectes et les acariens, l'un des mécanismes de résistance est représenté par un accroissement de la dégradation métabolique du pesticide (voir par. 2.2). Les pesticides qui sont facilement métabolisés par les processus normaux de transformation biologique risquent d'être moins efficaces à travers l'apparition d'une résistance, par rapport aux pesticides qui sont plus difficiles à détoxifier dans l'organisme.

Nombre de sites cibles du pesticide

La résistance se développe plus rapidement quand le pesticide a un seul site cible. Lorsqu'un pesticide a des sites cibles multiples, le ravageur doit développer une résistance pour tous ces sites. Si le pesticide n'a qu'un seul site cible, une seule mutation d'un seul gène peut mener à la résistance.

Gamme d'hôtes du ravageur

Les ravageurs qui ont une large gamme d'hôtes et qui infestent plus de cultures, risquent davantage de développer une résistance que les ravageurs plus spécialisés, spécifiques d'une culture. Cela est particulièrement pertinent pour les insecticides, car une espèce d'insecte peut infester différentes cultures. Dans nombre de cas, des stratégies, conçues pour une culture spécifique, sans prendre en considération les cultures hôtes avoisinantes ou de rotation, ou les déplacements des insectes, ont ainsi sous-estimé le nombre de traitements que les insectes reçoivent. Par exemple, une espèce d'insecte ravageur peut recevoir trois ou quatre traitements sur du coton et quatre ou cinq applications sur une culture maraîchère voisine ou successive. Le spécialiste du coton voit trois ou quatre sélections, celui des légumes en voit quatre ou cinq, mais l'insecte reçoit effectivement sept ou neuf sélections. C'est pourquoi il est important, en particulier pour les insecticides, de concevoir des stratégies axées sur la zone, plutôt que sur la culture.

Ces considérations sont moins pertinentes pour les fongicides, car la maladie de la plante est presque toujours spécifique à la culture et il n'y aura de problème que si les cultures voisines sont les mêmes que la culture traitée. Toutefois, il conviendra de considérer de mettre en place des programmes de pulvérisation par aire géographique plutôt que par exploitation agricole. La meilleure approche serait de coordonner les programmes d'application par pulvérisation de manière à minimiser la pression sélective sur l'agent pathogène occasionnée par une exposition continue au fongicide.

2.3.2 Facteurs génétiques

Apparition de gènes de résistance

Pour qu'il y ait sélection de la résistance dans une population de ravageurs, il faut qu'au moins quelques individus possèdent un gène résistant. Le degré de résistance et la rapidité à laquelle elle se développe dans la population dépend de l'efficacité que met(tent) le(s) gène(s) à protéger le ravageur. En général, plus grande est la protection offerte par le(s) gène(s), inférieur est le coût de la valeur adaptative, et plus la fréquence du gène de la résistance est élevée, plus vite la résistance sera sélectionnée.

Nombre de mécanismes de résistance

Ainsi qu'il est illustré plus haut (voir par. 2.2), il existe plusieurs mécanismes par lesquels le ravageur agricole peut survivre à l'exposition aux agents toxiques, et la résistance peut se développer plus facilement quand un organisme possède plus d'un mécanisme de résistance. En particulier chez les insectes, on observe de nombreux cas où les ravageurs ont recours à plus d'un mécanisme pour développer la résistance, même si l'un des mécanismes est plus accentué que les autres.

L'effet combiné de deux mécanismes peut aussi accroître considérablement le degré de résistance. Par exemple, si le degré de résistance d'un insecte à un pesticide a une valeur 10, à travers la détoxification enzymatique, et une valeur 2 à cause de la pénétration réduite, la résistance totale risque de valoir 20 plutôt que 12. (En ce qui concerne les fongicides, ces calculs compliqués ne sont pas pertinents.) De plus, si plusieurs mécanismes de résistance sont présents simultanément dans le même organisme, cela peut donner lieu à une résistance à plus d'une classe de pesticides. On appelle cela une résistance multiple.

Fréquence des gènes

La fréquence des gènes (souvent appelée fréquence d'allèle) est la proportion de toutes les copies d'un gène effectuée à partir de la variante particulière d'un gène (ou allèle). La fréquence de l'allèle résistant a un effet significatif sur le développement de la résistance. Dans la plupart des cas, la fréquence des individus homozygotes résistants à un nouveau pesticide est très basse (10^{-4} ou moins), tandis que la fréquence des individus hétérozygotes peut être supérieure. Bien qu'il y ait d'autres facteurs qui influent sur la sélection de la résistance dans une population, généralement plus la fréquence des gènes résistants est élevée, plus rapide sera le développement de la résistance.

En ce qui concerne les champignons, la situation est un peu différente, car tous à l'exception des Oomycètes (typiquement le mildiou duveteux), existent à l'état haploïde. La sélection des mutants résistants de la population naturelle de ces derniers constitue donc une simple considération de la pression sélective.

Dominance des gènes de résistance

Les gènes de la résistance peuvent aller de dominants à récessifs en passant par semi-dominants. Si un trait est dominant ou semi-dominant, il suffit qu'un seul parent possède ce trait pour qu'il s'exprime pleinement ou partiellement dans la progéniture. S'il est récessif, il faut que les deux parents le possèdent. Si la résistance est génétiquement dominante, elle peut rapidement s'établir dans la population et il risque d'être difficile de la gérer. Heureusement, la plupart des mécanismes de résistance (par exemple *kdr*) sont contrôlés par des gènes récessifs ou semi-dominants, ce qui augmente les chances de gérer les populations résistantes. Par exemple, dans le cas des fongicides à base d'amides d'acide carboxylique, la résistance est récessive chez *Plasmopara viticola* de sorte que seuls les individus homozygotes récessifs sont résistants. On pense que cela explique pourquoi les populations de *Plasmopara viticola* ne développent pas de résistance.

Chez les insectes, les gènes qui ne sont pas complètement récessifs ou dominants peuvent devenir fonctionnellement dominants quand les individus porteurs de ces gènes sont exposés à des taux réduits de pesticide. Ces doses réduites peuvent être dues soit à l'utilisation volontaire de doses réduites, soit à une mauvaise couverture de la plante ou de la zone traitée, soit encore à l'exposition aux résidus de pesticides déposés sur la superficie traitée. Dans ces cas-là, les individus hétérozygotes survivent et transmettent le gène résistant lorsqu'ils s'accouplent avec d'autres individus hétérozygotes ou sensibles.

Valeur adaptative des individus "R"

Les individus porteurs d'un gène résistant peuvent subir un coût de la valeur adaptative, telle une vigueur diminuée et/ou une différence de temps du cycle de vie, ce qui rend l'accouplement difficile avec les individus qui ne possèdent pas le gène "R". Si le coût de la valeur adaptative est faible, les gènes résistants peuvent s'accumuler rapidement dans une population. Cependant, si le coût de la valeur adaptative est élevé, c'est seulement en présence du pesticide que les individus résistants auront un avantage sur les individus sensibles. En l'absence de pesticide, les formes résistantes ne sont plus compétitives et peuvent disparaître rapidement. C'est ce facteur qui fait de la rotation un bon outil de gestion de la résistance.

Toutefois, les individus résistants n'ont pas toujours à payer le prix de l'adaptation. En ce qui concerne les fongicides, il est erroné de supposer que les champignons résistants seront moins adaptés que les champignons sensibles, car ce n'est pas toujours le cas. Il peut aussi se faire que les individus "moins adaptés" subissent une mutation et une sélection ultérieure conduisant à un accroissement de la valeur adaptative.

Protection induite par le gène "R"

Si le gène de la résistance fournit un degré élevé de protection contre le pesticide, les individus porteurs de ce gène ont de très hautes probabilités de survivre à l'application du pesticide et de transmettre le gène résistant à la génération suivante. Toutefois, si le gène de la résistance induit seulement un niveau de protection modéré, les individus porteurs du gène résistant seront protégés contre de faibles dosages du pesticide mais non pas contre des doses élevées. Cela est une autre raison de s'assurer que l'application d'un pesticide suive scrupuleusement les indications de l'étiquette en matière de dosages et que la meilleure couverture possible soit obtenue. Les doses réduites et la couverture médiocre permettent l'accumulation des gènes résistants dans la population.

Résistance croisée

Il y a résistance croisée quand la résistance à un pesticide procure une résistance à un autre pesticide, même si le ravageur n'a pas été exposé à ce dernier. Par conséquent, sa présence accroît le risque de résistance. La résistance croisée se manifeste parce que deux ou plusieurs composés agissent sur la même cible et/ou sont touchés par le même mécanisme de résistance. La résistance croisée se développe le plus souvent avec les composés qui agissent de la même manière et qui, généralement mais pas toujours, sont apparentés appartenant au même groupe chimique. Elle peut être complète ou partielle (si la résistance dépend de plus d'un mécanisme).

Certains mécanismes de résistance peuvent toucher des composés appartenant à différentes classes chimiques, mais ce phénomène est largement limité aux insecticides. Par exemple, le DDT aussi bien que les pyréthroïdes sont affectés par le gène *kdr* qui agit sur le canal sodium des cellules nerveuses. L'utilisation intensive de pyréthroïdes sur une population qui a déjà eu un problème de résistance précédent avec le DDT pourrait donner lieu au développement d'une résistance aux pyréthroïdes dans cette population.

Dans certains cas, il y a résistance croisée négative, lorsqu'un mécanisme de résistance rend un organisme résistant à un pesticide mais augmente sa sensibilité à un autre pesticide.

Sélection antérieure

La sélection antérieure de gènes résistants peut faciliter le développement d'une résistance à de nouveaux composés parce que l'utilisation antérieure a probablement accru la fréquence du gène résistant. Cela ne signifie pas nécessairement que le nouveau composé sera inefficace ou qu'il induira une résistance qui se développera rapidement. Cela veut simplement dire que les

possibilités de développement d'une résistance sont plus élevées que si aucun composé apparenté n'avait été utilisé précédemment. Toutefois, si le niveau de résistance croisée est élevé et s'il y a eu par le passé un sérieux problème de résistance, alors il y a de fortes chances qu'une résistance au nouveau composé se développe rapidement.

Gènes modificateurs

Les gènes résistants peuvent être délétères pour les ravageurs qui les possèdent dans une proportion plus ou moins grande. Toutefois, avec le temps et la sélection continue, la faible valeur adaptative des individus résistants peut être surmontée au fur et à mesure qu'ils acquièrent des gènes auxiliaires ou modificateurs, liés à l'amélioration de la valeur adaptative. Dans certains cas, le coût de la valeur adaptative du gène résistant est presque entièrement surmonté; le gène résistant continue d'apparaître dans la population du ravageur et le retour au gène sensible original se fera très lentement ou pas du tout. Dans d'autres cas, le coût de la valeur adaptative ne peut pas être surmonté et le retour, en l'absence de sélection, se fera très rapidement. On comprend mieux le rôle des gènes modificateurs chez les insectes et les mauvaises herbes. Les gènes modificateurs chez les champignons n'ont pas fait l'objet d'études approfondies, bien que l'on sache que la résistance aux fongicides inhibiteurs de la déméthylation peut se développer suite à l'accumulation de nombreux gènes d'effets mineurs et également à des gènes majeurs ou à des gènes majeurs modificateurs.

2.3.3 Facteurs opérationnels

Spectre d'activité du pesticide

Les pesticides à large spectre, efficaces contre une vaste gamme de ravageurs ou d'espèces, sont plus susceptibles de causer des problèmes de résistance que les pesticides à spectre étroit pour la simple raison qu'ils seront probablement utilisés beaucoup plus souvent dans une zone donnée car ils combattent davantage d'espèces de ravageurs. Dans la plupart des conditions culturales où il faut lutter contre d'autres ravageurs cibles, le pesticide à spectre étroit sera moins utilisé, et la pression sélective sera inférieure.

Il conviendra aussi d'utiliser avec précaution les pesticides à large spectre, car ils pourraient causer la sélection de la résistance chez des espèces non ciblées qui se trouvent dans la zone traitée en même temps que le ravageur ciblé, à un niveau seuil de sous-traitement. Par exemple, l'utilisation d'un amide d'acide carboxylique qui est un fongicide à spectre très étroit, utilisé pour lutter contre le mildiou duveteux de la vigne n'aura aucun effet sur les autres maladies de la vigne et n'exercera donc aucune pression sélective autre que sur le mildiou. En revanche, un fongicide DMI ou QoI, appliqué à une culture céréalière pour lutter contre une maladie particulière exercera une pression sélective sur d'autres maladies présentes, car ces groupes de fongicides ont un large spectre d'activité. La situation devient critique si la lutte contre le second ravageur exige un taux plus élevé d'application que le premier ravageur ciblé par le traitement. Si, à une date ultérieure, le ravageur secondaire devient le problème principal, la résistance pourrait se développer plutôt rapidement.

Taux d'application

Bien que le taux d'application des pesticides ne soit pas établi en fonction de la résistance, il est important de respecter les doses recommandées et ne pas appliquer une dose inférieure. Théoriquement, le taux d'application recommandé devrait éliminer tous les individus sensibles et l'essentiel de tous les individus hétérozygotes résistants de la population du ravageur, tout en réduisant le nombre de ravageurs au dessous du seuil économique. Si la dose appliquée est trop faible, les individus sensibles seront éliminés mais les hétérozygotes résistants survivront. Une dose trop faible aura également pour effet de rendre le gène de la résistance fonctionnellement dominant et la résistance se développera rapidement. Toutefois, la tentative d'éliminer les individus hétérozygotes sera plus efficace si la population n'est pas

très nombreuse, si elle est constituée principalement par des individus sensibles, et si elle est sujette à immigration par des individus sensibles. Alors, les individus homozygotes hautement résistants seront rares, et présenteront probablement une valeur adaptative réduite à cause des gènes de résistance.

Appliquer un dosage supérieur à celui recommandé n'est pas à conseiller non plus. Car s'il y aura des survivants après application d'un dosage élevé, ils seront principalement homozygotes résistants. En particulier, quand il n'y a pas d'immigration d'individus sensibles, les taux d'application élevés contribueront probablement à augmenter le développement de la résistance. En outre, ils élimineront aussi les ennemis naturels, ce qui aura pour résultat d'accroître les populations de ravageurs.

Couverture

La couverture du substrat (culture, produit) traité est très importante. Si la couverture est bonne, et la quantité de pesticide appliqué est correcte, les ravageurs présenteront le taux de mortalité désiré. Si la couverture est médiocre, certaines zones recevant plus de pesticide et d'autres moins ou pas du tout, le résultat sera le même que quand on utilise des taux d'application inférieurs aux quantités recommandées par l'étiquette. Il y aura sélection des individus homozygotes et le développement de la résistance s'en trouvera favorisé.

Systemie

Le recours aux pesticides systémiques plutôt qu'à ceux de contact peut à la fois accélérer et ralentir le développement de la résistance. Généralement, les insecticides systémiques ont un impact inférieur sur les insectes utiles associés au ravageur. Ainsi, après un traitement insecticide, les prédateurs sont toujours présents et pourront éliminer un grand nombre des ravageurs survivants, prévenant ainsi la transmission de leurs gènes résistants au reste de la population. Mais les composés systémiques ont aussi leurs inconvénients.

L'impact de la systémie dépend du composé en question. Les insecticides systémiques fournissent au ravageur infestant une dose plus uniforme et peuvent atteindre des ravageurs qui pourraient avoir échappé à un pesticide de contact, protégés contre l'application foliaire parce qu'ils se trouvaient au dessous d'une feuille pendant le traitement. Tandis que cela est positif pour la lutte contre les ravageurs, cela peut accroître la sélection de la résistance, car il n'y a plus de possibilité que quelques individus sensibles échappent au traitement et entretiennent la population des ravageurs avec leurs gènes. En ce qui concerne les fongicides, la systémie permet au produit d'imprégner la plante au fur et à mesure que le feuillage se développe, protégeant ainsi les tissus végétaux qui n'ont pas été traités directement. En général, les composés systémiques persistent dans la plante plus longtemps que les pesticides de contact, créant ainsi une plus grande pression sélective eu égard à la résistance, en particulier si l'afflux du ravageur est continu.

