

Variétés végétales tolérantes aux herbicides

Effets agronomiques, environnementaux, socio-économiques

Synthèse de l'expertise scientifique collective réalisée par le CNRS et l'INRA
à la demande des ministères en charge de l'Agriculture et de l'Écologie

Responsables scientifiques :

Michel Beckert - INRA, Président du centre de Clermont-Ferrand – Theix

Yves Dessaux - CNRS, ancien chargé de mission à l'Institut écologie et environnement (CNRS)

Rédaction et coordination éditoriale :

Isabelle Savini et Anaïs Tibi – INRA, DEPE

Contacts:

Michel Beckert : michel.beckert@clermont.inra.fr

Yves Dessaux : yves.dessaux@isv.cnrs-gif.fr

Anaïs Tibi : anais.tibi@paris.inra.fr

Directeur de la publication :

Philippe Chemineau – INRA, Directeur de la délégation à l'Expertise scientifique, à la Prospective et aux Etudes (DEPE)

Le rapport d'expertise, source de cette synthèse, a été élaboré par les experts scientifiques sans condition d'approbation préalable par les commanditaires ou l'INRA. La synthèse a été validée par les auteurs du rapport.

Ces documents sont disponibles sur les sites web institutionnels du CNRS (www.cnrs.fr) et de l'INRA (www.inra.fr).

Pour citer ce document :

M. Beckert, Y. Dessaux, C. Charlier, H. Darmency, C. Richard, I. Savini, A. Tibi (éditeurs), 2011. *Les variétés végétales tolérantes aux herbicides. Effets agronomiques, environnementaux, socio-économiques*. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, CNRS-INRA (France), 84 p.

Le présent document constitue la synthèse du rapport d'expertise scientifique co-subsventionnée par le ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche sur le programme 206, sous-action 10, et par le ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer en charge des technologies vertes et des négociations sur le climat (CGDD – Direction de la Recherche et de l'Innovation) sur le programme 190, action 13 sous-action 08 ; son contenu n'engage que la responsabilité de ses auteurs.

Expertise scientifique collective CNRS-INRA

Variétés végétales tolérantes aux herbicides

Effets agronomiques, environnementaux, socio-économiques

Synthèse du rapport d'expertise

Michel Beckert, Yves Dessaux, Christophe Charlier, Henri Darmency, Claire Richard
(experts coordinateurs)

Isabelle Savini, Anaïs Tibi
(rédactrices)

Novembre 2011



Table des matières

Avant-propos	3
1. Mécanismes de résistance aux herbicides et obtention de VTH	8
1.1. Des modes d'action herbicide aux déterminants génétiques du trait TH	8
1.2. Modes d'insertion du trait TH dans le génome d'une espèce cultivée	12
1.3. Perspectives d'évolution des méthodes d'obtention de VTH	16
1.4. Les VTH obtenues	17
Conclusions	21
2. Le développement des VTH.....	22
2.1. Description de l'adoption des VTH dans le monde	22
2.2. Les raisons qui peuvent motiver l'adoption des VTH.....	25
2.3. L'exemple nord-américain : le développement des VTH transgéniques et ses conséquences	27
2.4. Spécificités du contexte social et réglementaire de l'adoption des VTH en Europe	33
Conclusions	38
3. Diffusion du trait TH et apparition de résistances aux herbicides.....	39
3.1. Enjeux et mécanismes de diffusion du trait TH.....	39
3.2. L'apparition spontanée de résistances chez les adventices	48
Conclusions	55
4. Evolution des systèmes de culture associés aux VTH	56
4.1. Les effets sur la flore de l'adoption des VTH et des pratiques associées	56
4.2. Conditions spécifiques à l'introduction des VTH en France.....	59
Conclusions	65
5. Les effets sur l'environnement.....	Erreur ! Signet non défini.
5.1. Contaminations de l'environnement, milieux aquatiques et sols.....	Erreur ! Signet non défini.
5.2. Les résidus d'herbicides dans les végétaux	70
5.3. Effets de la culture de VTH sur la biodiversité sauvage	70
Conclusions	73
Conclusions générales de l'ESCo.....	75
Annexe 1. Cahier des charges de l'ESCo VTH	81
Annexe 2. Classification HRAC des herbicides	84
Auteurs et éditeurs de l'expertise.....	85

Avant-propos

L'arrivée après-guerre des herbicides chimiques de synthèse a considérablement facilité la conduite des cultures par la réduction de la concurrence des adventices permettant une augmentation du rendement et la mécanisation de la récolte. L'utilisation de traitements herbicides présente cependant un risque de phytotoxicité pour les plantes cultivées. L'industrie phytopharmaceutique recherchait donc des molécules sélectives désherbant avec une efficacité maximale en affectant le moins possible la culture. Depuis quelques années, une alternative à la recherche de nouvelles familles et molécules d'herbicides consiste en l'adaptation génétique des variétés cultivées aux substances actives existantes. Des sélectionneurs proposent ainsi, depuis une quinzaine d'années, des variétés tolérantes à un herbicide particulier (ou à une famille d'herbicides) – généralement à large spectre – qui peuvent être commercialisées sous la forme d'un kit variété-herbicide associé.

Les obtenteurs de ces variétés tolérantes à des herbicides (VTH) présentent le trait génétique de tolérance à un herbicide (TH) comme attractif pour l'agriculteur, notamment en termes de facilité d'utilisation et d'efficacité agronomique des herbicides associés. Ils promeuvent également la possibilité de traiter une culture déjà développée, permettant d'adapter le désherbage chimique à la flore adventice effectivement présente dans la parcelle, c'est-à-dire de ne traiter qu'en cas de besoin, et donc *a priori* moins que par traitement préventif systématique. Enfin, ils mettent également en avant au plan environnemental le fait que certains herbicides associés à ces variétés présenteraient un profil écotoxicologique plus favorable que les herbicides habituellement utilisés.

L'autorisation de la culture de VTH pose la question des modalités de l'évaluation de ces variétés dont le statut réglementaire diffère selon le mode d'obtention. Ces critères d'évaluation peuvent être définis au regard des divers impacts que peuvent avoir l'obtention et l'utilisation des VTH, tant du point de vue agronomique et environnemental qu'économique et juridique.

Contexte de la demande d'expertise et questions posées à l'INRA et au CNRS

A l'échelle mondiale, les obtentions revendiquant le trait TH sont soit des variétés transgéniques, soit des variétés obtenues sans recours à la transgénèse mais issues d'individus porteurs de mutations spontanées ou induites. En France, les VTH qui font actuellement l'objet de demandes d'inscription au Catalogue officiel des espèces et variétés sont issues de la sélection de mutants spontanés ou induits. Bien que la mutagenèse soit considérée comme une méthode de modification génétique par la Directive européenne 2001/18/CE¹, les variétés obtenues par cette technique sont exclues de son champ d'application, et sont donc soumises aux mêmes procédures d'évaluation que les variétés issues de l'amélioration variétale conventionnelle. Par ailleurs, ces VTH issues de mutants naturels ou induits commencent à faire l'objet d'une contestation sociale comme en témoignent les récents événements de fauchage de tournesols mutants TH en 2009, 2010 et à l'été 2011.

Dans ce contexte, les pouvoirs publics et instances d'évaluation français s'interrogent sur les perspectives de développement des VTH issues de mutation spontanée ou induite. Les ministères en charge de l'Agriculture et de l'Ecologie souhaitent disposer d'éléments d'analyse sur leurs effets réels et de long terme, et leur compatibilité avec les politiques à visée environnementale, notamment le plan de réduction d'utilisation des pesticides (Ecophyto 2018). L'INRA et le CNRS ont réalisé à leur demande une expertise scientifique collective (ESCo - Encadré 1) portant sur les impacts directs et indirects de l'utilisation du trait TH aux plans agronomique, environnemental, socio-économique et juridique – les impacts éventuels sur la santé humaine étant exclus du champ de cette ESCo.

Quelques définitions préliminaires

La notion de **variété tolérante à un herbicide** renvoie bien aux variétés cultivées dans lesquelles le trait TH a été introduit intentionnellement ; elle n'englobe pas la capacité propre d'une espèce à tolérer l'application d'un herbicide. Les principales espèces végétales considérées dans l'ESCo, qui ont fait l'objet de VTH, sont les espèces de grandes cultures de climat tempéré : maïs, soja, blé, colza, tournesol, betterave, riz, chicorée/endive.

L'ESCo a pour objet le **trait agronomique TH**, quelle que soit la manière dont il est introduit dans des variétés cultivées (méthodes de sélection traditionnelle, mutagenèse ou transgénèse). Les **méthodes de sélection traditionnelle** s'entendent comme les procédés d'amélioration variétale uniquement basés sur des mécanismes mis en œuvre dans la nature : croisements sexués et sélection. Les termes "**modification génétique**" et "**OGM**" (organisme génétiquement modifié) sont utilisés au sens de la directive 2001/18 : ils recouvrent les modifications de l'ADN obtenues par mutagenèse, transgénèse ou fusion cellulaire, et les organismes qui en sont issus.

La question centrale est celle de l'**efficacité agronomique de la stratégie TH**, usage couplé d'une VTH et de son herbicide associé, à court, moyen et long termes. Les effets de la culture de VTH vont dépendre du type d'herbicide auquel la variété est rendue tolérante, de l'espèce cultivée concernée et des systèmes de culture en jeu, mais aussi de l'ampleur de l'adoption de la VTH, qui est aussi fonction des conditions socio-économiques et juridiques.

¹ La directive 2001/18/CE encadre la procédure d'autorisation de dissémination volontaire et de mise sur le marché des organismes génétiquement modifiés (OGM). Voir <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2001:106:0001:0038:FR:PDF>

L'expertise vise à éclairer les possibles effets de la culture de VTH dans un contexte européen, c'est-à-dire pour des variétés non transgéniques et des systèmes de culture et un cadre socio-économique particuliers. Mais l'ESCO, exercice fondé sur l'analyse des publications scientifiques certifiées, est tributaire de l'existence de travaux académiques consacrés au sujet. Or les VTH les plus étudiées et documentées sont des variétés transgéniques cultivées en Amérique du Nord, où les recherches bénéficient d'un recul de 15 ans de leur culture sur une part très importante des surfaces agricoles. L'effort de recherche consenti sur les variétés transgéniques tient aussi aux débats que suscite le développement des OGM. La transposition des résultats obtenus outre-Atlantique a été immédiate pour certains résultats (par exemple des mécanismes biologiques), ou a été discutée pour d'autre en fonction du contexte européen.

L'ESCO ayant pour objectif d'analyser les effets de l'utilisation des VTH, les systèmes de production considérés comme référentiel sont ceux qui sont susceptibles d'adopter ces variétés, c'est-à-dire les systèmes conventionnels dont la gestion des adventices repose au moins en partie sur l'utilisation d'herbicides, qu'ils soient engagés ou non dans une démarche de réduction des intrants. Lorsqu'ils intègrent la stratégie d'utilisation couplée d'une VTH et de son herbicide associé, ces systèmes seront désignés "système TH".

Encadré 1. L'ESCO, principes et méthodes

La présente ESCo a été réalisée conjointement par le CNRS et l'INRA, en adoptant les principes et la méthode retenus par l'INRA.

L'expertise scientifique en appui aux politiques publiques

La mission d'expertise en appui aux politiques publiques de la recherche publique a été réaffirmée par la loi d'orientation de la recherche (2006). L'apport d'argumentaires scientifiques à l'appui de positions politiques est désormais une nécessité dans les négociations internationales. Or les connaissances scientifiques sont de plus en plus nombreuses, et produites dans des domaines très variés, difficilement accessibles en l'état aux décideurs. L'activité d'ESCO développée depuis 2002 à l'INRA se définit comme une activité d'analyse et d'assemblage de connaissances produites dans des champs très divers du savoir et pertinentes pour éclairer l'action publique.

La charte de l'expertise scientifique à l'INRA

Cette activité est encadrée par une charte qui énonce des principes d'exercice, dont le respect garantit la robustesse des argumentaires produits. Cette charte fonde l'exercice sur quatre principes : la compétence, la pluralité, l'impartialité et la transparence.

- La compétence se décline d'abord au niveau de l'institution INRA qui ne traite des questions d'expertise que dans son domaine de compétences. Ce principe de compétences s'applique aux experts qui sont qualifiés sur la base de leurs publications scientifiques, et également à la conduite des expertises dans le respect de la qualité du processus.

- La pluralité s'entend comme l'approche pluridisciplinaire des questions posées qui associe les sciences de la vie et les sciences humaines et sociales pour une mise en perspective des connaissances. La pluralité se manifeste également dans la diversité des origines institutionnelles des experts. La pluralité des domaines de recherches et des points de vue disciplinaires vise à stimuler le débat et contribue à favoriser l'expression de la controverse et de l'exercice critique.

- Le principe d'impartialité est garanti par une déclaration d'intérêts remplie par chaque expert et qui permet de faire état de leurs liens éventuels avec des acteurs socio-économiques, ainsi que par la pluralité du collectif d'experts.

- Enfin, le respect de la transparence se traduit par la production de documents d'analyse et de synthèse mis à disposition de tous.

L'ESCO est une activité d'expertise institutionnelle, régie par la charte nationale de l'expertise à laquelle l'INRA a adhéré en 2011.

Définition et fonctionnement de l'ESCO

L'ESCO établit un état des lieux des connaissances scientifiques académiques dont sont extraits et assemblés les éléments pour répondre aux questions posées par les commanditaires. Les questions adressées à l'INRA sont énoncées dans un cahier des charges (cf. Annexe 1) qui est le résultat d'une itération entre les commanditaires et le groupe d'experts, fixant les limites et le contenu de l'expertise. Un comité de suivi, réuni à l'initiative des commanditaires, sert d'interface entre les experts et les commanditaires et veille au bon déroulement des travaux.

Les experts rédigent chacun une contribution faisant état des références bibliographiques utilisées. L'ensemble des contributions forment le rapport d'expertise qui est mis en ligne sur le site INRA. Les experts sont responsables du rapport.

L'INRA s'engage sur les conditions dans lesquelles se déroule le processus d'expertise : qualité du travail documentaire de mise à jour des sources bibliographiques, transparence des discussions entre les experts, animation du groupe de travail et rédaction des documents de synthèse et de communication sous une forme qui concilie rigueur scientifique et lisibilité par un public large.

A ce jour, sept ESCo ont été conduites par l'INRA : "Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ?", "Pesticides, agriculture, environnement", "Sécheresse et agriculture", "Consommation des fruits et légumes", "Agriculture et biodiversité", "Douleurs animales", "Comportements alimentaires".

Méthodes et portée de l'ESCO

L'ESCO se fonde sur des références scientifiques internationales certifiées, ce qui explique que certains phénomènes, en particulier récents, ne puissent être renseignés, soit faute de travaux publiés, soit parce que les études disponibles ont été conduites dans des contextes trop éloignés des conditions observées en France. Par exemple, la majorité des surfaces cultivées en VTH portant des variétés transgéniques en situation américaine, peu de travaux concernent les VTH non transgéniques introduites dans des systèmes de culture différents du modèle nord-américain. La transposition de résultats étayés outre atlantique n'est pas toujours possible en Europe.

Une quinzaine d'experts français d'origines institutionnelles diverses (INRA, CNRS, universités de Bordeaux, Clermont, Evry, Paris XI, Nice-Sophia Antipolis...) ont été mobilisés pour l'ESCO Variétés tolérantes aux herbicides. Leurs compétences relèvent de l'écologie, de l'agronomie, de la chimie des herbicides, de la génétique, de l'économie, de la sociologie, du droit... Le rapport d'expertise est étayé par un corpus bibliographique de plus de 1400 références, constitué par trois professionnels de l'information scientifique et technique (INRA et INIST-CNRS), et composé essentiellement d'articles scientifiques auxquels se sont ajoutés données statistiques, ouvrages et rapports techniques (Encadré 2). Les experts en ont extrait, analysé et assemblé les éléments pertinents pour éclairer les questions posées.

L'ESCO ne fournit pas d'avis, ni de recommandations, ni de réponses pratiques aux questions qui se posent aux gestionnaires. Elle réalise un état des connaissances le plus complet possible des impacts liés à l'obtention et à l'utilisation des VTH, à travers une approche pluridisciplinaire associant sciences du vivant et sciences économiques et sociales. Elle met en relief les problématiques spécifiques à ces variétés.

Structuration du document de synthèse

La synthèse ci-après présente, dans un premier chapitre, les principaux modes d'action des herbicides, les mécanismes biologiques mis en œuvre chez les plantes pour résister à un herbicide, ainsi que les diverses techniques qui ont permis l'obtention de variétés cultivables possédant ce trait.

Le second chapitre est un bilan de l'utilisation de ces variétés, fondé sur l'exemple américain bien documenté. Il met en évidence les caractéristiques de l'offre VTH, les raisons pouvant motiver l'adoption de ces variétés par les agriculteurs, et ses conséquences en termes d'utilisation des pesticides.

Le troisième chapitre est dédié aux mécanismes biologiques de diffusion du trait TH et d'apparition de résistances aux herbicides, ainsi qu'aux stratégies permettant la gestion et la prévention de ces phénomènes.

Le quatrième chapitre est consacré à l'adaptation des pratiques agricoles associées à l'introduction d'une VTH dans un système de culture donné. Se pose la question de la transposition de ces éléments d'analyse dans le contexte agronomique particulier des systèmes de culture français.

L'évaluation des impacts environnementaux de l'usage des VTH est réalisée dans le cinquième chapitre. Sont pris en compte à la fois les effets éventuels sur la biodiversité des territoires agricoles, et la contamination chimique des eaux et des sols par les herbicides associés.

Les conclusions mettent enfin en exergue les principales réflexions des experts issues de la confrontation entre analyses des bibliographies disciplinaires.

Encadré 2. Les références bibliographiques citées par les experts

Methodologie

Une première équation de recherche, croisant les notions de résistance/tolérance et d'herbicide, a permis de constituer un corpus initial de près de 13000 références à partir de l'interrogation des grandes bases de données bibliographiques internationales. Un panorama des thématiques couvertes a ainsi été dressé et les principaux chercheurs spécialistes du domaine ont été identifiés.

Un travail d'itération continu entre les documentalistes et les experts a été nécessaire afin d'extraire les documents pertinents, d'identifier les lacunes du corpus initial et de les combler. L'élaboration d'équations de recherche spécifiques aux classes d'herbicides et aux molécules et le recours à de nouvelles ressources ont permis d'enrichir le corpus et de couvrir les champs manquants.

Plus de 1400 documents ont ainsi été sélectionnés par les experts et cités dans le rapport complet d'ESCO.

Principales sources d'information utilisées

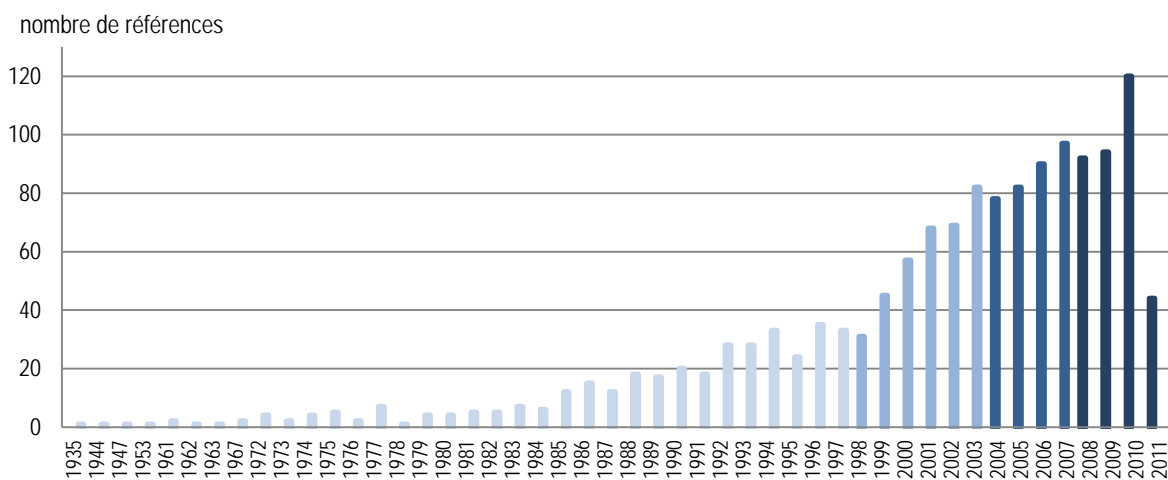
Différentes bases de données bibliographiques internationales ont été interrogées : Web of Science, Science Direct, Pascal (bases multidisciplinaires), CAB Abstract (base thématique "agriculture"), Medline/Pubmed (base thématique "biomédicale"), Francis (base thématique "sciences sociales") ainsi que des moteurs de recherche spécialisés en science tel que Scirus.

D'autres sources d'informations scientifiques et techniques ont également été utilisées : documents de l'AFSSA (Agence française de sécurité sanitaire des aliments, devenue ANSES), rapports de la commission européenne, bases de données en ligne sur les herbicides...

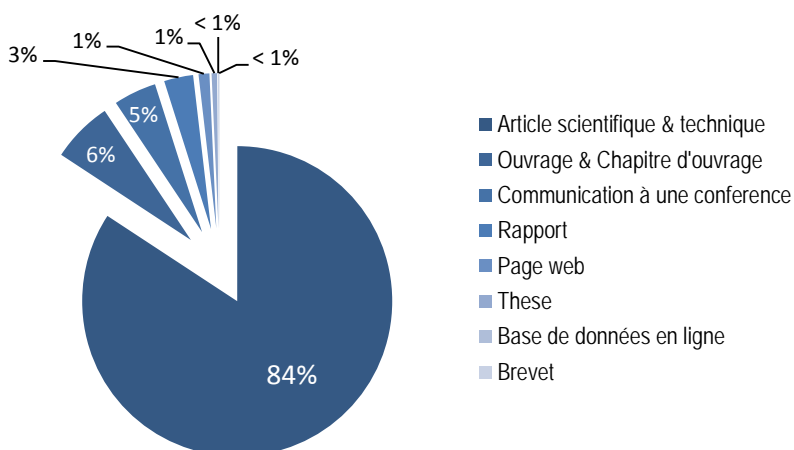
Caractéristiques du corpus cité

Les analyses bibliométriques réalisées ont été limitées par la multiplicité et l'hétérogénéité des sources bibliographiques dont sont issues les références utilisées. Seuls les champs communs à toutes ces références ont pu être analysés.

Des références récentes : plus de la moitié des références citées ont moins de 10 ans (publiées après 2003) et plus d'un quart datent des trois dernières années, comme en témoigne la répartition ci-dessous (chaque teinte représentant un quart des publications).



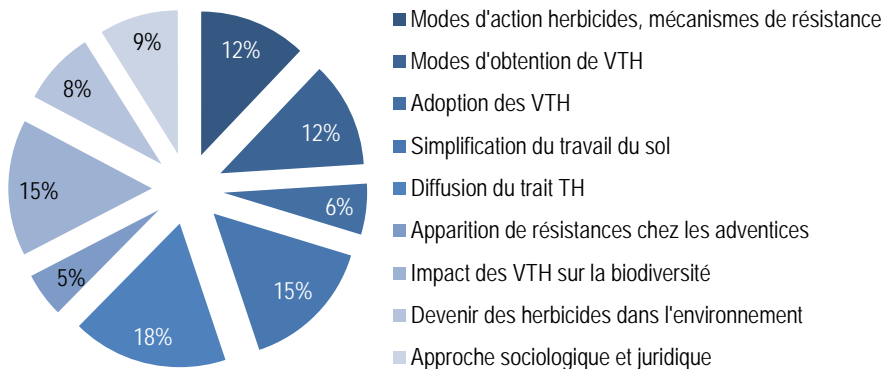
La majorité des références citées proviennent d'articles publiés dans des revues scientifiques :



Un quart des articles cités sont issus de neuf revues :

- Weed science,
- Weed technology,
- Theoretical and applied genetics,
- Pest management science,
- AgBioForum,
- Weed research,
- Agriculture ecosystems & environment,
- Journal of applied ecology,
- Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America

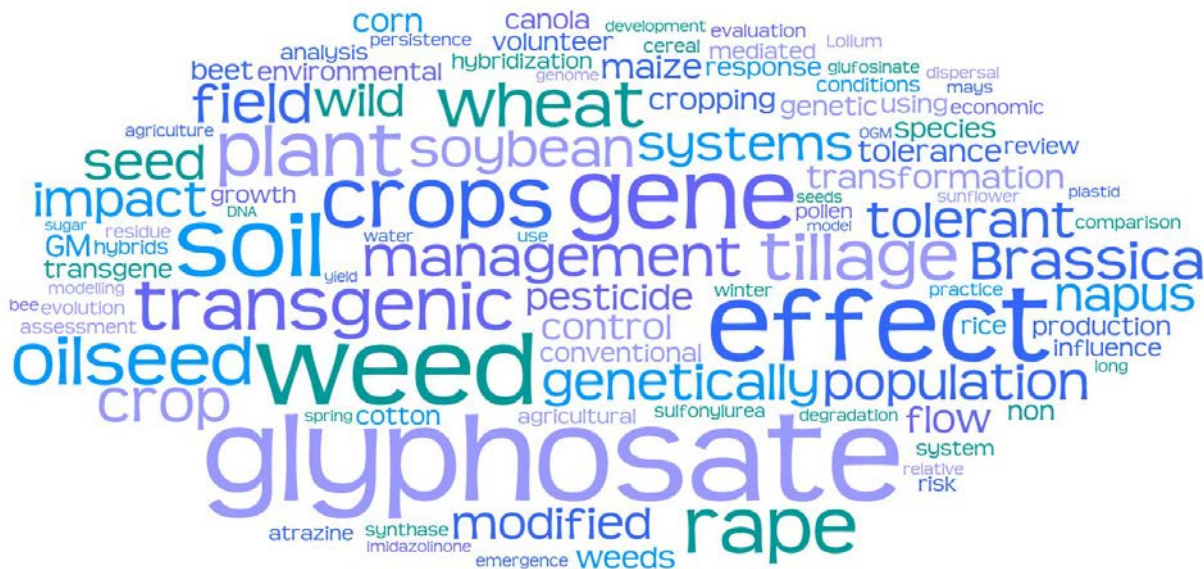
La répartition des références est relativement équilibrée, entre les 9 thématiques scientifiques qui structurent le rapport d'ESCO et la synthèse :



Une analyse des mots présents dans les titres des références citées permet d'illustrer les sujets abordés et l'adéquation du corpus avec les thématiques traitées dans l'ESCO Variétés Tolérantes aux Herbicides.

Dans le nuage de mots suivant, la taille des mots est proportionnelle à leur fréquence dans les titres des références (plus le mot est présent, plus sa taille sera importante). Cependant la différence de taille entre les mots est à relativiser, puisque le mot glyphosate ne représente que 4,6% des titres, le mot management 4% des titres et le mot hybridization 1,5%.

A noter, les mots herbicide et résistant/résistance ont été exclus du nuage.



1. Mécanismes de résistance aux herbicides et obtention de VTH

L'objectif de la création d'une VTH est d'ajouter, à une variété jugée intéressante par ailleurs, un trait TH qui facilite et sécurise le désherbage de la culture.

Cet objectif nécessite de disposer de ressources génétiques susceptibles de fournir ce trait TH, puis des techniques pour l'insérer dans le génome d'un individu appartenant à la variété d'intérêt. Ces ressources génétiques dépendent du mécanisme biologique conférant la tolérance, lui-même conditionné par le mode d'action de l'herbicide ; le type de source exploitable en amélioration variétale détermine les techniques d'insertion utilisables.

Dans ce chapitre, sont d'abord exposés les modes d'action des principaux herbicides utilisés avec des VTH, et les mécanismes mis en œuvre chez les plantes et microorganismes qui développent des résistances à ces substances. Ensuite, les diverses techniques permettant d'introduire le trait TH dans des variétés cultivées sont examinées. Enfin, sont présentés les couples VTH-herbicides qui ont été obtenus grâce à ces techniques.

1.1. Des modes d'action herbicide aux déterminants génétiques du trait TH

1.1.1. Les mécanismes biologiques de la résistance à un herbicide chez les plantes

- Les modes d'action des herbicides

Une substance herbicide est une molécule capable de pénétrer dans les cellules d'une plante où elle se lie à une cible, le plus souvent une enzyme vitale pour l'organisme. En l'inhibant, l'action de l'herbicide est létale ou fortement pénalisante pour l'organisme sensible. C'est sur leurs modes d'action (pour la plupart définis par leur cible enzymatique) qu'est fondée la classification des herbicides proposée par le Herbicide Resistance Action Committee (HRAC), utilisée par l'ESCo (cf. Annexe 2).

Le mode d'action des herbicides conditionne en partie leur spectre d'efficacité. Certains herbicides, dits totaux ou non sélectifs, sont efficaces sur l'ensemble des plantes, sauvages et cultivées. Les herbicides sélectifs n'agissent eux que sur un spectre limité de plantes, propriété classiquement mise à profit dans le désherbage de la plupart des cultures : celui-ci repose en effet sur la résistance des espèces cultivées à l'application de certains herbicides sélectifs qui leur sont spécifiques. L'usage de désherbants anti-graminées sur les cultures de dicotylédones en est un exemple. La sélectivité des herbicides dépend néanmoins de la dose appliquée : un herbicide sélectif n'affectant *a priori* pas la culture sur laquelle il est employé peut devenir létal à forte dose. Enfin, leur efficacité peut varier en fonction du stade de développement de la plante, de la composition du sol, des conditions météorologiques et des techniques d'application.

La sélectivité des herbicides est ainsi définie par les groupes botaniques qui y résistent naturellement. En dehors des taxons végétaux qui possèdent ce phénotype, un individu appartenant à une espèce réputée sensible à un herbicide peut cependant y devenir résistant suite à une mutation de son génome. La fréquence de mutation des gènes est faible, mais certaines mutations donnent un avantage sélectif aux individus qui la portent, révélé dans des conditions particulières du milieu : c'est le cas de la résistance à un herbicide dans les zones où celui-ci est utilisé.

Les termes "tolérance" et "résistance" sont utilisés dans la littérature pour désigner la caractéristique d'une plante capable de survivre et de se reproduire après l'application d'un herbicide. Diverses définitions ont été proposées par des disciplines scientifiques différentes. Elles se fondent principalement sur la manière dont ce caractère est acquis ou sur les mécanismes biologiques de ce caractère (voir Encadré 1-1). Les obtenteurs des VTH utilisent le terme de "tolérance", repris pour cette raison dans l'ESCo pour désigner les variétés cultivées chez lesquelles le trait a été intentionnellement introduit. Les termes "résistance" ou "insensibilité" seront employés dans tous les autres cas (description des mécanismes, plantes sauvages présentant une résistance, microorganisme insensible à un herbicide, etc.).

- Les mécanismes de la résistance aux herbicides

Sous l'effet de la pression sélective opérée par le désherbage chimique, les organismes cibles s'adaptent en développant des résistances. Les premiers organismes repérés comme résistants à des herbicides ont été, à partir de 1968, des adventices cibles devenues insensibles au traitement. L'acquisition de la résistance aux herbicides a également été recherchée chez les microorganismes des sols.

Encadré 1-1. "Tolérance" ou "résistance" aux herbicides ?

Si le terme *résistance* est plutôt appliqué aux mauvaises herbes, le terme *tolérance* est généralement utilisé dans la description des variétés cultivées même lorsqu'il s'agit rigoureusement des mêmes mécanismes physiologiques. Si les deux termes sont utilisés fréquemment et parfois de manière indifférenciée, certaines disciplines scientifiques ont néanmoins proposé des définitions les distinguant. Les acceptations sont parfois opposées.

En biologie des populations

Un premier couple de définitions, proposé en 1998, est basé sur le niveau taxonomique concerné (espèces / individus) et la notion d'évolution par sélection.

Le terme de *résistance* s'applique alors à des individus au sein d'une espèce. La *résistance aux herbicides* est la capacité héritée d'un petit nombre d'individus dans une espèce à survivre et se reproduire après exposition à une dose d'herbicide normalement létale pour le type sauvage. Chez les végétaux, la *résistance* peut résulter soit d'une mutation spontanée et être révélée sous l'effet de la pression sélective de l'herbicide, soit d'une mutation induite par des techniques de mutagenèse ou de génie génétique. La *tolérance* est la capacité inhérente d'une espèce à survivre et se reproduire après exposition à un traitement herbicide.

En physiologie

Une seconde distinction, proposée en 2004, est basée sur la nature du mécanisme et sur la notion de valeur sélective des individus porteurs du trait ("fitness" = nombre de descendants viables). Les termes y sont employés de la même manière qu'en écologie des interactions plantes-herbivores ou plantes-pathogènes.

La *résistance* à un herbicide est la capacité d'une plante à réduire ou supprimer les effets délétères qui peuvent lui être causés par cette substance, par exemple en la métabolisant ou en exprimant une protéine cible insensible.

La *tolérance* (ou compensation) est la capacité d'une plante à compenser les effets délétères d'un herbicide : la plante est capable de compenser les dommages infligés par l'herbicide (perte de biomasse par exemple) et, au terme de son cycle de vie, de produire au moins autant de semences (notion de fitness) qu'une plante non traitée. Comme la *résistance*, la *tolérance* peut être génétiquement variable entre individus d'une même espèce.

Dans la pratique cependant, la distinction entre *résistance* et *tolérance* semble délicate, car les mécanismes qui les sous-tendent sont potentiellement nombreux et difficiles à distinguer.

En langage commun

A l'usage, le terme de *résistance* dénote un phénomène clair et net, alors que celui de *tolérance* renvoie à l'idée de progressivité ou de *résistance moindre*, dépendant des conditions du traitement (stade de la plante, conditions météorologiques, dose). Au champ, les agriculteurs et les techniciens n'utilisent que le terme "*résistance*" face à des adventices survivantes car ils observent l'échec du traitement. Cet usage est repris parmi les experts et chercheurs, gouvernementaux, privés et industriels (par exemple, le groupe de travail de l'Association Française de Protection des Plantes sur ce sujet s'intitule GT Résistances). Le terme "*insensible*", ou plutôt "*pas sensible*", est réservé à l'état habituel de certaines espèces d'adventices non affectées par un herbicide donné. Pour le développement des VTH, les obtenteurs ont choisi d'utiliser le terme "*tolérance*", sans en expliciter les raisons.

Quatre modes de résistance à un biocide sont aujourd'hui connus chez les organismes vivants :

- la **perturbation de la translocation du toxique** vers sa cible (cuticules imperméables, séquestration...),
- la **modification de la cible**, empêchant le biocide de s'y lier pour l'inhiber (résistance dite de cible),
- la **surexpression de la cible**, qui a pour effet une dilution artificielle du toxique par rapport au nombre de cibles cellulaires,
- la **détoxication**, qui concerne la métabolisation des herbicides en dérivés non biocides, et la neutralisation des effets toxiques (résistance dite de métabolisation).

La connaissance de ces mécanismes est utile pour évaluer la facilité d'obtention et d'insertion du trait TH dans une variété.

Le HRAC, le North American Herbicide Resistance Action Committee (NAHRAC), et la Weed Science Society of America (WSSA) soutiennent le fonctionnement d'un site web collaboratif dont le but est de suivre l'évolution des adventices résistantes aux herbicides à l'échelle mondiale. Ce site recense les cas de résistance (populations d'espèces végétales sauvages, appelées "biotypes", ayant développé des résistances à un ou plusieurs herbicides) rapportés par les équipes scientifiques de plus de 80 pays. Toutes classes d'herbicides confondues, le nombre de biotypes résistants croît depuis le début des observations, et a atteint 368 dans le monde en octobre 2011, pour un total de 200 espèces. Ces chiffres, très dépendants de l'effort d'observation (variable selon les pays), sont *de facto* sous-estimés. Néanmoins, ces valeurs, et surtout les profils différenciés de leur évolution (voir chapitre 3, Figure 3-2), peuvent être considérés comme de bons indicateurs de la dynamique d'apparition de biotypes résistants selon la classe d'herbicides. Elle est à relativiser en fonction de la pression de sélection différentielle exercée par les herbicides et de l'importance de leur utilisation en agriculture. Le nombre de biotypes résistants est également un indicateur de la facilité avec laquelle peut apparaître et se fixer la résistance à un, voire plusieurs herbicide(s) de classes différentes dans une population végétale.

Tableau 1-1. Mécanismes de résistance développés par les plantes sauvages aux principales classes d'herbicides concernés par des VTH

Classe <i>Herbicides utilisés avec des VTH</i>	Mode d'action		Historique des principales utilisations des herbicides	Mécanismes de résistance chez les plantes sauvages
	Nature et rôle de la cible	Action des herbicides		
C - inhibiteurs de la photosynthèse au niveau du photosystème II <i>Triazines (atrazine)</i> <i>Nitriles (bromoxynil)</i>	Complexe protéique Transfert d'électrons le long de la chaîne photosynthétique	Inhibition compétitive du photosystème II	Atrazine : utilisation massive dès les années 1970 dans les cultures de maïs, vergers et vignes, métabolisant ou insensibles à cet herbicide. Interdiction en France en 2003, en Europe dès 2004. Contrôle sélectif pré- et post-émergence des mauvaises herbes annuelles Bromoxynil : contrôle sélectif post-émergence des mauvaises herbes dans les cultures de céréales.	Résistance à l'atrazine : - modification de la cible (majorité des cas) : une mutation ponctuelle du gène chloroplastique codant pour une protéine du photosystème II. - rares cas de résistance non liée à la cible : détoxication , comme c'est le cas du maïs cultivé. Certains gènes responsables de la dégradation de l'atrazine ont été identifiés chez des microorganismes. Résistance au bromoxynil : mécanisme non élucidé chez les biotypes résistants, possible métabolisme comme c'est le cas du blé cultivé. Une enzyme bactérienne présentant une résistance par dégradation du bromoxynil a été identifiée, et son déterminisme génétique élucidé.
B - inhibiteurs de l'acétolactate synthase (ALS) <i>familles des sulfonyl-urées (SU) et des imidazolinones (IMI)</i>	Enzyme commune aux microorganismes et aux végétaux Synthèse des acides aminés branchés et de l'uracile	Blocage de l'accès du substrat à son site de fixation dans l'enzyme.	Commercialisation au milieu des années 1980 pour contrôler un large spectre d'adventices dicotylédones et graminées. Intensément utilisés dans une large gamme de cultures (principalement céréales, soja, maïs et betterave). La sélectivité repose sur un niveau de métabolisation du toxique plus élevé chez les variétés cultivées (parfois grâce à l'ajout d'un antidote dans le traitement) que chez les adventices cibles.	- métabolisme de la molécule herbicide (fréquent) : mécanisme mal élucidé Chez les microorganismes capables de dégrader les IMI ou les SU, certaines voies métaboliques et leurs déterminants génétiques sont connus. - modification de la cible : mutation de l'un ou des gènes codant pour l'ALS, affectant un seul acide aminé de l'enzyme au niveau du site de fixation de l'herbicide
A - inhibiteurs de l'acétyl coenzyme A carboxylase (ACCCase) <i>Famille des "DIM"</i>	Enzyme Synthèse des acides gras	Inhibition compétitive de l'ACCCase	Introduction au milieu des années 1970, pour contrôler un large spectre de graminées adventices annuelles et pérennes dans une grande gamme de cultures. La sélectivité repose sur la différence de sensibilité de l'ACCCase des graminées et des dicotylédones (la sélectivité sur certaines céréales est due à une métabolisation très rapide, parfois accélérée grâce à l'adjonction d'un antidote dans le traitement)	- mécanismes non liés à la cible (majorité des cas) : déterminisme génétique de la dégradation des molécules herbicides mal élucidé - modification de la cible : mutations ponctuelles affectant le gène codant pour l'ACCCase
G - inhibiteur de l'enoïl pyruvyl shikimate 3-phosphate synthase (EPSPS) <i>Glyphosate</i>	Enzyme chloroplastique commune aux végétaux, bactéries et champignons Synthèse d'acides aminés aromatiques	Inhibition compétitive de l'EPSPS Inhibition de l'adressage de son précurseur dans le chloroplaste	Herbicide non sélectif introduit en 1974 pour le contrôle des mauvaises herbes en pré-semis ou post-récolte des grandes cultures conventionnelles et zones incultes. Largement utilisé depuis le milieu des années 1990 dans les cultures transgéniques Roundup-Ready® rendues résistantes à cet herbicide : soja, coton, maïs, colza, et plus récemment betterave et blé. Molécule herbicide la plus utilisée depuis plus de 20 ans.	Divers mécanismes de résistance, parfois simultanément mis en œuvre : - mutation de la cible . Chez les microorganismes, certains gènes codant des EPSPS naturellement résistantes au glyphosate ont été décrits - surexpression du gène codant pour la cible - perturbation de la migration du glyphosate dans la plante La métabolisme de l'herbicide est supposée inexistante ou non effective chez les plantes. Certains microorganismes du sol sont en revanche connus pour dégrader le glyphosate.
H - inhibiteur de la glutamine synthétase (GS) <i>Glufosinate ammonium</i>	Enzyme Synthèse de la glutamine	Inhibition compétitive et liaison irréversible avec la GS	Herbicide non sélectif introduit en 1981 pour le contrôle rapide des flores adventices en post-émergence. Utilisé depuis le milieu des années 1990 dans les cultures transgéniques Liberty Link® rendues résistantes à cet herbicide : maïs, colza, soja, et plus récemment coton.	Deux biotypes résistants récemment relevés, mécanisme inconnu. Chez les microorganismes, le gène bar a été identifié chez une bactérie du genre <i>Streptomyces</i> , comme déterminant génétique d'une résistance par détoxication .

Pour certaines classes d'herbicides, l'abondance des biotypes résistants constitue une première ressource génétique exploitable pour identifier et introduire le trait TH par croisements sexués dans les variétés cultivées. Pour d'autres en revanche, peu de mutants spontanés existent actuellement chez les végétaux, et aucun n'avait encore été identifié au moment où les premières variétés tolérantes à ces herbicides ont été obtenues. D'autres sources du trait TH, non végétales, ont ainsi dû être recherchées pour entreprendre l'obtention de ces variétés. Les microorganismes constituent à ce titre une importante source de gènes d'intérêt agronomique (vitesse de multiplication et d'évolution, et capacité d'adaptation à la présence d'un xénobiotique plus élevées que les organismes supérieurs).

1.1.2. Les résistances aux différentes classes d'herbicides

Cette section présente les mécanismes de résistance aux principales molécules herbicides actuellement utilisées avec des VTH, dans l'ordre chronologique des vagues d'observation de biotypes résistants. Ces molécules se répartissent dans 5 des 21 classes HRAC définies selon les modes d'action herbicides. Le tableau 1-1 présente, pour chaque classe d'herbicides utilisés avec des VTH, le mode d'action de la molécule, son historique d'utilisation hors VTH et les mécanismes de résistance élucidés chez les biotypes sauvages. Chez les plantes sauvages, les principaux mécanismes de résistance identifiés pour les 5 classes d'herbicides présentées sont basés sur la modification de la cible de l'herbicide (résistances de cible), ou sur la dégradation du toxique (résistances de métabolisation).

Les mutations génétiques responsables des **résistances de cible** sont généralement bien connues. Il s'agit de mutations ponctuelles du gène codant la cible, qui affectent le site de fixation de l'herbicide. Le déterminisme principalement monogénique de ces résistances explique la rapidité de leur évolution. Plusieurs mutations sont parfois possibles pour conférer la résistance à un même herbicide, augmentant la probabilité d'acquérir le trait bien que le niveau de résistance ne soit pas élevé dans tous les cas. A l'inverse, une même mutation peut conférer des résistances à plusieurs herbicides.

Le phénomène de mutation pose la question des effets secondaires qui lui sont associés. *A priori*, lorsque le site de fixation de l'herbicide sur l'enzyme est aussi celui du substrat de l'enzyme (inhibition compétitive), on peut s'attendre à ce qu'une mutation conférant la résistance à l'herbicide affecte également la fonctionnalité de l'enzyme, entraînant des coûts métaboliques. A l'inverse, si le site de fixation de l'herbicide est distant du site d'action du substrat (inhibition non compétitive), le risque de perturbation de l'activité enzymatique est moindre, et les coûts métaboliques associés sont faibles voire nuls. Par ailleurs, un gène peut déterminer plusieurs caractères phénotypiques (on parle de pléiotropie). La mutation d'un tel gène peut donc affecter plusieurs caractères phénotypiques déterminés par ce gène.

De très nombreux cas de **résistance par détoxification** existent par ailleurs, mais rares sont les mécanismes précisément connus chez les végétaux, et leur déterminisme génétique est probablement multigénique et variable. Ils pourraient impliquer les cytochromes P450 oxydases (P450) et/ou les glutathione-S-transférases (GST), enzymes qui interviennent dans la dégradation des substances organiques chez les organismes supérieurs et les microorganismes. Chez les plantes, les P450 et les GST forment d'importantes familles de protéines, dont la diversité des formes se traduit par la possibilité de métaboliser une large gamme d'herbicides aux modes d'action très variés. Certaines d'entre elles sont capables d'intervenir dans la détoxification de plusieurs herbicides aux modes d'action différents : certains biotypes de graminées sont ainsi résistants à la fois aux inhibiteurs de l'ACCCase et aux inhibiteurs de l'ALS avant même d'avoir été exposés à ces derniers.

- **Résistances aux herbicides des classes C : inhibiteurs de la photosynthèse**

Les classes C d'herbicides regroupent les molécules qui inhibent la chaîne photosynthétique de transport des électrons. La première vague d'observation de biotypes résistants, entre 1975 et 1980, correspond à des résistances aux triazines appartenant à l'une des classes C. La résistance est majoritairement conférée par une seule mutation de la cible enzymatique, associée à des coûts métaboliques importants.

- **Résistances aux herbicides de classe B : inhibiteurs de l'ALS**

L'ALS (acétolactate synthase, aussi connue sous le nom d'acétohydroxyacide synthase, AHAS) est une enzyme intervenant dans la synthèse de certains acides aminés. Des résistances aux herbicides de la classe B sont observées dès les années 1980, mais c'est au début des années 1990 que le phénomène s'amplifie. Cette seconde vague d'apparition de biotypes est marquée par une plus grande diversité des mécanismes de résistance, certaines plantes pouvant en cumuler plusieurs.

Les résistances par modification de la cible sont nombreuses. Parmi les 22 mutations repérées pouvant en être responsables, certaines (dont la plus répandue) sont associées à un coût métabolique faible voire nul. D'autres confèrent des résistances croisées aux sulfonyl-urées et aux imidazolinones, les deux familles d'herbicides de la classe B actuellement utilisées avec des VTH. De manière générale, la facilité de mutation du gène codant l'ALS explique la rapidité d'apparition de mutants résistants, et leur détection dès la généralisation de l'emploi des herbicides de la classe B. Peu de mutations ont cependant été étudiées sous l'angle de la valeur sélective des individus.

Les résistances de métabolisation sont au moins aussi nombreuses que les précédentes, et impliquent probablement des P450 et/ou des GST.

- Résistances aux herbicides de classe A : inhibiteurs de l'ACCCase

L'ACCCase (acétyl coenzyme A carboxylase) est impliquée dans la synthèse des acides gras. Les biotypes résistants aux herbicides sont majoritairement signalés après le milieu des années 1990. La plupart des résistances repose sur la métabolisation du toxique, mais les résistances de cible sont également nombreuses.

Si les résistances de métabolisation, majoritaires, semblent associées à un coût reproductif (évalué à environ 23% chez une Ivraie, par mesure du nombre de structures reproductives et du poids des graines), certaines résistances de cible ne sont associées à aucun coût métabolique. C'est le cas de la mutation la plus répandue, qui semble même favoriser une germination plus rapide. Huit mutations ponctuelles de l'ACCCase ont été identifiées, conférant des niveaux de résistance très variables.

- Résistance à l'herbicide de classe G : inhibiteur de EPSPS

L'EPSPS (enoyl pyruvyl shikimate 3-phosphate synthase) intervient dans la biosynthèse d'acides aminés aromatiques. L'apparition et la détection de résistances à cet herbicide s'est accélérée au début des années 2000. Plusieurs mécanismes sont souvent mis en œuvre simultanément chez les biotypes étudiés, dont le plus commun repose sur la réduction de la translocation de l'herbicide vers sa cible. La valeur sélective de ces mécanismes de résistance n'a été étudiée que pour ce mécanisme, qui semble entraîner un coût reproductif.

La modification de la cible (3 mutations possibles ne conférant qu'une résistance modeste au glyphosate) et son amplification ont également été mises en évidence, mais il n'est pas à exclure que d'autres mécanismes encore inconnus soient identifiés, étant donnée l'augmentation du nombre de biotypes résistants repérés depuis quelques années.

- Résistance à l'herbicide de classe H : inhibiteur de la GS

La GS (glutamine synthétase) intervient dans la synthèse de la glutamine. Aucun biotype résistant au glufosinate n'avait été détecté jusqu'à l'identification récente de 2 biotypes résistants à cet herbicide, sans que le(s) mécanisme(s) ne soit élucidé.

Quel que soit le mode d'action des herbicides présentés ci-dessus, des mécanismes de résistance ont été sélectionnés chez des populations de plantes, leur permettant de survivre et de se reproduire malgré les traitements herbicides. Toutes les classes d'herbicides sont concernées par ce phénomène. La connaissance des mécanismes moléculaires sous-jacents, dont certains n'ont aucune répercussion sur la valeur sélective des individus, renseigne sur les diverses possibilités d'introduire le trait TH dans une variété d'intérêt agronomique. Dans les cas où peu de biotypes sauvages ont été décrits chez les plantes, les microorganismes constituent une importante source de gènes qu'il est possible d'exploiter par le biais de la transgénèse.

1.2. Modes d'insertion du trait TH dans le génome d'une espèce cultivée

Il existe de multiples sources du trait TH, dans le règne végétal comme chez les microorganismes. Cette section présente les méthodes dont disposent les obtenteurs pour introduire ce trait dans des espèces cultivées, à partir :

- d'un individu porteur d'une mutation conférant la résistance à un herbicide, et capable d'hybridation avec l'espèce cultivée ; dans ce premier cas, la mutation portée par l'individu peut être spontanée ou induite par mutagenèse ;
- d'un organisme non apparenté à l'espèce cultivée, qui nécessitera le recours aux techniques de transgénèse. Dans ce cas, les gènes de TH insérés dans les plantes cultivées proviennent en grande majorité des microorganismes.

Trois méthodes d'obtention sont à l'origine des VTH actuellement commercialisées : les méthodes de sélection traditionnelles exploitant les ressources génétiques naturelles de l'espèce ou de ses apparentées, la mutagenèse et la transgénèse. Le tableau 1-2 précise, pour chacune d'entre elles, le type de modification génétique qu'elles permettent d'introduire dans une variété d'intérêt :

- l'extinction de l'expression d'un gène appartenant au génome de la plante (génome dit résident),
- la modification ponctuelle d'un gène résident,
- l'intégration d'un nouveau gène étranger au génome résident.

Tableau 1-2. Principales modifications génétiques rendues possibles par les méthodes actuelles d'obtention de variétés

Objectif recherché / Technique	Extinction de l'expression d'un gène résident	Remplacement d'un allèle résident par un allèle d'intérêt	Ajout d'un gène étranger au génome résident
Exploitation de mutations spontanées	X	X	
Mutagenèse	X	X	
Transgénèse	X		X

Les cibles cellulaires connues des herbicides étant des enzymes dont la présence est nécessaire à la survie de la plante, l'extinction de l'expression d'un gène résident est *a priori* non exploitable pour obtenir des VTH. Les méthodes permettant de réaliser ce type de modification génétique ne sont donc pas présentées dans ce document.

Les méthodes d'introduction du caractère dans une lignée d'intérêt agronomique ne seront pas détaillées, celles-ci n'étant pas spécifiques à l'obtention de variétés TH mais communes à tout processus d'amélioration variétale.

1.2.1. La valorisation de mutants spontanés et induits

Le site Weedsience ne présente que les résistances apparues chez des plantes sauvages. La variabilité génétique existant au sein des espèces cultivées permet également de détecter des mutants spontanés résistants pour un certain nombre d'herbicides (classes A, B, C, E, K1, O...). Ainsi, des repousses peuvent se révéler résistantes à l'herbicide utilisé dans les autres cultures de la rotation, ou à proximité de parcelles dans lesquelles il est utilisé, sélectionnées sous l'effet de la pression exercée par le traitement. De tels mutants constituent la source du trait TH la plus facilement exploitable pour introduire le trait chez la variété souhaitée, par simples croisements sexuels.

Toutefois, l'identification au champ de mutants spontanés dépend du réseau d'observation sur le terrain et implique un délai après la mise sur le marché de l'herbicide et son utilisation suffisamment longue et à assez grande échelle pour que des résistances se manifestent. Pour s'affranchir de ces contraintes, il est possible de cribler plus efficacement l'apparition de mutants résistants en laboratoire, en cultivant des microspores (cellule qui donne un grain de pollen) ou en faisant germer des graines en présence d'herbicide. Le taux de mutations spontanées n'est pas augmenté, mais l'herbicide opère comme agent de sélection permettant de repérer plus rapidement les mutants résistants. Les mutations naturelles restent néanmoins peu fréquentes.

La mutagenèse consiste à augmenter le taux de mutations dans l'ADN en exposant volontairement un organisme (principalement aujourd'hui des graines dans le cas des végétaux) à l'action d'un agent mutagène. Les agents mutagènes agissent sur l'ADN résident en provoquant aléatoirement des ruptures de la chaîne, des remplacements de bases ou des insertions/délétions de séquences plus ou moins importantes. De plus, bien qu'elle nécessite toujours de réaliser ultérieurement de nombreux rétrocroisements, la mutagenèse donne la possibilité d'induire des mutations directement dans une variété élite possédant déjà un ensemble de caractères phénotypiques d'intérêt agronomique. Le criblage des plantes porteuses des mutations d'intérêt est ensuite effectué par l'application de l'herbicide sur les plantules ou par trempage des graines avant semis. Une fois le géniteur de tolérance identifié, le caractère est transféré par rétrocroisement vers le matériel de bonne valeur agronomique en cours de sélection - ces rétrocroisements pouvant utiliser la sélection assistée par marqueurs.

En pratique, l'exploitation de mutations spontanées ou induites pour l'obtention de VTH s'est essentiellement concentrée sur les mutations du gène de l'ALS, cible enzymatique des herbicides de la classe B. La présente section porte donc essentiellement sur l'obtention de variétés tolérantes aux inhibiteurs de l'ALS. Une dizaine de mutations (par substitution d'acides aminés) ont été répertoriées sur les 3 gènes codant l'ALS (AHAS1, AHAS2 et AHAS3) chez les espèces cultivées. Elles confèrent des niveaux de résistance variés aux différents inhibiteurs de l'ALS selon le gène, l'allèle et l'homozygotie. Cependant, la caractérisation moléculaire de la mutation n'est pas toujours connue ou publiée chez les VTH commercialisées. Selon les cas, la résistance aux herbicides est obtenue par mutation sur l'un ou plusieurs des différents gènes AHAS.

• Exploitation de mutations spontanées

Le **tournesol** est la principale espèce pour laquelle des variétés tolérantes aux imidazolinones et d'autres aux sulfonyle-urées ont été obtenues respectivement en 1996 et dans les années 2000, à partir de repousses ou de plantes sauvages résistantes remarquées dans des champs de soja aux Etats-Unis en 1996. Les premières sont à l'origine des hybrides de tournesol Clearfield® de BASF qui portent la mutation AHAS1-1 mais nécessitent un deuxième gène pour obtenir une tolérance complète aux imidazolinones.

Des mutants spontanés ont par ailleurs été obtenus par sélection sur culture cellulaire pour le **colza** (tolérance aux imidazolinones), et sans donner suite à un développement commercial pour la **chicorée** et la **betterave**. Les mutants de **colza** obtenus par cette voie sont à l'origine de variétés Clearfield® développées initialement par BASF. Chez ces mutants, les gènes AHAS1 et AHAS2 sont mutés, apportant respectivement 15% et 85% de la résistance aux imidazolinones. De plus, les 2 mutations doivent être homozygotes pour apporter un niveau suffisant de tolérance aux imidazolinones.

En dehors de la tolérance aux inhibiteurs de l'ALS, des variétés tolérantes à d'autres classes d'herbicides ont été obtenues par exploitation de mutations spontanées, puis commercialisées. Ainsi chez le **maïs**, une résistance au séthoxydime (classe A) a été obtenue par sélection sur culture de tissus, tolérance associée à des mutations des gènes ACCase 1 et 2. Une résistance naturelle au cycloxydime a également été identifiée et exploitée dans le cadre du système DUO System® de BASF utilisé en France et en Europe. La tolérance peut être obtenue à l'état hétérozygote pour un seul allèle.

Des biotypes de navette résistants à l'atrazine (classe C1) ont été identifiés dans des champs de maïs désherbé à l'atrazine.

L'ensemble des composantes du cytoplasme de la navette a été transféré par croisement sexué à des cellules de **colza**, conduisant à la création de la variété Triton®. La tolérance est due à la mutation d'un gène chloroplastique. La résistance à l'atrazine a également été transférée au millet et au chou.

Notons enfin que le repérage du caractère de résistance aux herbicides chez une espèce sauvage distincte mais apparentée à l'espèce cultivée peut également être directement valorisable si l'hybride issu du croisement entre la plante sauvage et la variété cultivée est fertile. Cela peut être par exemple le cas du colza, du riz, du tournesol et de la betterave (voir Chapitre 3). La littérature exploitée ne rapporte cependant pas de telles obtentions.

• Induction de mutations par mutagenèse

Des agents mutagènes d'origine physique ou chimique ont été largement employés dans les cinquante dernières années pour provoquer des modifications de l'ADN et créer de la variabilité génétique exploitée par les sélectionneurs chez de nombreuses espèces cultivées. La mutagenèse physique procède principalement par irradiation de graines par rayons UV, gamma, ou par neutrons rapides. Les faibles doses de rayons provoquent surtout des mutations ponctuelles, tandis que les fortes doses génèrent des insertions/délétions ou translocations de séquences plus ou moins longues. Il est par ailleurs possible de provoquer des substitutions de bases en immergeant les graines dans une solution d'agent mutagène chimique, le plus souvent l'éthyl-méthanésulfonate (EMS). Ce second type de mutagenèse est à l'origine de l'ensemble des plantes cultivées tolérantes aux inhibiteurs de l'ALS présentées ici.

Une famille de brevets européens déposée par DuPont revendique une résistance aux sulfonyle-urées pour des génotypes de **tournesol** obtenus par mutation chimique sans toutefois faire référence à une mutation particulière de la séquence des gènes AHAS (mais probablement similaire à AHAS1-2). Différentes lignées obtenues par cette méthode ont été déposées par Pioneer, puis commercialisées sous la marque Express Sun®. Ces mutants sont particulièrement résistants à certaines des sulfonyle-urées (metsulfuron-méthyl, tribénuron-méthyl, éthametsulfuron-méthyl), mais pas aux imidazolinones.

La mutagenèse chimique sur graines de **tournesol** a également permis d'obtenir la mutation AHAS1-3 conférant une forte résistance à une large gamme d'imidazolinones. Les variétés dérivées sont commercialisées sous le label ClearfieldPlus® system de BASF.

De nombreuses autres espèces végétales ont aussi fait l'objet d'amélioration variétale reposant sur la mutagenèse chimique (en particulier orge, blé, maïs, riz, lentille, colza, coton tolérants à des herbicides de la classe B). Les publications analysées ne donnent cependant pas toujours de précisions sur les mutations en cause, les herbicides auxquels les plantes obtenues sont tolérantes, et l'application commerciale de ces mutants.

La tolérance à certains herbicides a enfin pu être recherchée pour d'autres objectifs que leur utilisation sur la culture. C'est le cas de l'obtention de mutants de **luzerne** tolérants aux résidus de sulfonyle-urées présents dans le sol (famille d'herbicides utilisée sur les autres cultures de la rotation) et habituellement toxiques pour les légumineuses.

1.2.2. La transgénèse

Les méthodes actuelles de transgénèse visent majoritairement l'intégration d'un nouveau gène, initialement non présent dans le génome de la plante (génome résident). Ce gène étranger peut provenir du règne végétal ou d'un autre règne. Afin que son expression soit régulée une fois inséré dans le génome résident, le gène d'intérêt est bordé de séquences promotrices et terminatrices. L'optimisation de cette construction moléculaire, qui constitue le transgène, conditionne l'efficacité de son expression finale dans la plante. Les principales méthodes de transgénèse présentées ci-dessous sont également utilisables pour insérer plusieurs transgènes d'intérêt agronomique dans une variété ("empiement" de traits).

• Méthodes classiques d'insertion du transgène

Depuis les premières tentatives de transformation de cellules végétales dans les années 1970, les techniques ont rapidement évolué la décennie suivante, permettant d'obtenir des transformants stables pour la majorité des espèces de grandes cultures. Les principales sont présentées ici.

Méthodes de transformation

Les méthodes de transformation indirecte utilisent un vecteur de transformation dans lequel est inséré le transgène avant mise en présence avec les fragments végétaux. Les vecteurs les plus utilisés sont les bactéries *Agrobacterium tumefaciens* et *A. rhizogenes*, capables de transférer une partie de leur matériel génétique (un plasmide) dans l'ADN de la plante qu'ils infectent. Dès le début des années 1980, il a été techniquement possible d'insérer un transgène dans le plasmide de ces bactéries. Ce système a alors largement été exploité sous le nom d'agrotransformation, permettant d'obtenir de nombreuses dicotylédones puis monocotylédones transgéniques.

Les méthodes de transformation directe sont basées sur la mise en présence de fragments végétaux directement avec l'ADN à insérer. La création maîtrisée, au milieu des années 1980, de cellules végétales rendues perméables par élimination

de leur paroi (protoplastes) s'est d'abord heurtée à la difficulté de régénérer des plantes entières (toutes les espèces ne sont pas régénérables à partir d'un protoplaste). Elles ont néanmoins abouti à l'obtention de transformants stables pour les céréales de grande culture, monocotylédones, réputées difficiles à transformer avec *Agrobacterium*.

La biolistique est une autre technique directe largement employée. Des micro-particules sont enrobées de molécules d'ADN, et projetées sur les cellules à l'aide d'un canon à particules. La 2^e génération de canons à particules a vu le jour au début des années 1990, et a permis d'obtenir des transformants stables pour de nombreuses espèces (soja, tabac, maïs, coton, papaye, riz, blé, avoine, canne à sucre, orge).

Applications actuelles à l'obtention de VTH

Plusieurs VTH de nombreuses espèces ont été obtenues par transgénèse, dont les plus connues constituent les offres de variétés Roundup Ready® et LibertyLink®.

Le transgène le plus utilisé dans l'obtention de VTH provient de la souche CP4 d'*Agrobacterium* et code une EPSPS insensible au glyphosate. De nombreuses espèces cultivées ont été transformées dans le but d'exprimer ce gène, formant l'offre Roundup Ready® initialement développée par Monsanto.

Les gènes *pat* et *bar*, provenant de deux espèces de *Streptomyces*, confèrent la résistance au glufosinate ammonium par détoxication (l'herbicide est converti par une enzyme en un dérivé inactif). Insérés par transgénèse dans des variétés de colza, maïs, coton et soja, ils sont à l'origine des variétés initialement développées par Pioneer et commercialisées sous l'appellation LibertyLink®.

Transformation des chloroplastes

L'application de ces méthodes à la transformation des chloroplastes pourrait être efficace pour obtenir des VTH. En effet, certaines protéines cibles des herbicides sont actives dans les chloroplastes. Un transgène codant la cible modifiée, inséré directement dans le génome chloroplastique pourrait y être normalement traduit car celui-ci possède toute la machinerie nécessaire à la synthèse d'une protéine. Le pollen transmettant rarement les chloroplastes (0,03% dans le cas général), une transformation chloroplastique permettrait de réduire fortement la diffusion du trait par voie de croisement pollinique.

Ce type de transformation est cependant encore difficile à réaliser. Seuls des tabacs résistants au glyphosate (par modification de cible), au glufosinate (par détoxication) ou encore aux sulfonyl-urées/imidazolinones (par modification de cible) ont été récemment obtenus (en 2001 et en 2008).

• Vérification du succès de la transformation et respect des exigences de la loi européenne

La procédure d'autorisation de dissémination volontaire et de mise sur le marché des OGM, dont les règles communautaires sont fixées par la directive 2001/18/CE, comporte une phase d'évaluation de la variété candidate par l'autorité compétente désignée par chaque Etat membre (en France, le Haut Conseil des Biotechnologies depuis 2009, succédant aux Commissions du Génie Biomoléculaire (CGB) et du Génie Génétique (CGG)). Selon la directive 2001/18/CE, les pétitionnaires qui souhaitent mettre sur le marché des variétés transgéniques doivent fournir des informations particulières, parmi lesquelles le nombre de copies du transgène, dont la localisation et le niveau d'expression sont précisément connus. Depuis 2004, ils doivent aussi s'assurer de l'absence de gènes de résistance aux antibiotiques, souvent utilisés comme gènes marqueurs, susceptibles d'avoir des effets sanitaires et environnementaux préjudiciables.

Caractérisation de l'insertion du transgène

En l'absence de techniques induisant des modifications ciblées dans le génome, les méthodes classiques de transgénèse ne permettent que des insertions multiples et aléatoires. Obtenir une insertion unique et en connaître la localisation exacte dans le génome résident n'est donc *a priori* pas aisé. La multiplication des rétrocroisements permet de supprimer les insertions surnuméraires, mais il reste quasiment impossible d'éliminer les insertions très proches. La localisation du transgène dans le génome ne peut être déterminée que de manière approximative, excepté lorsque le génome de la plante est séquencé.

Excision des gènes marqueurs

Les gènes de résistance à un antibiotique sont souvent utilisés comme marqueurs, associés aux transgènes dans une construction génétique appelée cassette de transgénèse. Insérés en même temps que les transgènes, ils permettent de s'assurer de l'intégration des gènes d'intérêt dans les génomes. L'antibiotique joue le rôle d'agent sélectif pour cribler les transformants qui ont bien inséré la cassette de transgénèse. L'article 4 de la directive 2001/18/CE prévoyait l'élimination progressive des marqueurs de résistance aux antibiotiques, qui sont susceptibles d'avoir des effets préjudiciables sur la santé humaine et l'environnement, avant 2004 pour les OGM mis sur le marché, et 2008 pour les essais au champ. De nombreux travaux ont donc eu pour objectif de mettre au point des techniques permettant d'éliminer tout gène marqueur après vérification du succès de la transformation.

Une méthode a été mise au point au début des années 2000 et utilisée pour exciser les gènes marqueurs du génome du transformant (système dit Cre/Lox basé sur le mécanisme de recombinaison de l'ADN).

Des gènes de résistance à un herbicide, notamment le glufosinate, sont également largement utilisés comme marqueurs. Les techniques décrites plus haut permettent d'exciser ces gènes, mais leur présence n'étant pas interdite par la réglementation, une partie des variétés transgéniques produites et cultivées pour un trait agronomique autre que la TH sont également tolérantes à un herbicide, bien que ce second trait ne soit pas revendiqué.