La tentation est grande d'utiliser des fongicides systémiques comme application curative, pour combattre les infections fongiques après qu'elles se sont installées dans le tissu végétal. D'une manière générale, cela n'est pas considéré comme une bonne pratique, et la plupart des directives concernant la gestion de la résistance déconseillent spécifiquement les applications curatives à cause de la pression sélective accrue qu'elles exercent.

Fréquence des traitements

Il convient de limiter la fréquence des traitements pesticides au nombre nécessaire à la protection de la culture ou à la lutte contre le ravageur, car les traitements superflus accroissent la pression sélective dans la population du ravageur. Il est particulièrement déconseillé d'effectuer des traitements fréquents à des doses sous-optimales (par exemple par souci d'économie) cela peut conduire rapidement à un développement de la résistance. Seuls

les individus sensibles seront éliminés de la population, tandis que les hétérozygotes deviendront fonctionnellement résistants et seront par conséquent sélectionnés avec les individus homozygotes résistants. Il y a eu des cas où, à la suite d'applications fréquentes, la lutte contre un ravageur a donné des résultats spectaculaires (provisoirement), pour être aussitôt suivis par l'apparition de sérieux problèmes de résistance. Dans les cas où un mouvement continu d'individus non traités dans une zone, rend nécessaire des applications fréquentes, il convient d'alterner les traitements pesticides avec des composés non apparentés, de manière à réduire la pression sélective sur la population du ravageur.

Présence de ravageurs secondaires

Ainsi qu'exposé plus haut au paragraphe concernant le spectre d'activité, il faut également prendre en considération la présence de ravageurs non ciblés mais sensibles qui se trouvent être présents dans une culture à un niveau de sous-traitement, alors qu'une autre espèce de ravageur a atteint le seuil de traitement. Bien que la seconde espèce soit ciblée, la première sera également sélectionnée par le traitement pesticide. C'est la raison pour laquelle il faut tenir un registre des applications de pesticides et le consulter. Malheureusement les spécialistes des cultures, en étudiant un programme de lutte contre les ravageurs, négligent souvent de prendre en considération les traitements déjà effectués au moment où l'état du ravageur était à un niveau de sous-traitement.

Stades de vie traités

La résistance a moins de chances de se développer si les insectes peuvent être traités pendant un stade de vie pendant lequel ils sont particulièrement vulnérables aux pesticides (par exemple, chez *Lepidoptera*, le nouveau-né ou larves au premier stade larvaire ou les mâles adultes ont une capacité très réduite de métaboliser les insecticides) ou si les différents stades de vie peuvent être traités avec des composés non apparentés. Ce dernier cas s'explique parce que, si certains individus se démontrent résistants à un certain stade de vie, ils seront probablement éliminés si, au stade suivant, ils sont traités avec un composé non apparenté. Toutefois, cette approche est difficile à réaliser, à moins que les générations soient parfaitement synchronisées ou que les larves et les adultes vivent dans des environnements différents. Le plus souvent, sur le terrain, les stades de vie sont confondus.

Proportion de la population traitée

Généralement, la résistance ne se développe pas en même temps sur toute la zone géographique de l'espèce de ravageur. Il est beaucoup plus probable qu'elle se développe localement. Dans le cas des champignons, par exemple chez l'oïdium des céréales, souvent la résistance apparaît d'abord dans les zones d'utilisation intensive de fongicide et de haute intensité de maladie, c'est-à-dire dans le nord de l'Europe et puis elle se propage vers le sud. En ce qui concerne les insecticides et les herbicides, si ce sont seulement certains champs ou des zones localisées qui sont traités, les individus ou les semences sensibles peuvent se transférer dans la zone traitée et tous les gènes résistants présents seront dilués quand les individus sensibles s'accoupleront ou le pollen des plantes sensibles se croquera avec les survivants résistants. À l'inverse, pour tous les pesticides, une zone localisée peut faire l'objet de traitements excessifs et une population résistante locale peut être ainsi créée. Chez les espèces à grande mobilité, comme les spores, les graines et les arthropodes transportés par le vent, les gènes résistants peuvent être transportés dans d'autres zones où le gène est absent ou présent seulement à très petites fréquences.

Persistance

Toutes choses étant égales par ailleurs, il est moins probable que la résistance se développe avec les pesticides moins persistants, parce que la pression sélective est inférieure. Toutefois, dans certains cas, il est préférable d'utiliser des produits à effet résiduel prolongé car ils

demandent moins d'applications. Néanmoins, si le pesticide se disperse lentement, à un certain moment, on atteindra le point où les individus résistants seront sélectionnés et la résistance apparaîtra.

Chez les insectes, l'importance de la sélection dépend en partie des déplacements de l'insecte ravageur. Par exemple, si l'application d'origine a éliminé la plupart des ravageurs et qu'il y a seulement quelques individus non traités dans les zones traitées, la sélection sera faible. Si au contraire, il y a un apport continu d'individus non traités provenant des zones adjacentes, ou surgissant du sol, alors le nombre d'individus résistants sélectionnés pourra être élevé. Si les traitements ne sont pas fréquents et la persistance de courte durée, les gènes résistants de la population peuvent être dilués par l'apport d'individus sensibles. Dans le meilleur des cas de figures, on a un pesticide hautement actif qui donne le résultat escompté en matière de lutte contre le ravageur et qui ensuite se dégrade très rapidement. La persistance et la fréquence des applications sont liées. Les pesticides à échéance résiduelle courte tendent à exercer une pression sélective moindre et le développement d'une résistance est plus lent. Toutefois, des applications fréquentes peuvent annuler les bénéfices d'un pesticide à échéance résiduelle courte.

Nombre de cultures traitées

Lorsque plusieurs cultures différentes sont traitées avec le même pesticide, le risque qu'une résistance se développe est plus grand, en particulier chez les ravageurs polyphages, ayant une vaste gamme de plantes hôtes. Le pesticide sélectionnera les insectes sur différentes cultures successives et il y aura moins d'individus sensibles.

Séquence de la culture

Si dans une même zone, les cultures sont séparées dans le temps (c'est-à-dire si les cycles de cultures successifs sont intercalés de périodes de jachères) ou si elles sont plantées dans des aires géographiques différentes, le risque qu'une résistance apparaisse est inférieur. D'autre part, si la période culturale est continue, le pesticide pourra sélectionner un grand nombre de ravageurs et la résistance se développera plus rapidement. De même les cultures plantées sur une vaste étendue continue, les refuges où les individus sensibles pourront survivre seront plus rares.

Tactiques de lutte contre les ravageurs

L'usage continu d'un même pesticide ou le seul recours à la lutte chimique, augmentera probablement le risque d'apparition d'une résistance aux pesticides. C'est pourquoi les stratégies de prévention et de gestion de la résistance, conseillent l'utilisation de tactiques de lutte multiples, fondées sur des pratiques chimiques, biologiques et culturales.

Effets sur les éléments non ciblés

Pour les insecticides en particulier, les méthodes de lutte qui n'affectent pas les ennemis naturels des ravageurs de la culture, comme les insecticides sélectifs et/ou des techniques alternatives de gestion des ravageurs, tendent à ralentir l'apparition de la résistance. En effet, les ennemis naturels tueront aussi bien les ravageurs résistants que ceux sensibles, réduisant ainsi la fréquence des gènes résistants de la population, si la résistance n'est pas encore prédominante.

2.4 Risque de résistance aux fongicides

Le risque de développement de la résistance dépend largement de la classe chimique du fongicide, de la maladie concernée et de comment et où le traitement est administré. Chaque

classe chimique se caractérise par un schéma type de résistance. Le tableau 2 range les principales classes chimiques de produits et composés, selon le degré de risque élevé, modéré ou faible pour qu'ils déclenchent une résistance.

Tableau 2 Risque inhérent de résistance lié aux différents fongicides et classes chimiques de fongicides.

Risque de résistance	Classe de produits ou composés chimiques
Élevé	Benzimidazoles, dicarboximides, phénylamides, analogues de la strobilurine (par exemple. méthoxyacrylates, oximino acétates)
Modéré	2-Amino-pyrimidines, amines (y compris morpholines), anilinopyrimidines, hydrocarbures aromatiques, azoles, carboxanilides, amides d'acide carboxylique, carpropamide, cymoxanil, fenhexamide, kasugamycine, phenyl-pyrroles, phosphorothiolates, quinoxifène
Faible	Chlorothalonil, cuivres, dithiocarbamates, fosetyl-Al, pyroquilon, phthalimides, soufres, tricyclazole

[Sources: Brent & Hollomon (2007a,b), FRAC (2011)]

Outre les risques de résistance liés aux différents fongicides, il y a également un certain nombre d'agents pathogènes qui ont montré une tendance à développer une résistance au fil des années. Ils sont indiqués au tableau 3.

Tableau 3 Exemples d'agents pathogènes des plantes estimés présenter un risque élevé de développement d'une résistance.

Agent pathogène	Culture
<i>Phytophthora infestans</i>	Pommes de terre (phénylamides seulement)
<i>Plasopara viticola</i>	Raisins
<i>Erysiphe gaminis</i>	Blé et orge
<i>Uncinula necator</i>	Raisins
<i>Sphaerotheca</i> spp.	Variés
<i>Mycosphaerella fijiensis</i>	Bananes
<i>Pyricularia oryzae</i>	Riz
<i>Gibberella fujikuroi</i>	Riz
<i>Botryotinia fuckeliana</i>	Variés, surtout raisins
<i>Venturia</i> spp.	Pommes et poires

[Source: OEPP/EPPPO (2002)]

Avec les nouveaux fongicides qui n'entrent pas dans les catégories ci-dessus, il convient de considérer les facteurs individuels qui peuvent conduire au développement de la résistance. Le tableau 4 fournit les éléments pour le faire.

Tableau 4 Cadre de travail permettant de prévoir le développement d'une résistance à un nouveau fongicide

Facteur	Indication positive de risque d'une résistance
Caractéristiques inhérentes au fongicide	
Classe du fongicide	Quand le fongicide fait partie d'une classe connue pour avoir des problèmes de résistance.
Site cible	S'il y a un seul site cible, ou si on sait que le site peut changer en adoptant une forme non touchée, ou moins touchée, par d'autres fongicides.
Résistance croisée	S'il y a des lignées de pathogènes cibles résistantes aux fongicides existants et qui résistent aussi au nouveau fongicide.
Réponse à des agents mutagènes	Si le traitement par des agents mutagènes occasionne la production, par le champignon cible, de mutants résistants et bien adaptés.
Réponse aux expériences de croisement sexué	Si le croisement sexué occasionne la production, par le champignon cible, de recombinants résistants et bien adaptés.
Réponse à des applications répétées du fongicide	Si l'exposition répétée du champignon cible au fongicide, en laboratoire ou sur des parcelles au champ, provoque l'apparition de lignées résistantes et adaptées, à un niveau décelable.
Caractéristiques inhérentes à l'agent pathogène de la plante	
Temps de reproduction	Si le pathogène cible se multiplie rapidement et, donc les applications de fongicide sont fréquentes.
Degré de sporulation	Si la sporulation du pathogène est abondante.
Dispersion des spores	Si les spores se propagent aussitôt entre les plantes, les cultures et dans la région.
Capacité d'adaptation génétique	Si le pathogène est haploïde, si la structure de ses gènes permet d'exprimer des mutations orientées vers la résistance, s'il a une séquence obligatoire de reproduction sexuée et asexuée dans le cycle de la maladie, ou s'il montre d'autres signes de faculté d'adaptation génétique.
Historique de la résistance	Si l'agent pathogène a un historique de développement de résistance aux fongicides (de tous types).
Conditions d'utilisation (déterminées au niveau local)	
Application du fongicide	Si les applications du fongicide seront répétées, si le fongicide (ou les fongicides qui lui sont apparentés par la résistance croisée) seront utilisés continuellement et/ou extensivement sur les cultures de la région.
Mesures complémentaires	Si d'autres types de fongicides (en préparation mixte ou en rotation) ou si des mesures non chimiques contre les maladies (par ex., rotation des cultures, variétés résistantes, précautions hygiéniques) ne doivent pas être utilisés.
Incidence de l'agent pathogène ("pression exercée par la maladie")	Si le pathogène est présent en grande quantité et/ou sur de grandes superficies, et/ou s'il se multiplie rapidement pendant une période prolongée (temps de reproduction bref).
Isolement de l'agent pathogène	Si les populations du pathogène cible sont isolées et/ou non migrantes, par exemple dans les cultures en serre.
[Source: Brent & Holloman (2007a)]	

La figure 3 montre comment il est possible de classer par catégories le risque inhérent de résistance lié à certains fongicides et agents pathogène spécifiques. La catégorisation du risque est approximative et les résultats sont arbitraires, mais ce sont là les meilleures évaluations possibles à la lumière des connaissances actuelles. Le Comité d'action pour la résistance aux fongicides (FRAC), un groupe technique d'experts mis en place par CropLife International, qui fournit des orientations en matière de résistance aux fongicides, examine régulièrement les risques de résistance des groupes chimiques et tient à jour une liste des organismes pathogènes des végétaux résistants aux agents de lutte contre les maladies des plantes, qui indique si un organisme a montré une résistance au champ ou en laboratoire, y compris des études sur les mutations.

Figure 3 Risque de développement d'une résistance liée à des combinaisons spécifiques fongicide-pathogène. Le risque inhérent de résistance lié à des fongicides et des agents pathogènes spécifiques peut d'abord être classé séparément en élevé, moyen, faible ou non existant (notés respectivement par 3, 2, 1, ou 0,5), et ensuite être combiné pour un résultat fongicide-pathogène (noté de 9 à 0,5). [Source: Brent & Holloman (2007a)]

Risque combiné: 1 = faible, 2-6 = moyen, 9 = Élevé				
Élevé Benzimidazoles Qols Phénylamides Dicarboximides	3	3	6	9
Moyen Carboxanilides DMI Phénylpyrroles Phosphorothiolates Anilinopyrimidines MBI-Ds	2	2	4	6
Faible Cuivres, Soufres Chlorothalonil Dithiocarbamates Phthalimides MBI-Rs Probénazole	0,5*	0,5	1	1,5
		1	2	3
		Faible <i>Rizoctonia</i> Rouilles Maladies transmises par le sol Charbons et caries	Moyen Piétin-verse <i>Mycosphaerella graminicola</i> <i>Rhynchosporium</i>	Élevé <i>Bptrytis</i> <i>Blumeria</i> <i>Magnaporthe</i> <i>Venturia</i> <i>Plasmopara</i> <i>Penicillium</i> <i>M. fijiensis</i> <i>Phytophthora infestans</i> **
<p>* Cette note basse reflète la situation prolongée de "non-résistance" dans ce groupe à risque faible.</p> <p>** D'aucuns considèrent que <i>Phytophthora infestans</i> présente un risque moyen car la classification de risque élevé est largement fondée sur la réaction aux phénylamides.</p> <p>Les informations à jour sont disponibles sur le site web du FRAC: www.frac.info.</p>				

En fin de compte, le développement d'une résistance dans un pays ou une région dépend des conditions d'utilisation des fongicides. Ces conditions sont parfois considérées comme modificateurs du risque, mais en fait, elles représentent un élément déterminant dans le développement de la résistance et doivent toujours être prises en considération et faire partie intégrante de l'évaluation. On considère que les conditions d'utilisation les plus importantes qui influent sur le développement de la résistance sont les suivantes:

- le nombre des applications – plus un composé particulier est appliqué à une population pathogène, plus la sélection de la résistance est rapide;

- l'utilisation exclusive d'un seul mode d'action – plus on a recours exclusivement à un seul mode d'action, plus est forte la pression sélective de la résistance;
- le dosage du fongicide utilisé – l'application d'une dose inférieure à celle recommandée par l'étiquette du produit peut accroître la pression sélective de la résistance;
- l'ampleur des populations pathogènes exposées au fongicide – si l'incidence de la maladie, dans une région particulière est relativement faible, sporadique, ou irrégulière d'une saison à l'autre, la sélection de la résistance se réduit;
- la taille des parcelles traitées et la proportion de la zone ou de la région traitée – plus les parcelles traitées sont grandes et plus est grande la proportion de l'ensemble de la zone où le fongicide est utilisé, plus la sélection s'étend et plus se créent des variantes résistantes;
- le recours aux fongicides seulement et la non-utilisation de la gestion intégrée des maladies – aboutiront à une pression sélective accrue aux fongicides; et
- l'isolement des populations pathogènes (par exemple, dans les serres, les tunnels en polyéthylène, ou les régions agricoles isolées), qui empêche la réintroduction de variétés sensibles – peut favoriser le développement de populations résistantes.