1.3. Perspectives d'évolution des méthodes d'obtention de VTH

Bien qu'elles soient à l'origine de la totalité des VTH cultivées actuellement commercialisées, les méthodes d'obtention actuellement utilisées à large échelle présentent des limites en termes d'utilisation et de caractérisation des modifications produites. Si l'introgession, par croisements sexués, de mutations spontanées détectées chez des plantes sauvages est l'approche la plus utilisée en amélioration variétale, il n'est pas toujours possible de trouver des mutants naturels résistants à des herbicides directement exploitables. Les techniques actuelles de mutagenèse et de transgenèse, basées sur l'occurrence aléatoire des mutations induites ou de l'insertion du transgène, se heurtent quant à elles à la difficulté d'obtenir des plantes possédant une seule modification génétique en un endroit précis du génome résident.

Si ces techniques d'obtention variétale sont maintenant utilisées à large échelle depuis une vingtaine d'années, on assiste depuis les années 1990 au développement de nouveaux outils s'inscrivant dans deux logiques :

- l'amélioration, quantitative et qualitative, de l'identification des variants pouvant présenter des traits d'intérêt agronomique,
- l'obtention de modifications ciblées du génome.

1.3.1. Le TILLING, criblage des mutants à haut débit

Lorsque des fragments de végétaux sont soumis à un traitement mutagène chimique ou physique, les plantes viables qui en sont issues présentent chacune de l'ordre de quelques dizaines de mutations ponctuelles dont les localisations varient d'un individu à l'autre en raison de leur caractère aléatoire.

L'objectif du **Tilling** (Targeting Induced Local Lesions in Genomes) est d'identifier pour un gène donné, toutes les versions mutées que possèdent les différents individus d'une collection de mutants. Reposant sur des outils de biologie moléculaire dont la mise en œuvre est actuellement bien maîtrisée, cette stratégie induit une rupture technologique car elle permet d'identifier les mutations affectant un gène d'intérêt (éventuellement exprimées dans des phénotypes particuliers), et de créer des collections de mutants pour n'importe quel caractère agronomique. La méthode est universelle, pouvant être appliquée à n'importe quel gène de tout organisme vivant. En France et à l'étranger, il existe depuis les années 2000 de nombreuses plateformes de Tilling dédiées chacune à une ou plusieurs espèces végétales.

Cette méthode est applicable aussi bien à des mutants obtenus par mutagenèse qu'à des collections de variants naturels (on parle alors d'Eco-Tilling). Le développement industriel de ces méthodes permet la constitution de grandes banques d'allèles d'intérêt agronomique dont l'origine exacte, entre mutants naturels et mutants induits, ne sera plus identifiable au plan biologique.

1.3.2. La modification ciblée du génome

Huit nouvelles technologies d'obtention variétale ont fait l'objet d'une étude par l'Institut de prospective technologique (IPTS, Institute for Prospective Technological Studies) du Centre commun de recherche (JRC, Joint Research Center) en 2010 à la demande de la Commission Européenne, afin d'évaluer le niveau de développement et d'adoption de ces technologies par le secteur de l'amélioration variétale. Parmi elles, deux techniques permettant de réaliser des modifications ciblées du génome s'avèrent faire l'objet de recherche et développement dans le but de créer de nouvelles VTH.

Ces deux techniques exploitent le mécanisme de **recombinaison homologue**, phénomène naturel de réparation du génome. Lorsqu'une cassure du brin d'ADN a lieu, ce mécanisme permet de la corriger en procédant à des échanges de portions d'ADN homologues présentes dans le même génome. Ce remplacement d'une séquence est rendu possible par l'action d'enzymes de restriction capables de couper le brin d'ADN de part et d'autre de la séquence après fixation à un site de reconnaissance spécifique. Principalement observée chez les bactéries, les levures et certains champignons, la recombinaison homologue est très rare chez les organismes supérieurs (excepté dans le génome chloroplastique), et son exploitation était inefficace chez les végétaux supérieurs. Les deux techniques présentées ci-dessous permettent de contourner ces difficultés et de provoquer des modifications ciblées dans le génome.

- L'utilisation des nucléases à doigts de zinc

À la fin des années 1990 ont été découvertes des enzymes de restriction qui possèdent un site de reconnaissance plus grand que celui des nucléases classiques, appelées méganucléases. De par sa taille, la séquence homologue du site de

reconnaissance de ces enzymes est généralement présente en un seul exemplaire dans le génome résident. Or il est aujourd'hui techniquement possible de construire *in vitro* des domaines de reconnaissance (dits "doigts de zinc") capables de se fixer sur une séquence d'ADN connue, et ainsi de concevoir des méganucléases spécifiques de n'importe quel endroit souhaité du génome d'une plante. Introduite dans une cellule par transformation, la méganucléase provoque une coupure que le système de recombinaison homologue de la cellule répare en utilisant le matériel génétique fourni : dans le cas des VTH, il peut s'agir d'un nouveau gène codant une cible enzymatique insensible, ou de quelques nucléotides dont l'insertion provoque une modification ponctuelle dans la séquence du gène résident codant la cible de l'herbicide.

Actuellement, cette technique a principalement été appliquée, en R&D, à l'obtention de tabac tolérant à des inhibiteurs de l'ALS, ou de maïs et de tabac tolérants au glufosinate. Dans certains cas, le développement de la technique en est à la phase d'essais au champ.

• L'utilisation des oligonucléotides

La technique dite ODM (oligonucleotide-directed mutagenesis) permet de générer une mutation à un endroit précis du génome. Le principe de la technique repose sur la recombinaison homologue entre l'ADN résident (présentant une séquence sauvage), et une séquence homologue – l'oligonucléotide – présentant la mutation ponctuelle d'intérêt que l'on veut introduire dans l'organisme. L'oligonucléotide, construit *in vitro*, est une chimère entre ADN et ARN. Une fois transféré dans la cellule par transformation, son appariement avec l'ADN résident stimule fortement l'activité endogène de recombinaison homologue. Il en résulte l'intégration, dans le gène résident ciblé, de la mutation ponctuelle présente dans l'oligonucléotide.

Cette technique a d'ores et déjà permis d'obtenir en laboratoire des lignées de riz, de colza et de maïs tolérantes à des inhibiteurs de l'ALS. Comme pour la technique des nucléases à doigts de zinc, certaines lignées obtenues font l'objet d'essais au champ.

Ces deux techniques ne laissent aucune trace moléculaire témoignant du remplacement ou de l'insertion. Il est donc actuellement impossible *a posteriori* de différencier expérimentalement la plante obtenue par cette technique d'un mutant naturel ou obtenu par mutagenèse, et donc de détecter au laboratoire l'usage de ces technologies dans un matériel végétal donné pour en déterminer le mode d'obtention. L'utilisation possible de ces technologies à l'échelle commerciale pose la question de la prise en compte des variétés qui en seront issues dans la réglementation européenne qui repose actuellement sur la distinction OGM/non-OGM (voir Chapitre 2). En effet, il est nécessaire de pouvoir détecter *a posteriori* le mode d'obtention d'une variété pour pouvoir la qualifier d'OGM ou de non-OGM. Des réflexions sont en cours à l'échelle européenne pour définir le statut réglementaire des variétés issues de ces nouvelles techniques.

1.4. Les VTH obtenues

Avant les années 1970, la recherche de variétés cultivées tolérantes à des herbicides était peu active. La séparation plus distincte entre semenciers et firmes phytosanitaires en était en partie la cause, les entreprises de sélection ne trouvant pas grand avantage à sélectionner des traits qui seraient fortement liés au produit d'une autre entreprise. Ce sont les premières observations de mauvaises herbes résistantes à des herbicides qui ont réellement suscité l'intérêt des scientifiques pour l'obtention de VTH. Si de très nombreuses expérimentations ont conduit à l'obtention de lignées cultivables TH, toutes n'ont pas abouti à un développement commercial. Seules les principales vagues de VTH commercialisées sont identifiées et présentées dans le tableau 1-3 (les couleurs bordant le texte renvoient à celles du tableau). Pour chacune d'entre elles, le mécanisme biologique sur lequel repose la tolérance y est précisé. Les principales VTH commercialisées ont fait l'objet de dépôt de marques en protégeant l'appellation commerciale ; ces noms figurent également dans le tableau 1-3.

1.4.1. Premières VTH : exploitation de mutants résistants

Les premières méthodes se sont basées sur l'exploitation de mutants spontanés présentant une résistance à un herbicide. Les variétés de colzas tolérants aux triazines (Triton®) mises sur le marché dans les années 1980 s'inscrivent dans cette logique. Ces variétés offraient une solution aux cas de désherbage les plus difficiles.

Dès l'introduction des colzas Triton®, d'autres méthodes basées sur la sélection d'individus à partir de populations sauvages, ou sur la mutagenèse, ont permis, dans les années 1990, d'obtenir des variétés également dotées d'une cible enzymatique modifiée, mais cette fois-ci sans effet secondaire significatif au point de vue agronomique : sojas et tournesols tolérants aux sulfonyle-urées (classe B), maïs tolérants à des herbicides de la classe A, et diverses variétés tolérantes à des imidazolinones (classe B) qui forment l'offre de variétés commercialisées sous la marque Clearfield®. En Europe, de nombreuses variétés de maïs tolérant au cycloxydime (classe A) sont inscrites au Catalogue, dont certaines sont cultivées en France depuis le début des années 2000. Des variétés de tournesol tolérant au tribénuron-méthyl (classe B) et de maïs, colza, riz et tournesol Clearfield® sont également inscrites au Catalogue communautaire, et certaines d'entre elles inscrites (tournesol) ou en cours d'inscription (colza) en France.

Tableau 1-3. Principales VTH commercialisées dans le monde

Herbicide		Cultures TH concernées				
Classe Famille	Molécule active <i>nom commercial</i>	Espèce	Première année de mise sur le marché – inscriptions aux Catalogues Zone géographique de culture / surfaces cultivées (hectares ha)	<i>nom commercial</i>	source du trait TH mécanisme de résistance	Mode d'obtention
A Cyclohexane- diones	Cycloxydime <i>Stratos ultra</i>	Mais	2000 – 35 variétés inscrites en France, 72 en Europe Cultivé en France	<i>Duo System®</i> (BASF)	Ressources génétiques sauvages Modification de la cible	Introgression d'une mutation spontanée par croisements sexuels
	Séthoxydime	Mais	1996 Am Nord		Mutants spontanés ou induits	
	Séthoxydime	Millet	2006 - Chine		Ressources génétiques sauvages Modification de la cible	Croisements sexuels
B Sulfonylurées	Tribénuron-méthyle <i>Express SX</i>	Tournesol	Des variétés inscrites en Europe France : introduction en 2010, env. 30000 ha en 2011	<i>Express Sun®</i> (Pioneer)	mutant spontanés ou induits	
	Chlorsulfuron	Soja	1994 aux USA	<i>STS soybean®</i> (DuPont de Nemours)	mutant spontanés ou induits	
B Imidazolinones	Substances enregistrées : Imazamox, imazapyr, imazethapyr, et imazapic <i>Pursuit, Onduty, Intervix, Newpath, Beyond, Clearpath, Midas, Solo, Pulsar 40...</i>	Mais	1992 aux USA (<i>IMI-corn®</i>) – 3 variétés en Europe (2003 et 2004)	<i>Clearfield®</i> (BASF)	Ressources génétiques de l'espèce Modification de la cible	Sélection de mutants en présence d'herbicide
		Colza	1995 (<i>Smart canola</i>) - 8 variétés en Europe (2010 et 2011)			Mutagenèse chimique sur graines ou microspores
		Riz	2001 aux USA - 2 variétés en Europe (2009 et 2011)			
		Blé	2001			
		Lentille				
Tournesol	2003 : USA, en Argentine et en Turquie – 1 variété au Catalogue français (2009), 52 au Catalogue communautaire France : introduction en 2010, env. 50000 ha en 2011	Croisements sexuels à partir d'une population de tournesols adventives résistants à l'imazethapyr				
C1 Triazines	Atrazine	Colza	1984 Canada jusqu'au milieu des années 1990 Australie : 1 million ha mais diminuent en faveur des Colza RR®	<i>Triton®</i>	Ressources génétiques sauvages Modification de la cible	Croisements sexuels
C3 Oxynils	Bromoxynil	Colza	2000 au Canada – N'est plus commercialisé aujourd'hui	<i>Westar-Oxy-235®</i> (Rhône-Poulenc)	Gène <i>oxy</i> bactérie du sol Métabolisation de l'herbicide	Transgénèse
		Coton	1995 - l'une des premières variétés transgéniques commercialisées N'est plus commercialisé aujourd'hui			Transgénèse
G glycines	Glyphosate <i>Roundup</i>	Soja	1996 Am Nord	<i>Roundup Ready®</i> (Monsanto)	Gène CP4 <i>Agrobacterium</i> Modification de la cible	Transgénèse
		Colza	1996 <i>Hyola au Canada</i>			
		Sorgho				
		Coton	1997 Am Nord			
		Mais	1998 Am Nord			
		Luzerne	2005 aux USA			
		Betterave	2007 aux USA → 95% d'adoption en 2009			
	Blé	En cours de développement				
	Glyphosate	Colza				Gène GOX microbien Métabolisation de l'herbicide
Mais					Gène muté de maïs Modification de la cible	Transgénèse
H Acides phosphiniques	Glufosinate ammonium <i>Liberty®, Ignite®</i>	Colza	1995 pour Invigor au Canada	<i>LibertyLink®</i> (Bayer)	Gène <i>pat</i> ou <i>bar</i> de <i>Streptomyces</i> Métabolisation de l'herbicide	Transgénèse
		Mais	1997 Am Nord – 2 variétés inscrites en France mais non cultivées			
		Coton	2005 pour les FiberMax			
		Soja	2009 aux USA			

Les herbicides associés à ces variétés sont déjà sélectifs sur d'autres cultures. Aussi, le désherbage de ces VTH n'est pas différent de celui des cultures classiquement désherbées avec ces molécules. Comme pour ces cultures, afin d'éliminer l'ensemble de la flore adventice, d'autres herbicides sélectifs doivent le plus souvent être appliqués en complément de celui auquel la variété a été rendue tolérante.

1.4.2. Le développement des VTH transgéniques

Dans le même temps, les outils nécessaires à l'obtention de variétés transgéniques ont rendu possible dès les années 1980 la production de cultures tolérantes à des herbicides à très large spectre, tels que le glyphosate et le glufosinate. En effet, la résistance à ces herbicides n'était observée que chez des microorganismes, impossibles à exploiter comme source du trait TH sans la transgénèse.

Dans ce contexte, la vague initiale de variétés transgéniques sont des VTH, dont le coton tolérant au bromoxynil a été, en 1995, l'une des premières mises à disposition des agriculteurs. Sa diffusion, ainsi que celle du colza tolérant au même herbicide, n'a pas été très large, mais ces variétés sont restées très utilisées dans les cas de désherbage difficile, jusqu'à leur retrait du marché au début des années 2000.

Les variétés transgéniques tolérantes aux herbicides des classes G et H ont fait l'objet d'importants efforts de recherche, et connaissent une adoption massive.

La quasi-totalité des variétés transgéniques tolérantes au glyphosate possèdent le gène CP4 d'*Agrobacterium* (offre des Roundup Ready® - RR). De nombreuses variétés ont par ailleurs été transformées avec le gène *bar* de *Streptomyces hygroscopicus*, responsable de la tolérance au glufosinate, mais principalement en tant que marqueur de transgénèse. Des variétés de colza et de maïs tolérantes au glufosinate ont été mises sur le marché au milieu des années 1990, rejointes récemment par des variétés de coton et de soja (offre des Liberty Link® - LL). En Europe, deux variétés de maïs LL sont inscrites au Catalogue français depuis 2010. Le glufosinate n'y est en revanche pas homologué pour cette utilisation sur maïs.

De plus en plus de variétés transgéniques possèdent aujourd'hui plusieurs traits agronomiques. Un certain nombre d'entre elles associent ainsi le trait TH à un trait de résistance à un lépidoptère (variétés *Bt*). Mais devant la nécessité grandissante de lutter contre l'apparition d'adventices résistantes au glyphosate, un certain nombre de variétés tolérantes à 2 modes d'action herbicide sont en cours de développement (cf. Chapitre 3, Tableau 3-5). Le développement de variétés possédant un empilement de caractères de plus en plus nombreux semble se poursuivre, comme le montre la récente introduction aux Etats-Unis et au Canada du maïs Smartstax (2010), qui possède 8 transgènes conférant la résistance à des insectes et les tolérances au glyphosate et au glufosinate.

1.4.3. Effets du trait TH sur la production végétale

De nombreux travaux sur la résistance à des xénobiotiques ont suggéré que ce caractère entraîne des coûts adaptatifs pour la plante qui le possède. Cette hypothèse a d'abord été confirmée, dans le cas de la résistance aux herbicides, par l'observation d'adventices ayant spontanément acquis la résistance aux triazines. Il n'est cependant pas possible de généraliser ce phénomène à l'ensemble des espèces végétales, en raison de l'important nombre de causes possibles de ces coûts métaboliques : les effets du trait TH sur la qualité et la performance des cultures doivent être examinés au cas par cas.

La littérature académique ne livre que peu de travaux sur cette question, et les effets observés chez les plantes cultivées ne sont pas toujours expliqués du point de vue moléculaire. De plus, les comparaisons entre variétés TH et non-TH ne sont pas toujours effectuées sur du matériel isogénique. Les résultats fragmentaires, présentés dans cette section, permettent néanmoins de mettre en évidence quelques sources possibles des différences observées entre VTH et leurs équivalentes non-TH.

- Le cas de la tolérance à l'atrazine chez le colza tolérant à l'atrazine

Chez le colza Triton®, la tolérance à l'atrazine s'est accompagnée d'un effet pénalisant : en culture pure au champ, les rendements de colzas tolérants à l'atrazine étaient réduits de 22 à 36% au Canada, selon les variétés. On retrouve une réduction de 22% chez le millet tolérant à l'atrazine (non commercialisé). Ces différences sont dues à des effets pléiotropiques de la mutation, qui entraînent une réorganisation du chloroplaste, ainsi qu'à une moins bonne qualité de l'huile.

Bien que le trait TH soit associé chez ces variétés à un rendement plus faible, la productivité à l'hectare restait néanmoins plus élevée en système TH qu'en colza classique dont le rendement était fortement affecté par concurrence des adventices. Après l'enregistrement de quelques variétés de colza résistantes aux triazines (Triton®) au Canada dès 1984, leur usage a donc perduré dix ans, essentiellement dans les zones très infestées de mauvaises herbes et difficiles à désherber autrement, et à cause du faible prix du désherbage. Elles ont ensuite été abandonnées au Canada au profit de l'adoption rapide d'autres VTH moins pénalisantes, mais leur utilisation a perduré en Australie de l'ouest, où elles constituaient la seule option efficace pour l'élimination de la ravenelle, une crucifère apparentée impossible à détruire avec les autres herbicides sélectifs du colza.

- Les variétés tolérantes aux sulfonyle-urées et aux imidazolinones

Différentes mutations permettent la résistance à certains inhibiteurs de l'ALS chez plusieurs espèces cultivées. De façon générale, les études comparatives VTH issues de mutation spontanée ou induite et variétés non-TH n'ont pas montré de différence de rendement. Une production supérieure de 10% a été constatée pour le coton TH mais aux dépens de la qualité de la fibre. Au contraire, un rendement inférieur de 5 à 11% a été observé chez le riz TH, mais des efforts de sélection ultérieurs ont permis de combler ces différences.

- Etude du rendement des VTH transgéniques

Des documents de synthèse financés par l'industrie tendent à montrer que les VTH transgéniques sont plus performantes que les variétés non-TH. Cependant, l'analyse détaillée montre que l'impact positif sur le rendement trouve le plus souvent d'autres explications : biais induit par des conditions de désherbage inadéquates en non-TH, petites différences en réalité non significatives, ou biais dus au niveau technologique supérieur des fermes ayant adopté les VTH par rapport aux autres fermes. Lorsqu'ils sont avérés, les écarts de performance dépendent beaucoup de la mutation, de l'événement d'insertion du transgène, ou des mesures d'accompagnement. Avec l'abandon du système ancien d'évaluation comparative des variétés dans des conditions standardisées, ce ne sont plus des caractéristiques variétales qui sont évaluées, mais des systèmes de désherbage entiers, voire des systèmes de culture.

Les variétés transgéniques RR tolérantes au glyphosate ont fait l'objet de comparaisons avec des variétés non-TH. Les observations rapportent une grande diversité de résultats concernant notamment le rendement de ces variétés. Les auteurs suggèrent que la diversité des résultats pourrait être attribuée à l'effet de la transgénèse (point d'insertion qui casse la lecture et l'expression d'un gène de la plante, mutations somatiques lors de la régénération in vitro des plantes, interactions géniques spécifiques), plutôt qu'à un éventuel effet du transgène lui-même.

Dans les premiers tests variétaux menés dans les années 1990, les variétés RR[®] étaient comparées soit en conditions de non-désherbage, soit en conditions de désherbage standard (traitements classiques appliqués à la fois aux variétés conventionnelles et aux variétés RR[®]). En utilisant du matériel isogénique TH et non-TH, ou de nombreuses variétés des deux types permettant de dégager des effets indépendants du patrimoine génétique des variétés, ces études ont montré des rendements inférieurs de l'ordre de 5% pour les VTH, voire plus dans des situations de forte compétition avec des adventices. Ces travaux ont fait l'objet d'une controverse, les obtenteurs des VTH revendiquant que les variétés soient comparées en appliquant à chacune la solution de désherbage préconisée par l'obteneur (glyphosate sur les variétés RR, programme conventionnel sur les non-TH). Dans le même temps, des efforts de sélection ont été réalisés sur les variétés RR afin d'en améliorer les performances. Les comparaisons de la fin des années 1990 et début 2000 ne montrent alors plus de pénalité de rendement par rapport aux références conventionnelles chez les variétés tolérantes au glyphosate, au glufosinate et au bromoxynil, voire même parfois des rendements supérieurs de 4 à 8%, aussi bien dans le cas du soja que du maïs ou du colza. On peut cependant retourner le raisonnement en supposant que l'effort de sélection s'est réduit ou arrêté pour les variétés non-TH, et donc que l'on n'a jamais été en mesure de comparer les deux stratégies "toutes choses égales par ailleurs".

Suite à l'adoption massive des VTH par les fermiers américains, favorisée par une offre variétale de plus en plus diversifiée, les travaux les plus récents n'abordent plus cette question ou comparent des systèmes de désherbage dans leur globalité : date de semis plus précoce grâce au semis direct qui entraîne une croissance plus longue, largeur de l'inter-rang et densité, traitement de pré- ou post-semis, et efficacité de l'herbicide.

- Effets secondaires

La bibliographie rapporte quelques cas hétéroclites de différences observées entre lignées/variétés TH ou non-TH. Ces différences peuvent être liées à la variété, à son interaction avec le milieu, ou encore à l'herbicide. Par exemple, l'application de tribénuron-méthyle à double dose sur des variétés de tournesol TH induit une perte de rendement (par rapport au témoin non traité) sur des variétés hétérozygotes, mais pas sur des variétés homozygotes. Dans le cas des mécanismes de résistance de métabolisation, des variations d'efficacité peuvent être observées car ils mettent en œuvre des processus enzymatiques qui dépendent des conditions climatiques. Dans le cas du colza, l'infection des plantes par le virus de la mosaïque du chou peut conduire, par des interférences entre le promoteur du transgène et une séquence homologue du virus, à la perte de la résistance au champ. Enfin, certains travaux montrent que l'application de glyphosate sur des variétés de soja RR peut être toxique pour la culture dans des conditions de stress hydrique, avec déclenchement de diverses carences, voire une réduction de la nodulation (symbiose fixatrice d'azote), mais ces effets peuvent être enrayerés par des pratiques appropriées.

Conclusions

Les premières VTH étaient issues de mutants spontanés ou induits ; des variétés transgéniques ont émergé sur la même période. Il existe deux types de tolérances aux herbicides introduites dans les variétés cultivées :

- la tolérance à un herbicide sélectif à large spectre ; les principales variétés actuellement commercialisées sont issues de la valorisation de mutations efficaces apparues de manière spontanée ou induite ;
- la tolérance à un herbicide non sélectif ou total, permettant théoriquement d'éliminer toutes les adventices par l'application d'une seule molécule. Les principales variétés qui en sont dotées sont actuellement obtenues par transgénèse, faute d'exploitation possible de mutations spontanées ou induites conférant cette tolérance.

De nouvelles technologies d'obtention sont en cours de développement, qui visent à obtenir des modifications génétiques plus ciblées et limitées par rapport à la mutagenèse et à la transgénèse actuellement utilisées. Certaines sont appliquées à l'obtention de VTH non encore commercialisées mais faisant l'objet d'essais au champ. Cependant, un délai de l'ordre d'une quinzaine d'années existe entre l'apparition d'une nouvelle technologie au laboratoire, et son utilisation agronomique à une échelle suffisamment large pour qu'il soit possible d'en tirer un bilan. Au délai nécessaire au développement d'une technologie s'ajoute celui de l'adaptation des variétés obtenues aux diverses conditions de culture locales puis de leur adoption par les agriculteurs. Enfin, l'apparition de nouvelles technologies s'accompagne d'un questionnement sur le statut juridique des variétés qui en sont issues (voir Chapitre 2).

2. Le développement des VTH

Après la présentation des principales VTH actuellement proposées aux agriculteurs (voir Chapitre 1), ce chapitre 2 vise à caractériser le développement de ces variétés, c'est-à-dire à la fois leur diffusion dans le monde et les caractéristiques économiques et réglementaires de cette offre variétale.

Dans une première section ont été regroupées les données chiffrées qui permettent de décrire l'ampleur de l'adoption, tant dans le temps que dans l'espace. Ces informations sont cependant parcellaires et concernent pour l'essentiel des exemples de VTH transgéniques cultivées en Amérique du Nord.

L'ensemble des arguments qui sont susceptibles d'expliquer l'adoption de VTH par l'agriculteur sont ensuite exposés. Les bénéfices et inconvénients des VTH sont identifiés parmi les arguments des firmes obtentrices, les conseils diffusés par les instituts techniques à l'attention des agriculteurs, les constats réalisés *a posteriori* par des expérimentations en champ...

L'adoption massive des VTH transgéniques aux USA ayant fait l'objet des analyses les plus complètes, une section y est dédiée. Cette étude de cas permet d'identifier les stratégies des firmes qui commercialisent les VTH, les raisons effectivement invoquées par les agriculteurs à l'adoption d'une semence TH, ainsi que la conséquence de ce choix en termes d'utilisation d'herbicides. Les limites de cet exemple sont néanmoins à considérer dès lors que se pose la question de la transposition des résultats au contexte français.

Une quatrième section présente donc les spécificités du contexte social et réglementaire de l'adoption des VTH en Europe.

2.1. Description de l'adoption des VTH dans le monde

A l'échelle mondiale, les VTH actuellement les plus développées (en termes d'offre aux agriculteurs et de surfaces cultivées) sont des variétés tolérantes à l'application d'un herbicide total qui permet d'éliminer théoriquement l'ensemble de la flore adventice en un seul passage. Ainsi, les variétés transgéniques tolérantes au glyphosate font l'objet de la majorité des publications scientifiques, et notamment des études visant à décrire leur adoption par les agriculteurs. Une seule comparaison chiffrée sur le long terme, entre adoption de variétés tolérantes à un herbicide total, variétés tolérantes à un herbicide sélectif et variétés non-TH, a été relevée dans la littérature.

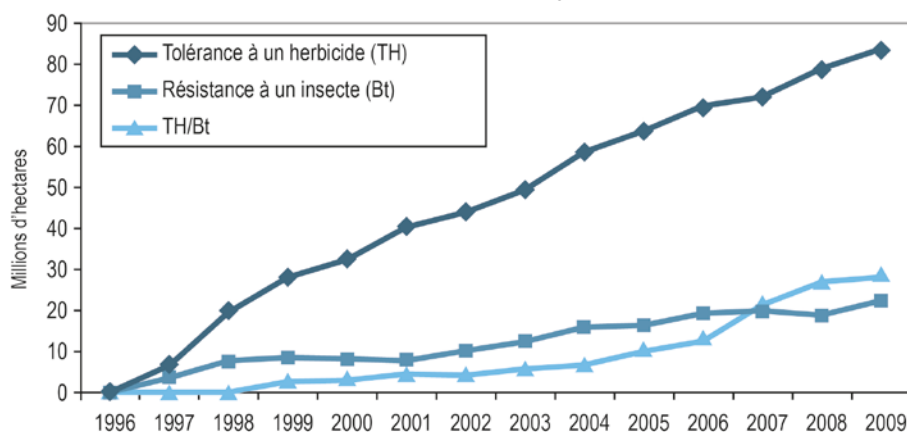
2.1.1. Adoption des VTH transgéniques, tolérantes à un herbicide total

Les données qui étayent cette section proviennent de deux rapports faisant respectivement un état de l'adoption des variétés transgéniques dans le monde, et un bilan de leur usage aux USA.

• A l'échelle mondiale

Le trait TH est le trait le plus représenté chez les variétés transgéniques à l'échelle mondiale, et ce depuis leur introduction en 1996 (Figure 2-1) : ces VTH représentaient 83% des cultures transgéniques en 2010 (soit environ 122 millions d'hectares (Mha) en incluant les variétés possédant un ou plusieurs autres caractères transgéniques), majoritairement situées aux USA, en Argentine et au Brésil.

Figure 2-1. Evolution des surfaces mondiales (Mha) en variétés transgéniques selon le trait d'intérêt, entre 1996 et 2009



Source : ISAAA, rapport Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2009.

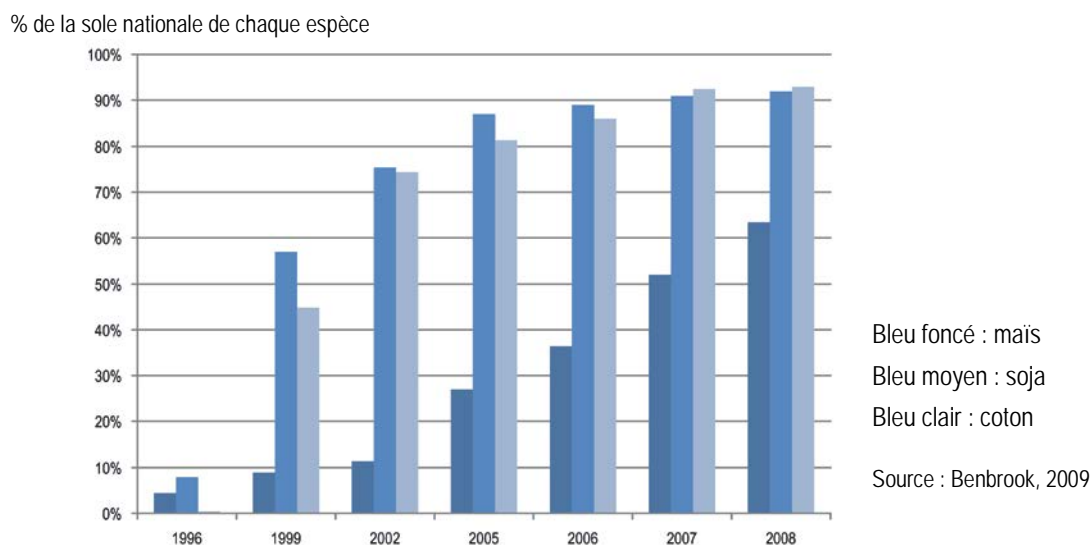
L'existence d'une offre en VTH transgéniques varie également selon les espèces cultivées. Les principales espèces pour lesquelles de telles VTH ont été obtenues sont le soja, le maïs, le coton et le colza.

Ces variétés sont tolérantes au glyphosate (offre Roundup Ready® - RR®), plus rarement au glufosinate (offre des LibertyLink® - LL®, seules concurrentes transgéniques actuelles des RR®). Le soja RR® est emblématique du succès commercial des VTH transgéniques établi sur une quinzaine d'années : en 2010, 81% des surfaces mondiales de soja étaient TH. Dans les 3 premiers pays cultivateurs, les variétés de soja RR® représentaient 99% des surfaces en Argentine, 93% aux Etats-Unis et environ 75% au Brésil.

- Dans certaines régions du monde

Un récent bilan de 13 années de cultures transgéniques aux Etats-Unis décrit l'évolution de la part des VTH les plus représentées dans la sole nationale (Figure 2-2).

Figure 2-2. Pourcentage de la sole cultivée en VTH transgéniques pour le maïs, le soja et le coton, aux Etats-Unis entre 1996 et 2008



Le soja, le coton et le maïs TH ont été introduits aux USA en 1996, représentant alors moins de 3 Mha. Leur culture a progressé très rapidement pour atteindre près de 53 Mha en 2008. Si le coton tolérant au bromoxynil a été cultivé depuis le milieu des années 1990 jusqu'en 2004 (date de fin de commercialisation), la très grande majorité des 3 VTH représentées en Figure 2-2 sont des RR®.

La betterave sucrière constitue par ailleurs un exemple d'adoption de VTH particulièrement rapide. La betterave RR® a connu l'adoption la plus rapide de toutes les variétés transgéniques aux USA, avec 59% d'adoption en 2008 (seconde année de culture), et 95% en 2010. Introduite la même année au Canada, elle y a connu un développement comparable (plus de 59% en 2008, 96% en 2009).

Enfin, une seule information concernant la culture de variétés tolérantes à un herbicide total en Europe a été relevée. Jusqu'en 2006, plus de 100 000 ha de soja RR® ont en effet été cultivés en Roumanie. A son entrée dans l'Union européenne en janvier 2007, la Roumanie a dû interrompre cette culture non approuvée pour la production dans l'Union.

2.1.2. Adoption des VTH issues de mutation, tolérantes à un herbicide sélectif

Les variétés tolérantes à un herbicide sélectif ont connu jusqu'à présent une diffusion assez limitée. La majeure partie de ces VTH sont tolérantes aux inhibiteurs de l'ALS : il s'agit de toute l'offre des variétés Clearfield® tolérantes aux imidazolinones (maïs, blé, riz, colza, tournesol) ainsi que le soja STS® tolérant aux sulfonyle-urées, dont les premières ont fait leur apparition sur le marché en 1992.

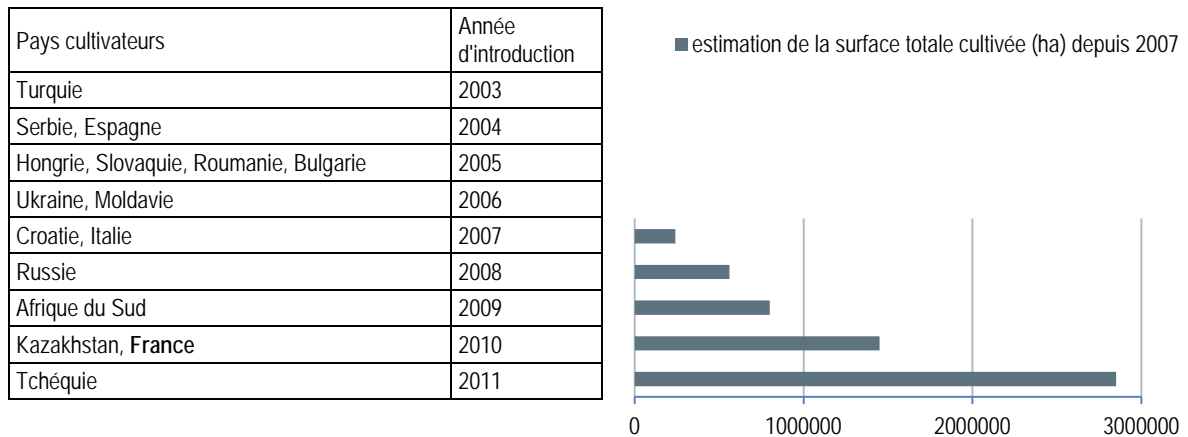
Les informations permettant de décrire et de quantifier leur adoption dans le temps et l'espace sont très rares. Une étude de marché estimait leur surface mondiale à environ 2,4 Mha en 2007, soit environ 2,5% des surfaces VTH tous modes d'obtention confondus.

Pour les Etats-Unis, des données USDA sur les variétés de blé semées sont disponibles pour quelques Etats : en 2011, les variétés Clearfield® représentent 32% des surfaces en blé tendre d'hiver dans l'Oregon, 23% dans l'Etat de Washington, 5% dans le Sud Dakota.

Pour l'Europe, les chiffres disponibles proviennent pour la plupart des sites internet des firmes obtentrices qui présentent une estimation des surfaces attendues ou effectivement cultivées. Les seules données chiffrées sur l'adoption actuelle concernent le tournesol tolérant aux inhibiteurs de l'ALS, sans qu'il soit possible de connaître la manière dont ces surfaces ont été mesurées ou estimées.

BASF indique ainsi sur son site commercial les surfaces cultivées en Tournesol Clearfield® depuis son introduction dans divers pays européens (Figure 2-3).

Figure 2-3. Année de lancement dans les pays de la zone Europe élargie et surfaces totales cultivées en Tournesols Clearfield® depuis 2007



Source : <http://www.agro.basf.fr/fr/common/tiles/static.jsp?page=825040&pageId=825040>

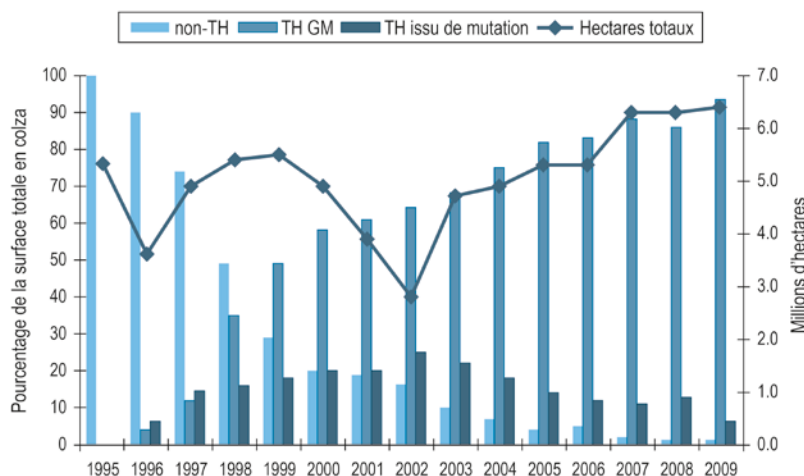
Le Cetiom² indique quant à lui que les tournesols TH Clearfield® tolérants à l'imazamox (Pulsar 40 - BASF) et Express Sun® tolérants au tribénuron méthyl (Express SX® - DuPont) ont couvert en Europe (Espagne, Turquie, Grèce et pays de l'Est) plus d'un million d'hectares en 2009 et près de 2 millions d'hectares en 2010.

Pour la France, BASF et DuPont estiment que les variétés Clearfield® et Express Sun® ont couvert respectivement 20 000 et 15 000 ha en 2010, et 50 000 et 30 000 ha en 2011, soit environ 11% de la sole française de tournesol en 2011.

2.1.3. Le cas du colza de printemps TH au Canada

Au Canada, l'offre de colza de printemps (canola) est variée. Depuis 1995 sont commercialisés 3 types de canola TH : tolérants au glyphosate (RR®), au glufosinate (LL®) et à un inhibiteur de l'ALS (Clearfield®). La Figure 2-4 présente les données de surface cultivées en canola au Canada entre 1995 et 2009, en distinguant ces divers types de variétés. Les modalités de collecte de ces données ne sont pas précisées.

Figure 2-4. Pourcentages de colza TH conventionnel, transgénique (RR® et LL®) et issu de mutagenèse (Clearfield®³) cultivés au Canada entre 1996 et 2009 (et surface totale en millions d'hectares)



Source : ISAAA, rapport Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2009.

² http://www.tournesol-tolerant.cetiom.fr/gamme_varietale.htm

³ La culture du colza Triton®, introduit au Canada en 1984, a cessé au milieu des années 1990

Au Canada, le colza TH transgénique représente les plus grandes surfaces cultivées, et a connu une extension particulièrement forte. Depuis 2003, l'on constate une augmentation à la fois des superficies totales en colza, et de la part de VTH transgéniques dans ces surfaces. La Figure 2-3 met en évidence la forte diminution de la part du colza conventionnel (notamment entre 1995 et 2000) à l'arrivée des colzas TH, jusqu'à ne représenter en 2009 que 1% des surfaces de colza. Les VTH transgéniques et non-transgéniques apparues la même année ont connu un accroissement similaire entre 1996 et 1997. En revanche, leur dynamique d'adoption diffère dès 1998 : les VTH transgéniques ont connu une très forte adoption tandis que les VTH issues de sélection traditionnelle ou de mutagenèse semblent aujourd'hui connaître un déclin, après une adoption maximum en 2002. Si les chiffres semblent indiquer un glissement de l'offre VTH vers les variétés tolérantes à un herbicide total, aucune explication n'a été relevée dans la littérature.

2.2. Les raisons qui peuvent motiver l'adoption des VTH

Cette section présente les divers avantages attendus des VTH, qu'ils soient invoqués par les firmes obtentrices, démontrés par des expérimentations, pointés par les instituts techniques, etc. L'état actuel de la littérature ne permet pas toujours de préciser si chaque argument invoqué *a priori* est effectivement vérifié à l'usage. De plus, il est encore plus difficile de savoir si chacun de ces arguments, qu'il soit avéré ou non, pèse dans la décision d'adoption d'une VTH. Ils sont donc listés dans cette section sans préjuger du poids que chacun pourrait représenter dans le choix d'une semence TH par un agriculteur, poids que la littérature analysée ne permet pas d'évaluer.

2.2.1. Une solution aux situations de désherbage difficile

Des difficultés de désherbage peuvent apparaître lorsque des adventices ne sont éliminées par aucun herbicide utilisable sur la culture, ce qui est en particulier le cas de mauvaises herbes botaniquement (très) proches de la culture.

- Le contrôle des adventices difficiles à éliminer avec les herbicides sélectifs classiques

Les herbicides non sélectifs, comme le glyphosate et le glufosinate, permettent *a priori* d'élargir le spectre d'efficacité du désherbage à toutes les adventices, notamment celles qui sont peu ou pas maîtrisées par les herbicides sélectifs homologués sur la culture, et d'éviter le développement des espèces peu sensibles aux désherbants sélectifs classiques.

La tolérance à des herbicides sélectifs (tels que les inhibiteurs d'ALS) permet aussi un élargissement du spectre d'espèces contrôlées en complétant l'action des herbicides classiquement utilisés sur la culture. Cet argument est utilisé par les obtenteurs, et certains travaux visant à caractériser le spectre d'action de ces herbicides associés aux VTH confirment leur efficacité sur des adventices habituellement difficiles à éliminer. Elle doit donc permettre, par exemple, l'élimination :

- des géraniums et de l'anthesis dans le colza ;
- du datura, du chanvre d'eau et du liseron des haies dans les tournesols tolérants à des inhibiteurs de l'ALS ;
- de la sétaire et d'une renouée dans du blé résistant aux imidazolinones ;
- des graminées estivales réputées difficiles à contrôler comme les pieds-de-coq, sétaires et digitaires, et de graminées vivaces (chiendent...), dans le maïs tolérant au cycloxydime.

Au-delà d'adventices qui sont gênantes dans une culture particulière, les firmes obtentrices promeuvent la contribution des VTH à la lutte contre des **espèces envahissantes** : c'est le cas de l'ambrosie, espèce allergène en expansion (dans les espaces cultivés ainsi que sur les bords de route, les terrains vagues...), et déjà localement très abondante en région Rhône-Alpes, notamment dans les champs de tournesol où la culture de variétés tolérantes à des inhibiteurs de l'ALS serait un moyen de lutte dans les parcelles cultivées.

Enfin, des expérimentations en champ démontrent que des VTH dotées d'une résistance de cible (ALS, ACCase, EPSPS) peuvent être utilisées pour lutter contre les **espèces parasites** comme le *Striga* chez le maïs et l'orobanche chez le tournesol, car l'herbicide n'affecte pas la plante-hôte mais est transmis intact, par la sève, au parasite.

- Le cas particulier des adventices apparentées aux cultures

Les adventices appartenant à la même famille botanique que la culture répondent souvent aux herbicides de la même manière qu'elle, et sont par conséquent impossibles à détruire sélectivement dans la culture en système classique.

L'exemple emblématique du choix d'une VTH pour résoudre ce problème est celui du colza résistant aux triazines : il a été adopté en Australie pour lutter contre la ravenelle, adventice proche du colza, alors que son rendement potentiel plus faible de 15 à 20% était connu. Des expérimentations démontrent que des problèmes similaires ont été résolus avec des variétés Clearfield® (tolérantes aux imidazolinones) de riz pour détruire le riz rouge sauvage, et de blé pour éliminer les égilopes.

Dans les cultures de betterave sucrière, le contrôle des populations de betterave adventice qui appartient à la même espèce nécessite le recours au désherbage mécanique (deux passages en binage) et surtout à l'arrachage manuel. Des expérimentations au champ ont montré que le glyphosate ou d'autres herbicides non sélectifs, auxquels les betteraves sucrières transgéniques sont rendues tolérantes, sont efficaces pour lutter contre la betterave adventice.

Les firmes phytosanitaires et les travaux portant sur le spectre d'action des molécules herbicides mettent également en avant l'efficacité des inhibiteurs de l'ALS contre des adventices de même famille que les cultures de colza ou de tournesol. Les conseils techniques diffusés auprès des agriculteurs, soulignant la nécessité d'éliminer les tournesols "sauvages", promeuvent les tournesols TH comme outil de lutte contre ces adventices.

2.2.2. Réduction des quantités d'herbicides utilisées

Les herbicides actuellement choisis pour être associés aux VTH sont des produits utilisés en post-levée, c'est-à-dire sur des cultures et des adventices déjà bien établies. Cette possibilité de traiter en post-levée, qui n'existait pas pour certaines cultures avant les VTH, permet théoriquement d'adapter le désherbage en fonction de la densité réelle d'infestation, de la répartition du peuplement adventices (homogène ou en taches) et du type d'adventices, et de leur nuisibilité probable pour la culture. Les VTH contribueraient donc à éviter les traitements "d'assurance" réalisés en pré-semis des cultures, réduisant les coûts du désherbage. De plus, certains des herbicides ciblés, comme le glyphosate, sont bon marché et se substituent à des herbicides sélectifs souvent plus chers.

Cette possibilité de ne traiter qu'en cas de besoin est également l'un des **bénéfices environnementaux** attendus des VTH. Un second argument est la possibilité de substituer une ancienne molécule sélective par une autre plus récente dont le profil toxicologique ou écotoxicologique est meilleur et le grammage d'emploi plus faible. Ces deux arguments ne sont cependant pas spécifiques aux VTH, mais font plus généralement partie de l'argumentaire des firmes à l'annonce de la mise au point de nouveaux herbicides ou de nouvelles formulations.

2.2.3. Facilité d'utilisation

L'utilisation d'un seul produit (à large spectre) simplifie le travail de l'agriculteur, qui peut éviter les désherbages de pré-semis et ne plus se soucier d'associer différentes matières actives pour compléter leurs spectres d'activité, ou encore ne plus réaliser de désherbage mécanique d'appoint. Une offre en VTH multiple (par exemple le canola au Canada, voir section 2.1.3) permet à l'agriculteur de choisir le mode d'action herbicide ou la méthode d'application du traitement les plus appropriés à la situation locale.

Le fait que la variété tolère l'application de l'herbicide quel que soit son stade de développement apporte une souplesse d'emploi sur la date d'application du traitement, permet qu'il soit réalisé dans les conditions les plus favorables, et surtout donne de la souplesse dans le calendrier de travail sur l'exploitation. Dans le cas du tournesol, le conseil agricole souligne que la VTH rend possible le désherbage en post-levée (impossible auparavant), qui offre une moindre dépendance vis-à-vis des conditions d'humidité du sol que le traitement de pré-levée.

La souplesse donnée par la VTH peut aussi être d'éviter la phytotoxicité résiduelle des herbicides appliqués sur la culture précédente (cas du lin TH semé après une céréale au Canada, à cause des effets persistants dans le sol des sulfonyles).

• Compatibilité avec la pratique de non-labour

L'efficacité du désherbage chimique atteinte en système TH peut permettre de se passer du labour (opération nécessitant un tracteur puissant et réalisée à vitesse lente), voire de tout travail du sol avant semis, et de supprimer le désherbage mécanique voire manuel. La suppression de ces opérations, et notamment le passage au non-labour, permettent donc un gain de temps, une économie de carburant et de matériel agricole, ainsi que la réduction de l'érosion dans certains contextes. En Argentine ou aux Etats-Unis, le développement rapide et parallèle des systèmes sans labour et du soja RR en constitue une illustration claire : l'intérêt majeur des VTH est alors leur compatibilité avec la suppression du labour sans risque de ne pas maîtriser les adventices.

2.2.4. Rendement et qualité de la récolte

La réalisation d'un meilleur rendement est une conséquence de l'amélioration du désherbage du fait de l'efficacité de la substance active, d'une période d'application plus appropriée, d'absence d'effet phytotoxique sur la culture, ou encore d'un spectre d'activité élargi. Permettant un désherbage plus efficace, les VTH contribuent donc à l'augmentation du rendement dans les cas où le désherbage classique était insuffisant pour assurer la maîtrise des adventices. L'utilisation du colza Triton tolérant à l'atrazine illustre ce cas de figure (voir Chapitre 1).

Par ailleurs, si la principale nuisance des adventices est la concurrence qu'elles exercent vis-à-vis de la culture, leur élimination peut aussi avoir pour objectif de préserver la qualité de la récolte, compromise par la présence de graines d'une adventice (cas des graines de sanve qui, récoltées avec le colza, augmentent le taux d'acide érucique au-delà des normes acceptées). Cette dernière motivation est cependant une préoccupation annexe émise par certains collectifs (coopératives, Conseils scientifiques d'unions de producteurs).

2.3. L'exemple nord-américain : le développement des VTH transgéniques et ses conséquences

La bibliographie internationale fournit une littérature abondante et publiée dans des revues scientifiques sur le déploiement des VTH transgéniques aux USA, les bases de cette adoption et ses conséquences sur les consommations d'herbicides. Les références disponibles concernant les VTH non transgéniques sont moins nombreuses, premièrement du fait d'un suivi réalisé davantage par des instituts techniques et des organismes de développement - qui publient moins leurs données dans des revues scientifiques. De plus, les herbicides sélectifs associés à ces VTH ne sont pas spécifiques à cet usage, ce qui rend difficile l'analyse de l'évolution de leur utilisation en système TH.

La présente section se focalise donc sur la mise sur le marché et l'adoption des VTH transgéniques aux USA. L'adoption des VTH a fait l'objet, en contexte nord-américain, d'enquêtes auprès d'agriculteurs et de travaux pour en identifier les motivations et les effets en termes de consommation d'herbicides, permettant d'avoir un recul d'une quinzaine d'années sur l'adoption de cette technologie. En revanche, les mécanismes économiques en jeu dans la constitution de l'offre sont moins renseignés, car les données commerciales ne sont pas disponibles étant donné leur caractère stratégique pour les entreprises.

2.3.1. Stratégies de mise sur le marché des VTH

Les conditions de la commercialisation des VTH contribuent à déterminer les conditions du développement des variétés, et donc leur intérêt pour les firmes obtentrices et les autres acteurs économiques agricoles. En termes économiques, la particularité commune à toutes les VTH réside dans le fait qu'elles créent sur le marché un lien de demande entre la variété et l'herbicide auquel elle est tolérante.

- **Stratégie de mise en marché des semences TH et des herbicides associés**

Cette question a fait l'objet de très peu d'articles approfondis dans la littérature. Une étude économique théorique portant sur les relations entre le positionnement stratégique des firmes sur les marchés des obtentions variétales et des pesticides, et le développement de nouveaux traits par transgénèse, a montré que les incitations à développer des variétés TH sont plus fortes si la firme détient également les droits de commercialisation de l'herbicide associé. Dans ce cas, la firme peut contrôler les prix des deux produits et dégager un profit plus important. Dans les faits, avec une quinzaine d'années de recul, les VTH (y compris non-transgéniques) ont en effet plutôt été développées par des firmes également présentes sur le marché des herbicides (Monsanto, Bayer, BASF, DuPont).

Les semences TH ayant pour but d'être utilisées spécifiquement avec l'herbicide auquel elles sont tolérantes, quelques études ont cherché à évaluer la possibilité, pour les firmes de l'agrofourmiture, de réaliser des ventes joignant les semences TH et l'herbicide associé. Deux formes de vente existent : la vente liée et la vente groupée.

Une vente liée conditionne l'achat de semences TH à celui de l'herbicide associé, empêchant l'achat de semences TH seules. Cette pratique peut présenter un intérêt pour une firme qui commercialise semence TH et herbicide mais n'a plus le monopole commercial sur l'herbicide - c'est par exemple le cas de Monsanto qui vend aujourd'hui les semences RR et le glyphosate dont le brevet est tombé dans le domaine public en 2000. La vente liée permet alors de limiter la concurrence des firmes qui entrent sur le marché de l'herbicide. Si des cas de ventes liées ont ainsi été observés aux Etats-Unis concernant des variétés tolérantes au glyphosate, ces pratiques, contrairement aux lois de la concurrence, ont cessé suite à des décisions de justice.

Une vente groupée consiste à proposer un kit "semences TH + herbicide associé". L'achat du kit est facultatif, celui des semences TH seules restant possible pour l'agriculteur. Les règles de la concurrence ne s'opposent pas à une telle pratique, mais dans les faits cette stratégie ne semble pas avoir été mise en œuvre. La difficulté à définir un package composé d'une quantité de semences TH et d'une dose d'herbicide qui conviendraient à un large éventail de situations au champ en est peut-être la cause.

Dans les faits, ces 2 pratiques semblent donc assez peu fréquentes, mais aucune donnée d'enquête n'est disponible pour évaluer leur étendue. D'autres stratégies sont en revanche mises en œuvre par les firmes pour conserver de larges parts de marché sans enfreindre les règles de la concurrence. Par exemple, pour préserver la place du RoundUp® sur le marché du glyphosate malgré la concurrence de produits génériques moins chers, Monsanto conserve le monopole sur les formulations les plus efficaces grâce à des adjuvants spécifiques, et offre une meilleure garantie⁴ sur l'efficacité de la tolérance si l'agriculteur a utilisé le RoundUp®. Cette pratique est autorisée car elle n'empêche pas l'utilisation des herbicides concurrents.

Enfin, la littérature académique ne permet pas d'identifier le rôle des marques souvent déposées sur le nom de la technologie TH (RR®, LL®, Clearfield®...) dans les stratégies commerciales des firmes.

⁴ Par ce type de garantie, le fournisseur indemnise l'agriculteur dans le cas où le produit utilisé n'a pas la performance annoncée.

• Pratiques de licences entre détenteur de caractère TH et semenciers

En Amérique du Nord (comme en Europe), les variétés végétales font dans la majorité des cas l'objet d'une protection industrielle qui confère à son titulaire un droit exclusif à exploiter la variété. En dehors des exceptions prévues à ces droits, tout semencier qui souhaiterait exploiter la variété ou les plantes qui en sont issues doit y être autorisé par le biais d'un accord de licence lui permettant, moyennant rétribution du titulaire de la protection, d'utiliser l'objet protégé. Les droits accordés au tiers sur la VTH ou le caractère TH dépendent alors des modalités de rétributions définies dans les accords de licence.

Très peu de données sont disponibles quant au contenu des accords de licence entre les firmes, et à la répartition des parts de marché dans le secteur des semences. Les travaux en économie sont donc très majoritairement fondés sur des études théoriques et des modèles qu'il est difficile de calibrer avec des données. Certains travaux permettent néanmoins de comparer résultats finaux théoriques et situations réelles.

Dans un contexte où les semenciers ont des tailles équivalentes, un premier résultat théorique indique que le détenteur du brevet sur le trait TH qui possède une filiale semencière (cas majoritaire) a intérêt à accorder une licence non exclusive aux autres semenciers désireux d'exploiter le trait pour permettre une diffusion large du caractère, lorsque les rétributions prévues par l'accord de licence sont en partie proportionnelles à la quantité de semences vendue. Ceci est confirmé par les données sur le soja aux Etats-Unis, mettant en évidence que 75% des ventes de semences transgéniques TH sont réalisées par des semenciers non intégrés aux firmes obtentrices du trait TH.

Le constat de l'adoption rapide, et à l'échelle de pays entiers, du soja ou de la betterave TH pose par ailleurs la question du remplacement éventuel de l'offre en variétés non-TH par leurs homologues TH, entraînant une réduction des possibilités de choix des agriculteurs. Dans le cas du soja aux USA, des études récentes montrent que cette offre non-TH existe encore, mais en faible quantité et sur certains segments seulement de ce marché. L'analyse théorique montre que l'offre des deux types de semences (TH et non-TH) peut être intéressante pour le semencier car elle lui permet de cibler un maximum d'agriculteurs lorsque ceux-ci font face à des problèmes de désherbage d'ampleur suffisamment variable. Ainsi, la disparition de l'offre non-TH ne devrait être observée que pour les segments du marché ciblant majoritairement les agriculteurs en situation de désherbage difficile.

Deux remarques amènent néanmoins à nuancer ce dernier résultat obtenu avec un cadre d'analyse assez simple. D'une part, les clauses figurant dans les contrats de licence établis entre détenteurs du trait TH et semenciers sont secrètes, ce qui ne permet pas d'identifier d'éventuels effets supplémentaires sur la répartition de l'offre entre TH et non-TH. D'autre part, le résultat théorique précédent peut être invalidé à plus long terme, suivant l'évolution des schémas de sélection. Deux modèles d'organisation peuvent exister. Le premier consiste à réaliser l'amélioration génétique sur du matériel non-TH, l'introduction du trait TH étant réalisée dans les dernières étapes de la sélection. Dans cette configuration, il est peu probable que la réduction de l'offre non-TH entraîne l'abandon des efforts de sélection sur les semences non-TH. L'inverse pourrait en revanche être observé dans le second modèle, dans lequel le trait TH serait introduit dans l'essentiel du matériel de base utilisé dans le schéma d'amélioration des plantes. L'adoption réelle de ces deux types de stratégies par le secteur de l'obtention variétale est difficile à définir, et dépend à la fois de l'espèce végétale et des grandes orientations du marché des semences dans les zones géographiques considérées.

• Tarification des VTH

La tarification des VTH et de leurs herbicides associés a très peu été étudiée en dehors des variétés RR® très largement diffusées. Des modèles appliqués à des données d'enquêtes auprès d'agriculteurs ont permis d'étudier l'effet du trait de tolérance au glyphosate sur le prix global des semences.

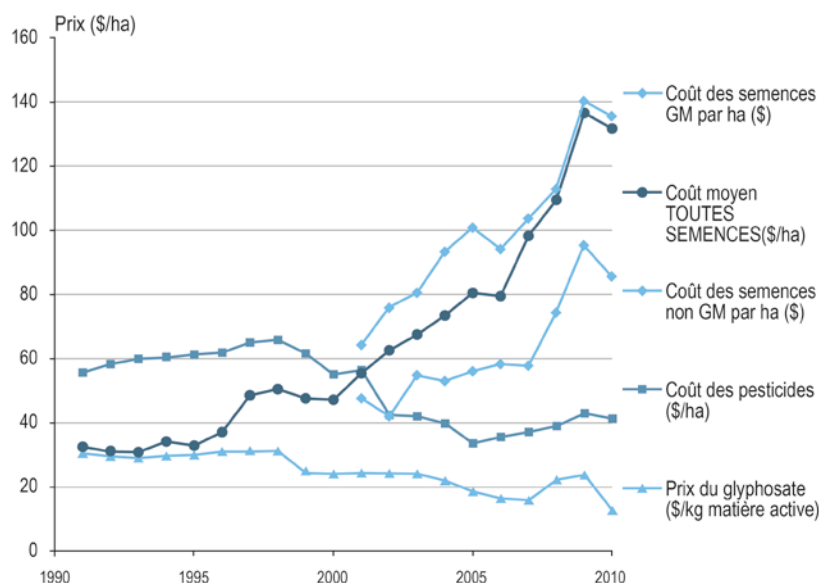
Aux **Etats-Unis**, les évolutions des prix pour le **soja** RR® ont été étudiées sur la période 2000-2007 (Fig 2-5). L'écart entre le prix des semences TH et non-TH est resté stable, la VTH étant en moyenne 50% plus chère que la semence non-TH⁵. L'étude du coût du trait TH chez le **maïs** RR® sur la même période est plus difficile en raison de la combinaison de transgènes souvent développée chez les variétés de maïs. Après décomposition de l'effet de chaque trait sur le prix total de la semence, les travaux montrent que le supplément de prix lié au trait TH est moindre lorsqu'il est combiné avec un autre trait.

En **Argentine**, où le trait TH n'est pas protégé par brevet, les semenciers peuvent l'intégrer dans leurs propres variétés de **soja** sans obligation de verser des royalties à Monsanto. Les données d'enquêtes mettent cependant en évidence un surcoût des semences tolérantes au glyphosate de l'ordre de 30%, expliqué par le versement volontaire de redevances à Monsanto de la part des semenciers argentins pour garantir leur accès aux futures innovations génétiques.

Enfin, le coût des semences de **colza** a fait l'objet de travaux au **Canada**, où des variétés tolérantes à différents herbicides sont proposées aux agriculteurs. Une étude très récente montre que seules les semences tolérantes au glyphosate présentent un surcoût depuis que le glyphosate est tombé dans le domaine public. Les deux autres matières actives (le glufosinate et un inhibiteur de l'ALS) étant encore protégées par brevet, la stratégie des entreprises qui les détiennent est de réaliser leur marge sur les ventes de l'herbicide et d'en développer le marché en n'imposant pas de surcoût sur les semences TH.

⁵ En valeur absolue, le coût de la semence de soja en 2007 était en moyenne de 55 \$/ha pour la semence conventionnelle et de 85 \$/ha pour la semence tolérante au glyphosate.

Figure 2-5. Evolution des coûts des semences et pesticides pour le soja aux Etats-Unis, de 1992 à 2010



Source : Bonny 2011, à partir de statistiques de l'USDA

Concernant le **glyphosate**, le seul herbicide qui en contenait était le RoundUp® de Monsanto, jusqu'à l'expiration de son brevet en 2000, amorçant la diminution de son prix. En parallèle, le prix moyen des autres herbicides a également diminué entre 1997 et 2005. En effet, la diffusion des variétés RR® dès 1996 a entraîné le remplacement partiel des herbicides utilisés précédemment dans ces cultures par le glyphosate (Figure 2-5). De ce fait, les firmes agrochimiques qui produisaient ces herbicides en ont diminué les prix pour limiter leurs pertes de marché. Dans un premier temps, tous les producteurs américains de soja ont donc vu le coût des traitements herbicides diminuer. A partir de 2005-2007 en revanche, le prix des herbicides contenant du glyphosate a connu de fortes fluctuations en lien avec l'évolution des quantités produites.

Il est difficile de tirer des conclusions quant à l'évolution globale du poste "semences TH + herbicides" dans les coûts de production, car les variations restent fortes selon les espèces et les pays, d'où la nécessité d'une analyse au cas par cas. De plus, l'évolution des prix ne concerne pas seulement les VTH et leurs herbicides associés, mais également les semences non TH et l'ensemble des pesticides. Dans le cas du soja aux Etats-Unis, le prix moyen de toutes les semences a augmenté depuis 1996, et notamment à partir de 2000 en raison de la concentration du secteur des semences. Globalement de 1997 à 2010, les coûts "semences + herbicides" ont augmenté par rapport à la période 1980-1997.

Des travaux théoriques ont enfin cherché à évaluer ce que serait la tarification des VTH dans des pays où elles ne sont pas adoptées. La demande potentielle en VTH a été estimée à partir de la distribution du niveau actuel de dépense des agriculteurs pour le poste désherbage. En **France**, ces travaux estiment que l'augmentation du prix des semences pour du **colza RR®** serait de 50 €/ha. A l'échelle européenne, un supplément de 50 à 147 €/ha est estimé selon les pays pour la **betterave RR®** (87 €/ha pour la France), ou 95 €/ha dans toute l'Europe si un prix uniforme des semences est imposé.

2.3.2. Analyse économique des facteurs explicatifs de l'adoption par les agriculteurs

L'agriculteur peut choisir d'adopter une VTH selon le bilan qu'il en attend (*analyse a priori*), et/ou qu'il en tire après une ou plusieurs années de culture (*analyse a posteriori*). Evaluer l'intérêt économique d'une innovation est cependant complexe en raison de la diversité des situations des exploitations et des fluctuations spatio-temporelles de prix et de coûts qui peuvent induire des différences assez fortes selon le contexte ou l'année. De façon générale, comme toute technique agricole, les cultures TH sont susceptibles d'être adoptées si elles permettent une meilleure marge que les non-TH - c'est-à-dire si le surcoût spécifique des semences transgéniques est plus que compensé par d'autres facteurs -, et/ou si elles contribuent à réduire les risques liés à la production.

Les enquêtes menées auprès des agriculteurs américains à la fin des années 1990, lors des premières commercialisations des variétés transgéniques de soja et de maïs TH, révélaient une attente de meilleurs rendements et d'économies d'intrants. Les enquêtes plus récentes montrent que les intérêts de l'innovation qui ont conduit une majorité d'agriculteurs américains à privilégier les VTH ont été la résolution de problèmes de désherbage spécifiques et/ou dans des zones très infestées, et la souplesse d'emploi et une efficacité en adéquation avec la stratégie du non-labour (souvent adoptée préalablement), qui ont amené une économie significative de temps de travail.

• Facteurs d'adoption liés à l'évolution des recettes et coûts de production

La perspective de rendements plus élevés et de coûts de production moindres sont évidemment considérés comme des facteurs explicatifs de l'adoption. Cependant, les travaux exploitant les données de la fin des années 1990 ont rapidement révélé que l'augmentation de rendement pronostiquée par les évaluations expérimentales des cultures de soja TH aux USA n'a pas été confirmée par les observations en conditions réelles. Dès lors, les recherches économiques se sont orientées vers l'identification d'autres explications, à la forte adoption des VTH, que les seuls rendements.

Les résultats d'enquêtes et de travaux supplémentaires indiquent d'abord que ce paradoxe semble spécifique au cas du soja aux Etats-Unis. D'une part l'augmentation des rendements en système TH varie selon le couple espèce cultivée / aire géographique considérée, et le degré d'amélioration du contrôle des adventices permise par l'adoption de la VTH. D'autre part, les études s'accordent pour souligner les économies de coût du contrôle des adventices engendrées par l'adoption des VTH du fait d'une plus grande flexibilité dans le travail : moins de passages d'herbicides et intervention en post-levée. La diminution du coût est aussi attribuée à la baisse du prix des herbicides associés aux VTH. Dans les travaux les plus récents, la baisse des coûts de production est cependant remise en cause du fait de l'apparition d'adventices résistantes.

Le surcoût des semences TH joue en revanche à contre-sens. Il a été mis en évidence qu'il constitue un frein pour 2/3 des non adoptants du soja TH (Etat du Delaware).