2.5 Risque de résistance aux herbicides

La résistance aux herbicides a évolué moins vite que la résistance aux insecticides et aux fongicides, mais elle a été observée au niveau mondial. Ce fait s'explique par:

- la reproduction relative lente des végétaux, souvent une seule génération par an;
- la pression sélective incomplète des herbicides;
- les réserves de semences du sol (banques de semences);
- plasticité des plantes nuisibles;
- multiplicité des modes d'action des premiers herbicides; et
- recours à des méthodes non chimiques de lutte contre les mauvaises herbes en même temps que l'utilisation d'herbicides.

Dans nombre de cas, la mauvaise herbe ne semble pas souffrir du coût de la valeur adaptative en présence du gène de la résistance. En conséquence, la fréquence de ces gènes pourrait être élevée avant même qu'ils ne soient sélectionnés par l'utilisation de l'herbicide. Dans la plupart des cas, la résistance aux herbicides implique une mutation simple ou la modification de certaines fonctions de sorte que la mauvaise herbe présente une résistance ou une résistance croisée. Des cas de résistance multiple ont été observés mais il est rare qu'une plante unique possède des mécanismes de résistance multiples.

À l'heure actuelle, la résistance aux herbicides connaît un accroissement exponentiel. Cela peut être dû au fait que plusieurs parmi les herbicides nouveaux sont très actifs et visent un seul et unique site cible.

Les principaux mécanismes de résistance aux herbicides sont les suivants:

- *site cible altéré*: à cause d'un changement dans la structure du site cible, l'herbicide ne se fixe plus à son site d'action normal, permettant ainsi à la plante de survivre au traitement herbicide;
- *métabolisme renforcé*: la plante résistante peut décomposer l'herbicide en substances non phototoxiques, plus rapidement qu'une plante sensible normale, et survivre ainsi à un

traitement herbicide, de la même manière que de nombreuses plantes cultivées; et

- *séparation/séquestration*: l'herbicide est enlevé des parties sensibles de la cellule végétale et acheminé vers un site tolérant, comme une vacuole, où il est inoffensif pour la croissance de la plante.

Le facteur le plus important pour le développement de la résistance aux herbicides est l'usage fréquent de produits ayant des modes d'action semblables. Parmi les autres facteurs on trouve:

- l'intensité de la pression sélective;
- le recours à la rotation des cultures basée principalement sur les herbicides pour la lutte contre les mauvaises herbes – la rotation des cultures est importante car elle détermine la fréquence des traitements et le type de pesticide à utiliser. Elle représente également le facteur le plus important lorsqu'il s'agit de choisir des options non chimiques de lutte contre les mauvaises herbes, enfin elle a un impact puissant sur la flore adventice présente;
- le défaut de pratiques de lutte non chimique contre les mauvaises herbes – les techniques culturales ou non chimiques de lutte contre les mauvaises herbes, associées à une approche intégrée, sont essentielles dans un système de gestion durable des cultures;
- la fréquence des gènes résistants dans les mauvaises herbes; et
- la dimension et la viabilité de la banque de semences, c'est-à-dire des semences adventices dormantes dans le sol, qui peuvent faire fonction de tampon en retardant le développement de la résistance.

Le tableau 5 montre comment les différents facteurs opérationnels agissent sur le développement de la résistance aux herbicides et, plus précisément, si les pratiques culturales présentent un risque faible, modéré ou élevé de sélectionner la résistance dans les mauvaises herbes traitées.

Tableau 5 Impact des facteurs opérationnels sur le développement de la résistance aux herbicides

Facteurs opérationnels	Risque de développement d'une résistance		
	Faible	Modéré	Élevé
Système de culture	Rotation complète	Rotation limitée	Pas de rotation
Herbicides mixtes ou rotation du système de culture	>2 modes d'action	2 modes d'action	1 mode d'action
Lutte contre les adventices dans le système de culture	Cultural, mécanique et chimique	Cultural et chimique	Chimique
Recours au même mode d'action par saison	Une fois	Plus d'une fois	Plusieurs fois
Résistance de l'adventice au mode d'action	Inconnue	Limitée	Courante
Infestation par la mauvaise herbe	Faible	Modérée	Élevée
État de la lutte dans les derniers 3 ans	Bon	Déclinant	Médiocre

[Source: HRAC (2011)]

Certaines classes d'herbicides sont plus susceptibles que d'autres de présenter des problèmes de résistance. Le tableau 6 montre la rapidité et la probabilité du développement de la résistance pour différents groupes d'herbicides, classés suivant leur site d'action par le Comité d'action pour la résistance aux herbicides (HRAC), un groupe technique d'experts mis en place par CropLife International, qui donne des orientations en matière de résistance aux herbicides.

Tableau 6 Années requises pour le développement d'une résistance dans les groupes d'herbicides du HRAC et risque de résistance.

Groupe d'herbicides (Classification HRAC)	Nombre d'années d'application avant le développement d'une résistance	Risque de résistance
A	6 - 8	Élevé
B	4	Élevé
C	10 - 15	Moyen
D	10 - 15	Moyen
F	10	Moyen
I	Inconnu	Faible
L	>15	Faible
M	15	Faible

[Source: HRAC herbicide classification, FAO (2008)]

En règle générale, un herbicide ayant une faible pression sélective, quand il est utilisé sporadiquement et alterné avec des pratiques de lutte non chimique, présente un risque de résistance faible. Il y a également un certain nombre d'espèces adventices qui ont montré une certaine prédisposition à développer une résistance aux herbicides. Elles sont énumérées au tableau 7.

Tableau 7 Dix principales adventices présentant une résistance aux herbicides dans le monde

Espèces	Nom commun
<i>Lolium rigidum</i>	Ivraie effilée
<i>Avena fatua</i>	folle-avoine
<i>Amaranthus retroflexus</i>	Amarante réfléchie
<i>Chenopodium album</i>	Chénopode blanc
<i>Setaria viridis</i>	Sétaire verte
<i>Echinochloa cus-galli</i>	Panic pied de coq
<i>Kochia scoparia</i>	Faux cyprès
<i>Conyza canadensis</i>	Vergerette du Canada
<i>Amaranthus hybridus</i>	Amarante hybride

[Source: HRAC (1999)]

2.6 Risque de résistance aux insecticides

L'histoire de la résistance aux insecticides est longue. En fait, tôt ou tard, tous les principaux insecticides induisent une résistance. À ce jour, l'objet principal de la recherche sur la résistance visait à mettre au point des tactiques pour éviter ou retarder la résistance aux insecticides. La plupart des problèmes liés à la résistance des insectes sont associés aux facteurs indiqués au tableau 8.

Tableau 8 Facteurs liés au développement de la résistance chez les insectes.

Facteur	Effet sur le développement de la résistance
Facteurs liés aux insectes	
Cycle de vie court	La population d'insectes reçoit plusieurs ou de nombreux traitements par culture, par saison, ce qui risque d'abrèger le temps de développement de la résistance.
Infestation élevée/niveau de population	Même en présence d'un niveau élevé de lutte, il peut y avoir un nombre relativement important de survivants sélectionnés, conduisant à un développement accéléré de la résistance.
Progéniture nombreuse par femelle	Permet à un nombre relativement bas d'insectes de reformer rapidement une vaste population, à partir de survivants sélectionnés porteurs du (des) gène(s) résistants.
Large gamme de plantes hôte	L'insecte peut être sélectionné sur plusieurs cultures par année.
Facteurs opérationnels	
Emploi de doses inférieures à celles indiquées sur l'étiquette	Sélectionne les individus hétérozygotes résistants augmentant la fréquence des gènes de la résistance dans la population de ravageurs.
Couverture non appropriée	Équivalent à l'emploi à faible dose, qui accroît la survie des hétérozygotes résistants et donc, la fréquence du (des) gène(s) résistant(s).
Temps d'application impropres	Les stades les moins sensibles sont ciblés ou la population peut s'accroître énormément. Cela peut conduire à la sélection d'hétérozygotes au sein des stades les moins sensibles et le traitement de populations nombreuses aura pour résultat la sélection d'un grand nombre d'individus résistants.
Emploi d'une seule classe de produits chimiques	Niveau élevé de sélection, soit accroissement de la pression sélective de la résistance.
Lutte presque/exclusivement chimique	La pression sélective élevée sur les insecticides tue les prédateurs et les parasites, permettant ainsi aux gènes résistants de s'accroître dans la population de ravageurs.
Cibler un seul ravageur et une seule culture	Ignore la présence d'insectes en dessous du niveau seuil ainsi que le traitement d'autres cultures; accroît la sélection de la résistance chez les espèces non ciblées.
Emploi de composés à échéance résiduelle longue	Les composés se dégradent tout en permettant la survie d'individus hétérozygotes, faisant croître ainsi la fréquence des gènes résistants.
Emploi de produits à large spectre	Élimine les prédateurs et les parasites ce qui contribue à atteindre les objectifs de la lutte aux ravageurs, mais peut aussi sélectionner la résistance dans les populations non ciblées présentes dans la même zone.
[Sources: IRAC (2011), Whalon et al, (2008), NRC (1986)]	

Un certain nombre d'espèces d'insectes ont développé une résistance plus que d'autres. Elles sont illustrées au tableau 9, et comprennent plusieurs parmi les espèces d'arthropodes les plus difficiles et économiquement nuisibles au monde. Ces espèces tendent à compter des populations très nombreuses avec un renouvellement générationnel court. Par conséquent, les infestations tendent à faire l'objet d'un grand nombre d'applications d'insecticide par année. Au fil des ans, plusieurs de ces espèces ont été traitées par presque tous les nouveaux insecticides ou acaricides étudiés. Bien qu'elles ne soient pas nécessairement résistantes à tous les insecticides ou à toutes leurs gammes. Ces espèces demandent une attention particulière. Si l'une d'elle devient un ravageur cible, il est décisif de mettre au point un plan de gestion de la résistance comprenant le plus possible de bonnes pratiques de gestion intégrée, avant d'entreprendre un traitement quelconque, avec un insecticide existant ou nouveau. En fait, en décidant de traiter des espèces non comprises dans cette liste, il conviendra de se montrer prudent: il ne faut pas supposer qu'elles ne développeront pas de résistance à un nouvel insecticide appartenant à une nouvelle classe chimique, car cette possibilité existe bien.

Tableau 9 Les 20 arthropodes principaux dont on a constaté la résistance aux insecticides en agriculture et en santé publique. Le classement est fondé sur le nombre d'insecticides auxquels les insectes sont résistants, de 1 (résistants au plus grand nombre de produits) à 20.

Ordre	Famille	Espèce	Classement	Hôte
Acarien	Acaridés	<i>Rhizoglyphus robini</i>	19	Plantes ornementales oignons stockés
Acarien	Ixodidés	<i>Boophilus microplus</i>	6	Bétail
Acarien	Tétranychidés	<i>Panonychus ulmi</i>	9	Arbres à fruits
Acarien	Tétranychidés	<i>Tetranychus urticae</i>	1	Coton, fleurs, fruits, légumes
Coleoptère	Chrysomelidae	<i>Leptinotarsa decemlineata</i>	4	Pomme de terre, aubergines, tomates
Coleoptère	Tenebrionidés	<i>Tribolium castaneum</i>	17	Graines stockées, arachides, sorgho
Dermaptère	Blatteliidae	<i>Blatella germanica</i>	7	Urbain
Diptère	Caliphoridés	<i>Lucilia cuprina</i>	18	Bétail, ovins
Diptère	Culicidés	<i>Anopheles albimanus</i>	20	Humains
Diptère	Culicidés	<i>Culex pipiens pipiens</i>	11	Humains
Diptère	Culicidés	<i>Culex quinquefasciatus</i>	15	Humains
Diptère	Muscidés	<i>Musca domestica</i>	5	Urbain
Hémiptère	Aleyrodidés	<i>Bemisia tabaci</i>	8	Serres, coton, cucurbitacées, crucifères (choux) et légumes
Hémiptère	Aphididés	<i>Aphis gossypii</i>	10	Coton, légumes
Hémiptère	Aphididés	<i>Myzus persicae</i>	3	Fruits, légumes, arbres, graines
Hémiptère	Aphididés	<i>Phorodon humuli</i>	12	Houblon, prunes
Lépidoptère	Noctuidés	<i>Helicoverpa armigera</i>	13	Coton, maïs, tomates
Lépidoptère	Noctuidés	<i>Heliothis virescens</i>	14	pois chiches, coton, maïs, tomates
Lépidoptère	Noctuidés	<i>Spodoptera littoralis</i>	16	Luzerne, coton, pommes de terre, légumes
Lépidoptère	Plutellidés	<i>Plutella xylostella</i>	2	Crucifères (choux)

[Source: Michigan State University (sans date)]

2.7 Risque de résistance aux rodenticides

Le processus du développement de la résistance chez les rongeurs est semblable à celui observé chez les autres espèces de ravageurs, c'est-à-dire il est le résultat d'une utilisation excessive, du sous-dosage, et de l'emploi d'une seule classe de produit chimique. Cependant, il y a deux facteurs uniques qui sont spécifiques aux rodenticides. Ce sont:

- l'habileté de certains rongeurs d'apprendre à éviter les appâts traités et les pièges, appelée crainte de l'appât ou aversion acquise envers l'appât. Ce comportement est observé le plus souvent avec les poisons aigus. Les rodenticides modernes se limitent à l'action anticoagulante retardée;
- la taille des populations de rongeurs, lesquelles sont notoirement plus petites que celles des champignons, des insectes ou des adventices. Le moyen principal de lutte est l'appât empoisonné que chaque individu doit décider de manger. Il n'y a pas pulvérisation de grandes superficies comme avec les herbicides, ou les insecticides.

Chez les rongeurs, la résistance aux anticoagulants est plutôt complexe. La cause principale

de la résistance chez les rats de Norvège (*Rattus norvegicus*) semble trouver raison dans les mutations du gène VKOR qui affecte le métabolisme de la vitamine K. La détoxification accrue par le cytochrome P450 est également mise en relation avec la résistance. De même que chez les ravageurs arthropodes, la résistance chez les rongeurs est influencée par les caractéristiques reproductives, les caractéristiques du pesticide, et l'histoire antérieure de la population.

Bien que la résistance à certains composés anticoagulants existe dans un certain nombre de régions, en particulier dans les pays de l'Amérique du Nord et de l'Europe du Nord, et chez les espèces *R. norvegicus*, *Mus musculus*, *M. domesticus* and *R. rattus*, la lutte contre les rongeurs reste satisfaisante avec les rodenticides actuellement disponibles, même dans les endroits où la résistance existe. Cette situation devrait se maintenir stable dans l'avenir prévisible.

3 Prévention et gestion de la résistance aux pesticides

3.1 Conception d'un plan de gestion de la résistance

Un plan de gestion de la résistance décrit les tactiques ou les mesures qu'il convient de prendre pour prévenir et/ou gérer la résistance d'un ravageur donné à un pesticide. Le but est de réduire la sélection des gènes de la résistance dans une population de ravageurs. Les tactiques doivent être étudiées de manière à maintenir une fréquence élevée des gènes sensibles et une fréquence faible des gènes résistants dans la population du ravageur, en réduisant la pression sélective, tout en assurant le niveau requis de maîtrise du ravageur. Ces tactiques seront différentes pour chaque groupe de ravageur, mais il y a un certain nombre de principes généraux qui s'appliquent à tout plan de gestion de la résistance.

3.2 Principes généraux

Gérer de la résistance aux pesticides comme partie de la GID

Il est hautement recommandé qu'un plan d'action pour la gestion de la résistance soit étudié dans le cadre d'une approche globale de gestion intégrée des déprédateurs pour un ravageur et un système de cultures donnés. Cela permettra d'assurer que des stratégies rationnelles de lutte contre les ravageurs, fondées sur les principes de la gestion intégrée - y compris l'utilisation des pesticides seulement en cas de nécessité et le recours, autant que possible, à des techniques alternatives de gestion des ravageurs - sont conçues pour gérer la résistance.