Les études s'accordent enfin pour mettre en avant une corrélation entre adoption de VTH et adoption d'un travail simplifié du sol. Certains auteurs parlent à ce propos de "co-évolution" des technologies. Ce résultat semble, en outre, insensible au type de culture. La causalité de l'adoption d'une technologie sur l'adoption de l'autre n'est pas fermement établie. A notre connaissance, une seule étude conclut que l'adoption d'un travail simplifié du sol est une variable explicative de l'adoption dans le cas du coton TH aux Etats-Unis.

L'évaluation des bénéfices éventuels de la culture de VTH ont aussi été explorés au-delà de l'année de la culture TH elle-même. Une étude récente sur l'impact de l'adoption du colza TH (Clearfield®, RR® et LL®) au Canada s'est ainsi intéressée aux effets sur la culture suivante de la rotation, d'un colza TH cultivé l'année t . Dans cette enquête, 44% des répondants estiment que la culture TH améliore la gestion des adventices à l'année $t+1$ et en réduit les coûts. Même si les économies estimées varient en fonction de l'herbicide (le RoundUp® est considéré comme le plus performant de ce point de vue), ignorer cette "externalité" dans le temps conduit à sous-estimer le revenu procuré par le colza TH. Pour les auteurs, le bénéfice de cette "externalité" représenterait entre 19 et 28% du bénéfice net total de la nouvelle technologie.

Les effets de l'adoption de VTH ont aussi été recherchés à l'échelle de l'exploitation. Une étude particulière sur le soja TH aux Etats-Unis a ainsi montré que la gestion facilitée des adventices permet de dégager du temps pour l'agriculteur, temps investi dans des activités hors exploitation, contribuant à accroître la part non agricole du revenu du ménage.

• Facteurs d'adoption non pécuniaires

La taille de l'exploitation, le niveau d'éducation, l'utilisation de nouvelles techniques de communication (NTIC) ont été *a priori* perçus comme des facteurs non pécuniaires de l'adoption des VTH. Les grandes exploitations, dirigées par un agriculteur bien formé ayant recours à l'informatique dans la gestion de son exploitation, seraient susceptibles d'adopter plus facilement des semences TH. La littérature économique montre cependant que la taille de l'exploitation et le niveau d'éducation influencent différemment la décision d'adoption en fonction du type de culture considéré. Concernant le soja TH, la taille de l'exploitation et l'utilisation de NTIC constituent des variables qui affectent de manière positive la probabilité d'adoption de VTH.

La recherche d'une meilleure gestion des risques est également mise en évidence par certaines enquêtes auprès des producteurs américains : protection contre les pertes de rendement, sécurité économique dans la gestion du désherbage et diminution des risques liés aux aléas climatiques apparaissent notamment comme facteurs explicatifs de l'adoption de VTH.

Enfin, l'existence d'incitations réglementaires à adopter un travail simplifié du sol dans des zones géographique où l'érosion est problématique, peut être vue comme un facteur d'adoption de semence TH. Cette causalité a pu être mise en évidence mais est discutée.

2.3.3. Conséquences de l'adoption des VTH sur la consommation des herbicides

Les premières estimations des réductions des quantités d'herbicides épandues sur les VTH transgéniques ont été très favorables. Elles se fondaient sur des expérimentations en petites parcelles, comparant des modalités de traitement par l'herbicide toléré par la VTH aux programmes de désherbage classiquement appliqués dans la région. Ainsi, des expérimentations menées en France sur la betterave ont montré que les variétés tolérantes à un herbicide total supprimaient les traitements de pré-levée et remplaçaient les mélanges pulvérisés en végétation : au lieu de 4 passages, il n'y avait plus que 2 passages de glyphosate en végétation. Et comme une partie des herbicides remplacés étaient de conception ancienne et nécessitaient des doses importantes de produit pour être efficaces, la masse d'herbicide épandue par passage (en grammes de matière active) était aussi réduite.

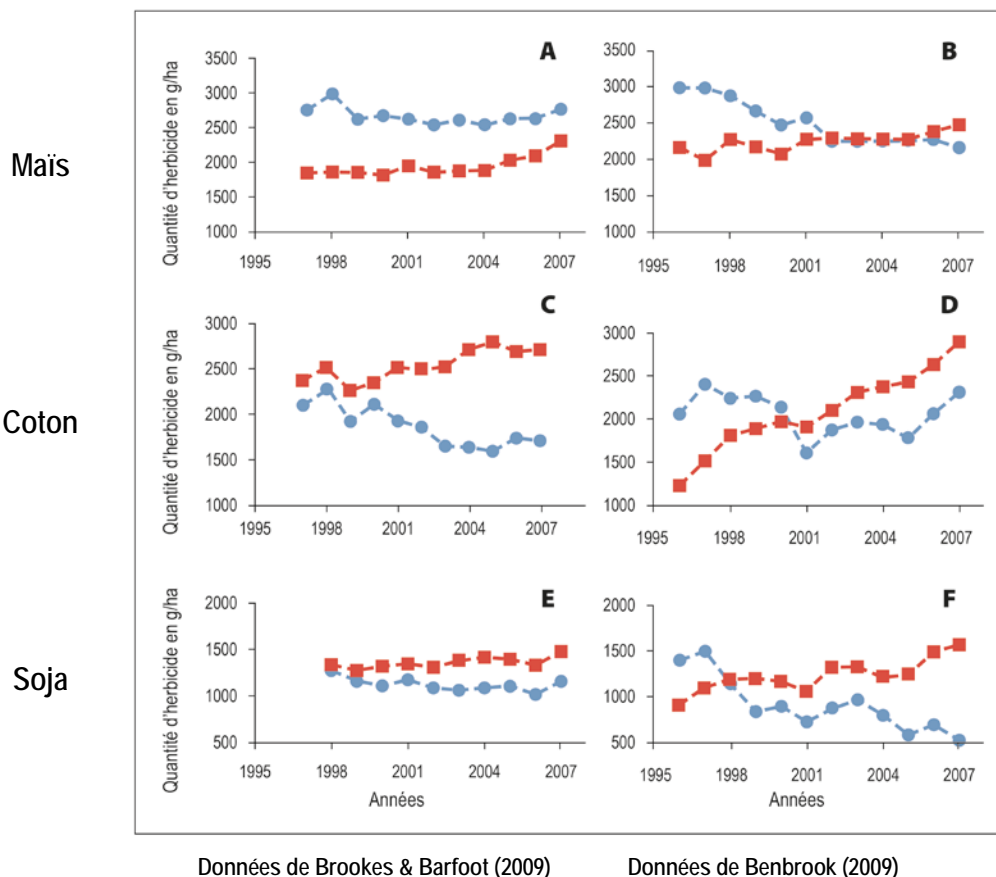
Une évaluation *a posteriori* des consommations effectives d'herbicides a été rendue possible par les enquêtes quinquennales de 2002 et 2007 du service statistique de l'USDA (U.S. Department of Agriculture) et celles réalisées par un cabinet d'étude privé (DMRKynetec). Ce type de résultats a été utilisé pour extrapoler les bénéfices sur un territoire entier, à partir d'une dizaine de points de référence régionaux où le désherbage conventionnel des années 1990 le plus répandu était comparé à celui de la culture transgénique TH. Sur ces bases, il a été estimé qu'une économie de 27 600 tonnes d'herbicides avait été réalisée en 2005 aux Etats-Unis, soit environ 10% du total des herbicides agricoles.

La quantification des économies d'herbicides réalisées, ou non, avec les VTH a donné lieu à débat : les discussions portaient sur les méthodes de recueil des données, les sources d'informations, les zones géographiques enquêtées, les extrapolations aux territoires entiers, les interprétations statistiques, et notamment le type d'herbicides et de programme de désherbage pris comme référence pour les variétés conventionnelles. De plus, même dans le cas où des données brutes consolidées seraient disponibles, la comparaison serait déjà biaisée par le fait que les VTH ont été adoptées là où les difficultés de désherbage étaient les plus importantes, alors que la consommation d'herbicides des non-adoptants, dans des zones à moindre difficulté, correspond à des situations exigeant un désherbage moindre. Des méthodes ajustées ont alors été mises au point pour comparer des situations où les intensités de désherbage seraient similaires.

L'analyse des quelques rapports publiés à ce sujet révèle donc des estimations assez différentes, souvent difficiles à comparer. Ainsi par exemple, le total des quantités d'herbicides utilisés aux Etats-Unis sur le maïs était, pour un auteur, réduit d'un cinquième en 2007 par rapport à 1996, mais pour un autre il était en augmentation de 10% sur la même période. Ces écarts d'estimation proviennent à la fois des sources et des traitements différents des données, mais aussi des méthodes retenues pour évaluer la ligne de référence pour la consommation d'herbicides des variétés non-TH.

Globalement, deux phénomènes sont en jeu dans l'évolution relative des consommations d'herbicides. En premier lieu, des problèmes de désherbage apparus après quelques années en système TH ont entraîné un accroissement des quantités d'herbicides utilisées dans ces cultures. Les différents rapports montrent ainsi une augmentation des consommations sur une période de 13 ans (Figure 2-6), même si les évaluations de son niveau ne sont pas identiques. Par ailleurs, la consommation d'herbicide sur les variétés non-TH a diminué par réaction de la concurrence, qui a mis au point des formulations plus efficaces, ou mis sur le marché des herbicides nouveaux. Ces deux tendances résultent en une évolution du différentiel de consommation d'herbicide entre les cultures TH et non-TH, qui était initialement en faveur des VTH, et qui est maintenant défavorable notamment dans le cas du coton et du maïs.

Figure 2-6. Evolutions de la consommation moyenne d'herbicides, aux Etats-Unis, pour les cultures transgéniques TH (carrés rouges) et non-TH (ronds bleus), de maïs, coton et soja, selon 2 rapports



Source : Darmency, 2010

Les données de 2011 confirment ces tendances, avec des indications similaires pour le soja notamment au Brésil et en Argentine. La consommation d'herbicide en maïs VTH resterait inférieure à celle sur variétés conventionnelles, malgré une forte réduction de l'écart. Le colza TH reste le moins consommateur d'herbicide aux Etats-Unis et au Canada.

Ces accroissements de consommations sont interprétés en termes d'évolutions du désherbage nécessitées par celles de la flore dans le nouveau système de culture (voir Chapitre 3), dont l'apparition d'adventices résistantes à l'herbicide utilisé avec la VTH. Ce phénomène particulier suscite d'ailleurs aujourd'hui une attention particulière des agriculteurs américains : une enquête de 2009 montre que 59% des cultivateurs de coton, 54% des cultivateurs de soja, et 48% des cultivateurs de maïs interrogés se disent concernés par ce problème, même si tous ne le considèrent pas comme suffisamment important pour mettre en question de la pérennité de l'adoption. Par exemple, seuls 1/4 des producteurs de colza enquêtés font état de difficultés accrues dans la gestion de la résistance des adventices aux herbicides.

2.3.4. Les spécificités et limites de l'exemple nord-américain

La bibliographie scientifique ne portant guère que sur des cas nord-américains, les résultats qu'elle permet d'établir ne peuvent être extrapolés sans précaution. Les spécificités des systèmes de culture nord-américains et des VTH adoptées sont à souligner.

- Les spécificités de l'agriculture des Etats-Unis

Les agriculteurs américains se sont placés dans une logique de production simplifiée, principalement de cultures de printemps pour des raisons climatiques ou économiques, qui augmente les difficultés de désherbage, et ne propose qu'une réponse chimique aux difficultés émergentes de désherbage. L'adoption de VTH en Amérique du Nord ne semble pas avoir modifié les systèmes de culture, qui étaient déjà très simplifiés (par exemple rotation maïs-soja avec semis sans labour).

La place accordée à la culture du soja est aussi en soi une caractéristique importante des systèmes américains. Or le soja est une espèce intrinsèquement peu compétitive vis-à-vis des adventices, exigeant donc un désherbage très efficace, que les stratégies herbicides conventionnelles n'assurent pas toujours. Par conséquent, l'offre commerciale de variétés tolérantes à un herbicide total est apparue d'emblée très attractive pour les agriculteurs. Cela explique à la fois le remplacement rapide des cultures non-TH par des cultures TH aux Etats-Unis, et l'expansion du soja en Argentine, y compris sur des terres nouvellement mises en culture et donc difficiles à désherber.

Comparés à ces situations américaines, les assolements régionaux comme les systèmes de culture européens restent actuellement plus diversifiés, avec une place importante, et croissante, des cultures d'hiver. De tels systèmes ne sont pas sujets aux mêmes difficultés de désherbage que les systèmes simplifiés, et ils disposent d'une palette plus large de moyens de lutte. La tolérance à un herbicide total peut néanmoins rester attractive comme le montre la culture du soja RR® en Roumanie avant son entrée dans l'UE.

Les exemples américains mettent en évidence le couplage entre culture de VTH et pratique de travail du sol simplifié, l'adoption de la VTH venant conforter l'abandon du labour ou le rendant possible, selon les situations. Parmi les éléments qui favorisent cet abandon du labour, certains sont spécifiques au contexte américain. La promotion d'une agriculture "de conservation" sans labour (*conservation tillage*), dans les zones sensibles à l'érosion, où elle fait l'objet d'incitations financières, en est un exemple. La volonté des agriculteurs de réduire le temps de travail et les coûts inhérents au travail du sol est en revanche un motif économique d'abandon du labour de portée plus générale.

Les déterminants du passage au non-labour diffèrent donc en partie en Europe, où les risques d'érosion sont moins prégnants. En France notamment, l'abandon du labour se développe en absence de VTH, mais il est rarement complet et définitif : les agriculteurs y recourent périodiquement pour contrôler certaines adventices, mais aussi pour ses autres fonctions (voir Chapitre 4).

En Amérique du Nord, l'adoption massive des VTH concerne des variétés tolérantes au glyphosate, et 3 cultures : soja, coton et maïs. La situation est en revanche très peu connue pour les variétés non transgéniques tolérantes à un herbicide sélectif, notamment lorsqu'elles ne se trouvent pas en concurrence avec les précédentes. Dans le seul cas bien documenté, celui du colza au Canada, où des variétés tolérantes à un herbicide total ont été mises sur le marché en même temps que des variétés tolérantes à un herbicide sélectif, les agriculteurs ayant adopté le colza TH semblent s'être massivement tournés vers les premières comme en témoigne le déclin relatif des secondes dans les surfaces cultivées en quelques années.

En France, les variétés autorisées à la culture et/ou déposant des demandes d'inscription au Catalogue français sont des variétés tolérantes à un herbicide sélectif, qu'il s'agisse du maïs, du tournesol (pour lequel aucune variété tolérante à un herbicide total n'est d'ailleurs commercialisée dans le monde) ou du colza.

Il faut enfin souligner que les variétés transgéniques ont bénéficié aux Etats-Unis et en Argentine notamment, d'un contexte social favorable à leur développement, sans que l'on puisse préciser le poids de ce contexte dans l'adoption de VTH. Dans ces pays, beaucoup d'organismes ont en effet apporté leur soutien aux biotechnologies agricoles et la perception des OGM par la société peut être qualifiée d'assez bonne.

- La mesure des consommations d'herbicides

Dans la bibliographie nord-américaine analysée, la consommation d'herbicides est évaluée en quantités pondérales. Or le tonnage est un indicateur peu probant pour comparer des pratiques, car la dose d'homologation, assurant l'efficacité agromonomique du traitement, varie beaucoup d'une substance herbicide à l'autre (de plusieurs kg à quelques grammes par hectare).

Un autre estimateur de la consommation d'herbicides est l'IFT (Indicateur de Fréquence de Traitement), qui comptabilise le nombre de doses homologuées utilisées sur un hectare (ainsi par exemple, un traitement effectué à demi-dose homologuée ou localisé sur la moitié de la parcelle ne comptera que pour 0,5 point dans l'IFT). L'IFT élimine ainsi le biais du grammage dans l'estimation de la pression pesticide. L'adoption de cet indicateur facilite, en France, les comparaisons entre itinéraires de désherbage (voir Chapitre 4).

Quant à l'impact sur l'environnement, il dépend des caractéristiques éco-toxicologiques de l'herbicide et des modalités d'emploi. Divers autres indicateurs ont été envisagés, en particulier l'Index d'impact environnemental, EIQ (cf. Chapitre 5).

2.4. Spécificités du contexte social et réglementaire de l'adoption des VTH en Europe

Le contexte européen d'adoption des VTH se distingue actuellement du contexte nord-américain sur deux points : l'existence d'une contestation sociale des OGM, et le cadre juridique en matière de propriété intellectuelle et de mise sur le marché des variétés végétales.

Dans ce contexte général, les VTH obtenues par mutagenèse font aujourd'hui l'objet de l'amorce d'une contestation, comme en témoignent les prises de positions de syndicats agricoles, des faucheurs volontaires ou des associations de vigilance face aux biotechnologies⁶. Après une réflexion sur l'interprétation de cette contestation, cette section vise à décrire le cadre réglementaire dans lequel s'insèrent les VTH en Europe, à la fois en termes de protection intellectuelle de l'innovation qu'elles représentent, et en termes de procédures d'évaluation avant leur mise sur le marché.

Sur le plan juridique, les VTH en tant que telles ne font pas l'objet de dispositions particulières vis-à-vis du régime général de protection et de mise sur le marché des variétés végétales. Seules les VTH obtenues par transgenèse relèvent en Europe, du fait de leur mode d'obtention, d'un traitement spécifique.

2.4.1. Le contexte social du débat naissant sur les VTH

La revendication d'arrachages (en 2009, 2010, et 2011) de tournesols TH obtenus par mutagenèse a fait écho à la recommandation de la Confédération Paysanne de ne pas utiliser de VTH obtenues par mutagenèse (premier communiqué de presse au printemps 2010, puis à l'automne 2011 pour englober les colzas TH en cours de demande d'inscription). Pour autant, la littérature disponible en sciences sociales ne fait pas état de controverses publiques ou professionnelles sur l'utilisation de la mutagenèse à des fins de création variétale.

Lors de ces arrachages, les registres des discours sont les mêmes que pour les arrachages d'essais d'OGM. Ces événements et les mobiles qui voudraient les justifier dans le cadre de la lutte contre les OGM, restent cependant à analyser au regard de la conflictualité anti-OGM et du blocage irréversible dans une logique du conflit qui, elle, fait l'objet d'études sociologiques.

Les travaux en sciences sociales permettent de replacer la contestation des OGM dans une perspective historique. Initié par le débat autour des techniques de l'ADN recombinant qui ont fondé l'innovation biotechnologique dans les années 1970, le dossier "OGM" est marqué par une amplification des controverses publiques lors de l'introduction des cultures transgéniques dans les années 1990, dont l'un des points focaux réside dans la contestation de l'évaluation des risques dans le cadre des autorisations de mise sur le marché (AMM). La situation s'est durcie en Europe avec le moratoire de juin 1999, puis avec l'intensification des arrachages. Il s'agit donc d'appréhender la réception des VTH dans l'espace public à l'aune de cette saturation de la conflictualité sur les OGM, dans la mesure où à l'échelle mondiale, un grand nombre de variétés revendiquant un trait TH l'a obtenu par transgenèse.

⁶ Infogm.org

La question posée par les arrachages de tournesols TH est celle de l'extension de la conflictualité anti-OGM à d'autres techniques issues des biotechnologies que la transgénèse. Les prises de position portent en effet sur l'assimilation de ces plantes mutées tolérantes aux herbicides à des organismes génétiquement modifiés, ou non. S'appuyant sur la même définition d'un OGM depuis 1990, la directive 2001/18/CE considère la mutagenèse comme une technique de modification génétique mais place les organismes obtenus par mutagenèse hors de son champ d'application. Les plantes issues de mutagenèse sont ainsi exemptées des obligations que doivent satisfaire celles obtenues par transgénèse en matière d'évaluation, d'autorisation de mise sur le marché, de traçabilité et d'étiquetage (voir section 2.4.4).

Le réexamen de la définition des OGM est par ailleurs également engagé pour les organismes issus des nouvelles biotechnologies, réflexion amorcée au niveau Européen par le travail du JCR sur les nouvelles technologies de sélection variétale (voir Chapitre 1).

La controverse sur les OGM, puis la lutte contre les essais d'OGM en plein champ (particulièrement en France), ont conduit à une cristallisation stable de positions radicales autour de la définition et de la réalité des risques collectifs. Cette stabilisation des antagonismes s'insère aussi dans un mouvement plus large de remise en cause des modèles de consommation, où elle contribue à un marquage de territoires symboliques de consommation alimentaire opposant "malbouffe" et "manger sain", risque sanitaire de l'alimentation industrielle et innocuité du naturel. Ces contestations sont portées par un mouvement consumériste écologique bien établi, qui a constitué des cadres cognitifs forts, validés par certains objectifs du Grenelle de l'Environnement, à partir des débats et des actions militantes contre les OGM, mais aussi contre les pesticides.

L'opposition entre OGM et non-OGM, devenue une référence incontournable dans l'espace public et marchand, a modifié le regard des acteurs socio-économiques sur les processus d'évaluation des variétés, qui n'étaient auparavant que du ressort des commissions d'homologation focalisées exclusivement sur la valeur agronomique de ces variétés.

2.4.2 Protection intellectuelle applicable aux VTH en Europe

L'obtention d'une VTH, quelle qu'en soit la technique, conduit à la création d'une nouvelle variété végétale, à savoir un génotype qui peut être protégé par le droit des obtentions végétales. Par ailleurs, l'information génétique responsable du trait TH peut indépendamment faire l'objet d'une protection par la voie du brevet, si elle respecte les conditions de brevetabilité. La protection industrielle a pour but d'octroyer à son titulaire, pour une durée limitée (20 à 30 ans selon les régimes), un monopole sur l'exploitation de la variété ou de l'invention en contrepartie de sa divulgation auprès de la communauté scientifique et industrielle. Les conditions de ce droit d'exclusivité sont fixées par le Code de la propriété intellectuelle (CPI) et peuvent prévoir des mécanismes visant à promouvoir l'accès de tiers à l'innovation et à son exploitation.

• Le COV : la protection de la création variétale

La Convention de l'Union pour la protection des obtentions végétales (UPOV), adoptée en 1961, a instauré une protection spécifique matérialisée par le certificat d'obtention végétale (COV). En Europe, pour obtenir un COV, toute variété végétale (quels que soient son mode d'obtention et les traits revendiqués) doit satisfaire aux critères "DHS" :

- distinction de la variété par rapport aux autres variétés protégées,
- homogénéité dans l'ensemble des caractères présentés par les individus,
- stabilité des caractères à chaque cycle de multiplication.

A ces critères traditionnels, s'ajoute un critère de nouveauté "commun" à la plupart des droits de propriété industrielle.

• Le brevet : la protection de l'innovation végétale

Les demandes de protection par brevet peuvent être introduites à l'échelle nationale, européenne ou internationale, respectivement traitées par l'Institut National de la Propriété Industrielle (INPI), l'Office Européen des Brevets (OEB) et l'Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI) (ou un Office de brevet national compétent).

En Europe, la directive 98/44/CE permet d'appliquer au vivant le système de brevet institué par la Convention sur le brevet européen (1973). En droit européen des brevets, seules les innovations infra-variétales (gène, cellule) sont brevetables, dès lors que les principes généraux de la brevetabilité s'appliquent : nouveauté, inventivité, possibilité d'application industrielle. Ainsi, l'information génétique responsable du trait TH peut faire l'objet d'un brevet si elle constitue une invention biotechnologique, c'est-à-dire une solution technique à un problème technique. De plus, la faisabilité technique de l'invention ne doit pas être limitée à une seule variété. Surtout, lorsqu'une séquence génétique est brevetée, toute matière biologique dans laquelle elle s'exprime est protégée par ce brevet : la cellule, mais aussi la plante. Enfin, les procédés brevetables qui ont permis l'obtention des plantes ne doivent pas faire exclusivement appel à des phénomènes naturels (procédés dits "essentiellement biologiques").

Le Tableau 2-1 applique au cas des VTH les types de protection intellectuelle que ces variétés peuvent éventuellement cumuler selon qu'elles sont obtenues par des méthodes de sélection traditionnelles, par mutagenèse ou par transgénèse. Ainsi, une plante TH peut dans certains cas être protégée en Europe à la fois par COV et par brevet, à condition que le

génotype revendiqué par l'obteneur remplisse les critères DHS et que la séquence d'ADN codant le trait TH soit exprimée par la plante. En pratique, si la quasi-totalité des variétés sont en Europe protégées par COV, le trait TH ne fait donc pas systématiquement l'objet d'un brevet.

Tableau 2-1. Voies de protection possibles des VTH et de l'information génétique TH selon le mode d'obtention du trait

Objet de la protection		protection de la VTH (Génotype)	protection de l'information génétique TH (Gène)
"types" de plante TH	mode d'obtention		
Inclusion dans le champ de la 2001/18/CE			
Non	introgression d'une mutation spontanée par croisements et sélection (sélection variétale classique) <i>ex. Mais DUO System®, Tournesol Clearfield®...</i>	Pays européens : COV	Pays européens : - brevet de produit possible *
	techniques actuelles de mutagenèse <i>ex. Tournesol Express Sun®, Colza Clearfield®...</i>		Pays européens : - brevet de produit possible * - brevet de procédé possible **
Oui	techniques actuelles de transgénèse <i>ex. RR®, LL®</i>		

* si la séquence d'ADN et sa fonction sont précisément isolées et identifiées pour la première fois (connaissance qui n'était jamais tombée dans le domaine public)

** si le procédé est nouveau, applicable à d'autres variétés et reproductible par l'Homme du métier

L'étendue des droits conférés par chacun de ces "outils" de protection est différente, car ils ne prévoient pas tout à fait les mêmes limitations au monopole de leur titulaire. Il existe 3 types de limitation :

- l'exemption en faveur de la recherche, autorisant l'utilisation de la variété protégée à des fins expérimentales ;
- le privilège de l'agriculteur, autorisant l'usage de semences de ferme issues de la variété protégée moyennant le versement d'une rémunération équitable ;
- le privilège de l'obteneur, autorisant l'utilisation de la variété protégée afin de développer une nouvelle variété, dont la commercialisation est libre de droits dès lors qu'il ne s'agit pas d'une variété essentiellement dérivée (VED) de la variété initiale (notion de distance variétale suffisamment importante).

Le Tableau 2-2 récapitule les dispositions prévues à ces égards par le COV et le brevet.

Tableau 2-2. Limitations au monopole octroyé par un brevet ou un COV

	COV (convention UPOV)	Brevet (directive 98/44/CE)
Exemption en faveur de la recherche	Prévue aux échelles communautaire et nationale	
Privilège de l'agriculteur	Prévu à l'échelle communautaire (règlement communautaire 1994) En France : explicitement interdit (toléré), sauf accord de branche (n'existant que pour blé tendre)	Prévu à l'échelle communautaire et nationale
Privilège de l'obteneur	Prévu à l'échelle communautaire pour les nouvelles variétés hors VED En France : la notion de VED n'a pas encore été introduite en droit français	Non prévu à l'échelle communautaire En France : la transcription de la directive autorise la commercialisation libre de droits de la nouvelle variété si l'élément breveté n'est pas exprimé par la plante

De ces différences de régime découle la distinction pratique suivante :

- Un obteneur a toujours la possibilité d'utiliser une variété végétale protégée par COV afin de développer une nouvelle variété libre d'exploitation.
- Un obteneur a toujours la possibilité d'utiliser une variété végétale protégée par COV et incorporant un gène TH breveté à des fins de sélection variétale. Néanmoins, il ne pourra pas commercialiser la nouvelle variété sans l'accord du titulaire du brevet si le gène d'intérêt y est toujours actif.
- Pour pallier ces possibles hypothèses de "blocage" entre obteneur et inventeur, la directive 98/44 a institué un système de licences croisées obligatoires délivrées par la voie judiciaire.

Ainsi, pour les variétés protégées à la fois par COV et par brevet, seuls l'exemption en faveur de la recherche et le privilège

de l'agriculteur sont prévus par la législation européenne. En France, bien qu'elle soit tolérée dans les faits, l'utilisation des semences de ferme est explicitement interdite par la loi en matière de COV. Le projet de loi du 8 juillet 2011 (actuellement voté uniquement par le Sénat) prévoit de modifier les dispositions du CPI en faveur du privilège de l'agriculteur. Ce privilège est par ailleurs prévu en droit français des brevets depuis la transposition de la directive 98/44/CE.

Les règles et principes de la protection des innovations variétales diffèrent selon les régions du monde considérées. En effet, aux Etats-Unis, les obtenteurs ont la possibilité de protéger leurs innovations variétales soit par brevet soit par une protection de type UPOV (la possibilité de choisir entre l'une ou l'autre de ces alternatives dépend des espèces végétales considérées). Contrairement à la protection de type UPOV, le système de brevet américain ne prévoit ni privilège de l'obteneur, ni privilège de l'agriculteur ; ces différences d'étendue des monopoles conférés ont incité les obtenteurs à choisir massivement la protection par brevet.

2.4.3. Conditions d'accès à la mise sur le marché

• Régime général

Dans l'Union Européenne, pour obtenir une autorisation de mise sur le marché, toute variété végétale relevant de la catégorie des espèces "réglementées" (quels que soient son mode d'obtention et les traits revendiqués) doit déposer une demande d'inscription à l'un des 27 catalogues officiels nationaux, et satisfaire à 2 types de tests :

- les tests DHS : critères identiques à ceux qu'il faut satisfaire pour l'obtention d'un COV, et dont l'évaluation est harmonisée entre tous les états européens ;
- les tests VAT pour les espèces de grande culture : visant à caractériser la valeur agronomique et technologique de la nouvelle variété (rendement, précocité, composition nutritionnelle...).

En France, l'inscription d'une variété est régie par la directive 2002/53/CE ainsi que par toute une série de directives propres à chaque type de semences. Elle est effective par décision du Ministère chargé de l'Agriculture, prise sur la base d'un avis rendu par le Comité Technique Permanent de la Sélection (CTPS), lui-même établi à partir des résultats des expérimentations conduites sous la responsabilité du GEVES (Groupe d'étude et de contrôle des variétés et des semences).

A la suite d'une réflexion récente relative à l'élargissement de la VAT à des critères environnementaux, la VATE (valeur agronomique, technologique et environnementale) fait partie des évolutions proposées par le CTPS (mai 2011) dans un rapport intitulé "Semences et Agriculture Durable". Dans une optique de réduction des intrants, la VATE vise principalement à une meilleure prise en compte de la tolérance aux maladies et aux ravageurs, du comportement des variétés dans les différents milieux, et des interactions génotype x environnement x mode de culture dans les décisions d'inscription. Dans les faits, des critères environnementaux tels que la tolérance à certaines maladies, qui permet d'éviter des traitements fongicides, sont déjà pris en compte dans l'évaluation des variétés.

L'inscription à l'un des catalogues nationaux entraîne automatiquement son inscription au catalogue communautaire au bout d'un an. Ces inscriptions autorisent la mise sur le marché de la variété inscrite, c'est-à-dire sa production, sa multiplication, (pour l'activité semencière), sa commercialisation et son exportation dans tous les pays européens.

• Enjeux actuels liés au développement de nouvelles techniques

Devant le développement de nouvelles biotechnologies pouvant être utilisées en obtention variétale, un groupe de travail a été constitué en 2007 par la Commission Européenne dans le but d'établir, pour 8 d'entre elles, si elles constituent ou non des techniques de modification génétique, et si les organismes en résultant entrent ou non dans le champ d'application de la législation européenne (directive 2001/18/CE). Cette discussion est toujours en cours.

Devant les difficultés à définir précisément dans quelle catégorie classer chaque technique, certains auteurs s'interrogent sur la légitimité d'une distinction OGM/non-OGM sur le plan juridique, et en filigrane sur l'extension de la logique de précaution (se traduisant par un processus d'évaluation spécifique des risques écologiques et sanitaires) à d'autres variétés que celles obtenues par transgénèse.

2.4.4. Spécificités des VTH transgéniques en contexte européen

Pour les utilisateurs de VTH, agriculteurs et acteurs économiques aval, les conditions d'adoption dépendent des obligations réglementaires qui peuvent être attachées à la culture/commercialisation de ces variétés. Ainsi, en Europe, si des VTH transgéniques étaient autorisées à la culture, ou si des VTH non-transgéniques étaient soumises aux mêmes obligations, ces contraintes réglementaires et leur traduction économique pèseraient dans le choix d'adopter, ou non, ces variétés. Sont concernés : la mise sur le marché, l'engagement de la responsabilité de l'agriculteur vis-à-vis des producteurs voisins, et l'obligation de séparation des filières, qui implique une gestion de leur coexistence.

• Autorisation de l'événement de transgénèse : évaluation préalable et possible moratoire

En plus de l'inscription au Catalogue, la mise sur le marché des variétés transgéniques est conditionnée à l'obtention d'une autorisation de mise sur le marché (AMM) spécifique sur l'événement de transformation : l'obteneur doit alors faire une demande sous forme d'un dossier faisant état de résultats d'évaluations environnementale et sanitaire de la culture des plantes qui possèdent l'événement de transformation. Ce principe d'autorisation préalable est posé par la directive 2001/18/CE relative à la dissémination volontaire d'OGM dans l'environnement.

La transposition de ces procédures communautaires en droit français figure dans le Code de l'environnement, qui prévoit ces procédures d'autorisation préalable s'agissant de la dissémination volontaire et de la mise sur le marché d'OGM, ainsi que les sanctions applicables en cas de non-respect des normes édictées (utilisation sans autorisation, inobservation des mesures administratives, non-respect des prescriptions de l'autorisation ou obstacles aux fonctions des agents habilités à exercer les contrôles). Ces sanctions ont été renforcées avec la loi du 25 juin 2008 relative aux OGM.

En complément des procédures d'AMM des variétés transgéniques, la directive 2001/18/CE prévoit la possibilité, pour un Etat-membre, de faire jouer des clauses de sauvegarde afin de déroger à l'autorisation communautaire de mise sur le marché. Ainsi, la directive 2001/18/CE dispose que seules des informations nouvelles ou complémentaires relatives aux risques sanitaires ou environnementaux, devenues disponibles après l'autorisation, peuvent justifier de recourir à un tel mécanisme de sauvegarde. C'est sur ce fondement que la France a prononcé la suspension du maïs MON 810 (résistant à un ravageur, la pyrale).

Cette répartition des compétences entre l'Union des Etats-membre fait l'objet de réflexions. En effet, une proposition de modification de la directive 2001/18/CE, actuellement en discussion, vise à accorder davantage de marge de manœuvre aux Etats membres quant aux motifs invoqués pour restreindre la culture de variétés transgéniques sur leur territoire. L'invocation de ces motifs pourrait cependant entraîner la mise en œuvre de la responsabilité des Etats devant les instances internationales (OMC). L'analyse critique de cette proposition de directive conduit des juristes, français et étrangers, à considérer que la marge de manœuvre des Etats ne serait pas réellement augmentée par ce texte.

• Contraintes pour les utilisateurs

Responsabilité du cultivateur (fonction réparatrice de la responsabilité)

Si c'est en termes juridiques que la responsabilité de l'agriculteur est engagée, les conséquences éventuelles sont bien économiques, qu'il s'agisse de souscrire une assurance ou d'indemniser un autre producteur.

Un nouveau régime juridique, dit de responsabilité de plein droit (responsabilité objective⁷) rend un exploitant agricole cultivant une variété transgénique autorisée, responsable en cas de présence fortuite du transgène dans la production d'un autre exploitant si cette présence cause un préjudice économique à ce dernier. Le Code rural instaure toutefois des conditions très restrictives pour la mise en œuvre de cette responsabilité : limitation aux parcelles et ruchers situés à proximité, aux produits issus d'une même campagne de production et au préjudice économique résultant de l'obligation d'étiqueter OGM. Il prévoit un système d'assurance obligatoire pour couvrir ce risque, mais à l'heure actuelle ces assurances n'existent pas et, de plus, aucune sanction n'est prévue en cas de non-respect de cette obligation d'assurance. À noter qu'un décret en Conseil d'État précisant les modalités de ce régime de responsabilité est en attente de publication à l'heure actuelle.

Hormis ce régime de plein droit extrêmement restrictif, d'autres régimes de responsabilité peuvent être mis en œuvre en cas de contamination (par des variétés transgéniques ou non) : la responsabilité environnementale, la responsabilité des produits défectueux, les troubles du voisinage, la responsabilité des faits des choses que l'on a sous sa garde, la responsabilité engagée pour vices cachés ou encore la responsabilité pour faute. Toutefois, la mise en œuvre de ces régimes apparaît difficile, les dommages qu'ils couvrent ou les catégories auxquelles ils se réfèrent (produits dangereux...) n'étant pas adaptés à ces situations de contamination ; de fait, ils n'ont quasiment pas été mobilisés.

Obligation d'étiquetage des produits

Afin de répondre à la demande des consommateurs d'être informés sur la nature des produits commercialisés, l'Union Européenne a retenu le principe d'un étiquetage obligatoire des denrées alimentaires contenant des OGM (ou des dérivés) qu'elles soient destinées à la consommation humaine ou à l'alimentation des animaux. L'obligation de traçabilité, générale dans le domaine agro-alimentaire, est reprise spécifiquement, en matière d'OGM, par la directive 2001/18/CE qui pose le principe d'une traçabilité à tous les stades de mise sur le marché le long de la chaîne de production et de distribution. Ces obligations se retrouvent en droit français, en particulier dans le Code de la consommation.

Le principe de l'étiquetage OGM, fixé par le règlement 1830/2003, concerne les produits d'alimentation humaine et l'alimentation pour animaux. Le principe est d'étiqueter tout produit OGM, excepté les produits contenant des traces d'OGM

⁷ C'est-à-dire pouvant être mise en jeu en l'absence de faute de l'auteur du dommage (lequel ne peut s'exonérer de sa responsabilité en prouvant qu'il n'a commis aucune faute, par exemple qu'il a pris toutes les précautions pour éviter le dommage).

inférieures au seuil de 0,9% lorsque cette présence est "fortuite ou techniquement inévitable". S'agissant d'une exception, c'est aux producteurs, dans la majorité des Etats-membres, qu'il revient d'apporter la preuve du caractère fortuit ou techniquement inévitable de la contamination - concrètement, en démontrant que toutes les mesures ont été prises pour l'éviter.

Actuellement, les discussions concernant l'étiquetage portent essentiellement sur les conditions d'étiquetage d'un produit "sans OGM". Dans une recommandation rendue le 26 octobre 2009, le Conseil économique, éthique et social du HCB propose de retenir le seuil de 0,1% d'ADN transgénique pour la qualification "sans OGM" ; un rapport du HCB sur la mise en œuvre de la coexistence est attendu pour l'automne. Il convient de noter que l'Allemagne, l'Autriche et l'Italie ont adopté une réglementation pour encadrer l'utilisation de la mention "sans OGM".

Coûts de la séparation des filières

En cas de mise en place de filières séparées, telles que prévues pour les cultures transgéniques en Europe, la coexistence doit être organisée dès le champ (cf. Chapitre 3) et sur toute la chaîne aval, avec une séparation spatiale et/ou temporelle des lots lors de la collecte des récoltes, des transports, des stockages, des étapes de transformations... L'absence de mélanges et de contaminations doit être vérifiée par un système de contrôle comportant des tests de pureté des produits, à positionner aux points clés/critiques de la chaîne d'approvisionnement. Une telle gestion peut être optimisée, mais elle resterait coûteuse, alors qu'il n'existe pas, pour l'instant du moins, de marché des produits issus de VTH créateur de valeur (contrairement au cas de filière séparée pour une production qui présente une valeur technologique, et donc économique, supérieure à celle de la production standard).

Conclusions

L'étude de la diffusion des VTH dans le monde fait apparaître des disparités dans l'adoption des VTH, selon qu'elles sont transgéniques ou issues de sélection traditionnelle ou de mutagenèse.

Les VTH transgéniques, principalement des variétés dotées d'une tolérance au glyphosate développées pour le soja, le maïs, le coton et le colza, ont connu une diffusion massive et parfois très rapide sur le continent américain, qui explique la focalisation de la littérature économique sur ce cas. Cette adoption massive, malgré un surcoût des semences, atteste de l'intérêt qu'y trouvent les agriculteurs. L'association entre non-labour et VTH apparaît comme un facteur déterminant du succès commercial de ces VTH.

La diffusion des variétés non transgéniques tolérantes à un herbicide sélectif, peu étudiée, apparaît plus restreinte à l'échelle mondiale. Elle semble limitée, dans les pays où différents types de VTH sont disponibles, par l'existence d'une offre de variétés tolérantes à un herbicide total.

En Europe où le contexte social et réglementaire n'est pas favorable à la diffusion des OGM, les seules VTH cultivées sont issues de mutation spontanée ou induite. Leur diffusion encore modeste est peut-être à relativiser en fonction du caractère récent de leur introduction.

Les enquêtes récentes réalisées aux Etats-Unis montrent que le différentiel de consommation d'herbicides entre cultures RR® et non-TH, initialement en faveur des VTH, régresse en quelques années jusqu'à devenir défavorable pour le soja et le coton. Cet accroissement au fil du temps des quantités d'herbicides utilisées sur des VTH s'explique par le recours curatif à des traitements herbicides supplémentaires, notamment pour lutter contre les espèces devenues résistantes au glyphosate.

3. Diffusion du trait TH et apparition de résistances aux herbicides

Deux phénomènes biologiques sont à l'origine d'un certain nombre de risques liés à l'utilisation de VTH :

- la diffusion du trait TH : d'une part par des descendants directs de la VTH (dans et hors parcelle), et d'autre part par des individus issus de croisements avec la VTH et qui sont porteurs du trait TH. Ce premier mécanisme dépend de l'espèce végétale considérée ;
- l'apparition de nouveaux mutants spontanés, ayant acquis une résistance sous la pression sélective de l'herbicide. Ce second phénomène est fonction du mode d'action et des conditions d'utilisation de l'herbicide.

La présence dans les parcelles de plantes qui ne sont plus sensibles à l'herbicide associé à la VTH, résultant de ces phénomènes, pose un certain nombre de problèmes agronomiques, socio-économiques, juridiques ou environnementaux : mise en cause de la pérennité de la technique VTH, diffusion de la tolérance dans des cultures non-TH pouvant appartenir à d'autres agriculteurs, possible impact sur la biodiversité sauvage...

3.1. Enjeux et mécanismes de diffusion du trait TH

3.1.1. Enjeux agronomiques et environnementaux

- La durabilité de la stratégie TH

L'utilisation de VTH est susceptible d'engendrer, dans la parcelle où elles ont été cultivées mais également dans les parcelles environnantes, de nouvelles difficultés de désherbage dues à la présence :

- de repousses de la VTH, qui peuvent jouer le rôle de mauvaises herbes dans une culture ultérieure gérée avec l'herbicide auquel la repousse est tolérante, et ceci en particulier si les espèces ont des cycles biologiques voisins (cultures de printemps ou d'hiver). Dans ce cas, il s'agit de diffusion du caractère TH dans le temps par les semences, et le phénomène peut perdurer plusieurs années, tant que le stock de semences dans le sol de la parcelle n'est pas épuisé ou s'il est réalimenté ;
- d'adventices résistantes, qui peuvent apparaître après avoir acquis le trait TH par croisement avec la VTH, c'est-à-dire par diffusion du pollen.

- La contamination des cultures voisines non-TH

La diffusion du trait TH aux parcelles environnantes cultivées avec une variété non-TH, *via* le pollen, peut poser un problème pour la mise sur le marché de la récolte issue de ces parcelles si la production est soumise à une obligation de pureté conduisant à son déclassement commercial en cas de contamination.

C'est le cas si la variété TH est transgénique, la séparation entre filières "OGM" et "non-OGM" imposant que, dans une récolte non transgénique, la présence d'"OGM" ne dépasse pas un seuil fixé à 0,9% ; au-delà, la contamination n'est plus considérée comme "fortuite ou techniquement inévitable" et entraîne un étiquetage "OGM" qui peut pénaliser le producteur au plan commercial. Dans ce cadre, l'introduction du trait TH dans les champs voisins d'agriculteurs produisant pour la filière "non-OGM" pourrait engager la responsabilité de l'agriculteur à l'origine de la contamination (voir Chapitre 2). C'est dans cette perspective de séparation des filières que se sont développées les études sur les flux de gènes, les facteurs influant sur leurs niveaux, et les mesures susceptibles de limiter les risques de dépassement du seuil de 0,9%. A noter la possibilité, actuellement en discussion, que le respect d'un seuil de 0,1% d'ADN transgénique soit requis pour accéder à la qualification "sans OGM" (voir Chapitre 2).

C'est également le cas (quel que soit le mode d'obtention de la VTH) lorsque la culture non-TH est destinée à la production de semences, pour laquelle le niveau d'exigence sur la pureté génétique de la récolte est élevé (taux maximum de 0,1% de semences non transgéniques, ou encore de 0,3% de semences non conformes pour un colza conventionnel). Le problème provient des semences produites par les porte-graine suite à une fécondation par du pollen extérieur. La filière semences s'est organisée pour garantir cette pureté variétale : imposition d'une distance d'isolement réglementaire et dispositif pour assurer son respect (déclaration préalable de la parcelle en multiplication de semence instaurant une zone protégée autour, service d'inspection).

En dehors de ces situations affectant la qualité de la production, la présence de graines porteuses du trait TH dans la récolte d'un producteur voisin n'ayant pas adopté les VTH peut signifier, pour les espèces produisant des repousses (le colza en particulier), des difficultés d'élimination de ces repousses.

Ces phénomènes de diffusion du trait TH sont mis en évidence sur le terrain : au Canada, à défaut d'analyse des récoltes, on dispose d'observations au champ montrant que des repousses de colza cumulant des tolérances à 3 herbicides sont rapidement apparues. Leur étude a montré qu'à la fois des croisements entre deux variétés possédant des tolérances à des herbicides différents avaient lieu dans les pépinières de production de semences, et qu'il existait des pollinisations croisées dans les champs en production commerciale.

- La diffusion possible vers les espaces "naturels"

Une des craintes spécifiquement évoquées avec les VTH est liée à la perte de contrôle de ces plantes ou de leurs descendants, et à la colonisation des espaces "naturels" (non cultivés). Repousses d'une VTH et mauvaises herbes ayant acquis la résistance par hybridation avec la VTH pourraient "sortir" de la parcelle, formant ainsi respectivement des populations spontanées et des biotypes nouveaux. Leur arrivée et leur prolifération dans des espaces "naturels", même non suivies d'implantation permanente, pourraient bouleverser les équilibres biologiques, par exemple en réduisant les ressources disponibles pour les espèces tant végétales qu'animales de l'écosystème, mais aussi en attirant et en hébergeant des organismes auparavant absents.

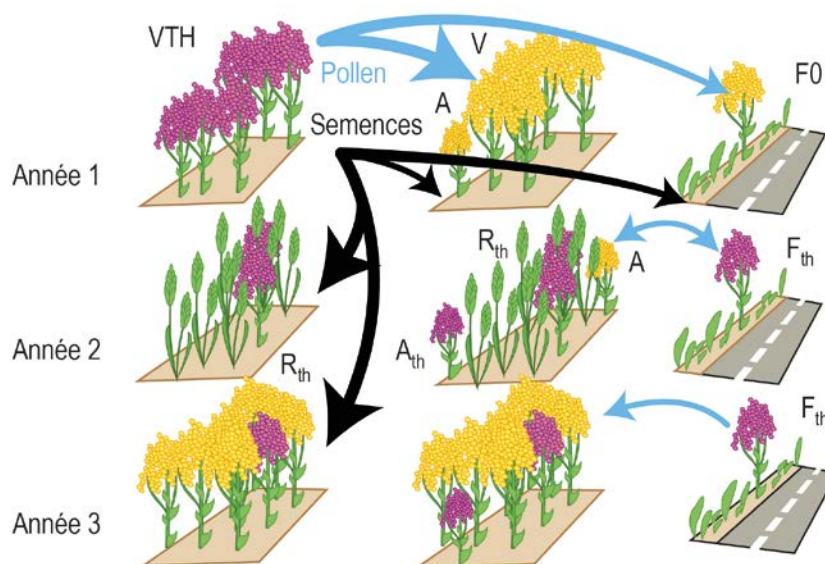
La question concerne aussi les espèces sauvages apparentées qui pourraient être pollinisées par la culture TH et exprimer des caractéristiques avantageuses dans un milieu naturel. En dehors des parcelles cultivées, le trait TH présente un avantage sélectif pour les plantes dans les autres milieux désherbés (bords de champs, bordures des routes, zones urbaines et industrielles). Au-delà, les dérives de pulvérisation (emportées par le vent) pourraient entraîner des pressions de sélection dans des milieux naturels proches des zones traitées qui avantageraient les plantes dotées d'un gène de résistance. Enfin, on ne peut exclure que des gènes de tolérance aient des effets secondaires favorables sous certaines conditions.

3.1.2. Flux de gènes au sein de l'espèce cultivée et vers les apparentées

- Mécanismes des flux de gènes

La diffusion des gènes (Figure 3-1) peut s'opérer par les graines (semences produites par la VTH puis ses descendants) et/ou par le pollen (fécondation de plantes, repousses ou cultivées, appartenant à une variété non-TH ou d'adventices apparentées). L'intensité des flux dépend de l'abondance des vecteurs (semences et pollen), de leur capacité de dispersion (selon la biologie des plantes, le vent, les insectes pollinisateurs...), du taux de réussite du transfert (formation d'hybrides viables, capacité de germination et d'implantation des semences échappées), puis de l'avantage sélectif des nouveaux individus dotés du trait TH dans le milieu concerné.

Figure 3-1. Flux et transferts de gènes possibles



D'après Colbach

Année 1 : Pollinisation d'une plante cultivée non-TH (V), d'une adventice apparentée (A) et d'une population férale de l'espèce cultivée (F₀) par du pollen d'une VTH, ce qui conduit à la présence de graines TH dans la récolte non-TH, et à la dispersion de graines hybrides dans les champs et les bordures. Dispersion des semences de VTH dans les champs et les bordures.

Année 2 : Repousses de VTH (R_{th}) et d'hybrides TH (A_{th}) dans d'autres cultures de la rotation. Pollinisation par les repousses R_{th} et les populations férales hybrides (F_{th}) de repousses et d'adventices non-TH, et réciproquement.

Année 3 : Présence de repousses TH dans une variété non-TH dans le champ d'origine de la VTH, mais aussi dans un autre champ où apparaissent aussi des adventices TH. Pollinisation des variétés non-TH par les populations férales.

Ces flux peuvent donc se produire **dans l'espace**, par la dispersion du pollen et/ou des graines, mais aussi **dans le temps** via les semences, qui peuvent, selon les espèces, survivre plus ou moins longtemps dans le sol avant de redonner une plante. Si la diffusion du trait TH dépend avant tout des caractéristiques de l'espèce cultivée considérée (voir section 3.1.3.), des pratiques culturales peuvent accentuer ou freiner les processus (gestion des stocks de semences et des repousses, pratiques de prophylaxie avec les outils agricoles, techniques de récolte, rotations, simplification ou abandon du travail du sol, organisation du paysage...).

- **La diffusion du trait TH au sein de l'espèce cultivée**

Parmi les plantes issues de semences perdues (lors de la récolte ou de transports) de la culture, une distinction est opérée entre les repousses, situées dans les parcelles cultivées, et les plantes dites "férales", qui se développent en dehors des champs. Les trois types de plantes, cultivées, repousses et férales, sont interfertiles et peuvent contribuer à disperser les gènes ou allèles de tolérance dans le temps et dans l'espace.

Si elle est aussi modulée par les pratiques culturales, l'ampleur du phénomène dépend surtout de la biologie des plantes, et notamment :

- de la biologie de leurs semences : résistance à la chute des graines à maturité (c'est une caractéristique de l'espèce mais aussi de la variété) et dispersion autour du pied producteur ; dormance primaire et/ou secondaire (induite par l'enfouissement) qui déterminent la capacité des semences à germer dans des conditions favorables ; durée de survie dans le sol (de quelques mois ou années à plusieurs décennies) ; taille et morphologie favorisant, ou non, la dispersion par divers vecteurs (vent, animaux, outils agricoles) ;
- de leur cycle de développement, qui détermine dans quelles autres cultures ou milieux incultes cette espèce peut se développer et se reproduire, et sa rapidité de propagation.

Les repousses

Les repousses sont issues de semences d'une culture, tombées au sol avant ou pendant la récolte dans la parcelle de culture, ou de graines produites par des repousses précédentes. Selon les pratiques culturales, ces graines peuvent germer immédiatement ou entrer en dormance et être enfouies à des profondeurs de conservation, survivre pendant plusieurs mois ou années avant de germer et de produire des plantes dans les cultures suivantes. Ces repousses font partie de la flore adventice et ont les mêmes effets que les mauvaises herbes : compétition avec la culture pour la lumière, l'eau et les nutriments ; transmission éventuelle de maladies... Dotées du trait TH, ces repousses possèdent un avantage sélectif important vis-à-vis de la flore adventice "sauvage" si leur éradication ne repose que sur l'herbicide auquel elles sont tolérantes.

Au-delà des difficultés de désherbage qu'elles peuvent poser, ces repousses sont des vecteurs du trait TH vers d'autres variétés : par leur présence même dans ces cultures non-TH (dont elles contaminent les récoltes par leurs propres semences) ou par leur pollen qui peut féconder les plantes de variétés non-TH à proximité (dont les graines seront donc porteuses du trait TH). Selon les facilités de croisement, les repousses pourraient ainsi accumuler au fil du temps plusieurs gènes de tolérance.

Les populations férales

Est dite férale une plante qui dérive (pleinement ou en partie) d'une espèce cultivée et est capable de se reproduire et de développer des populations sans dépendre des conditions créées par l'homme, c'est-à-dire des pratiques agricoles. La féralité d'une population traduit avant tout sa capacité à s'installer en dehors du compartiment cultivé. Selon les évolutions possibles de l'espèce, des étapes plus ou moins avancées vers la "dé-domestication" (retour à l'état sauvage) peuvent exister, notamment grâce à des mutations réverses et à la présence ou à l'acquisition de traits "sauvages".

Des populations férales existent pour toutes les espèces cultivées majeures, quelque part dans le monde. Dans le contexte français, la seule espèce annuelle de grande culture concernée actuellement est le colza, mais le phénomène serait en cours de constitution avec les formes adventices du tournesol.

Les populations férales sont issues de semences apportées par les engins agricoles, les véhicules de transport ou les oiseaux, dans des espaces semi-naturels interstitiels des territoires agricoles (bords de chemins, talus...) et des zones urbaines ou industrielles. Elles sont à même de persister de nombreuses années au même endroit, par autorecrutement et/ou par la banque de graines du sol de l'apport initial. Dans le cas du colza, l'analyse de marqueurs d'anciennes variétés montre que ces populations sont périodiquement enrichies génétiquement par l'apport de graines de variétés plus récentes. Qu'elles descendent directement d'une VTH ou qu'elles aient acquis le trait par pollinisation depuis des champs de VTH voisins, des populations férales pourraient servir de réservoir de gènes et de semences TH ; elles favoriseraient l'implantation de nouvelles populations, surtout si des espaces semi-naturels sont soumis à un traitement herbicide, ou la contamination de cultures non-TH voisines, et cela bien après l'arrêt de la commercialisation des VTH correspondantes.

- La diffusion du trait par le pollen vers les espèces apparentées

Les flux de gènes entre les cultures et leurs espèces sauvages apparentées sont longtemps restés un sujet de discussion académique, car l'opinion la plus répandue était que les croisements étaient rares et produisaient des hybrides stériles. C'est avec la commercialisation des variétés transgéniques que se sont développées des recherches sur ce sujet, afin d'évaluer l'impact environnemental du transfert accidentel aux plantes sauvages de gènes avantageux ou défavorables.

Ces flux de gènes dépendent de l'existence d'apparentées sur le territoire français, de leur présence dans les champs ou à proximité, de la fréquence des fécondations croisées, de la vigueur et de la fertilité des hybrides, de la valeur adaptative des descendants, et pour les milieux naturels, de la résistance à la colonisation par la communauté végétale en place.

Les apparentées compatibles (et co-présentes)

Une grande partie des flux de gènes par croisement sexué concerne des espèces adventices, car elles sont présentes au sein même des champs. Ce sont des adventices appartenant à la même espèce ou au même complexe d'espèce que la culture. Elles représentent une menace pour la stratégie d'utilisation des VTH car elles peuvent capter le trait et exprimer la résistance, donc rendre inutile l'utilisation de ces VTH. Certaines participent aussi, selon les régions, à des communautés végétales naturelles : navette, chou et roquettes sauvages, betterave littorale, chicorée sauvage, égllope... Elles peuvent produire des hybrides plus ou moins viables selon les cas.

Les flux de pollen

Les espèces apparentées aux cultures qui produisent le pollen le plus abondant et/ou le plus dispersé sont les cibles les plus concernées, et d'autant plus si elles sont allogames et auto-incompatibles, ce qui favorise les fécondations croisées par du pollen TH. Les distances auxquelles les croisements se réalisent dépendent du type de pollen (agrégé en paquets lourds et collants, ou diffusé grain à grain), de sa viabilité selon les conditions climatiques (humidité et température), des caractéristiques du parcours (topographie, végétation, turbulences, flux à l'échelle du paysage), de vecteurs éventuels (insectes), des organes récepteurs femelles, de pollen compétiteur local. Des modèles ont été proposés pour estimer la composition génétique du nuage de pollen au-dessus d'une plante à une distance donnée des différentes sources de pollen.

La viabilité des hybrides

Lorsque l'apparentée appartient à la même espèce que la culture (c'est le cas pour le riz, le tournesol, la betterave, la chicorée), il n'y a pas de problème d'hybridation interspécifique, et les hybrides sont directement viables et vigoureux. En revanche, plus les espèces sont éloignées, avec des nombres chromosomiques différents, plus la présence des deux patrimoines génétiques entraîne des perturbations du développement et de la reproduction. Le retour à une biologie normale ne se fait qu'après des purges et des réarrangements chromosomiques, sur plusieurs générations, en particulier *via* des croisements en retour avec le parent sauvage.

La valeur adaptative des individus porteurs du trait TH

En l'absence d'exposition à l'herbicide, l'acquisition du trait TH ne devrait pas modifier le comportement des apparentées sauvages. La mise en évidence chez certaines VTH (cf. section 1.4.3.) d'effets négatifs du trait TH sur le développement des plantes ou la biologie des graines plaiderait même, transposés aux plantes sauvages, pour une valeur adaptative moindre qui entrainerait plus ou moins rapidement la disparition des hybrides et de leurs descendants. La variabilité du fond génétique dans lequel s'exprime le gène de tolérance, et la diversité des milieux à considérer, complexifient cependant l'évaluation des effets.

Dans les champs ou les autres espaces traités avec l'herbicide concerné, l'acquisition d'un trait TH absent ou très rare chez une espèce sauvage lui procure un avantage d'autant plus déterminant que la pression exercée est forte (selon la fréquence des traitements). Ce phénomène met en échec cette procédure de désherbage, mais les autres stratégies de lutte, y compris avec d'autres herbicides, restent efficaces. La dénomination de "*super weed*" pour qualifier une adventice ayant acquis le trait TH d'une culture paraît donc abusive à de nombreux malherbologistes, s'il ne s'agit que d'une tolérance à un herbicide, sans acquisition d'autres caractères nuisibles pour l'agriculture (capacité accrue de multiplication, de migration, de compétition...). Cette appellation ne se justifierait qu'en cas d'accumulation avec le temps de plusieurs gènes de résistance et dans des systèmes où les herbicides seraient le seul moyen de gestion envisageable.

3.1.3. Les risques associés aux différentes espèces cultivées

Sont considérées ici les cultures majeures, classées par facteurs de risque croissants ; leurs caractéristiques déterminantes pour les risques de diffusion du trait TH sont récapitulées dans le Tableau 3-1.

• Maïs

Dans les conditions climatiques françaises, le maïs a une probabilité quasi-nulle de développer des repousses, en raison de sa sensibilité au gel hivernal et d'une longévité très faible de ses semences. Les graines, sans dormance, peuvent lever en automne, mais les repousses ne survivent pas à l'hiver en France ; elles le pourraient si le réchauffement climatique conduisait à des conditions analogues à celles de la Catalogne.

Comme il y a peu d'égrenage des épis de maïs à maturité, le seul vecteur de dispersion des graines serait donc le trafic agricole - et les animaux. Originaire d'Amérique centrale, le maïs est sans apparentées en Europe. Les cultures non-TH sont donc seules concernées par le risque de diffusion du trait TH par le pollen, qui peut être transporté sur des distances importantes par des flux d'air ascendants. Les distances d'isolement imposées pour la production de semences certifiées (pour une pureté variétale de 99,8%) sont de 200 ou 300 m selon la taille de la parcelle ; 20 à 35 m entre champs sont suffisants pour assurer un taux de pollinisation inférieur à un seuil de 0,9%.

• Blé

Les repousses de blé existent, notamment dans les cultures semées à la fin de l'été et au début de l'hiver, mais elles sont peu fréquentes, en raison de leur destruction en général avant le semis de la culture suivante, et d'une longévité très faible des semences. Des repousses pourraient éventuellement se développer en cas de simplification du travail du sol, qui ne détruirait plus les plantes levées en été, ou dans les monocultures de blé. Comme il y a peu d'égrenage des épis de blé, le seul vecteur de dispersion serait les transports agricoles.

Les distances d'isolement nécessaires en cas de filières séparées (production de semences, séparation OGM/non-OGM) sont faibles, sauf en cas de seuil d'impureté admissible particulièrement bas, l'espèce étant largement autogame et son pollen peu dispersé. Toutefois, si des variétés hybrides venaient à être commercialisées, on assisterait à la sélection de variétés ouvrant davantage leurs fleurs et exportant plus de pollen (afin d'améliorer le rendement de la production de semences hybrides), caractéristiques qui se retrouveraient au champ et augmenteraient les flux de pollen.

Des hybridations interspécifiques sont observées dans les régions méridionales avec des égilopes (autogames aussi), mais les hybrides sont peu fertiles.

• Betterave sucrière

Il s'agit d'une culture bisannuelle, qui a besoin d'une vernalisation (induction par des températures froides) pour fleurir. Elle est semée au printemps et les racines sont récoltées en automne de la première année, avant vernalisation. La principale difficulté de désherbage est l'élimination des betteraves adventices qui peuvent apparaître dans les cultures. Ces formes adventices, qui peuvent avoir différentes origines, ont la particularité de monter à fleur. Elles produisent des graines nombreuses et ayant une durée de vie longue dans le sol. Sans intervention adaptée, cela peut conduire à des infestations empêchant la culture de la betterave sucrière.

Les variétés sucrières sont sélectionnées pour ne pas monter à graines à plus de 0,01% l'année de culture dans les conditions françaises. Mais ce sont des variétés-populations hybrides dont de nombreuses caractéristiques domestiquées disparaissent dans la descendance. Cette descendance de type adventice peut être produite : par les 0,01% d'individus sensibles à la vernalisation au stade plantule, puis par leurs descendants ; par des semences non germées l'année du semis, qui seront vernalisées durant l'hiver ou à leur germination dans la culture suivante. Les betteraves adventices peuvent aussi provenir d'hybrides, contenus dans les lots de semences sucrières, produits par les porte-graine sucrières fécondés accidentellement par des betteraves rudérales poussant au voisinage ; ces hybrides héritant de leur parent rudéral d'un gène d'annualité dominant, ils sont également annuels. Enfin, des petites racines de betterave sucrière non récoltées ("trainantes") peuvent survivre, être vernalisées pendant l'hiver, se reproduire dans les cultures suivantes et contribuer aussi au stock semencier de betterave adventice.

Le problème de désherbage majeur est l'élimination des betteraves adventices dans la culture de sucrières. Le risque d'infestation de la parcelle justifie le recours au désherbage manuel pour éliminer les pieds montés à graines, plantes que la stratégie TH doit permettre d'éliminer chimiquement. Des flux de pollen à longue distance (>1 km) et des flux de graines sont possibles entre populations. Le caractère TH pourrait donc se répandre rapidement si les montées à graines n'étaient pas systématiquement détruites.

• Tournesol

La perte de semences à la récolte est du même ordre que la dose de semis, mais ces semences sont sensibles au froid. Des repousses peuvent apparaître dans les cultures de printemps. Originaire d'Amérique, le tournesol n'a pas d'apparentées natives en Europe, mais plusieurs espèces ornementales ont été introduites ainsi que le topinambour, avec lesquelles des hybridations sont possibles. Le principal problème est posé par des "tournesols sauvages", apparus dans les années 1990 en Espagne et plus récemment en France. Ces formes adventices présentent des combinaisons variées de traits cultivés et de traits sauvages dont la ramification et la chute des graines à maturité. Ce sont probablement des hybrides entre des variétés cultivées et la forme sauvage présente en Amérique, introduits dans des lots de semences provenant d'Outre-Atlantique.

Plantes de grande taille, très compétitives, pouvant occasionner de fortes pertes de rendement, ces tournesols adventices commenceraient, en Espagne, à constituer des populations férales, qui peuvent échanger des gènes avec les tournesols TH. Dans les conseils agricoles diffusés auprès des producteurs français, la destruction de ces formes adventices grâce aux VTH constitue un argument important pour l'adoption des VTH, malgré un risque évident de transfert rapide du gène de tolérance par le pollen.

• Colza (d'hiver)

En France, le colza est une culture d'hiver, semée en fin d'été (alors que des variétés de printemps sont plantées ailleurs en Europe et au Canada). C'est l'espèce qui cumule le plus de risques de diffusion incontrôlée du trait TH, avec à la fois des repousses abondantes, des populations férales nombreuses et des hybridations interspécifiques possibles avec des adventices apparentées. Les flux de gènes ont été étudiés, dès lors que la question des cultures transgéniques s'est posée.

Plus de 5% de la récolte (représentant plusieurs milliers de graines par m²) peuvent être perdus à cause d'une ouverture précoce des siliques qui peuvent être plus ou moins fragiles selon les variétés et les conditions climatiques. Les graines sont petites et nombreuses, sans dormance primaire mais avec une forte aptitude à la dormance secondaire (surtout si elles sont enfouies rapidement) et une survie de plusieurs années dans le sol. Les **repousses** peuvent lever et se reproduire dans la plupart des cultures d'hiver et même de printemps.

Des **populations férales** sont présentes un peu partout dans les régions de culture du colza. On y retrouve la marque de variétés cultivées parfois anciennes (par exemple des génotypes à taux élevé d'acide érucique toujours présents plusieurs années après l'arrêt de leur culture). Des travaux de suivis en Europe, des études par modélisation ainsi que les données des plans de surveillance de la culture de colza transgéniques TH sur plus d'une décennie au Canada, aboutissent au même constat : le caractère TH migrera de manière inéluctable vers les populations férales de colza. Les traits TH se maintiendront hors des parcelles cultivées essentiellement par la persistance des graines dans le sol.