Mettre en œuvre les programmes de prévention et gestion de la résistance lorsque de nouveaux pesticides sont introduits

Les plans de gestion de la résistance doivent être mis en œuvre avant que la résistance ne devienne un problème et doivent être appliqués de manière uniforme sur de vastes zones pour en obtenir entièrement le bénéfice biologique. Lorsqu'on remarque les premiers symptômes de la résistance, la fréquence des gènes résistants aura déjà augmenté de façon significative. Il deviendra plus difficile de maintenir la sensibilité globale de la population du ravageur. À moins que le coût de la valeur adaptative ne soit très élevé, le(s) gène(s) résistants pourraient progressivement s'accumuler dans la population du ravageur.

Se concentrer sur le ravageur

Lorsque l'on conçoit un Plan de gestion de la résistance, il est important de collecter le

maximum possible d'informations concernant la biologie du ravageur et ses hôtes. Ces informations sont essentielles pour comprendre la perte de sensibilité et le développement de la résistance chez le ravageur ciblé. Le Plan de gestion de la résistance doit prendre en considération toute la zone où se trouve le ravageur, et non pas uniquement la culture visée. L'idéal serait de mettre le plan en œuvre dans toute la région cultivée, en se concentrant sur le ravageur plutôt que sur une culture en particulier, et d'en faire adopter les mesures par tous les cultivateurs de la région. Tous les efforts d'un Plan de gestion important peuvent être annulés même par une toute petite non application. Dans le cas des fongicides, le plan devrait être réalisé sur une vaste zone géographique, généralement des régions entières ou des pays. Dans le cas des herbicides, le plan devrait être axé sur la gestion des mauvaises herbes dans toute les cultures en rotation.

Prendre en considération les cultures hôtes adjacentes

En particulier, en matière de résistance chez les insectes, le plan de gestion devrait prendre en considération les traitements pesticides effectués sur les cultures hôtes au voisinage de la culture hôte principale. En effet, il est probable que plusieurs des mêmes espèces d'insectes ravageurs soient présentes sur les autres cultures, voisines ou en séquence alternée ou sur des plantes hôtes sauvages. Si on utilise le même pesticide, ou un pesticide apparenté, sur toutes ces cultures, la population subit une pression sélective bien plus importante que celle escomptée.

Par exemple, *Bemisia* sp infeste aussi bien le coton que les légumes, et se déplace facilement d'une culture à l'autre. Si on effectue cinq applications sur le coton et cinq autres sur une culture maraîchère, la population de *Bemisia* sp recevra annuellement dix applications ou sélections. Si on examine chaque culture séparément, il apparaîtra que la population subit seulement cinq sélections par an. En étudiant le plan de gestion de la résistance, il est donc important de tenir compte de ces facteurs. Si chaque culture est considérée séparément, il est fort probable que la pression sélective exercée sur la population de ravageurs sera sous-estimée, surtout si différents cultivateurs et experts des cultures sont concernés.

Prendre en considération des mesures alternatives (non chimiques) de gestion des ravageurs

Un plan de gestion de la résistance, respectueux des principes et stratégies de la GID, doit inclure le plus possible d'instruments et méthodes de lutte non chimique contre les ravageurs, pour autant qu'ils contribuent effectivement à gérer l'organisme nuisible. Parmi ces derniers, on peut compter les biopesticides, les agents de lutte biologique comme les prédateurs et les parasitoïdes, les variétés de cultures résistantes, les temps de plantation de manière à réduire les risques d'infestation, le recours à la rotation des cultures et à d'autres pratiques culturales qui interagissent avec le cycle reproductif du ravageur, l'attention aux pratiques d'hygiène comme le nettoyage des équipements pour éviter la propagation des semences et des spores, etc.

Utiliser plus d'une classe de pesticide

Un plan de gestion de la résistance doit comprendre le plus grand nombre possible de classes de pesticides pour éviter le développement d'une résistance croisée, quand la résistance à un produit crée une résistance à un autre pesticide, même quand le ravageur n'a pas été exposé à ce dernier. Plus on a recours à des composés sans résistance croisée, moins la pression sélective se fera sentir sur chacun de ces composés ou classe de composés. Ces différentes classes peuvent être appliquées en séquence (applications alternées) ou en formulations mixtes ou en mélanges en cuve contenant différents composés ayant des modes d'action différents et différents modes de résistance. La classification des modes d'action des différents fongicides, herbicides et insecticides peut être consultée en ligne à travers les liens indiqués à l'annexe 1.

Prendre en considération tous les traitements effectués pendant l'année

Un plan de gestion de la résistance doit prendre en considération tous les traitements effectués sur une culture pendant l'année, y compris les traitements avec des composés différents et à des stades différents de la vie du ravageur. Une ébauche de résistance sélective a lieu chaque fois qu'un pesticide est appliqué. De manière générale, plus on applique de traitements, plus les différents stades de vie de l'insecte sont visés et plus de générations de pathogènes sont traitées, plus rapidement la sensibilité se perdra et la résistance augmentera, à moins de prendre des mesures pour réduire la sélection des gènes résistants.

Par exemple, si un insecte du sol est traité par un insecticide du sol, la larve subira la pression sélective de la résistance. Certaines larves hétérozygotes pourraient survivre, car il est difficile d'obtenir une concentration uniforme de pesticide dans le sol. Si les adultes issus des larves traitées sont traités à leur tour par le même insecticide ou par un produit apparenté, une seconde sélection de cette génération aura lieu. Donc, dans ce cas il y aura deux stades de la vie du ravageur qui auront été sélectionnés. Certains des individus hétérozygotes ayant survécu au traitement du sol peuvent être éliminés quand les adultes sont traités, mais au fil du temps, la population verra la formation d'individus résistants. Pour éviter cela, il vaut mieux utiliser des composés différents pour traiter le stade larvaire et les adultes.

De même, si un ravageur infeste plusieurs cultures dans le courant de l'année et on utilise le même composé ou des composés apparentés sur toutes les cultures, la population subira une pression sélective beaucoup plus forte que celle que l'on pourrait calculer, si toutes les cultures et tous les traitements effectués ne sont pas pris en compte.

Appliquer seulement les quantités de pesticides recommandées

Il faut toujours appliquer les doses correctes de produit. La diminution des taux d'application de pesticide afin d'abaisser les coûts semble atteindre l'objectif de combattre le ravageur, mais ce résultat n'est que temporaire. Les applications continues en quantités inférieures à celles recommandées par l'étiquette causeront la sélection accrue d'individus hétérozygotes et homozygotes résistants, accroissant ainsi le développement d'une population résistante. L'application correcte du pesticide au taux indiqué par l'étiquette permettra d'éliminer les individus hétérozygotes résistants de la population du ravageur et de ralentir de façon significative le développement d'une population résistante.

Faire participer toutes les parties concernées

Pour avoir des chances de réussite, toute stratégie de gestion de la résistance, doit faire l'objet d'un consentement élargi de la part de toutes les parties concernées, y compris les cultivateurs, le Bureau des pesticides, les compagnies productrices et les distributeurs, le ministère de l'agriculture et les services de vulgarisation. En particulier, la stratégie doit être bien compréhensible et acceptable pour les agriculteurs. Dans le cas de plans de gestion relatifs à de vastes étendues, comme ceux conçus pour les fongicides, la coopération au niveau local et régional est essentielle pour la bonne réussite et la mise en œuvre du plan.

Évaluer et affiner le Plan de gestion de la résistance

Le développement de la résistance est un processus dynamique en évolution continue; par conséquent, les plans de gestion doivent être flexibles. Pour rester efficaces, il faut qu'ils soient continuellement réévalués et adaptés aux situations variables lesquelles peuvent comprendre des changements dans le niveau de résistance du ravageur, la disponibilité de nouveaux pesticides agissant de manière innovatrice ou la disponibilité de variétés culturales nouvelles, résistantes aux ravageurs.

3.3 Tous types de pesticides - tactiques de gestion de la résistance

Mélanges de pesticides ayant différents modes d'action et mécanismes de résistance

Les mélanges de pesticides ayant différents mode d'action peuvent efficacement contraster le développement de la résistance. En agriculture et pour la lutte contre les ravageurs, différents types de mélanges de pesticides sont utilisés - par exemple, deux pesticides ayant différents spectres, la combinaison d'un pesticide et d'un produit synergiste, la combinaison d'un insecticide et d'un fongicide, l'adjonction de micronutriments à un insecticide, etc. On tient compte ici des seuls mélanges destinés à la gestion de la résistance chez les ravageurs.

Les produits mélangés préparés et certains mélanges en cuve ont montré une bonne marge de réussite en ce qui concerne la lutte contre les insectes nuisibles et pour retarder le développement de la résistance. Comme pour l'utilisation de composés simples, les mélanges doivent toujours faire partie d'un plan de gestion de la résistance. Certains mélanges ou préparations préformulées efficaces ont été conçus pour des situations spécifiques et après un examen attentif du système cultural, des effets sur les arthropodes utiles, et le complexe des ravageurs. Si la population ciblée présente une résistance substantielle à l'un des composants du mélange pesticide, l'application de ce mélange peut aggraver la situation en sélectionnant une résistance multiple dans la population du ravageur.

Les mélanges préformulés présentent l'avantage que la gestion de la résistance y est déjà incluse par le fabricant. Les mélanges en cuve sont plus flexibles mais ne sont efficaces que si l'utilisateur est en mesure de les composer correctement. Traditionnellement, un mélange fongicide contient un fongicide à "risque élevé" (de développement d'une résistance) mélangé à un fongicide à "risque faible", ce dernier fournissant la gestion de la résistance au premier. Cependant, des mélanges soigneusement étudiés qui contiennent deux composantes à risque élevé peuvent être très efficaces à condition de les utiliser correctement. L'utilisation de mélanges d'insecticides *ad hoc* n'est pas conseillé; des mélanges mal conçus risquant de ne retarder en aucune manière le développement de la résistance et, au contraire, d'aggraver le problème.

La figure 4 montre les effets d'un mélange insecticide sur une population d'insectes où certains individus sont résistants (RR) ou partiellement résistants (RS) à l'un des deux insecticides composant le mélange. Les individus qui ne sont tués par un des composants est tué par l'autre. Cela suppose que le nombre des individus RRRR est extrêmement bas; ils survivraient aussi.

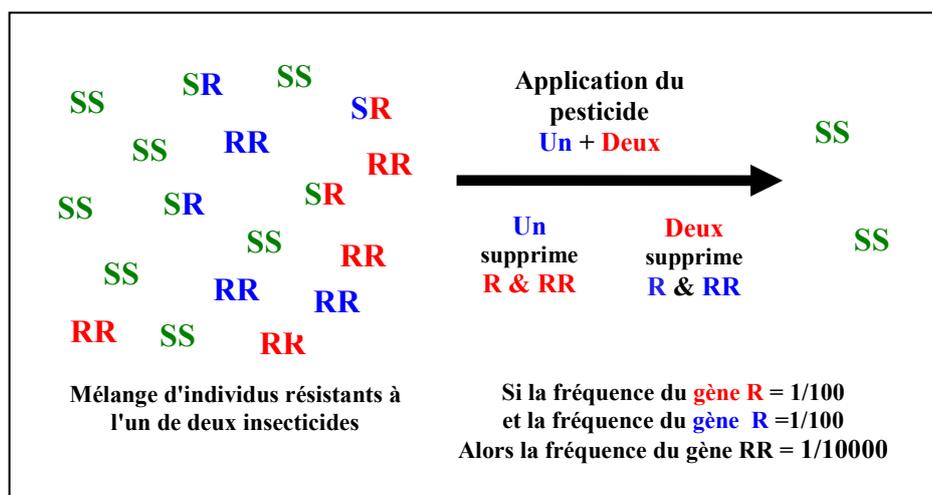


Figure 4 Illustration de l'utilisation de mélanges pour réduire l'accumulation des gènes résistants dans une population de ravageurs.

Les mélanges de pesticides doivent être utilisés avec précaution et ne sont pas recommandés, à moins que le mélange n'ait fait l'objet de recherches approfondies et satisfasse aux conditions suivantes:

- les composants du mélange n'ont pas de résistance croisée, les individus résistant à l'un ou l'autre des composants sont rares, et les individus résistants aux deux composants sont extrêmement rares;
- le mélange est préparé de façon que les deux pesticides soient appliqués à leurs doses prescrites par l'étiquette. Si les quantités appliquées ne sont efficaces que partiellement, il sera beaucoup plus probable que la résistance se développe, car la dose appliquée ne suffira pas à tuer les individus hétérozygotes;
- l'activité résiduelle des deux composants est la même. Autrement, le composant ayant l'activité résiduelle la plus brève se dégradera et l'autre composant ayant l'activité résiduelle plus longue commencera à sélectionner une résistance à soi-même.

Rotations ou alternance des pesticides

L'alternance des pesticides est une autre tactique permettant de gérer le développement de la résistance.

Cette tactique suppose que 1) les ravageurs résistants aux deux pesticides sont rares, donc les survivants à la première application seront éliminés par la deuxième, et 2) le pourcentage des ravageurs résistants déclinera en l'absence du pesticide à cause de l'instabilité relative du mécanisme de résistance. Pour que la tactique soit efficace, les conditions suivantes doivent être satisfaites:

- Les pesticides alternés doivent appartenir à des classes chimiques non apparentées et ne doivent pas présenter de résistance croisée (voir à l'annexe 1 - Classification des modes d'action)
- les deux pesticides doivent présenter une efficacité égale au dosage indiqué par leur étiquette;
- l'intervalle entre les applications des pesticides alternés doit être suffisamment long pour que la population du ravageur revienne à son niveau original de sensibilité, comme le montre la figure 5 (où Récupération = récupération de la sensibilité).

Comme pour les mélanges de pesticides, les programmes d'applications alternées de fongicides, se fondent souvent sur le recours à un pesticide à "risque élevé" et un pesticide à "risque faible", bien qu'il soit aussi possible d'utiliser seulement des pesticides à "risque élevé". Cette tactique repose sur la supposition que le pesticide alternatif à "risque faible" éliminera tout individu résistant ou isolera ceux qui ont survécu à la précédente application du pesticide à "risque élevé".

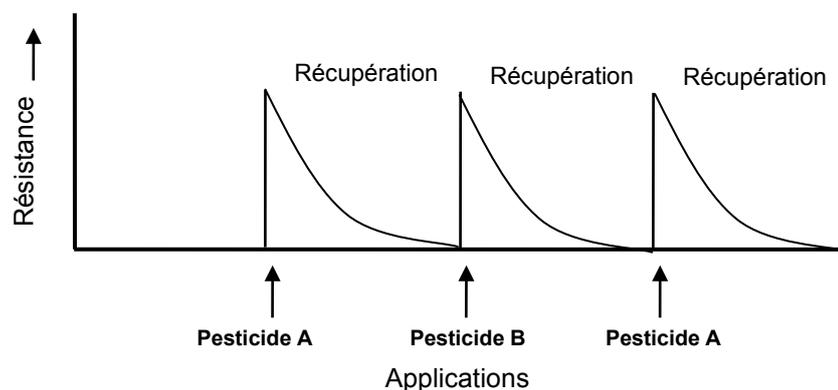


Figure 5 Illustration de l'effet de la rotation des produits sur les niveaux de résistance aux insecticides dans le cadre d'un programme de gestion de la résistance aux insecticides.

Un exemple de gestion de la résistance à travers la rotation des pesticides et la lutte biologique

Programme de lutte contre l'onchocercose en Afrique de l'Ouest

En Afrique de l'Ouest, le Programme de lutte contre l'onchocercose (OCP), de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) était presque entièrement fondé sur des applications hebdomadaires de larvicides dans les fleuves pour tuer les larves de la simulie (*Simulium*), vecteur de la maladie. Les aspersions hebdomadaires continuèrent sans interruption pendant au moins 15 ans, dans huit pays, exerçant ainsi une très forte pression sélective sur les populations du vecteur. L'OCP a dû rapidement affronter de sérieux problèmes de résistance au temephos, le seul larvicide utilisé pendant les premières phases du programme. Il a donc renforcé la surveillance de la résistance et mis au point un plan de gestion de la résistance très efficace. Aux termes de ce plan, l'utilisation continue d'un seul larvicide organophosphoré comme le temephos, fut remplacée par une rotation préétablie de produits non apparentés. L'organophosphoré fut utilisé pendant de brèves périodes alterné par un larvicide microbien, *Bacillus thuringiensis israelensis* (*Bti*), un pyréthroïde et un insecticide carbamate. *Bti* et les larvicides chimiques ont été appliqués de façon stratégique, sur la base de l'état et l'évolution de la résistance, la dynamique de la population des vecteurs, l'impact environnemental, le coût et les facteurs logistiques.

Cette stratégie a été pleinement couronnée de succès pendant les 17 ans de sa mise en œuvre. La résistance a régressé au point qu'il a été possible de réintroduire l'utilisation du temephos dans le plan de rotation, et il n'a induit aucune résistance dans les zones où il n'avait pas été utilisé auparavant. Aucune résistance n'a été observée non plus à aucun des autres insecticides utilisés, bien qu'ils aient pu potentiellement sélectionner une résistance chez les simulies. L'emploi extensif du larvicide microbien *Bti*, un moyen biologique de traiter les insectes avec des toxines multiples, a consenti de réussir la gestion de la résistance sans qu'il y ait eu un impact décelable à moyen ou long terme, dans l'équilibre biologique des fleuves traités.

3.4 Tactiques de gestion de la résistance aux fongicides

On dispose d'un nombre considérable de tactiques de gestion de la résistance aux fongicides. Elles varient suivant les différents groupes de fongicides, les pathogènes cibles, les cultures et les zones géographiques, mais il est souvent possible et efficace d'en intégrer deux ou trois ensembles dans un Plan de gestion de la résistance. Les tactiques décrites ci-après constituent le base d'un Plan de gestion de la résistance aux fongicides. Des stratégies spécifiques de gestion de la résistance ont été mises au point pour les différents groupes de fongicides.

Mettre en œuvre une gestion intégrée des maladies (gestion intégrée des ravageurs)

L'utilisation intégrée de pratiques culturales et de fongicides n'est pas seulement avantageuse économiquement et pour l'environnement, mais elle représente aussi la stratégie principale de lutte contre les maladies des cultures, tout en évitant ou retardant la résistance aux fongicides. Malheureusement, les méthodes non chimiques de lutte contre les maladies peuvent se révéler insuffisantes ou elles ne sont pas disponibles, de sorte que l'application de fongicides est la contremesure prédominante, parfois même la seule, pour plusieurs maladies, y compris le mildiou de la pomme de terre, le mildiou de la vigne, la cercosporiose de la banane et la carie du blé.

La gestion intégrée des maladies comprend:

Pratiques culturales

- Utiliser des variétés culturales résistantes aux maladies, des agents de lutte biologiques, et adopter des pratiques hygiéniques de base comme la rotation des cultures et le nettoyage des parties malades des plantes pérennes cultivées de façon à réduire l'incidence de la maladie.
- Éviter de cultiver de grandes superficies de la même variété, surtout si on sait qu'elle est sensible.
- Stériliser le sol et les équipements afin de prévenir la propagation des pathogènes. Cela est particulièrement vrai pour les cultures en serre.
- Allonger les intervalles de la rotation des cultures dans la mesure du possible, pour éviter la diffusion de pathogènes du sol.
- Inspecter régulièrement les champs pour détecter l'apparition de symptômes d'une maladie avant qu'elle ne puisse s'établir.
- Se familiariser avec les conditions de l'environnement et des cultures car elles sont généralement liées avec l'apparition de maladies.

Utilisation des fongicides

- N'appliquer les fongicides que lorsque cela est réellement nécessaire.
- Utiliser les fongicides aux doses prescrites par l'étiquette et s'assurer qu'il y ait une bonne couverture de la pulvérisation.
- Appliquer les fongicides pour diminuer la formation de pathotypes plus virulents, susceptibles d'affecter même les variétés de cultures (précédemment) résistantes aux maladies.
- Ne pas utiliser d'applications au sol pour soigner les maladies du feuillage.

Utiliser autant que possible des pesticides ayant différents modes d'action

La disponibilité de différents types de fongicides pour chaque principale maladie des cultures représente un avantage certain autant du point de vue environnemental que pour la solution des problèmes de résistance. L'utilisation continue d'un seul produit ou de très peu de classes de composés, échelonnée sur de nombreuses années, représente un risque bien plus élevé d'effets secondaires et favorise l'apparition de la résistance chez les organismes ciblés.

Utiliser des fongicides ayant différents modes d'action, ou en alternance ou rotation avec différents traitements fongicides (voir à l'annexe 1 – Classifications des modes d'action). Les mélanges ou les applications alternées ou les groupes de traitements de composés qui risquent de développer une résistance, avec un fongicide partenaire non apparenté, sont souvent utilisés dans les plans de gestion de la résistance aussi bien pour élargir le spectre des maladies contrôlées que pour gérer la résistance.

Les composés "partenaires" appliqués soit en mélange, soit en rotation réduiront la pression sélective exercée par le fongicide "à risque" et inhibent la croissance de toute population résistante. Généralement, les fongicides bon partenaires sont des inhibiteurs multisites, très efficaces contre le pathogène et présentant un faible risque de résistance. Toutefois, il est possible d'utiliser un fongicide monosite, que l'on sait ne pas être apparenté à son partenaire par une résistance croisée ou, en l'absence de toute résistance connue, par un mode d'action similaire. L'utilisation d'un mélange de deux fongicides monosite présente un certain risque de sélectionner des lignées à résistance double, mais les possibilités de voir deux mutations s'opérer simultanément seront minimales comparées à celle d'une mutation simple.

Réduire le nombre de traitements par saison, appliquer seulement quand cela est strictement nécessaire

Cette approche, comme la rotation, réduit le nombre total des applications du fongicide "à risque" et, par conséquent, ralentit dans une certaine mesure, le processus de sélection de la résistance. Elle peut aussi favoriser le déclin des lignées résistantes qui ont une valeur adaptative déficitaire. Toutefois, le retard dans l'apparition d'une résistance peut ne pas être proportionnel à la diminution du nombre de pulvérisations. Cela s'explique parce que les traitements que l'on continue d'appliquer coïncident généralement aux stades les plus actifs de l'épidémie, au moment où la pression sélective est la plus élevée. D'autre part, une pause appréciable dans l'utilisation, au moment où le pathogène est encore en train de se reproduire peut permettre la réapparition bénéfique d'un plus grand nombre d'individus sensibles.

Utiliser les doses efficaces, c'est-à-dire recommandées.

Il faut appliquer les fongicides aussi aux doses recommandées pour assurer leur efficacité dans un vaste éventail de conditions. La réduction des doses peut stimuler le développement d'une résistance.

Éviter les utilisations thérapeutiques

Les fongicides systémiques peuvent éradiquer ou soigner les infections, et cela peut être d'une grande utilité quand on les utilise sur une base "seuil", c'est-à-dire que l'application advient uniquement lorsqu'un niveau de maladie économiquement inacceptable est déjà atteint. Toutefois, dans certains cas, plus précisément quand le fongicide est un mélange de composants systémique et non systémique, un traitement thérapeutique n'est pas conseillé car il risque d'imprimer une pression sélective extrêmement élevée sur le pathogène. En particulier, il faut éviter l'utilisation thérapeutique des phénylamides, lorsqu'ils sont appliqués pour lutter contre les maladies du feuillage en mélange avec un fongicide partenaire multisite. Ce dernier n'a pas d'action curative, de sorte que seul le composant systémique agit lorsque le

mélange est appliqué aux infections existantes, ce qui accroît la pression sélective.

Le fait d'éviter l'utilisation des fongicides à des fins curatives peut retarder l'apparition de la résistance pour une autre raison d'ordre plus général. Attendre qu'apparaisse une population seuil du pathogène signifie généralement que plusieurs lésions sporulantes (occupant jusqu'à 5 pour cent du feuillage) sont exposées au fongicide. Les possibilités qu'il y ait sélection de la résistance sont beaucoup plus élevées que si le fongicide avait été appliqué comme prophylaxie pour maintenir la population à un niveau faible de façon permanente.

3.5 Tactiques de gestion de la résistance aux herbicides

La base d'une bonne gestion de la résistance aux herbicides est l'utilisation d'un système durable qui intègre des méthodes de lutte physique, chimique et biologique et qui évite de dépendre excessivement de l'une de ces méthodes. À court terme, toute pratique de gestion qui réduit la pression sélective, par exemple changer d'herbicide, réduira le taux de développement d'adventices résistantes. Mais, à moyen et long terme, il est nécessaire d'introduire dans le programme la gestion des cultures et l'utilisation stratégique d'instruments chimiques et mécaniques de lutte contre les mauvaises herbes. Ces techniques, lorsqu'elles font partie d'une approche intégrée, contribueront à réduire la pression sélective et à réduire de façon significative les chances de survie des adventices résistantes.

Gestion des cultures

Il conviendra toujours d'avoir recours aux techniques suivantes de gestion des cultures qui ont fait leurs preuves.

- Alternier les cultures en ayant recours à des schémas différents d'utilisation des herbicides et/ou des cycles de croissance, pour éviter d'avoir des cultures successives dans le même champ, qui exigent des herbicides ayant le même mode d'action pour lutter contre les mêmes espèces d'adventices. Des cultures diversifiées permettront d'utiliser à tour de rôle des herbicides ayant un mode d'action différent et pourront éviter ou interrompre la croissance saisonnière de la mauvaise herbe. En outre, des cultures qui prévoient des temps de labourage et de préparation des lits de semis différents permettent d'appliquer une variété de techniques culturales pour la gestion d'un problème particulier d'adventice. Les cultures montrent aussi des comportements différents par rapport à la concurrence aux mauvaises herbes; une culture fortement compétitive aura de meilleures possibilités de neutraliser la production de semences de l'adventice.
- Retarder l'ensemencement de façon que les premières pousses de l'adventice puissent être supprimées par un herbicide non sélectif.
- Désherber à la main, ameublir ou labourer avant les semences pour contrôler les plantes qui poussent et enterrer les semences qui n'ont pas germé. Ces techniques n'exercent aucune pression sélective chimique et sont extrêmement utiles pour diminuer la banque de semences du sol.
- Utiliser des semences de culture certifiées sans adventices.
- Encourager le pâturage après -récolte dans la mesure du possible.
- Brûler le chaume quand cela est permis, pour limiter la fertilité des semences des adventices
- Couper pour le foin ou l'ensilage pour prévenir le grainage de l'adventice en cas de résistance confirmée.
- Nettoyer les équipements pour éviter la diffusion mécanique des semences de mauvaise herbe.

Outils chimiques: rotation des herbicides et mélanges

De nombreuses études ont signalé les avantages et la nécessité d'avoir recours à un mode d'action utilisant des herbicides multiples pour prévenir l'implantation de la résistance et pour résoudre la question d'une résistance préexistante concernant plusieurs complexes culture/herbicide/adventice. Les séquences étudiées comprenaient: l'application de mélanges d'herbicides; les applications post-levées utilisées en séquence sur la même culture; les applications pré-levée d'herbicides actifs dans le sol, suivies par l'épandage de produits actifs post-levée sur la même culture, et l'alternance des herbicides sur différentes années/différentes cultures dans le cadre d'une rotation des cultures.

Mais la rotation des herbicides à elle seule, ne suffit pas à prévenir le développement d'une résistance. La rotation chimique doit être accompagnée par quelques-unes au moins des mesures non chimiques de lutte aux adventices. Dans les cas où la résistance métabolique est déjà présente, le critère clé n'est pas forcément le mode d'action de l'herbicide. Dans ces cas, le mécanisme de dégradation peut être très important et recouper transversalement les groupes d'herbicides, présentant différents modes d'action et de compositions chimiques. À ce jour, une classification des herbicides relative à la dégradation n'est pas encore disponible et il convient de traiter ces exemples au cas par cas.

Pour lutter contre la même espèce d'adventice, soit en applications successives soit en mélanges, il faudra choisir les produits dans des groupes ayant différents modes d'action. Il existe une classification des herbicides par leur mode d'action (annexe 1) qui est régulièrement mise à jour et qui peut être utile pour mettre au point un programme de lutte contre les mauvaises herbes.

En matière de rotation des herbicides et de mélanges, il faudra suivre les directives suivantes:

- Utiliser des herbicides à échéance résiduelle brève.
- Effectuer la rotation de cultures ayant différentes saisons de croissance dans la mesure du possible.
- Éviter l'utilisation continue du même herbicide ou d'herbicides ayant le même mode d'action, dans le même champ sauf s'il est ou ils sont associés à d'autres pratiques de lutte contre les mauvaises herbes.
- Limiter le nombre d'applications d'un seul herbicide ou d'herbicides ayant le même mode d'action durant la même saison agricole.
- Dans la mesure du possible, se servir de mélanges ou de traitements successifs avec des herbicides ayant un mode d'action différent mais qui sont actifs sur la même adventice cible. Pour que les mélanges soient efficaces, la matière active de chacun d'entre eux doit pouvoir assurer un degré de lutte élevé sur l'adventice visée.
- Utiliser des herbicides non sélectifs pour prévenir les levées précoces des mauvaises herbes avant l'émergence de la culture.
- Toujours utiliser des herbicides post-levée aux doses recommandées par l'étiquette suivant les temps prescrits ou le stade de croissance de l'adventice.

Conseils supplémentaires concernant la gestion de la résistance

- Les cultivateurs doivent connaître la nature des mauvaises herbes qui infestent leurs champs ou les superficies non cultivées et, dans la mesure du possible, ajuster leur programme de lutte contre les mauvaises herbes selon la densité des adventices et/ou les seuils économiques.

- Suivre scrupuleusement le mode d'emploi des herbicides indiqué sur l'étiquette, en particulier les dosages recommandés et les temps d'application.
- Surveiller régulièrement le résultat des applications d'herbicide, avec une attention particulière à tout changement ou tendances dans les populations d'adventices présentes.
- Tenir un journal détaillé des opérations du champ de sorte que l'historique des cultures et des herbicides soit connu.

3.6 Tactiques de gestion de la résistance aux insecticides

En considérant la gestion de la résistance des insectes, il faut se rappeler que l'objectif premier est de protéger la culture ou de lutter contre le vecteur et non pas nécessairement de tuer tous les insectes. Il convient de suivre la stratégie générale qui consiste à éviter l'utilisation excessive d'un seul mode d'action insecticide. Des tactiques supplémentaires de gestion de la résistance aux insecticides sont indiquées ci-après.

Culture-par-ravageur et tactiques régionales

Les tactiques de gestion de la résistance fondées sur la "culture-par-ravageur" sont axées sur une seule combinaison culture-ravageur. Elles peuvent être appropriées lorsque la superficie cultivée est vaste et qu'il n'y a essentiellement qu'une seule espèce de ravageur à traiter à l'insecticide (par exemple, *Helicoverpa* sur les tomates).

Toutefois, dans les régions horticoles et agricoles, il y a souvent un éventail de cultures et un éventail de ravageurs. Dans les cas où un ou plusieurs insecticides ayant un seul mode d'action, sont utilisés à travers cette gamme de cultures pour lutter contre des ravageurs qui peuvent promptement se déplacer de culture en culture, le risque de développer une résistance a toutes les chances de s'accroître. Par exemple, les tactiques de gestion de la résistance concernant la fausse-teigne des crucifères sur les légumes crucifères (famille des choux) peuvent être compromises par l'emploi extensif d'insecticides similaires pour la lutte contre le même insecte sur le colza. En outre, le complexe ravageur pour une culture spécifique peut varier selon les régions de production et, par conséquent, les tactiques de simples culture-par-ravageur peuvent être imparfaites.