Il existe en Europe de nombreuses crucifères proches (une douzaine d'espèces) susceptibles de se croiser avec le colza, dont certaines sont d'ailleurs utilisées comme ressource génétique pour l'amélioration du colza. La plupart sont auto-incompatibles. L'étude des possibilités de **croisements interspécifiques** produisant des hybrides viables a révélé toute une gamme de situations : hybridation spontanée facile et fréquente, hybridation rare sur le terrain ou possible seulement par une pollinisation manuelle, hybridation récurrente mais disparition des descendants... Ces espèces ont des nombres de chromosomes différents : les hybrides ne sont pas tous viables, et des réarrangements chromosomiques interviennent dans les générations suivantes. L'espèce avec laquelle les hybridations sont les plus faciles est la navette sauvage (*Brassica rapa*), qui possède un génome commun avec le colza qui facilite les fécondations croisées et la production de descendants de formule chromosomique stabilisée, mais elle n'est pas fréquente en France. L'hybridation est aussi possible avec les choux sauvages, encore plus rares. L'hybride entre colza et navette semble disposer d'un avantage sur la navette dans les populations des bords de rivière, indépendamment d'un gène particulier du colza. Dans le cas de la ravenelle, la production d'hybrides ayant acquis le trait TH est possible, même à des taux faibles.

• Autres espèces, mineures dans le contexte français

Riz (produit sur environ 20 000 ha en Camargue, souvent en monoculture). Aucun des apparentés sauvages du riz n'est présent en France, mais le riz "crodo" (ou riz "rouge"), un riz égrenant adventice issu du riz cultivé, est présent dans plus de 40% des rizières de Camargue. Le riz est connu pour être autogame, mais une fraction non négligeable du pollen peut être exportée à quelques mètres. Dans nos régions, les croisements spontanés avec le riz crodo sont, au champ, de l'ordre de 0,1% en condition de mélange, et sont quasi nuls à plus de 10 m de distance ; des taux plus élevés peuvent être atteints avec certains cultivars et dans des conditions climatiques favorables. Les croisements sont complètement fertiles ; les hybrides sont plus productifs que le riz et leurs grains sont caduques, ce qui permet une large dispersion et rend nécessaire un désherbage spécifique en pré-semis du riz. Le risque de diffusion de gènes de TH à cette forme adventice est donc très élevé.

Endive et chicorée. La forme sauvage de la chicorée est partout présente en France, notamment sur les bords des routes et des chemins. L'espèce est entomophile et dotée d'un système d'auto-incompatibilité. Dans les zones de production de semences ou de culture de racines, les échanges polliniques sont donc possibles entre formes cultivées et sauvages. Des hybrides et des descendants sont effectivement trouvés dans les populations des bords de route, et ils peuvent même y être majoritaires, ce qui indique la facilité du croisement spontané et l'introggression pérenne des caractères cultivés. La diffusion de gènes de TH semble donc inéluctable.

Pomme de terre (environ 160 000 ha). Les croisements avec les 2 adventices proches, la douce-amère et la morelle noire, présentes partout en France, sont très improbables en conditions naturelles ; de plus ces espèces sont très autogames.

Soja (culture ne couvrant qu'environ 20 000 ha en France, surtout dans le Sud-Ouest et l'Est). Aucun des apparentés au soja n'est présent sur le territoire.

Tableau 3-1. Caractéristiques biologiques des principales espèces cultivées et risques de diffusion du trait TH

	Biologie des semences : pertes de récolte, dormance, survie dans le sol	Repousses Populations férales	Flux de pollen Risques de contamination des récoltes voisines <i>Distances d'isolement</i>	Existence d'adventices apparentées Risque de transfert du trait TH
Maïs	Pas de dormance, ni survie dans le sol	Pas de repousses en France (levée possible en automne, mais pas de survie hivernale)	Vent (et insectes), allogame à 100% <i>* 200 ou 300 m selon taille parcelle [0,2%] ; ** > 35 m</i>	Aucune apparentée en Europe
Blé	Survie < 2 ans	Levée des repousses en été-automne, mais sont détruites avant le semis de la culture suivante	Vent, autogame à 95% <i>* 20 m [0,3%] ; ** > 5 m</i>	Hybridation possible avec plusieurs égilopes, mais fertilité réduite
Betterave	Taux de survie annuel de 80%, dormance cyclique	En fonction de la présence de montées à graine	Vent, allogame à 100% <i>* 300 m pour variétés diploïdes</i>	Hybridation spontanée avec betterave adventice et littorale, pas de réduction de fertilité
Tournesol	Survie possible	Des repousses Des populations férales en Espagne	Insectes, allogame° <i>* 500 m [1%]</i>	Qq espèces ornementales ou potagères et populations de tournesols adventices introduites
Colza	Fortes pertes de récolte (10 ³ à 10 ⁴ /m ²) Pas de dormance 1 ^{ère} mais dormance 2 ^{ème} selon conditions ; survie <10 ans	Levée majoritaire en automne ; des repousses très abondantes en cultures d'hiver Les populations férales sont fréquentes	Vent et insectes, allogame° à 30% <i>* 100 m [0,3%] ; ** 20-120m selon type de variété et taille parcelle</i>	Nombreuses espèces proches ; hybridation ± facile, hybrides ± viables...

* : distance réglementaire d'isolement pour la production de semences certifiées [seuil d'impureté variétale toléré] ; ** : distance d'isolement pour un seuil de 0,9% de mélange (résultats de modélisation).

° : hors variétés mâle-stériles

3.1.4. La gestion des risques de flux de gènes

Face aux risques de dissémination du trait TH dans le génome de populations sauvages, férales ou adventices, par définition incontrôlés et irréversibles, des recherches ont été conduites dans deux directions : d'une part trouver des solutions innovantes dans la création des variétés TH pour rendre impossibles les flux de gènes, et d'autre part évaluer quels étaient les facteurs agronomiques déterminants dans les flux de gènes afin de jouer sur les pratiques agricoles pour les éviter. L'hypothèse de devoir gérer la coexistence au champ entre variétés destinées à des filières séparées a également conduit à examiner différentes modalités d'organisation de cette coexistence.

• Les stratégies génétiques de prévention de la diffusion du trait TH

Différentes stratégies de prévention ont été proposées : des stratégies conventionnelles jouant sur la biologie des variétés ou des stratégies de bio-confinement obtenues par génie génétique. Ces dernières, qui concernent surtout les variétés transgéniques, ont été conçues pour limiter l'accès au matériel génétique et préserver les droits des obtenteurs, mais elles peuvent aussi limiter la diffusion des gènes de tolérance par les semences et le pollen. Aucune solution ne garantit une protection absolue, mais leur usage conjoint peut diminuer l'intensité des flux de gènes.

Les transferts par le pollen étant souvent considérés comme les plus probables, une première stratégie consiste à réduire les flux de pollen ou à empêcher que le pollen transmette le gène de tolérance. Une seconde stratégie joue sur la viabilité des hybrides (ou sur l'expression du trait chez les descendants).

Réduire les transferts par le pollen

Les stratégies conventionnelles de réduction des flux de pollen consistent à choisir ou sélectionner :

- des cultivars à floraison très décalée par rapport à celle des apparentées sauvages, ce qui ne permet en général qu'une réduction des périodes de chevauchement de floraison, et n'exclut pas la fécondation d'individus sauvages par du pollen issu de la culture, surtout s'ils sont auto-incompatibles, et lorsque le donneur de pollen est une repousse (cas des crucifères) ;
- des variétés cléistogames (dont la fécondation a lieu dans les fleurs fermées), dont le pollen et les stigmates des fleurs sont moins accessibles aux insectes pollinisateurs ;
- des variétés mâle-stériles restaurées ponctuellement pour la production de graines au champ, qui émettent moins de pollen, mais qui peuvent aussi produire un hybride si elles sont fécondées par du pollen sauvage ;
- des variétés apomictiques (qui produisent des graines par reproduction non sexuée), qui peuvent éviter la production d'hybrides par la plante cultivée, mais qui conservent souvent la possibilité d'émettre du pollen. Des recherches visent à transférer des gènes de cléistogamie, d'incompatibilité ou d'apomixie pour éviter le flux de pollen.

Une stratégie de génie génétique consiste à insérer le transgène dans le génome chloroplastique, car les plastides du gamète mâle dégénèrent à la pénétration dans l'ovule. Il existe cependant un taux accidentel de transfert de l'ADN chloroplastique par le pollen, de l'ordre de 0,03%, révélé maintenant chez plusieurs espèces. De plus, la fécondation d'une plante cultivée par du pollen sauvage conduit aussi à un hybride, qui possède et transmettra le chloroplaste de la variété cultivée.

Au niveau de la production de semences, les risques dépendent de la stratégie génétique retenue. Chez la betterave par exemple, si le trait TH est apporté par le porte-graine, les hybrides avec les betteraves sauvages des environs seront tolérants ; s'il l'est par le donneur de pollen, aucune semence hybride ne sera tolérante, mais les populations rudérales locales pourront acquérir le trait TH, et contaminer en retour les porte-graine dans un second temps.

Enfin, il est aussi devenu possible d'éviter la présence du transgène dans le pollen en insérant aussi dans la plante des gènes codant pour des nucléases spécifiques (cf. Chapitre 1).

Réduire la viabilité des hybrides

Les technologies génétiques restrictives (GURT) ont pour but de supprimer la viabilité des semences afin d'en empêcher la réutilisation par les agriculteurs. Sous l'appellation populaire de "Terminator", elles ont soulevé une controverse sociale telle qu'elles ne sont pas employées commercialement. Elles fonctionnent sur une combinaison de trois gènes, dont l'un code une toxine qui bloque la germination, les deux autres régulant l'expression de la toxine. Les obtenteurs travaillent ces plantes en présence d'une stimulation inhibant la production de la toxine.

Dans des logiques proches, diverses options ont été proposées et/ou testées :

- obtenir l'avortement des semences issues d'allofécondation lorsqu'un gène de répression de la toxine (plutôt que par le stimulus extérieur) est absent chez le pollen, mais les descendants d'autofécondation sont viables ;
- placer le gène de tolérance en tandem avec un gène codant une caractéristique intéressante pour la plante cultivée mais défavorable pour une plante sauvage, par exemple l'absence de dormance des graines ou le nanisme. L'effet délétère du second gène sur la fitness des descendants doit entraîner leur disparition. Cette stratégie a été expérimentée avec succès sur des hybrides entre colza et navette.

Enfin, signalons la possibilité d'utiliser des gènes récessifs : la résistance à l'herbicide ne s'exprimant pas dans l'hybride (F1), celui-ci pourra être détruit par le désherbage, mais si des plantes échappent, cette stratégie peut conduire à la fixation du gène dans les populations si l'herbicide est continuellement appliqué.

• Les stratégies agronomiques de prévention de la diffusion du trait TH

Les flux de pollen et de semences dépendent largement aussi de l'assolement, de la structure du parcellaire (taille et forme des champs...) et des techniques culturales à même de réduire les risques. Les effets, nombreux, cumulatifs et interactifs, sont difficiles à étudier au champ. De plus, les données de contamination réelle font défaut : la présence fortuite de gènes externes dans les récoltes n'est généralement pas suivie dans les pays (Etats-Unis, Canada...) où les VTH transgéniques sont cultivées. Et en Europe, où cette présence fortuite est déterminée, la seule variété transgénique cultivée à grande échelle n'est pas une VTH, mais le maïs *Bt*, qui peut néanmoins servir d'exemple pour l'étape de diffusion des semences et du pollen. Les effets des pratiques agricoles sur la teneur en semences TH des récoltes non-TH ont donc surtout été étudiés par simulations, sur divers modèles, et notamment les modèles GENESYS (colza, betterave) et Mapod (maïs). Les cas les plus étudiés ont été le maïs et le colza.

Cas du maïs (risque de contamination des cultures non-TH par le pollen TH)

Les simulations montrent un effet prépondérant de l'assolement (% de maïs dans le paysage, % de maïs en VTH), qui détermine la distance que doit parcourir le pollen pour féconder une variété voisine. La structure du parcellaire (taille et forme des champs) influe sur la dispersion, mais cet effet apparaît faible comparé à celui de l'assolement. La vitesse du vent et la synchronisation des floraisons (qui dépend de la conduite des cultures et des variétés) sont également des facteurs non négligeables dans la dispersion du pollen et la probabilité de pollinisation croisée. C'est essentiellement la bordure du champ qui est fécondable par le pollen extérieur.

Pour respecter le taux maximum de 0,9% d'OGM dans les récoltes non-GM, il faudrait pouvoir limiter la part de maïs et de maïs transgénique dans l'assolement de la région. Des distances d'isolement de quelques dizaines de mètres ou la présence d'un cordon de maïs non-transgénique (éloignant ainsi le voisinage des plantes transgéniques avec les champs non-transgéniques) ainsi que le détournement (récolte séparée du contour extérieur du champ) peuvent permettre de respecter la coexistence de deux filières séparées.

Cas du colza (diffusion par le pollen et les semences)

Le cas du colza est le plus complexe, avec une dispersion spatio-temporelle *via* le pollen et les semences, et l'existence de repousses et de populations férales hors champ. Les simulations indiquent que le facteur-clé pour limiter les flux des variétés TH vers les non-TH est la maîtrise des repousses, qui se gère essentiellement par les effets de la rotation et les pratiques culturales (Tableau 3-2). Les résultats dépendent cependant fortement de la taille des îlots de culture, eux-mêmes fonction

du type d'exploitation agricole et du parcellaire. L'instauration de distances d'isolement entre variétés de filières séparées n'est efficace qu'en l'absence de repousses dans la région, et la distance nécessaire varie fortement en fonction du type de variétés de colza. La seule situation où les repousses ne contribuent pas au flux de gènes est le cas des fermes ayant des grandes parcelles (plusieurs dizaines d'ha) ou des parcelles agrégées en îlot contigu, pour autant que la part de colza dans l'assolement reste similaire à celle observé actuellement.

Cas du tournesol

Le cas du tournesol se rapproche de celui du colza du fait de l'apparition récente dans plusieurs pays d'Europe (France, Espagne, Italie) et d'Amérique du Sud de repousses de type intermédiaire entre les types sauvages et cultivés, capables d'entretenir des stocks importants de semences dans les parcelles cultivées. Ces populations férales sont susceptibles d'intégrer très rapidement les traits TH. La question de la gestion des repousses est donc là aussi essentielle.

Cas de la betterave sucrière

La sélection pour des variétés sans montée à graine et la maîtrise des flux de gènes dans les zones de production de semences permet d'éviter d'introduire des plantes annuelles dans les zones de production de racines. L'éradication des betteraves adventices, grâce à une variété TH et à des techniques culturales adaptées (par exemple, le labour est préconisé *avant* la culture de la betterave, mais déconseillé *après*, pour éviter d'enfouir en profondeur des éventuelles graines issues de plantes TH ayant fructifié et favoriser la germination des semences et leur disparition du stock), est une réponse nécessaire mais pas suffisante, car des plantes échapperont et pourront recevoir du pollen des quelques betteraves sucrières montées à fleur. Les simulations montrent que le facteur le plus important est la pratique du désherbage manuel pour éliminer toute montée cultivée accidentelle à l'origine de l'échappée des traits TH.

Tableau 3-2. Options agronomiques pour la gestion des repousses de colza et des "repousses" de betterave adventice

	Colza	Betterave sucrière
Rotation	Diversifier les rotations, alterner cultures de printemps et cultures d'hiver Alterner les tolérances et herbicides dans les rotations >4 ans entre deux colzas (6 ans réglementaires en production de semences) Réduire la proportion de colza dans l'assolement Éviter les autres cultures dicotylédones avec peu de solutions chimiques, surtout après colza	Réduire la proportion de betterave, d'autres cultures sarclées et cultures de printemps dans la rotation
Travail du sol avant la culture	Labour avant colza	Labour seulement avant la betterave
Travail du sol après la culture	Pas de faux semis avant la fin de l'été après colza (1), mais un travail simplifié plus tardif avant les autres cultures	Peu ou pas de travail profond avant les autres cultures
Date de semis	Retarder les semis de colza et céréales d'hiver	Retarder les semis de betterave et autres cultures de printemps
Variétés	Sans déhiscence précoce, sans dormance primaire	Peu sensibles à la vernalisation
Semences		Sans hybrides accidentels
Désherbage manuel	Rare en agriculture intensive française	Arracher les montées (pour éviter la création et l'expansion de populations de betterave adventice)
Désherbage mécanique	Peu développé en France	Limite les populations adventices
Récolte	Optimiser date et réglage du matériel pour limiter les pertes à la récolte	

(1) Un travail précoce après la récolte enfouit les semences et les rend dormantes, créant un stock semencier persistant et copieux qui augmente l'infestation des cultures suivantes.

• Les différentes modalités d'organisation de la coexistence au champ

Si de nombreux facteurs, biologiques et agronomiques, influent sur les risques de contamination des cultures voisines, les mesures réglementaires visant à les limiter reposent en général sur l'instauration de distances d'isolement entre cultures – c'est le cas pour la production de semences certifiées. Dans la perspective de la mise en place d'une coexistence entre filières OGM et non-OGM, les législations européennes ont également retenu cette modalité et proposé la mise en place de distances d'isolement par les agriculteurs utilisant des plantes transgéniques. Une telle règle peut induire, par un "effet domino", une réduction des surfaces transgéniques cultivées : si la mise en place d'une distance d'isolement s'avère impossible ou trop coûteuse, l'agriculteur souhaitant cultiver une variété transgénique y renoncera ; cette décision de semer finalement une variété conventionnelle aura à son tour des conséquences sur les choix de ses voisins... D'autres options ont été explorées, par des études théoriques ou fondées sur des observations sur le terrain.

Des modalités de gestion plus souples peuvent être envisagées, reposant sur la mise en place de zones tampons destinées à capter le pollen transgénique, qui sont constituées de quelques rangs de cultures non-transgénique (dont la production serait donc à écouler dans la filière OGM). Ces zones tampons peuvent être à la charge de l'agriculteur "GM" ou bien implantées par un agriculteur "non-GM" qui est alors dédommagé des pertes dues au déclassement d'une fraction de sa production. Une telle option pourrait être gérée via la création d'un marché de zones tampons.

Sur le terrain, des phénomènes d'auto-organisation au niveau local ont été observés, en Allemagne et au Portugal. Les agriculteurs ont eu tendance à planter les cultures transgéniques au cœur de leurs exploitations et à proximité de parcelles portant d'autres cultures, ou bien au contraire au voisinage de parcelles de cultures transgéniques appartenant à d'autres agriculteurs, avec lesquels ils se sont coordonnés. Une telle logique collective de gestion de la coexistence pourrait être favorisée par la création de clubs de producteurs, regroupant les agriculteurs d'un même territoire qui s'entendraient pour constituer des îlots de cultures de grande taille, minimisant les contacts entre cultures transgéniques et non-transgéniques, et instaurant des mécanismes de compensation permettant aux agriculteurs du centre de la zone d'indemniser ceux situés à la frontière, dont les parcelles jouent le rôle de zones tampons.

Enfin, une solution consisterait à faire gérer l'organisation du territoire par les entreprises clientes des agriculteurs (comme les coopératives agricoles), qui seraient en mesure, via des politiques de prix différenciées zonées et de contractualisation des agriculteurs, d'influer sur leurs choix variétaux et d'obtenir la constitution de zones de production homogènes.

3.1.5. Le contrôle des repousses TH

Des difficultés de désherbage apparaissent en cas d'introduction dans une rotation d'une culture tolérante à un **herbicide sélectif** appartenant à une famille d'herbicides déjà utilisés dans les autres cultures de la rotation, et qui ne pourront donc plus y éliminer ces repousses TH. Les premiers problèmes sont apparus aux Etats-Unis avec l'arrivée des maïs tolérants au sethoxydime, alors que ce produit et d'autres anti-graminées du groupe A étaient utilisés aux Etats-Unis pour éliminer les repousses de maïs dans le soja. Ces repousses ont pu être contrôlées un temps par le glyphosate dans les variétés de soja qui y étaient tolérantes, mais pas les repousses de maïs tolérant au glyphosate.

L'introduction dans une rotation d'une seule culture tolérante à un **herbicide non sélectif** (glyphosate ou glufosinate), qui n'est donc pas utilisé sur les autres cultures de la rotation, ne modifie pas l'efficacité du désherbage habituel contre les repousses – à condition que l'herbicide ne soit pas non plus employé en remplacement du travail du sol avant semis de ces autres cultures. La gestion des repousses devient en revanche problématique lorsque plusieurs cultures de la rotation sont tolérantes au même herbicide non sélectif. Ainsi, lorsque toutes les cultures sont tolérantes au glyphosate, le contrôle des repousses de maïs ou de coton dans le soja, de celles de soja dans le riz, etc., nécessite la mise au point de programmes de désherbage complémentaires au glyphosate, avec recours à des mélanges d'herbicides et/ou à des traitements supplémentaires. Des programmes de pré- ou post- ou pré+post-levée sont ainsi proposés aux Etats-Unis en complément du traitement au glyphosate, ce qui génère dans tous les cas une consommation supplémentaire d'herbicides.

L'offre commerciale, pour une même culture, de variétés tolérantes à divers herbicides constitue un moyen de choisir l'herbicide auquel les repousses sont sensibles. Mais cette offre variée, dans le cas d'une espèce cultivée qui se croise facilement, comme le colza, entraîne aussi l'accumulation des gènes de tolérance dans les repousses, soit que des semences bi-tolérantes soient produites accidentellement dans les pépinières (ou proposées comme variété bi-tolérante dans le futur afin d'utiliser deux herbicides simultanément pour lutter contre l'apparition d'adventices résistantes), soit que des repousses bi- et tri-résistantes se forment dans les champs par flux de gènes entre variétés et repousses. Une solution de désherbage chimique avec un autre produit est en général possible, mais elle fait perdre une partie des avantages techniques des VTH.

3.2. L'apparition spontanée de résistances chez les adventices

Ce phénomène est maintenant bien connu. Il concerne la plupart des familles d'herbicides (cf. Chapitre 1). Le problème n'est pas spécifique des VTH, mais il est possiblement accru par la répétition de l'emploi des herbicides associés aux VTH dans l'assolement. Le premier cas de résistance à un herbicide a été noté en 1968 aux Etats-Unis. Le nombre d'espèces pour lesquelles une résistance est décrite a augmenté rapidement par la suite, surtout au cours des années 1980 et 90. Le site collaboratif Weedsience, qui répertorie les cas observés dans le monde, dénombre actuellement (octobre 2011) 200 espèces pour lesquelles a été identifiée au moins une population contenant des plantes résistantes à au moins un herbicide.

3.2.1. Les facteurs déterminants dans l'apparition et la diffusion de résistance

Le mécanisme biologique général est le suivant. De très rares individus sont porteurs de variation(s) génétique(s) spontanée(s) conférant une résistance à un herbicide. Le tri sélectif opéré par l'application de l'herbicide entraîne l'augmentation de fréquence de ces variants, jusqu'à ce qu'ils posent un problème de désherbage aux agriculteurs. La sélection exercée par les herbicides est très intense, puisque leur efficacité (le pourcentage de plantes qui meurt après le traitement) est généralement d'au moins 90%, le plus souvent de 95 à 99%. Cela explique que l'évolution de la résistance puisse être rapide ; elle est toutefois fonction de nombreux facteurs.

• Facteurs génétiques

- La fréquence initiale des variants résistants : elle dépend du taux de mutation spontanée permettant leur apparition. La probabilité de présence d'individus résistants pouvant être sélectionnés augmente avec la taille des populations.

- L'hérédité de la transmission : on connaît un seul cas de résistance cytoplasmique, mais qui s'est répété chez de très nombreuses espèces alors que la majorité des cas correspond à des mutations dominantes de l'ADN nucléaire ; quelques mutations récessives ont été observées, mais elles ont été plus longues à apparaître (un mutant hétérozygote n'est pas résistant, donc il est détruit par l'herbicide).

- Le nombre de gènes impliqués. La résistance peut être monogénique : c'est le cas des résistances de cible, conférées par des mutations dans le gène codant pour l'enzyme dont l'activité est normalement bloquée par l'herbicide. Elle peut être multigénique : c'est le cas des résistances de métabolisation (qui empêchent l'action de l'herbicide par sa dégradation rapide dans la plante). Une résistance monogénique se met en place plus rapidement qu'une résistance multigénique, qui peut nécessiter l'accumulation de plusieurs facteurs de résistance, par croisements au cours des générations.

- Les effets secondaires : la résistance peut avoir un "coût" pour l'organisme, c'est-à-dire réduire sa capacité à survivre et produire des descendants à cause de l'activité réduite de l'enzyme mutée, par exemple. Ce coût s'oppose à la prolifération des plantes résistantes, surtout les années où la pression de sélection (l'herbicide) n'est pas appliquée.

Plusieurs mécanismes de résistance à un même herbicide, à déterminismes génétiques différents, peuvent coexister chez un même individu. Certains mécanismes peuvent conférer une résistance à plusieurs substances herbicides (résistance croisée).

• Nature de l'herbicide et modalités d'utilisation

Certains modes d'action touchent des cibles pour lesquelles les mutations sont létales, donc peu propices à produire une plante résistante, alors que pour d'autres les mutations viables sont plus fréquentes et peuvent plus facilement induire des plantes résistantes (cf. Chapitre 1 et section suivante). La structure chimique de l'herbicide conditionne la rémanence dans l'environnement, qui peut être plus ou moins forte et augmente le risque de sélection de la résistance, et aussi la facilité des processus de dégradation dans la plante.

L'efficacité du désherbage, qui est fonction de l'herbicide, de la dose et des conditions d'application, joue un rôle majeur. Une forte efficacité favorise la sélection rapide de résistances liées à la cible, mais elle réduit la taille des populations soumises à sélection. L'emploi d'herbicide à dose réduite, qui se traduit par un plus fort taux de survie, favoriserait l'évolution progressive de résistances multigéniques, surtout chez les espèces allogames. L'utilisation de plusieurs herbicides, en mélange, en séquence (à des dates différentes sur une même culture) ou en rotation (sur plusieurs saisons culturales), peut ralentir l'évolution de la résistance (cf. section 3.2.3).

• Biologie des espèces adventices

Le mode de reproduction (allogamie ou autogamie) ainsi que la quantité de semences produites influent sur la vitesse d'évolution de la résistance. Le taux de renouvellement et la longévité du stock de semences contenu dans le sol sont également importants : chez les espèces à graines très dormantes et à survie longue, des individus sensibles sont réintroduits chaque année à partir du stock semencier du sol.

Enfin, la propagation spatiale de la résistance aux herbicides varie selon les capacités de dispersion des espèces, par les semences et/ou le pollen. Une dispersion très rapide de la résistance au glyphosate a été constatée pour *Coryza canadensis* aux Etats-Unis : 5 ans après l'observation de la première population résistante, la résistance concernait 44 000 hectares. Cette expansion s'explique par la quantité de semences produites (70 à 200 000 par plante) et les caractéristiques de ces graines (légères et dotées d'une aigrette) qui permettent leur dispersion par le vent à au moins 500 mètres des plantes mères. La dispersion anémophile du pollen permet aussi la diffusion de la résistance à d'autres populations à des distances de dispersion maximales de l'ordre de quelques kilomètres pour le vulpin et l'ivraie raide, par exemple. C'est aussi par le pollen que des adventices apparentées peuvent échanger des gènes de résistance, comme pour les amarantes résistantes au glyphosate dans les champs de VTH aux Etats-Unis.

• Pratiques culturales et paysage

L'usage d'herbicides ayant le même mode d'action en succession dans la rotation, comme l'exemple américain le confirme, accroît la pression de sélection et les probabilités de faire apparaître des résistances. A l'opposé, la diversification des cultures, en particulier l'alternance culture d'hiver-culture de printemps, permet de gérer les adventices concernées sans imposer la même pression de sélection.

A l'échelle du paysage agricole, des simulations montrent que la dispersion de la résistance est plus efficacement ralentie par la diminution du nombre de parcelles (et de bordures) où le glyphosate est utilisé, que par la diversification des cultures.

3.2.2. Les résistances par classe d'herbicides

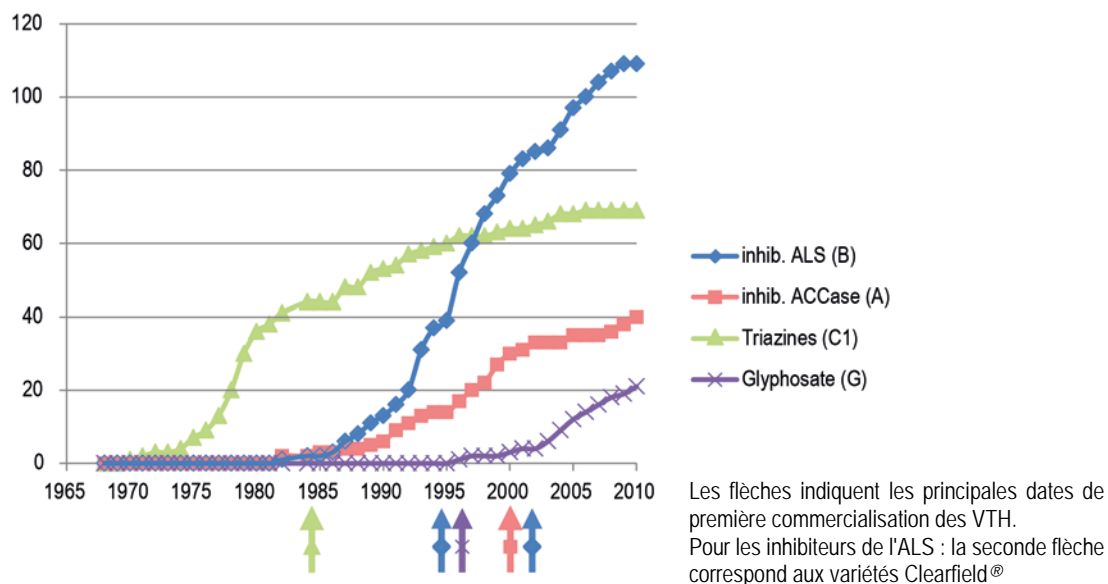
Les dates et les cinétiques d'apparition des résistances sont variables selon les modes d'action (Figure 3-2). A l'intérieur de chaque mode d'action, le nombre de cas de résistance répertoriés par herbicide est souvent lié aux surfaces et à la fréquence des traitements avec chaque produit.

• Inhibiteurs de l'ACCCase (Groupe A)

Les herbicides de ce groupe sont des anti-graminées. Des populations de graminées résistantes sont apparues dès le début des années 1990. Actuellement 40 espèces de graminées ayant acquis une résistance aux inhibiteurs de l'ACCCase sont recensées dans le monde, dont 10 en Europe (et pour la France : vulpin, folle avoine, ray-grass d'Italie et ivraie). Il existe plusieurs mutations possibles de la cible. Selon la mutation, la plante est résistante à une seule, à deux ou aux trois familles que comporte le groupe A. La mutation la plus fréquente en Europe n'est pas associée à un coût sur la reproduction. Cependant, les mutations de la cible n'expliquent qu'une faible part de la résistance, qui est majoritairement due à des mécanismes par métabolisation qui sont moins connus. L'évolution de la résistance aux inhibiteurs de l'ACCCase est liée à leur usage très fréquent comme anti-graminées des céréales d'hiver dans les années 1980 et 90. Cette résistance est actuellement très développée : pour le vulpin, elle concerne la quasi-totalité des parcelles du quart Nord-Est de la France.

Figure 3-2. Dynamique temporelle du nombre d'espèces ayant développé une résistance à l'un des quatre principaux modes d'actions herbicides associés aux VTH

Nombre de biotypes résistants



Données issues du site www.weedscience.org (février 2011)

• Inhibiteurs de l'ALS (Groupe B)

Les inhibiteurs de l'ALS sont le mode d'action herbicide présentant le plus grand nombre d'espèces ayant acquis une résistance - actuellement 109 dans le monde -, et pour lequel l'évolution de la résistance (à partir du milieu de la décennie 80) a été la plus rapide. En Europe, 15 espèces sont résistantes (dont trois en France ; Tableau 3-3). Ces apparitions ont été indépendantes de l'utilisation des variétés Clearfield® commercialisées à la fin des années 90, voire après 2000 en Europe. Remarquons que la commercialisation de ces dernières est accompagnée d'un ensemble de conseils portant sur la fréquence d'utilisation de ces variétés et des herbicides inhibiteurs de l'ALS dans la rotation.

Tableau 3-3. Les espèces adventices montrant de la résistance aux inhibiteurs de l'ALS en Europe
(d'après www.weedscience.org, février 2011)

	Espèce	Pays
Graminées	<i>Alopecurus myosuroides</i> (vulpin)	Allemagne, Belgique, France , Grande-Bretagne
	<i>Avena fatua</i> (folle avoine)	Grande-Bretagne
	<i>Apera spica-venti</i> (jouet du vent)	Allemagne, Pologne, République Tchèque
	<i>Echinochloa crus-galli</i> (panic crête de coq)	Italie, Yougoslavie
	<i>Lolium perenne</i> (ray grass)	Allemagne
	<i>Lolium rigidum</i> (ivraie raide)	France , Espagne
Autres espèces	<i>Alisma plantago-aquatica</i> (plantain d'eau)	Espagne, Italie, Portugal
	<i>Amaranthus retroflexus</i>	Italie, Yougoslavie
	<i>Conyza canadensis</i> (vergerette du Canada)	Pologne
	<i>Cyperus difformis</i>	Espagne, Italie
	<i>Matricaria chamomilla</i> (matricaire camomille)	Allemagne
	<i>Papaver rhoeas</i> (coquelicot)	Danemark, Espagne, France , Grande-Bretagne, Grèce, Italie
	<i>Scirpus mucronatus</i>	Italie
	<i>Sinapis alba</i>	Espagne
	<i>Stellaria media</i>	Danemark, Grande-Bretagne, Irlande, Norvège, Suède

Certaines mutations confèrent la résistance à pratiquement toutes les molécules du groupe, d'autres à seulement 2 des 5 familles qu'il comporte. La fréquence des mutations conférant la résistance, et l'absence de coût associé expliquent que les individus résistants de cible soient fréquents dans les populations avant même une exposition aux inhibiteurs de l'ALS. La mutation de cible n'est pas le seul mécanisme en jeu ; le plus répandu chez les graminées en Europe semble être la métabolisation (tous les inhibiteurs de l'ALS autorisés en France sont métabolisables).