Les "tactiques régionales" constituent une alternative à la tactique "culture-par-ravageur". Dans les premières, des plans intégrés de gestion de la résistance sont mis au point pour plusieurs cultures et plusieurs ravageurs dans une zone géographique donnée, et non pas pour des combinaisons d'une seule culture et un seul ravageur. On peut citer des exemples de stratégies intégrées de gestion de la résistance pour les céréales et les cultures horticoles annuelles dans les états de Nouvelle-Galles du Sud et Victoria (Australie), ou les cultures maraîchères en Floride (États-Unis).

Pratiques générales

Pour réduire le risque de développement d'une résistance aux insecticides, les tactiques de gestion suivantes sont recommandées:

Adopter une approche intégrée

La gestion de la résistance aux insecticides exige de prendre en considération tous les aspects de la production agricole, y compris les pratiques agronomiques, les méthodes de lutte physiques et biologiques et la biologie de l'insecte nuisible. Il est possible de prévenir le développement de la résistance simplement en se conformant aux concepts de la gestion intégrée des cultures. Par exemple, surveiller et respecter les seuils recommandés d'infestation

et/ou de dégâts, respecter l'utilité des ennemis naturels, adopter de simples mesures d'hygiène, enlever des champs les résidus de récolte, utiliser des variétés de culture résistantes, et éviter simplement de cultiver une seule variété de culture tout au long de l'année - toutes ces mesures peuvent contribuer à ralentir et même à prévenir l'instauration de la résistance.

Protéger les organismes utiles

Dans toute la mesure possible, protéger les ennemis naturels. La contribution des organismes utiles à la lutte contre les ravageurs peut se révéler significative dans nombre de systèmes agricoles. Les organismes utiles peuvent également jouer un rôle important dans la gestion de la résistance, car ils luttent contre les ravageurs ciblés, indépendamment de leur degré ou de leur mécanisme de résistance, contribuant ainsi à ralentir le processus de sélection de la résistance. On peut protéger les ennemis naturels en utilisant des insecticides sélectifs, en évitant les surdosages ou en optant pour la lutte non chimique.

Appliquer les dosages recommandés

Appliquer les dosages recommandés et respecter les intervalles entre les traitements tels qu'indiqué sur l'étiquette de l'insecticide. Ne jamais appliquer davantage ou moins que le taux recommandé, car cela peut donner lieu au développement d'une résistance et/ou à des effets indésirables sur les organismes non ciblés et sur l'environnement. Toujours s'assurer que l'équipement d'aspersion est en bon état, que les buses et les filtres ne soient pas obstrués, ce qui provoque l'aspersion de dosages erronés et peut occasionner le développement de la résistance.

Alterner des composés non apparentés

Utiliser des composés variés, homologués pour l'emploi en question, appartenant à des classes chimiques non apparentées et ne présentant pas de résistance croisée; ne jamais se servir d'un composé ou d'une classe chimique unique.

Utiliser les mélanges avec précaution

Il convient d'utiliser les mélanges avec une extrême précaution; ils ne sont pas recommandés, sauf en des cas très limités, car l'emploi incorrect des mélanges peut aggraver la résistance. En particulier, il ne faut jamais utiliser de mélange si le ravageur ciblé est déjà résistant à l'un des modes d'action présent dans le mélange. S'il faut utiliser un mélange, il convient de s'assurer que les matières actives soient appliquées à leurs doses recommandées et elles doivent avoir une activité résiduelle semblable pour éviter de sélectionner une résistance au composant qui a l'activité résiduelle la plus prolongée.

Utiliser les produits synergistes avec précaution

L'utilisation de synergistes qui bloquent ou retardent la détoxification métabolique des insecticides, peut améliorer l'efficacité de ces derniers et prolonger leur temps de vie utile, si les synergistes sont appliqués à un dosage non toxique, soit avant, soit en même temps que l'insecticide (par exemple mélangé avec l'insecticide). Les produits synergistes inhibent les systèmes des enzymes métaboliques qui peuvent capter l'insecticide ou le décomposer, et/ou favoriser la pénétration de l'insecticide. L'inhibition se produit parce que le synergiste se fixe aux enzymes métaboliques et permet à une proportion plus élevée d'insecticide d'atteindre le site cible. Par conséquent, les produits synergistes dont la seule action est d'inhiber les enzymes métaboliques ne sont pas utiles si le site cible est modifié.

Utiliser des produits non spécifiques

Les produits destinés à la protection des plantes comme les huiles et les savons qui ont un mode d'action non spécifique, sont des outils efficaces pour la gestion de la résistance. Dans

la mesure du possible, on peut les utiliser en rotation ou en mélange avec les insecticides conventionnels, à condition qu'ils combattent effectivement les populations des ravageurs cible aussi bien sensibles que résistantes.

Appliquer les produits avec précaution

Appliquer les insecticides au moment le plus opportun pour que le niveau de la lutte soit optimal, c'est-à-dire quand l'infestation a atteint le seuil d'action, mais n'est pas encore surabondante. S'assurer que la couverture soit bonne. Ne pas utiliser les mêmes composés ayant le même mode d'action pour lutter contre un ravageur qui aura plusieurs générations pendant la saison agricole de la culture.

Surveiller les ravageurs problématiques

Surveiller les infestations de ravageurs de manière à détecter les premiers symptômes d'un changement de la sensibilité. Dans de nombreux cas, les données concernant la sensibilité de base des populations représentatives au champ, ont été établies avant que les produits ne soient utilisés largement. Le réexamen, à intervalles réguliers, de la sensibilité des populations à l'insecticide peut révéler des changements dans le niveau de sensibilité. Il est également recommandé de surveiller régulièrement la résistance pour déceler tout changement de la sensibilité du ravageur avant que de sérieux problèmes de lutte ne surgissent de façon évidente (voir aussi chapitre 4).

3.7 Tactiques de gestion de la résistance aux rodenticides

Lorsqu'on soupçonne des cas de résistance, la première étape est de confirmer qu'il s'agit effectivement de résistance et non pas simplement du résultat de mesures de lutte insuffisantes, comme le sous-appâtage ou une migration. Se rappeler que la résistance aux rodenticides se caractérise par l'habileté qu'ont les rongeurs de continuer à manger les appâts pendant un laps de temps prolongé, et non pas par la réticence à manger les appâts. On confirme mieux la résistance à travers l'usage d'une méthodologie normalisée. Cela est nécessaire à cause de la variabilité des espèces et des lignées de rongeurs, des différences de réponse entre mâle et femelle, et des différences entre les matières actives.

Ainsi qu'avec les agents pathogènes des plantes, les insectes et les mauvaises herbes, la gestion de la résistance doit viser à conserver la sensibilité du rongeur, ou à réduire à un niveau acceptable la fréquence phénotypique de la résistance. Ces objectifs peuvent être atteints en mettant les individus résistants dans une situation de désavantage sélectif. Malheureusement les classes de rodenticides sont plutôt limitées, ainsi la rotation des classes n'a pas les mêmes possibilités de prévenir la résistance au rodenticide que les pesticides des plantes.

Comme avec les autres organismes nuisibles, la gestion de la résistance aux rodenticides implique le recours à de bonnes tactiques en matière de Plan de gestion. La stratégie de base comprend:

- gestion de l'habitat, c'est-à-dire privation de nourriture, d'abri et d'eau pour les rongeurs;
- installation de barrières qui empêchent les rongeurs d'atteindre les cultures vulnérables, les zones ou les bâtiments de stockage;
- maîtrise des populations de rongeurs à travers un usage approprié de mesures de lutte chimiques et physiques.

Quand on a recours à la lutte chimique, les mesures suivantes contribueront à éviter le développement de la résistance chez les populations de rongeurs.

- Se servir de composés anticoagulants, dans des produits de bonne qualité, dûment étiquetés et destinés à cet usage.
- Inspecter fréquemment toutes les stations d'appâtage et remplacer les plus vieilles autant que de besoin.
- Suivre le mode d'emploi de l'étiquette jusqu'à ce que l'infestation soit éliminée.
- Une fois la lutte achevée, enlever tous les appâts.
- Ne pas utiliser uniquement des anticoagulants; les stations d'appâtage permanentes serviront seulement en cas d'immigration élevée.
- Surveiller régulièrement l'activité des rongeurs et tenir un registre détaillé des traitements.
- Lorsque le problème des rongeurs persiste, recourir à différentes mesures de lutte, changer les appâts, élargir le programme.
- S'assurer que l'infestation est complètement éliminée.

4 Détection et vérification de la résistance

4.1 Objectifs de la détection et de la surveillance de la résistance

Quand un pesticide ne donne pas les résultats escomptés, il faut tout d'abord identifier le problème. Il peut y avoir plusieurs raisons aux problèmes de performance d'un produit, mise à part la résistance. Il peut s'agir d'une couverture médiocre de l'application, un dosage incorrect, une identification erronée du ravageur, des conditions environnementales hostiles, des temps incorrects pour l'application, et ainsi de suite. Des échecs qui peuvent être normaux sur le terrain sont parfois attribués à la résistance. Tous ces facteurs doivent être étudiés de près en même temps que le développement possible d'une résistance.

La détection de la résistance est l'identification d'un changement significatif de la sensibilité d'une population de ravageurs aux pesticides. Des observations *ad hoc* de la part des chercheurs ou des agriculteurs, ou à travers une surveillance systématique, permettent de détecter la résistance. La surveillance de la résistance tente de mesurer les changements dans la fréquence ou le degré de la résistance, dans le temps et dans l'espace. La surveillance peut aussi servir à évaluer l'efficacité des différentes tactiques utilisées pour prévenir, retarder ou gérer le développement de la résistance. La détection et la surveillance de la résistance sont toutes deux le plus utiles lorsqu'elles sont engagées précocement lorsqu'un épisode de résistance se manifeste.

En principe, la surveillance de la résistance doit s'effectuer lorsqu'il y a soupçon ou probabilité de développement d'une résistance. Par exemple, les programmes de surveillance de la résistance doivent être mis en place pour les ravageurs et les pesticides pour lesquels une résistance a été constatée précédemment. Pour les ravageurs qui présentent un risque très élevé de développement d'une résistance, un programme de surveillance de cette dernière doit être établi avant même qu'elle ne soit détectée, comme partie intégrante du Plan de gestion de la résistance. Dans nombre de pays, la détection et la surveillance de la résistance sont prises en charge par les institutions de recherche nationales ou régionales, quoique les fabricants de pesticides puissent aussi y participer.

Le tableau 10 présente un schéma de base pour la surveillance de la résistance et montre comment il s'intègre dans le Plan de gestion de la résistance.

Tableau 10. Phases de surveillance et gestion de la résistance pour un nouveau pesticide

Période	Activités de détection et surveillance de la résistance	Autres activités de gestion	Acteur
1-2 ans avant la mise en vente sur le marché	Établir des méthodes d'échantillonnage et d'analyse Recherche de données concernant la sensibilité initiale	Évaluer les risques Décider la stratégie d'utilisation, mettre au point un Plan de gestion de la résistance	Industrie des pesticides
Pendant les années d'utilisation	Surveillance au hasard de l'apparition d'une résistance dans les zones traitées, si justifiée par une évaluation du risque culture/ravageur particulièrement importante	Mettre en œuvre le Plan de gestion; surveiller de près les performances pratiques du pesticide	Institutions de recherche, services de vulgarisation et consultatifs, utilisateurs (grands) de pesticides, industrie des pesticides
Dès que des signes de résistance sont détectés	Surveillance pour déterminer l'ampleur et la signification pratique de la résistance Étudier la résistance croisée, la valeur adaptative des variantes des organismes résistants, évaluer les autres facteurs qui touchent au développement de la résistance	Si le problème de la résistance se confirme, revoir et modifier le Plan de gestion de la résistance	Institutions de recherche, industrie des pesticides
Ultérieurement	Surveiller le taux de diffusion ou de déclin de la résistance	Surveiller les performances du pesticide; revoir le Plan de gestion	Institutions de recherche, industrie des pesticides

Source: Adapté de NRC (1986)

Le développement de la résistance est un phénomène extrêmement variable et n'est pas uniforme pour tous les aspects d'un organisme, car il y a une telle variété de facteurs qui l'influencent, ainsi que l'hôte et le programme d'application de du pesticide. Même si la résistance est documentée dans une zone, cela n'entraîne pas nécessairement la suppression du pesticide partout ailleurs. En outre, si des individus résistants sont décelés, cela ne signifie pas nécessairement que toute la population est résistante et hors de contrôle. Toutefois, cela constitue un avertissement précoce et signifie que le Plan de gestion devrait être révisé et ajusté pour prévenir l'accroissement de fréquence du gène résistant dans la population et les problèmes qui s'ensuivent.

4.2 Méthodes de vérification de la résistance

Indépendamment du pesticide concerné, c'est-à-dire fongicide, herbicide ou insecticide, il y a plusieurs méthodes et conditions pour mettre en évidence la résistance d'un organisme donné. Celles-ci comprennent:

Dose diagnostique

Il s'agit de la méthode la plus utilisée pour mesurer le degré de résistance au champ, en

particulier en ce qui concerne les insecticides. Elle est simple et relativement efficace. Le but de la dose diagnostique est d'établir si les conditions de la sensibilité de la population ont changé. Toutefois, il n'est généralement pas possible de déceler les individus résistants avant que la fréquence du gène de résistance ne dépasse un pour cent.

Pour mettre au point un programme de dosage diagnostique unique, il faut prendre en considération trois facteurs importants:

1. établir la dose diagnostique pour séparer les individus résistants des individus sensibles;
2. déterminer la mesure de l'échantillon à collecter à chaque endroit;
3. déterminer la réponse appropriée à un survivant à la dose diagnostique.

Les données peuvent être extraites des analyses de dosage biologique des survivants dans la zone traitée, à condition qu'elle n'ait pas fait l'objet d'un traitement avec un autre composé immédiatement après.

Ces analyses de dosage biologique devraient être effectuées avant, ou tout de suite après, qu'un nouveau composé est commercialisé et utilisé sur le ravageur ciblé, ou une nouvelle culture transgénique est plantée. Souvent, ce sont les fabricants de pesticides qui le font, en collaboration avec les instituts de recherche nationaux ou régionaux. Ces analyses permettront d'établir une référence qui pourra servir à identifier la variabilité naturelle de la sensibilité chez les populations de ravageurs et à confirmer ultérieurement des situations de résistance. Les tests doivent être rigoureux, rapides et relativement facile à exécuter. La procédure doit être précise et donner des résultats quantitatifs réalistes, reproductibles et faciles à comprendre.

L'annexe 1 donne les liens utiles qui indiquent des méthodes d'analyses normalisées pour mesurer la sensibilité. S'agissant des organismes nuisibles les plus importants (par exemple, le moustique du paludisme), il existe des tests prêts à l'emploi pour la surveillance de la résistance.

Analyse de la réponse à la dose

La méthode la plus précise pour mesurer la sensibilité d'une population à un composé ou à une caractéristique est l'analyse classique de la réponse à la dose. Initialement, il s'agit de calculer sur un certain nombre d'échantillons de population, les données de la réponse à la dose qui occasionne la mortalité qui va de 5 à 95 pour cent dans le cas des insecticides et de 0 à 100 pour cent dans le cas des herbicides. Pour ces derniers, seules la population concernée et une population que l'on sait être sensible doivent être analysées. Ces données servent à déterminer l'éventail de la sensibilité dans les populations avant d'effectuer des applications à grande échelle. Ces informations peuvent se révéler utiles, plus tard, si on constate que la lutte ne donne pas les résultats escomptés.

Analyses biochimiques et immunologiques

De plus en plus, il est fait recours aux analyses biochimiques pour identifier les enzymes de la détoxification liés aux ravageurs résistants, en vue de rechercher les individus et les populations résistantes. Ont été également mises au point des analyses immunologiques pour détecter la résistance sur la base de l'identification des enzymes détoxifiants, au moyen des anticorps monoclonaux.

Données de référence

Il conviendra de collecter toutes les données de référence concernant la sensibilité de l'organisme du ravageur au pesticide, idéalement avant d'introduire le produit dans une zone donnée. Indépendamment de la méthode de vérification de la résistance utilisée, le résultat des

analyses devra toujours être comparé aux références.

En ce qui concerne les insecticides, des lignées de laboratoires sont souvent utilisées pour établir les valeurs de référence de la sensibilité. Ces valeurs présentent une utilité car elles peuvent fournir des informations sur les niveaux de sensibilité les plus élevés pouvant être observés. Toutefois, nombre de ces populations de laboratoire sont effectivement plus sensibles que n'importe quelle population de terrain, car elles sont affaiblies par le processus d'élevage. Si la gamme des valeurs de référence est large, cela indique qu'il existe une diversité génétique considérable dans la population de l'organisme cible, et que la résistance risque de se développer plus rapidement que si la gamme des valeurs de référence est plutôt étroite.

Pour les fongicides, il est normal d'utiliser pour générer les valeurs de référence de la sensibilité, des isolats de terrain non traités et non exposés. Quand on se sert de populations de terrain, il faut collecter les échantillons dans une aire géographique aussi vaste que possible, afin d'obtenir une variabilité générale de la population naturelle. Très probablement, la référence sera constituée par une série de valeurs plutôt que par une valeur absolue contre laquelle mesurer les données collectées après introduction du pesticide. Les données de référence concernant la sensibilité aux fongicides ne sont pas uniformément distribuées mais elles sont clairement asymétriques et incluent une faible proportion d'individus ayant des valeurs de EC_{50} beaucoup plus élevées que la moyenne. Ces individus sont des composantes naturelles du spectre de la sensibilité et ne sont pas classés comme résistants; une application normale de fongicide suffit à les maîtriser. Il existe ailleurs des informations supplémentaires concernant l'établissement de données de référence en matière de fongicides.

En ce qui concerne les mauvaises herbes, les populations non résistantes doivent être comparées aux populations soupçonnées de résistance.

Rapport entre le résultat des analyses biochimiques et le niveau de performance sur le terrain

Dès que possible, il faudra établir le rapport entre le résultat des analyses biochimiques et le niveau de performance sur le terrain. Cela permettra d'évaluer un éventuel déclin de sensibilité chez le ravageur et le niveau de performance au champ. Avec certains composés, un léger changement de la sensibilité, déterminé par les tests biochimiques, aura un impact significatif sur le niveau de performance du produit au champ. Avec d'autres composés, il faudra constater de grandes différences de sensibilité avant de pouvoir observer des effets sur la performance au champ.

4.3 Procédures d'analyses

Il existe des procédures d'analyses validées, pour évaluer et confirmer la résistance aux pesticides d'une large variété de ravageurs, d'adventices et d'insectes. Certaines de ces analyses sont illustrées sur les sites web de différents comités d'action pour la résistance, tels que le FRAC, le HRAC, et l'IRAC, ainsi que sur le site web de l'Organisation mondiale de la santé (OMS). Ces sites figurent à l'annexe 1.

5 La résistance et les cultures transgéniques

5.1 Introduction

S'agissant de la gestion de la résistance, les cultures transgéniques, transformées par l'insertion d'un ou plus d'un gène, présentent plusieurs avantages. L'un de ceux-ci est que dans la plante transgénique, le déclin en concentration de la toxine dans le temps est minimal et les taux qui peuvent causer une pression sélective se produisent une fois seulement, vers la fin de la saison. Au contraire, avec les pesticides conventionnels, la dose de pesticide disponible peut varier suivant les plantes et dans le temps, à cause des problèmes de couverture et de la dégradation de la matière active. Cela rend nécessaire l'application répétée du pesticide, et aboutit souvent à de nombreux phénomènes de sélection. Par comparaison, le potentiel de sélection de la résistance avec les plantes transgéniques est notablement réduit, même s'il n'est pas complètement éliminé.

Bien que l'on ait observé une certaine résistance à la toxine *Bt* sur le terrain, il n'y a eu que peu de cas d'échec de lutte contre les ravageurs lié à la résistance, dans les cultures de plantes transgéniques. Il conviendra de respecter scrupuleusement les plans de gestion de la résistance pour que cela ne se produise pas à l'avenir. La résistance des insectes à la toxine *Bt* pourrait avoir de sérieuses conséquences sur la production vivrière. La résistance des mauvaises herbes au glyphosate, observée dans des cultures tolérantes à l'herbicide est essentiellement un cas normal de résistance à l'herbicide (c'est-à-dire qu'elle se produirait même dans une culture de plantes non transgéniques), mais le nombre d'espèces adventices résistantes s'accroît au niveau mondial. La diffusion de la résistance au glyphosate pourrait représenter une menace sérieuse pour les cultures transgéniques tolérantes au glyphosate.

5.2 Historique du développement de la résistance dans les cultures *Bt*

Quand au milieu des années 90, les premières plantes transgéniques incluant la toxine *Bt* furent créées, une sérieuse inquiétude régnait quant à l'apparition d'une résistance à la toxine *Bt*. En fait, certains prévoyaient que la résistance se serait développée en trois à cinq ans seulement. Ces prévisions se fondaient sur ces observations:

- il y avait eu développement d'une résistance à des préparations pulvérisables de *Bt* de la part de *Plutella xylostella* au champ, démonstration que la résistance à *Bt* pouvait se développer;
- la résistance à des insecticides et à des protéines Cry contenant *Bt* avait été sélectionnée en laboratoire;
- une dose élevée constante de la toxine resterait présente dans la plante pendant une période de temps considérable, occasionnant une pression sélective très élevée pendant de multiples générations;
- la toxine serait exprimée dans toute la plante et tout au long de la saison. En outre, les cultures génétiquement modifiées seraient largement adoptées, fournissant ainsi très peu de possibilités de dilution des gènes résistants éventuellement sélectionnés;
- la toxine serait dans la plante dès sa germination, déterminant ainsi une situation préventive plutôt que curative. Dans plusieurs cas, les populations de ravageurs se trouveraient en dessous du seuil de traitement et cela, croyait-on, aurait créé des phénomènes de sélection indésirables;
- la toxine *Bt* était essentiellement la seule substance active et il y avait un certain nombre de mécanismes de résistance possibles, chacun desquels pouvant faire l'objet d'une

sélection, donnant lieu à une population d'insectes ravageurs résistants à *Bt*.

Les expériences de terrain effectives sur du coton *Bt* durant toute la décennie passée ont démontré que le risque de développement d'une résistance était bien inférieur à ce qui avait été prédit à l'origine. Ainsi seuls de lointains gènes résistants à *Bt* à des fréquences très faibles, et seuls quelques problèmes de résistance au champ ont été observés jusqu'à présent. Les plans rigoureux de gestion de la résistance, requis pour l'homologation des produits, en sont une des raisons. L'intégration de pratiques agricoles, de méthodes de lutte biologique, de pesticides foliaires conventionnels, et d'autres tactiques de gestion intégrée des déprédateurs, avec les cultures *Bt* a contribué à prévenir le développement de la résistance. En outre, les facteurs suivants ont sans doute, également joué un rôle:

- il y a relativement peu de régions où les cultures *Bt* prédominent dans toute la superficie cultivée; à l'exception de quelques zones de culture intensive du maïs et du coton où on trouve de grande superficies de cultures *Bt*;
- dans ces zones, plusieurs parmi les ravageurs clés ont un vaste éventail d'hôtes et un ample rayon de dispersion, de sorte que seule une partie de la population est exposée et subit la sélection de la résistance à *Bt*. En outre, les plans de gestion ont exigé que les cultures *Bt* qui exprime une seule protéine *Bt* aient une zone refuge structurée de culture non *Bt* plantée à proximité de la culture *Bt*. Ces variétés et cultures non *Bt* assurent la survie d'un grand nombre d'individus sensible dans l'espèce ciblée;
- chez les insectes, les gènes de la résistance tendent à être fonctionnellement récessifs et liés à un coût élevé de la valeur adaptative. Jusqu'à présent on a difficilement trouvé un grand nombre de larves résistantes qui puissent compléter leur cycle de développement et se reproduire dans les cultures *Bt*. Dans les cas où les populations résistantes à *Bt* ont été élevées à partir d'échantillons de terrain, les colonies n'ont pas survécu au-delà de quelques générations.
- la toxine est présente dans la plante *Bt* dans une proportion élevée, spécifiquement au moins suffisamment pour maîtriser les populations d'insectes hétérozygotes chez la plupart des ravageurs ciblés, et elle persiste dans la plante pendant la plus grande partie de la saison. Cela rend la sélection de la résistance plus difficile que s'il y avait eu plusieurs sélections répétées suite à des traitements pesticides fréquents (au cours desquels les résidus de produits déclinaient au niveau sous-optimal avant la répétition du traitement). En outre, un certain nombre de différentes protéines *Bt* ayant des sites d'actions uniques (par exemple, les récepteurs du moyen intestin des insectes) ont maintenant été mises en circulation.

Ces facteurs expliquent pourquoi les différentes espèces de ravageurs ont eu des difficultés à produire des populations vigoureuses résistantes à *Bt*. Jusqu'à 2012, la résistance sur le terrain (y compris la pathologie végétale) aux cultures *Bt* est documentée seulement chez la légionnaire d'automne (*Spodoptera frugiperda*), à Porto Rico, le foreur des tiges africain (*Busseola fusca*), le ver rose du cotonnier (*Pectinophora gossypiella*) en Inde, et la chrysomèle occidentale des racines du maïs aux États-Unis (*Diabrotica virgifera virgifera*). Il semblerait que ces cas sont en partie le résultat de la non-application des recommandations généralement indiquées dans les Plans de gestion relatives à ces combinaisons culture-ravageur.

Il est clair que pour que la viabilité des cultures *Bt* se poursuive, il faudra mettre au point et appliquer de vigoureux plan de gestion de la résistance. Il sera important de se rappeler que le risque de résistance n'est pas uniforme pour tous les produits et pour toutes les modalités d'utilisation. On ne peut pas prendre pour acquis que toutes les expériences de nouvelles cultures génétiquement modifiées avec *Bt* seront nécessairement pareilles.

5.3 Tactiques pour prévenir la résistance aux toxines Bt

Les tactiques aptes à gérer la résistance aux cultures Bt sont généralement les mêmes que celles adoptées pour les pesticides conventionnels, mais en y ajoutant des tactiques pour préserver la sensibilité des gènes chez les populations de ravageurs. Les principales tactiques auxquelles on a actuellement recours pour les cultures Bt comprennent les éléments suivants.

- *Pratiques de gestion des cultures*: ainsi que pour les pesticides conventionnels, le recours à une bonne gestion des cultures et à la gestion intégrée des déprédateurs constituent la base de la gestion de la résistance. Outre à réduire le nombre d'applications de pesticide nécessaires, une bonne gestion des cultures aide à préserver les populations des prédateurs et des insectes parasites. Il y a de bonnes chances pour que ces espèces utiles éliminent tout ravageur survivant qui persiste sur une culture transgénique.
- *Dose et spectre du ravageur cible*: certaines espèces d'insecte sont plus sensibles que d'autres à la protéine Bt et la protéine Bt peut ne pas s'exprimer de la même manière dans toutes les parties de la plante. Tant que la protéine Bt s'exprime dans les tissus critiques de la plante et que la dose en est suffisante pour tuer toutes les populations sensibles du ravageur cible, la sélection de la résistance devrait avancer très lentement. Au contraire, si le niveau de la toxine est assez faible pour permettre la survie de quelques individus, y compris des hétérozygotes, la résistance pourrait évoluer très rapidement.
- *Refuges pour les insectes ravageurs sensibles*: la plupart des plans de gestion de la résistance dans les cultures Bt prévoient la constitution et ou la préservation de cultures refuges non Bt. Elles sont placées le long ou même au milieu de la culture Bt, et permettent la survie d'un nombre suffisant d'individus sensibles de manière à maintenir leurs gènes dans l'ensemble de la population de ravageurs. Le mouvement des larves et des insectes adultes indiqueront l'emplacement des cultures refuge non Bt. Par exemple, les larves de la pyrale européenne du maïs (*Ostrinia nubilalis*) se déplacent longitudinalement le long des rangées de maïs et non pas entre elles: dans ce cas un refuge dans le champ est la meilleure solution (soit, huit rangées de maïs Bt, suivies de deux rangées de maïs non Bt). En revanche pour le coton, où les ravageurs se déplacent le long et dans les rangées, le refuge est planté en un bloc et non pas en rangées. Les refuges externes doivent se trouver assez près de la culture Bt pour permettre l'accouplement au hasard des insectes adultes. Dans le coton, étant donné que les ravageurs cibles (surtout les héliothes) sont très mobiles, la migration à partir d'autres cultures non Bt donne également un nombre significatif d'insectes sensibles.
- *Choix de la culture Bt*: il convient de prêter attention au genre de protéines Bt présentes dans différentes cultures Bt, car les populations d'insectes qui migrent peuvent être sélectionnées pour la résistance aux mêmes protéines (ou du même genre) existantes dans des cultures différentes dans d'autres régions agricoles. C'est la raison pour laquelle certains pays ont pris des mesures pour limiter l'emploi d'une protéine Bt particulière à une culture spécifique. Une autre approche consiste à utiliser des cultures où deux ou plus de deux protéines ayant un seul site de fixation ont été insérées dans la même plante (pyramidage). Il est hautement improbable qu'un insecte puisse développer une résistance à deux toxines différentes. À cause du risque de résistance réduit, et parce que les ravageurs ciblés se déplacent si rapidement et migrent dans la culture à partir de cultures non Bt adjacentes, l'Agence pour la protection de l'environnement des États-Unis a autorisé la constitution d'un refuge naturel pour le coton Bt exprimant deux protéines Cry, au lieu du refuge structuré requis pour le coton génétiquement modifié, ayant une seule protéine Bt.

On peut voir au tableau 11, les points de force et les points faibles de différentes tactiques de gestion de la résistance utilisées pour les cultures transgéniques avec Bt et autres.

Tableau 11 Points de force et points faibles des tactiques de gestion de la résistance dans les cultures transgéniques résistantes aux insectes

Tactique	Points de force et points faibles
Dose élevée pour la maîtrise des hétérozygotes	Doses élevées uniformes administrées contre les ravageurs primaires, autant que possible.
Refuge structuré pour insectes sensibles	Réalisé avec succès dans plusieurs pays, mais souvent compliqué et coûteux à mettre en œuvre.
Refuge naturel/non structuré (= hôtes alternatifs)	Significatif seulement quand les ravageurs cible primaires sont généralistes.
Rotation des matières actives	Impossible dans une même saison, et compliqué et coûteux à mettre en œuvre et à vérifier à travers les saisons.
Pyramidage des matières actives	Stratégie réussie à condition que les deux toxines aient un seul site d'action et soient actives contre les mêmes espèces d'insectes. Peut aussi élargir le spectre d'activité de l'insecte.
Limitation de la surface plantée en cultures transgéniques dans une région donnée (plafond des superficies cultivées)	Cas limités de mise en œuvre réussie aux Philippines et en Australie, risque d'être impossible à gérer dans certains systèmes.
Gestion intégrée des déprédateurs (GID)	Des instruments de GID ciblés culturaux, biologiques et chimiques peuvent réduire de façon significative la survie des populations résistantes.
Surveillance de la sensibilité de l'insecte	Si elle est exécutée correctement, elle peut mesurer des changements minimes de la sensibilité de l'insecte avant l'échec de la récolte à grande échelle. La collecte des populations d'insecte et les analyses biochimiques peuvent être difficiles. La surveillance de dommages imprévus sur le terrain peut être précieuse.
Éducation des parties concernées et communication	Les cultivateurs et les autres parties concernées doivent être informés du choix de cultures <i>Bt</i> et de l'importance des tactiques de gestion. Si la mise en place d'un refuge structuré est requise, il faudra surveiller que le cultivateur s'y conforme.

[Sources: Ferré et al. (2008)]

6 Résistance et vecteurs de maladies

Tandis que la résistance aux pesticides est un problème majeur en agriculture, elle représente également un problème dans la lutte aux insectes vecteurs de maladies transmises aux humains et au bétail. Les maladies importantes transmises par les vecteurs qui risquent de développer une résistance aux insecticides comprennent le paludisme, la dengue, la leishmaniose et la maladie de Chagas, entre autres. La gravité des maladies et le relativement petit nombre d'insecticides disponibles pour les combattre fait de la résistance un problème très important.

Les principes de la prévention et de la gestion de la résistance chez les vecteurs de maladies sont les mêmes qu'en agriculture, mais les pratiques spécifiques peuvent être différentes. Cela dépasse le sujet des présentes directives, ainsi pour de plus amples informations concernant les risques de résistance, la détection et la gestion des vecteurs de maladies, le lecteur est invité à s'adresser à l'OMS et à l'IRAC (voir annexe 1).

Toutefois, une question particulièrement épineuse est l'accroissement de la pression sélective de la résistance chez les vecteurs des maladies humaines dérivant de l'utilisation des insecticides en agriculture. Cela se produit lorsque les insecticides utilisés pour la lutte contre

les vecteurs sont aussi utilisés à grande échelle en agriculture dans la même région. Les secteurs agricoles et sanitaires doivent agir en étroite collaboration pour gérer ces risques et la préparation de plans conjoints de gestion de la résistance est fortement recommandée.

Annexe 1 – Lectures conseillées et références

Le lecteur trouvera ci-après quelques lectures relatives aux sujets traités dans les présentes directives. Certaines des références citées peuvent couvrir d'autres matières [marquées entre parenthèses carrées].

Évaluation du risque de résistance et facteurs de risque

Général

OEPP/EPPO 2002. *Resistance risk analysis*. Standards for efficacy evaluation of plant protection products, PP 1/213(2). European and Mediterranean Plant Protection Organization, Paris. (voir: <http://pp1.eppo.org/getnorme.php?n=213>)

Fongicides

Brent, K.J. & Hollomon, D.W. 2007a. *Fungicide resistance: The assessment of risk*. FRAC Monograph 2 (revised). (voir: <http://www.frac.info/frac/index.htm>)
[note: aussi “detection and verification”]

Herbicides

HRAC. Sans date. *Herbicide cross resistance and multiple resistance in plants*. Monograph. Herbicide Resistance Action Committee. (voir: <http://hracglobal.com/Publications/HerbicideCrossResistanceandMultipleResistance.aspx>)

Insecticides

Whalon, M.E., Mota-Sanchez, D & Hollingworth, R.M. (eds.) 2008. *Global pesticide resistance in arthropods*. CABI, Wallingford.)
[note: aussi “resistance prevention and management” and “transgenic crops”]

Rodenticides

Buckle, A.P, Prescott, C. V. & Ward, K.J. 1994. Resistance to the first and second generation anticoagulant rodenticides – A new perspective. *In*: W.S. Halverson & A.C. Crabb, eds. *Proc. 16th Vertebrate Pest Conference*. pp. 137-144. Univ. of California, Davis. (voir: <http://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1006&context=vpcl6>)

Classification des modes d'action

Fongicides

FRAC. 2011 FRAC Code list: (voir : <http://www.frac.info/frac/publication/anhang/FRAC%20Code%20List%202011-final.pdf>)

Herbicides

HRAC. Sans date. Classification of herbicides according to site of action. (voir: <http://www.hracglobal.com/Publications/ClassificationofHerbicideSiteofAction.aspx>)

Insecticides

IRAC. 2011. IRAC MoA Classification Scheme (voir: <http://www.irc-online.org/teams/mode-of-action/>)

Bases de données des problèmes de résistance vérifiés et rapports

Fongicides

FRAC. 2011. FRAC list of plant pathogenic organisms resistant to disease control agents. (voir: http://www.frac.info/frac/publication/anhang/List%20of%20resistant%20plant%20pathogens_Jan%202011.pdf)

Herbicides

ISHRW. Undated. International Survey of Herbicide Resistance Weeds.(voir: <http://www.weedscience.org/in.asp>)

Insecticides

MSU. Undated. Arthropod Pesticide Resistance Database. Michigan State University. (voir: <http://www.pesticideresistance.org/>)

Prévention et gestion de la résistance

Général

NRC. 1986. *Pesticide Resistance: Strategies and Tactics for Management*. Board on Agriculture, National Research Council. National Academies Press, Washington, DC (At: http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=619&page=313)
[note: aussi “risk assessment and risk factors” et “detection and verification”]

Fongicides

Brent, K.J. & Hollomon, D.W. 2007b. *Fungicide resistance in crop pathogens: How can it be managed?* FRAC Monograph No. 1 (revised edition). Fungicide Resistance Action Committee, Bâle. (voir: <http://www.frac.info/frac/index.htm>)

Damicone, J. 2007. *Fungicide resistance management*. Oklahoma Cooperative Extension Fact Sheet F-7663. Division of Agricultural Sciences and Natural Resources, Oklahoma State University. (voir: <http://pods.dasnr.okstate.edu/docushare/dsweb/Get/Document-2317/EPP-7663web.pdf>)
[note: aussi “risk assessment and risk factors”]

Herbicides

HRAC. 2011. *Guideline to the management of herbicide resistance*. Herbicide Resistance Action Committee (voir: <http://www.hracglobal.com/Publications/ManagementofHerbicideResistance.aspx>)

Palou, A.T., Ranzenberger, A.C., & Larios C.Z. 2008. *Management of herbicide-resistant weed populations – 100 questions on resistance*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. (voir: <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/011/a1422e/a1422e00.pdf>)

Valverde, B.E. 2003. *Herbicide resistance management in developing countries*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. (voir: <http://www.fao.org/DOCREP/006/Y5031E/y5031e0h.htm>)

Rodenticides

CropLife. 2003. Anticoagulant resistance management strategy for pest management professionals, central and local government and other competent users of rodenticides. Technical Monograph. CropLife International, Brussels (voir: http://www.rrac.info/downloads/technical_monograph_2003_ARM.pdf)

Insecticides

Onstad, D.W. (ed.) Insect resistance management: Biology economics and prediction. Elsevier, Amsterdam
[note: aussi “risk assessment and risk factors” et “detection and verification”]

Détection et vérification de la résistance

Fongicides

FRAC. Sans date. Monitoring methods to investigate possible development of resistance. Fungicide Resistance Action Committee (FRAC) (voir: <http://www.frac.info/frac/index.htm>)

Herbicides

HRAC. 1999. *Detecting herbicide resistance*. Herbicide Resistance Action Committee. (voir: <http://www.hracglobal.com/Publications/DetectingHerbicideResistance.aspx>)

Insecticides

IRAC. Sans date. Insecticide and acaricide resistance monitoring methods. Insecticide Resistance Action Committee (IRAC). (voir: <http://www.iraconline.org/teams/methods>)

WHOPES. Sans date. Test procedures for monitoring resistance in disease vectors. WHO Pesticide Evaluation Scheme. (At: <http://www.who.int/whopes/resistance/en>)

Rodenticides

CropLife. 2003. A reappraisal of blood clotting response tests for anticoagulant resistance and a proposal for a standardised BCR test methodology. Technical monograph. (voir: http://www.rrac.info/releases_01.htm)

Prescott, C.V., Buckle, A.P., Hussain, I., Endepols, S. 2007. A standardised BCR-resistance test for all anticoagulant rodenticides. *Int. J. Pest Mgt.* 53(4): 265-272.

Résistance et cultures transgéniques

Carrière, Y., Dennehy, T.J., Pedersen, B., Haller, S., Ellers-Kirk, C., Antilla, L., Yong Biao, L., Willott, E. & Tabashnik, B.E. 2001 Large scale management of insect resistance to transgenic cotton in Arizona: Can transgenic insecticidal crops be sustained? *J. Econ. Entomol.* 94(2): 315-325. (voir: <http://esa.publisher.ingentaconnect.com/content/esa/jee/2001/00000094/00000002/art00001>)

Ferré, J., Rie, J.V. & MacIntosh, S.C., 2008. Insecticidal genetically modified crops and insecticide resistance management (IRM). *In: J. Romeis, A. M. Shelton & G. Kennedy. eds. Integration of insect-resistant genetically modified crops within IPM programmes. Progress in Biological Control, Vol. 5. Springer, Dordrecht.*

Gassmann, A. J., 2012. Field-evolved resistance to Bt maize by western corn rootworm: Predictions from the laboratory and effects in the field. *J. Invert. Path. 110 (2012) 287-293.*

MacIntosh, S.C., 2009. *Managing the risk of insect resistance to transgenic insect control traits: Practical approaches in local environments*, Insecticide Resistance Action Committee, Brussels. (voir: <http://www.irc-online.org/content/uploads/2009/09/SC-MacIntosh-IRM-manuscript.pdf>)

Bates, S.L., Ahao, J., Roush, R.T. & Selton, A.M., 2005. Insect resistance management in GM crops: past, present and future. *Nature Biotechnology 23(1): 57-62.*

Tabashnik, B.E., van Rensburg, J.B.J. & Carrière, Y., 2009. Field-evolved resistance to Bt crops: definition, theory and data. *Journal of Economic Entomology 102: 2011-2025* (voir: <http://docserver.ingentaconnect.com/deliver/connect/esa/00220493/v102n6/s1.pdf?expires=1346048945&id=0000&titleid=10264&checksum=0256E56CD08BF19CE865F2A3A09E4357>)

Huang, F., Andow, D.A. & Buschman, L.L., 2011. Success of the high-dose/refuge resistance management strategy after 15 years of *Bt* crops use in North America. *Entomologia Experimentalis et Applicata 140:1-16* (voir: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1570-7458.2011.01138.x/pdf>)

Résistance et vecteurs de maladies

Brogdon, W.G. & McAllister, J. C. 1998. Insecticide resistance and vector control. *Emerging Infectious Diseases 4(4): 517-713.* (voir: <http://www.cdc.gov/ncidod/eid/vol4no4/brogdon.htm>)

IRAC. 2011. *Prevention and management of insecticide resistance in vectors and pests of public health importance.* 2nd edition. Insecticide Resistance Action Committee (IRAC), Brussels.. (voir: http://www.irc-online.org/wp-content/uploads/2009/09/VM-Layout-v2.6_LR.pdf)

Knobler, S.L., Lemon, S. M., Najafi, M., & Burroughs, T. (eds). 2003. *The resistance phenomenon in microbes and infectious disease vectors: Implications for human health and strategies for containment.* Chapter 3 – Vector resistance. National Academies Press, Washington, D.C. (At: http://books.nap.edu/openbook.php?record_id=10651&page=88)

Annexe 2 – Exemples appliqués de plans de gestion de la résistance

Quelques exemples appliqués de plans de gestion de la résistances relatifs à certaines cultures ou groupes de pesticides sont cités ci-dessous. La liste est seulement indicative et non exhaustive. La FAO n'est pas responsable des plans de gestion de la résistance distincts. Ainsi que le texte l'indique, les plans de gestion de la résistance doivent être étudiés pour la situation spécifique dans laquelle le pesticide sera utilisé.

Fongicides

Informations générales

- <http://pods.dasnr.okstate.edu/docushare/dsweb/Get/Document-2317/F-7663web.pdf>
- http://www.croplifeaustralia.org.au/default.asp?V_DOC_ID=1953
- http://www.cottoncrc.org.au/content/Industry/Publications/Pests_and_Beneficials/Insect_Resistance_Management.aspx

Colza

- <http://www.pesticides.gov.uk/guidance/industries/pesticides/advisory-groups/Resistance-Action-Groups/frag>

Pommes de terre

- <http://www.potatodiseases.org/pdf/Fungicide-Resistance-Management.pdf>
- http://www.extension.umn.edu/AgProfessionals/components/CPM/Stevenson_Fungicides.pdf

Fruits d'espèces arborescentes

- <http://tfpg.cas.psu.edu/56.htm>

Herbicides

Informations générales

- FAO – Gestion des populations d'adventices résistantes aux herbicides:
<ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/011/a1422e/a1422e00.pdf>
- http://www.croplifeaustralia.org.au/default.asp?V_DOC_ID=1954
- http://www.dpi.qld.gov.au/cps/rde/xchg/dpi/hs.xsl/26_4240_ENA_HTML.htm
- http://www.dpi.qld.gov.au/cps/rde/xchg/dpi/hs.xsl/26_4239_ENA_HTML.htm
- http://www.croplifeaustralia.org.au/default.asp?V_DOC_ID=1854,
- <http://www.croplifeaustralia.org.au/files/resistancemanagemen/herbicides/2010%20Herbicide%20Resistance%20Management%20Strategies.pdf>

Coton

- http://cottoninfo.ucdavis.edu/Production_Guidelines/
- <http://www.cotton.org/tech/pest/upload/07CIweedresistbulletin.pdf>

Maïs

- <http://www.nwnyteam.org/Corn%20Congress%20Presentations/Herbicide%20Resistance%20Management%20Sstrategies.pdf>

Maïs génétiquement modifié

- <http://text.lsuagcenter.com/NR/rdonlyres/FC8C9299-F8CA-4F99-869D-f3EB0FB0B5502/45400/pub2963herbicideresistancecotton2008HIGHRES.pdf>

Insecticides

Informations générales

- http://www.croplifeaustralia.org.au/default.asp?V_DOC_ID=1955

Coton

- http://www.cottonerc.org.au/industry/Publications/Pests_and_Beneficials/Insect_Resistance_Management

Légumes Brassica

- http://www.sardi.sa.gov.au/_data/assets/pdf_file/0005/91616/irm_flyer_sept_2008.pdf

Serres

- www.entomology.umn.edu/cues/4015/ppts/greenhouseRM.ppt

Colza

- <http://www.iraq-online.org/news/updated-monitoring-and-irm-guidelines-in-oilseed-2>
- <http://www.pesticides.gov.uk/guidance/industries/pesticides/advisory-groups/Resistance-Action-Groups/frag>

Plantes ornementales

- http://solutionsforyourlife.ufl.edu/hot_topics/agriculture/whiteflies.html#resistance

Cultures mixtes (coton, melons et maraîchères)

- <http://www.cals.arizona.edu/pubs/insects/az1319.pdf>

Pommes de terre

- http://www.nationalpotatocouncil.org/NPC/p_documents/document_280607084102.pdf
- <http://www.hort.uconn.edu/IPM/veg/htms/cpbipm.htm>
- <http://www.pesticides.gov.uk/guidance/industries/pesticides/advisory-groups/Resistance-Action-Groups/irag>

Cultures en ligne

- <http://www.pesticides.gov.uk/guidance/industries/pesticides/advisory-groups/Resistance-Action-Groups/irag>

Fraises

- <http://www.ipmcenters.org/pmsp/pdf/CASTRAWBERRY.PDF>

Annexe 3 – Groupes d'experts

Groupes d'experts sur la résistance

International – Comités d'actions sur la résistance (RACs)

Groupes d'experts de CropLife International composés d'experts de l'industrie des pesticides.

- Fungicide Resistance Action Committee (FRAC): <http://www.frac.info/frac/index.htm>
- Herbicide Resistance Action Committee (HRAC): <http://www.hracglobal.com/>
- Insecticide Resistance Action Committee (IRAC): <http://www.irc-online.org/>
- Rodenticide Resistance Action Committee (RRAC): <http://www.rrac.info/>

Royaume-Uni – Groupes d'action pour la résistance

Groupes d'action pour la résistance basés au Royaume- Uni, composés d'experts de l'industrie des pesticides et d'organisations indépendantes.

- <http://www.pesticides.gov.uk/guidance/industries/pesticides/advisory-groups/Resistance-Action-Groups>

Australie – Groupes d'examen de la gestion de la résistance

Groupes d'experts de CropLife Australie composés d'experts de l'industrie des pesticides

- http://www.croplifeaustralia.org.au/default.asp?V_DOC_ID=1952

Groupes d'experts – Produits et groupes divers

- Entomological Society of America – Resistance information available at: <http://www.entsoc.org/Search/default.aspx> (Saisir *resistance* dans la case Recherche)
- Weed Science Society of America – Resistance information available at: http://www.wssa.net/00Search/search.php?zoom_query=herbicide+resistance
- European Weed Society – Resistance information available at: http://www.ewrs.org/herbicide_resistance.asp
- National Cotton Council – Resistance information available at: <http://www.cotton.org/search.cfm> (Saisir *insecticide resistance* ou *herbicide resistance* dans la case Recherche).
- WERA060: Management of Pesticide Resistance (from WERA60) <http://nimss.umd.edu/homepages/home.cfm?trackID=9616>