Les inhibiteurs de l'ALS exercent une forte pression, en raison de leur très bonne efficacité sur plantes sensibles et de leur activité résiduelle dans le sol. Du fait de leur spectre d'action étendu (anti-dicotylédones et anti-graminées), ils ont été intensément utilisés dans une large gamme de cultures. D'où certainement la rapidité de l'apparition des phénomènes de résistance : les premiers cas ont été observés aux Etats-Unis, sur deux espèces, 5 ans seulement après la première commercialisation d'une sulfonyle-urée ; en Italie, l'amarante est devenue résistante en monoculture de soja après 5 années d'application. Pour le vulpin, une résistance a été constatée en France après seulement 3 années consécutives de traitement.

L'étendue actuelle de la résistance aux inhibiteurs de l'ALS reste difficile à apprécier. En Grande-Bretagne, pour le vulpin (principale graminée adventice), la résistance est en augmentation et confirmée dans 21 comtés. En Espagne, pour l'ivraie (graminée prédominante dans les céréales), la prévalence de la résistance diffère selon les régions ; dans la plus touchée, la Catalogne, 60% des parcelles sont concernées.

• Triazines (groupe C2)

Les triazines sont le deuxième groupe pour le nombre de cas de résistance constatés dans le monde. La résistance est apparue dès 1968 chez le séneçon aux Etats-Unis ; il s'agissait du premier cas répertorié de résistance à un herbicide. Actuellement, 69 espèces ont acquis de la résistance dans le monde (dont 21 en France), essentiellement dans le maïs, les vignobles et les vergers. Le gène muté, situé dans le génome chloroplastique, est associé à une perte d'efficacité de la photosynthèse et a un coût important sur la valeur sélective en l'absence d'herbicide. Les colzas résistants à l'atrazine en Australie de l'Ouest ne sont pas associés à une recrudescence de l'apparition de populations résistantes.

• Glyphosate (groupe G)

Le premier cas de résistance au glyphosate a été détecté en 1996 en Australie, chez l'ivraie. Actuellement 21 espèces présentant une résistance sont recensées dans le monde, dont seulement 5 en Europe : 3 espèces de vergerette (*Conyza*) et 2 ivraies (*Lolium*), dont une en France apparue dans des vignobles. Il existe plusieurs mécanismes de résistance. Les niveaux de résistance conférés ne sont pas toujours élevés et des coûts associés existent parfois sur la reproduction des plantes. Avant les variétés TH, toutes les populations résistantes recensées correspondaient à des situations d'utilisation intensive de glyphosate pendant plusieurs années, comme herbicide non sélectif en pré-semis ou post-récolte des grandes cultures conventionnelles, et pour le contrôle des mauvaises herbes en friches, vignes et vergers.

L'adoption des variétés transgéniques TH a considérablement accéléré l'apparition des résistances, avec 6 espèces supplémentaires aux Etats-Unis et leur diffusion dans de nombreux Etats dans les cultures de coton et de soja. Chez la vergerette du Canada, la résistance est apparue après seulement 3 années de culture continue du soja RR®, et elle est actuellement présente sur plusieurs millions d'hectares. En Amérique du Sud, sur les 6 espèces présentant une résistance

au glyphosate, 4 sont observées dans des cultures de soja TH. Les systèmes culturaux caractérisés par une culture continue de soja transgénique TH ou la rotation soja TH - maïs TH, et le non-travail du sol ont été identifiés comme les principaux facteurs favorisant la résistance.

Cet impact est aussi amplifié par :

- une adoption généralisée de ces variétés sur de très grandes surfaces (la quasi-totalité des surfaces sont cultivées en soja ou en maïs dans certains Etats) ;
- un abandon des autres modes d'action herbicide, entraînant une pression de sélection forte et constante ;
- l'abandon du désherbage mécanique et du travail du sol, qui a un effet direct correspondant à la suppression d'un mode de gestion alternatif qui peut permettre de maintenir les populations adventices à faible densité. L'abandon du labour a également un effet indirect, *via* la suppression de l'effet tampon du stock semencier sur l'évolution de la résistance.

• Glufosinate (groupe H)

Jusque très récemment, aucune résistance à cet herbicide non sélectif n'était connue. En 2009, deux cas ont été rapportés, chez une graminée tropicale (*Eleusine indica*) en Malaisie, dans des plantations d'hévéa et de palmier à huile soumises à une utilisation très intensive du glufosinate (6 à 24 applications annuelles pendant 4 à 5 ans), sans lien avec la culture d'une VTH. En 2010, un cas d'Ivraie (*Lolium multiflorum*) résistante à la fois au glufosinate et au glyphosate a été identifié dans un verger aux USA.

• Les résistances multiples

Les résistances par métabolisation confèrent des résistances croisées à plusieurs modes d'action, en particulier, chez les graminées, aux inhibiteurs de l'ALS et de l'ACCCase. La résistance croisée par métabolisation affecte également plusieurs autres modes d'action importants. La détoxification par les cytochromes P450 est ainsi particulièrement susceptible de concerner les herbicides des groupes A et B, mais aussi C1, C2, K1, O et N (Tableau 3-4). En Australie, des ivraies résistantes par métabolisation à 9 modes d'action différents ont été observés. Plusieurs espèces cumulent des résistances aux inhibiteurs de l'ALS et à des herbicides d'autres groupes. En France, de telles résistances multiples ont été découvertes chez le vulpin.

Tableau 3-4. Espèces ayant acquis une résistance multiple aux inhibiteurs de l'ALS (groupe B) et à d'autres modes d'action alternatifs utilisables en blé, colza ou tournesol

Les cas, nombreux, de résistance multiple uniquement aux inhibiteurs de l'ALS (B) et inhibiteurs de l'ACCCase (A) ne sont pas répertoriés ici. Seules les espèces présentes en France sont listées. Source : <http://www.weedscience.org>

Espèce	Pays	Modes d'action	Nombre de molécules
Vulpin (<i>Alopecurus myosuroides</i>)	Belgique	A, B, C1, C2, K1	7
	Allemagne	A, B, C2, K3	6
Folle avoine (<i>Avena fatua</i>)	Canada	A, B, N	3
Panic (<i>Echinochloa crus-galli</i>)	Brésil	B, O	4
Gaillet (<i>Galium spurium</i>)	Canada	B, O	7
Ivraie (<i>Lolium multiflorum</i>)	Etats-Unis	A, B, K3	5
Ivraie raide (<i>Lolium rigidum</i>)	Australie	A, B, F3, K1, K2, K3, N	15
Coquelicot (<i>Papaver rhoeas</i>)	Espagne	B, O	2
Ravenelle (<i>Raphanus raphanistrum</i>)	Australie	B, F1, O	4
Sanve (<i>Sinapis avensis</i>)	Turquie	B, O	5
Sisymbre d'Orient (<i>Sisymbrium orientale</i>)	Australie	B, O	5

3.2.3. La gestion des risques de développement des résistances

Les méthodes de prévention et de gestion de l'apparition et de la diffusion des résistances sont maintenant réglementairement associées au dossier d'homologation des herbicides. Elles sont essentiellement fondées sur des modèles plus ou moins élaborés.

• Les bases théoriques de la prévention des résistances fondée sur des stratégies d'emploi des herbicides

Le principe de base est d'éviter qu'un nombre important de plantes soit soumis à une pression de sélection forte et continue. Il s'agit donc d'éviter de laisser se développer de grosses populations et de diversifier les modes d'actions des herbicides.

Trois stratégies de diversification des modes d'action existent, qui correspondent à des échelles de temps croissantes :

- par l'application en une seule fois de plusieurs modes d'action différents, associés en mélange,

- selon une séquence, ou "programme", qui définit l'application de différents modes d'action successivement sur la même culture, à l'échelle d'une saison culturale,
- selon une rotation qui définit l'emploi de différents modes d'action à l'échelle de la succession des cultures sur la parcelle.

Dans le cas des **résistances de cible**, la probabilité d'apparition d'un individu résistant d'emblée à plusieurs modes d'action (qui est égale au produit des taux de mutation conférant la résistance à chacun des modes d'action) est très faible. Mais si les herbicides sont utilisés successivement, un mutant résistant au second herbicide peut être produit par un mutant déjà résistant au premier, accumulant donc plusieurs mutations. La succession dans le temps des modes d'action est donc en théorie moins efficace que leur utilisation simultanée en mélange. Etudes théoriques et expérimentations ont en effet montré que l'utilisation en mélange de deux modes d'action différents permet de retarder efficacement l'évolution de la résistance de cible, tandis que la rotation des herbicides est moins efficace ou entraîne l'évolution de double résistance. L'efficacité des rotations ou des mélanges d'herbicides est meilleure en cas de résistance de cible monogénique et d'adventices cibles autogames et à dispersion limitée. La situation opposée est moins favorable : une allogamie de l'adventice favorise les fécondations croisées, et la dispersion des semences et du pollen favorisent les croisements entre différentes plantes résistantes et donc l'accumulation de mutations conférant la résistance à différents modes d'action.

Pour être efficace en prévention de la résistance de cible, la stratégie du mélange doit :

- associer des modes d'action ayant des efficacités et des rémanences similaires. Sinon, il y a risque d'évolution de résistance au mode d'action qui exerce la plus forte pression, c'est-à-dire le plus efficace ou le plus rémanent ;
- être appliquée à dose pleine pour chaque herbicide - ce qui augmente la quantité d'herbicide utilisée ;
- être appliquée lorsque la résistance n'est apparue pour aucun des constituants du mélange. Cette stratégie de mélange a par contre peu de chances d'être efficace en gestion, c'est-à-dire lorsque la résistance à l'un des constituants préexiste. C'est pourtant la stratégie privilégiée par les agriculteurs confrontés à une résistance, car ils souhaitent continuer à utiliser une molécule qui reste très efficace sur les espèces sensibles.

La **résistance par métabolisation** présente des difficultés de prévention et de gestion plus importantes que les résistances de cible, car elle confère des résistances à plusieurs modes d'action. L'efficacité des stratégies de mélange, séquence et rotation s'en trouve considérablement réduite. De plus, le profil des résistances croisées est difficilement prévisible et peut varier d'une population à l'autre. L'identification des molécules à associer pour prévenir ce type de résistance nécessiterait donc la réalisation de nombreux tests biologiques.

• La déclinaison des stratégies générales

Les stratégies de prévention/gestion des résistances décrites ci-dessus sont de portée générale et valent aussi bien pour les cultures non-TH que TH. Cependant, du fait du risque accru d'utilisation répétée d'un même mode d'action en cas d'adoption de VTH, plusieurs études se sont focalisées sur ce cas particulier. La plupart concernent la prévention de la résistance au glyphosate dans les systèmes intégrant des variétés qui y sont tolérantes ; quelques travaux plus récents envisagent les méthodes de prévention/gestion à associer à la culture de variétés tolérantes aux inhibiteurs de l'ALS.

La prévention de la **résistance au glyphosate** passe essentiellement par le maintien des adventices à des densités faibles, qui peut suffire à empêcher l'apparition ou à éliminer les gènes de résistance, étant donné le faible taux de mutations efficaces. Des comparaisons entre techniques, effectuées par simulations, ont montré que la rotation avec une culture non-TH et l'utilisation d'un autre mode d'action une année sur deux semble moyennement efficace : elle ne fait que ralentir l'évolution de la résistance. La stratégie "double knock-down", qui consiste à introduire un travail du sol au moment du semis ou à utiliser un second mode d'action en séquence avant ou après le glyphosate, est efficace, à condition que le deuxième herbicide ait une efficacité forte (> 95%) ou une très forte rémanence dans le sol et soit appliqué dès le semis.

Pour la prévention de la **résistance aux inhibiteurs de l'ALS**, les recommandations actuelles se fondent sur les principes généraux en gestion de la résistance - et non sur des résultats d'études (simulations ou expérimentations) spécifiques. Pour les variétés Clearfield®, les préconisations de la firme obtentric (BASF) reposent essentiellement sur la rotation : elles sont de ne pas cultiver de variété Clearfield® plus de deux années sur quatre sur une même parcelle, et de pratiquer une rotation des modes d'action herbicide. En France, les recommandations diffusées (par le Cetiom) pour prévenir la résistance dans les cultures de colza Clearfield® et de tournesol Clearfield® ou Express Sun® préconisent la rotation des modes d'action et l'adoption préventive de programmes herbicides, sur la VTH elle-même ainsi que sur les céréales de la rotation.

• La création de variétés multi-tolérantes

Suite à l'extension importante de la résistance au glyphosate chez les adventices, en lien avec la culture de variétés qui y sont tolérantes, la stratégie des firmes qui les commercialisent consiste à développer de nouvelles variétés tolérantes à deux herbicides ou plus. Cet empilement de tolérances faciliterait l'adoption par les agriculteurs d'une stratégie de prévention basée sur le mélange des modes d'action. Pour une bonne prévention des résistances, les composants du mélange doivent être efficaces sur l'ensemble de la flore présente ; les variétés en cours de développement sont donc bi-tolérantes à des herbicides à large spectre, appartenant aux groupes B, G, H, O et F2 (Tableau 3-5).

Tableau 3-5. Principales VTH en cours de développement, qui cumulent la résistance au glyphosate et une résistance à un second mode d'action

Groupes HRAC	Herbicides	Culture	Firme
G + B	Glyphosate + Sulfonyl-urée Glyphosate + Imidazolinone	soja, maïs maïs	Pioneer Hi-Bred BASF
G + F2	Glyphosate + inhibiteur de l'HPPD	soja	Bayer CropScience
G + H	Glyphosate + Glufosinate	maïs	Monsanto
G + O	Glyphosate + Dicamba Glyphosate + 2, 4 D	soja maïs, soja	Monsanto Dow Agrosiences

Pour tous ces herbicides retenus en complément du glyphosate, il existe au moins une espèce dans le monde présentant une résistance. Ceux pour lesquels la résistance est la plus limitée (de 1 à 3 espèces répertoriées) sont le glufosinate, les inhibiteurs de l'HPPD et le dicamba. Cette constatation suscite des interrogations sur l'intérêt de ces nouvelles VTH pour prévenir la résistance, qui est le principal avantage mis en avant par les firmes. Leur adoption pourrait aussi ré-augmenter l'usage d'herbicides moins utilisés, tel le 2,4 D, et favoriser une résistance existant déjà par ailleurs (16 espèces concernées actuellement).

• Méthodes de prévention de la résistance basées sur des pratiques de gestion non chimiques

La rotation des types de cultures (cultures monocotylédones et dicotylédones, d'hiver et de printemps/été...) permet de diminuer les densités de populations adventices et donc de lutter contre la résistance, à condition d'être accompagnée par une rotation des modes d'action herbicides. Ainsi, le maintien ou l'introduction de cultures de printemps est à privilégier dans les rotations céréales-colza. Les méthodes de lutte mécanique contre les adventices (travail du sol) sont souvent aussi un moyen opérationnel pour limiter les populations. Le labour est particulièrement efficace sur graminées, par exemple sur le vulpin. Le binage est une méthode intéressante en tournesol et aussi en colza. La pratique du faux semis accompagnée d'un semis retardé du tournesol est efficace contre les dicotylédones et particulièrement l'ambroisie.

Considérée individuellement, chaque pratique non chimique a une efficacité bien moindre que celle d'une application d'herbicide pour réduire la densité d'adventices. Cependant l'association de plusieurs de ces pratiques permet, par leurs effets complémentaires, d'obtenir une efficacité proche de celle des pratiques fondées sur les herbicides. La combinaison de plusieurs pratiques agronomiques à effet partiel peut donc limiter de manière satisfaisante la taille des populations adventices, ce qui diminue le risque d'apparition de résistance aux herbicides. Or l'introduction de VTH dans une rotation pourrait plutôt avoir pour conséquence un moindre recours aux méthodes non chimiques, voire une simplification ou un abandon du désherbage mécanique (voir Chapitre 4).

• L'adoption des mesures visant à limiter l'apparition de résistances

Bien que moins étudiée par les économistes que la résistance aux insecticides, la résistance aux herbicides a fait l'objet de quelques travaux, qui ne portent pas sur des VTH mais sur des variétés non-TH.

Une première série d'études s'est intéressée à l'arbitrage entre les coûts et les gains économiques des mesures visant à limiter l'apparition de résistance. Un travail appliqué au désherbage du blé en Australie a permis de montrer que le recours au désherbage mécanique ou le rallongement des rotations permettent de repousser la date à laquelle la culture du blé doit être abandonnée parce que plus assez rentable du fait des problèmes de désherbage. Une étude plus spécifique sur l'usage de glyphosate en pré-levée montre qu'il est intéressant d'utiliser cette matière active en combinaison avec le paraquat.

Une seconde série de travaux s'est intéressée à l'adoption effective de ces mesures. Une enquête auprès d'agriculteurs australiens a montré qu'ils n'adoptent les pratiques de gestion de résistance que s'ils sont assez conscients de l'apparition de résistance et qu'ils estiment peu probable l'homologation prochaine de nouveaux herbicides. Une analyse similaire sur données américaines, concernant la gestion de la résistance au glyphosate, a montré que parmi les 10 pratiques envisagées, les moins utilisées sont : la réalisation d'un labour, le nettoyage des équipements pour éviter la propagation des adventices résistantes entre champs, et l'usage combiné de plusieurs modes d'action herbicide. A l'inverse, les agriculteurs adoptent plus facilement des pratiques de surveillance des parcelles avant ou après application de l'herbicide et de traitements précoces, sur adventices encore peu développées. Les deux études soulignent l'importance du conseil et de l'information apportés aux agriculteurs pour favoriser l'adoption de bonnes pratiques. On notera une limite de ces études : elles négligent les interactions entre agriculteurs voisins, alors que celles-ci sont assez probables compte tenu de la diffusion possible des adventices résistantes entre champs.

Conclusions

Dans de nombreux pays, où les observations sont réalisées, on n'a pu que constater l'apparition rapide de formes adventices résistantes aux principales molécules herbicides quelques années après leur mise en œuvre. La vitesse d'apparition de ces formes adventices ainsi que leurs dynamiques d'expansion sont dépendantes des mécanismes biologiques et moléculaires de résistance mis en jeu, mais surtout des modalités d'utilisation des herbicides. Les phénomènes apparaissent cumulatifs et on constate aujourd'hui l'apparition d'adventices présentant des résistances multiples à plusieurs familles d'herbicides.

Pour certaines espèces de grande culture, dans les zones cultivées, ou à la frontière de celles-ci et des zones naturelles adjacentes, existent des apparentées sauvages et parfois des populations férales. Le transfert de gènes d'une variété tolérante dans le génome de ses apparentées sauvages est une réalité biologique. Ce phénomène constitue une autre voie importante d'obtention non contrôlée de formes adventices résistantes susceptibles de coloniser des espaces agricoles par l'avantage sélectif que leur confère la tolérance acquise. Ces formes, génétiquement proches de l'espèce cultivée parente, peuvent se retrouver en compétition dans les parcelles de production et constituer un problème pour la qualité des récoltes. Si la fréquence initiale de ce type de transfert demeure faible, la pression de sélection exercée par les herbicides renforce de fait la survie des formes hybrides et la diffusion potentielle de ces caractères.

En fonction de leur biologie, toutes les espèces ne sont pas concernées au même titre :

- maïs et soja n'ont pas d'apparentées sur le territoire français, ni de survie hivernale (dans les conditions climatiques actuelles) des repousses. Des modalités de prévention des flux de pollen entre variétés sont disponibles ;
- betterave, tournesol, et riz présentent un problème majeur de désherbage posé justement par des apparentées très proches (appartenant à la même espèce), donc avec lesquelles les croisements (et donc l'acquisition du trait TH) sont faciles ;
- le colza donne facilement lieu à des repousses et des populations férales non contrôlées, et les flux de pollen vers ses apparentées ne sont pas maîtrisables.

4. Evolution des systèmes de culture associés aux VTH

La mise en place d'une culture TH s'accompagne de l'évolution de la stratégie de désherbage chimique, mais aussi, de manière plus ou moins directe, de différentes pratiques à l'échelle de la parcelle.

Ces changements techniques ont en particulier différents impacts sur la composition de la flore adventice, qui peuvent générer de nouvelles difficultés de désherbage. La gestion de ces difficultés peut être abordée de deux manières, présentées dans la première partie de ce chapitre :

- soit de manière curative, par un nouvel ajustement des pratiques agricoles,
- soit de manière préventive, en adoptant dès l'introduction de la VTH, un ensemble de pratiques visant à prévenir ces difficultés de désherbage.

Les VTH qui déposent actuellement des demandes d'inscription en France sont des oléagineuses. La seconde partie du chapitre vise donc à décrire les tendances actuelles dans l'évolution des systèmes de culture français, qui constituent le contexte dans lequel ces VTH s'insèreraient, et qui est susceptible de jouer sur leur adoption et ses conséquences.

4.1. Les effets sur la flore de l'adoption des VTH et des pratiques associées

Tout changement dans le système de culture (type d'herbicide, rotation culturale, travail du sol, méthode de désherbage...), en modifiant les conditions de développement des adventices, sélectionne les espèces, et se traduit par une dérive de flore ; il peut également avoir un effet sur l'apparition et la diffusion des résistances aux herbicides.

4.1.1. La simplification du désherbage accompagnant l'adoption des VTH

Les flores adventices sont composées d'espèces ayant des caractéristiques biologiques très diverses, en particulier des périodes de levées, hivernales ou printanières, et des sensibilités différentes aux divers herbicides. Cela conduit à la nécessité de pratiquer des désherbages à plusieurs périodes et avec plusieurs produits afin de maîtriser l'ensemble de la flore.

Avec les cultures tolérantes au glyphosate, qui permet de lutter contre un large spectre d'adventices monocotylédones et dicotylédones et avec une grande souplesse vis-à-vis du stade de développement des adventices, les agriculteurs américains ont trouvé le moyen de simplifier leurs stratégies de désherbage chimique, remplaçant des combinaisons complexes de traitements de pré- et de post-levée et de molécules plus ou moins complémentaires par une application en post-levée d'un seul produit universel. Cette simplification s'est parfois aussi appliquée au système de culture entier, où soja, maïs et coton tolérants au glyphosate se succèdent dans la parcelle avec le même type de désherbage, ce qui a accentué les changements par rapport au système antérieur où chaque culture de la rotation était accompagnée de son propre cortège d'herbicides.

• Les changements de flore et l'émergence de nouvelles espèces à risque

Tout changement d'herbicide ou de technique de désherbage (labour, binage, mulching...) conduit à des dérives de flore, phénomène plus ou moins exacerbé et générateur de problèmes nouveaux pour l'agriculteur. Un phénomène appelé "inversion de flore" avait ainsi été observé en Europe suite à l'utilisation des dérivés hormonaux dans les années 1960, qui avait éliminé les dicotylédones en laissant le champ libre aux graminées.

De nouveaux problèmes sont ainsi apparus dans les cultures TH, voire même dans les autres cultures de la rotation. Bien que le spectre d'activité de l'herbicide associé à la VTH soit plus large, toutes les espèces n'y sont pas également sensibles. Par exemple, si les triazines sur colza TH en Australie contrôlent bien la ravenelle, elles sont moins efficaces sur l'ivraie qui peut se multiplier entre deux céréales, et se renforce donc comme adventice majeure dans les céréales de la rotation. Le glyphosate permet un meilleur résultat sur l'ensemble d'une rotation, mais des adventices qui n'étaient pas habituellement des espèces déterminantes dans le désherbage sont devenues préoccupantes aux Etats-Unis en système TH : *Sesbania exaltata*, *Amaranthus rudis* et *Conyza* sp. dans le soja ; ipomée dans le maïs ; *Comelina diffusa* dans le coton... Elles ont rapidement exploité les espaces libérés par le meilleur contrôle des adventices auparavant dominantes. Par exemple, des espèces à levée tardive et développement lent, habituellement en situation d'infériorité dans un peuplement d'adventices déjà établi, ont ainsi pu s'installer. Pour autant, ces espèces ne sont pas devenues moins sensibles au glyphosate, comme le montre la comparaison à 30 ans d'écart de populations d'ipomée. Des interventions complémentaires sont donc parfois devenues nécessaires pour contrôler ces plantes.

• L'apparition/extension d'adventices résistantes

Cette simplification du désherbage a généré les conditions les plus appropriées au développement de populations résistantes au glyphosate (voir section 4.2.2). Ainsi, des érigerons, des amarantes et des ambrisies résistants sont apparus à partir de 2000, et sont maintenant présents dans de nombreux Etats américains cultivant le coton, le soja et le maïs résistant au glyphosate : 9% de la surface semée en variétés Roundup Ready® aux Etats-Unis seraient concernés en 2010 (plus de 2% pour *Amaranthus palmerii*). Moins souvent évoquée est l'évolution de la sensibilité de certaines adventices. Par exemple, les doses nécessaires pour détruire le chénopode blanc ont progressivement augmenté au cours des 10 dernières années ; comme il est pour l'instant détruit par les doses homologuées, on ne parle pas de résistance.

4.1.2. La simplification du travail du sol

La simplification ou l'abandon du travail du sol sont fréquemment associés à l'introduction des variétés tolérantes à un herbicide total, aux Etats-Unis, au Canada et en Argentine. Cette tendance semble cependant plus marquée pour le soja ou le coton que pour le maïs. La motivation essentielle est le gain de temps et, dans une moindre mesure, la lutte contre l'érosion.

Historiquement, le travail du sol, et particulièrement le labour, était un élément-clé pour le contrôle des adventices, mais ses objectifs sont multiples et comprennent en premier lieu la création d'une structure du sol favorable à la levée et à l'enracinement de la culture (Encadré 4-1). Il convient de distinguer l'abandon du labour (travail du sol profond et "inversant", réalisé avec une charrue à soc) avec maintien d'un travail du sol plus superficiel, et l'abandon total du travail du sol, c'est-à-dire la pratique du semis direct. Ce dernier rend possible les couverts permanents ("mulchs vivants"), pratique innovante visant à améliorer la lutte contre l'érosion et limiter la lixiviation des nitrates.

Encadré 4-1. Les effets du travail du sol

Le travail du sol a de nombreux effets directs et indirects sur la flore adventice. Le labour (travail du sol réalisé avec une charrue à soc, qui découpe et retourne une tranche de sol.) est un cas particulier dans la mesure où il maximise généralement tous ces effets.

Le travail du sol :

- enfouit les semences adventices les plus récemment produites et remonte une partie des semences plus anciennes. Or la germination et la probabilité de levée diminuent fortement avec la profondeur des semences ;
- expose les semences à la lumière et les change de milieu, ce qui peut contribuer à lever des dormances et stimuler des germinations ;
- détruit, par arrachage et enfouissement, les plantes adventices ayant levé auparavant, avec une mortalité variable selon le stade de développement de l'advice, l'espèce et les caractéristiques du travail du sol. Le labour fragmente aussi les organes souterrains des espèces pérennes, ce qui en détruit certaines mais peut contribuer à en disperser d'autres ;
- fragmente les mottes de terre et produit une structure du sol plus fine, qui favorise l'enracinement des cultures et diminue la mortalité pré-levée des adventices ;
- réduit la présence de matière organique et résidus de culture en surface du sol. Une accumulation de ces résidus peut limiter l'efficacité de certains herbicides, en jouant le rôle de parapluie ou en absorbant les molécules à mode de pénétration racinaire. En cas de forte accumulation comme en semis direct, ces résidus peuvent par contre aussi être un obstacle à la levée des adventices ;
- peut, par l'enfouissement, protéger les semences adventices de la prédation par la macrofaune.

Le travail du sol est à l'origine de processus dont certains favorisent et d'autres défavorisent la levée et la reproduction des adventices ; de plus, ces effets et leurs poids relatifs dépendent des espèces adventices (pérennes ou annuelles, taille et persistance des semences). La diversité des outils utilisés pour le travail du sol et des conditions au moment de l'opération explique la variabilité des effets observés pour un "même" changement de pratique (abandon du labour, abandon du travail du sol). Enfin, les effets dépendent de l'échelle d'analyse : une augmentation des adventices à court terme (levée après l'opération) peut aboutir à une diminution à moyen et long terme (infestation des cultures de la rotation).

• Les effets sur la flore de l'abandon ou de la réduction de la fréquence du labour

Les effets observés du non-labour sont une augmentation :

- des graminées annuelles, notamment des espèces ayant des semences petites et/ou à persistance limitée (vulpin, ivraie, folle avoine). Le labour permet au contraire de réduire considérablement (de plusieurs ordres de grandeur) les fortes infestations, qu'elles soient résistantes à des herbicides ou non, et cet effet est visible dans la culture suivante, mais aussi durant plusieurs années ;
- des repousses de culture ;
- des adventices pérennes dont les organes souterrains étaient détruits par la charrue.

Les effets sont variables sur les adventices dicotylédones ; beaucoup sont des espèces à semences persistantes, peu sensibles au labour, ou qui peuvent même en bénéficier, l'enfouissement qu'il opère les protégeant de la prédation.

Si les effets du non-labour apparaissent très variables, selon notamment la flore initiale de la parcelle et la flore régionale, la tendance générale est un accroissement de la flore adventice, en termes de densité et de nombre d'espèces. Tous les travaux concordent sur le changement de la composition spécifique, avec une augmentation des pérennes et des graminées à semences petites et/ou à persistance limitée. Les effets peuvent même être visibles dans les parcelles voisines, notamment pour les espèces à dispersion par les animaux ou le vent.

Le non-labour a aussi pour conséquence une accumulation en surface de résidus phytotoxiques (que le labour enfouissait), qui peuvent compromettre la levée de la culture suivante, comme c'est le cas notamment des résidus de sulfonyle-urées vis-à-vis du colza et des céréales.

Dans les **parcelles en VTH**, la simplification du travail du sol représente un facteur de risque de diffusion du trait TH, par ses effets sur les repousses (celles de colza notamment). Il accroît également le risque d'apparition de nouvelles résistances par l'abondance des individus soumis à l'herbicide si les infestations à la levée ne sont pas maîtrisées.

- **Les effets sur la flore de l'abandon du travail du sol et de l'avancée des semis**

L'abandon de tout travail du sol produit des effets similaires à ceux de l'abandon du labour, en exacerbant les tendances observées. L'abandon du travail du sol induit également la présence de résidus végétaux en surface lors du semis, qui peuvent contribuer à maîtriser les adventices. Cet effet d'étouffement est particulièrement efficace avec les mulchs vivants, mais leur gestion est aussi délicate et ils sont souvent associés à une diminution du rendement. Enfin, l'augmentation de la compaction du sol et la dégradation du bilan hydrique souvent observées en semis direct peuvent modifier le type de flore présente.

Une autre conséquence possible de l'abandon du travail du sol est l'**avancée des dates de semis**, qui est rendue possible par la simplification des travaux de la ferme, et qui augmente le rendement potentiel en améliorant les conditions d'implantation et en allongeant la durée du cycle de la culture. Cependant, un semis avancé peut augmenter la présence des adventices déjà fréquentes, sauf si le changement de date est suffisamment radical pour que le semis ait lieu à une période où peu d'adventices lèvent. Inversement, le *retard* de semis est souvent conseillé comme moyen de lutte : il favorise la levée pendant l'interculture des adventices, qui pourront être détruites avant le semis de la culture par une pratique de faux semis. La simplification ou l'abandon du travail du sol ont aussi pour conséquence de réduire fortement le risque d'érosion, mais cet effet positif est généralement accompagné d'effets indésirables tels que l'augmentation de la compaction du sol, la dégradation du bilan hydrique et la réduction du potentiel de rendement.

4.1.3. La simplification des rotations et des assolements régionaux

Aux Etats-Unis, la tendance au semis direct sans labour était initialement développée grâce essentiellement à l'usage du glyphosate comme herbicide total en pré-semis. L'apparition de variétés tolérantes a apporté un outil nouveau améliorant ce système tout en conservant le même et unique herbicide. Cette adoption a entraîné une succession de traitements au glyphosate, quelle que soit la culture de la rotation, et confirmé l'abandon d'une série de pratiques contribuant à la maîtrise de la flore adventice : rotations plus longues, alternance des modes d'action des herbicides, utilisation de mélanges d'herbicides à modes d'action différents, programmes de lutte associant désherbage chimique et interventions culturales. Ces évolutions ont contribué à une simplification et à une homogénéisation des pratiques et des successions.

Dans d'autres pays (Argentine, Brésil), l'utilisation de VTH constitue l'opportunité de mettre directement en place ce système de culture simplifié qui est plus rentable à court terme, plus propice à l'industrialisation de l'agriculture et aux grandes exploitations, mais qui bouleverse les systèmes traditionnels et l'organisation du paysage. En Argentine, le développement de monocultures de soja permises par les VTH a conduit à la fois à un accroissement considérable de la production de soja, au détriment d'autres productions moins rentables (viande, lait...), mais aussi à une recrudescence du parasitisme, justifiant un accroissement des traitements insecticides et surtout fongicides sur soja.

4.1.4. Le recours à des herbicides supplémentaires

En principe, la situation de référence VTH consiste à ne traiter qu'en post-levée, et donc en fonction de la flore réellement présente. L'exemple des Etats-Unis a rapidement montré la mise au point de traitements complémentaires, comme pour des variétés classiques.

- **Le développement de programmes de désherbage**

Les problèmes émergents de dérive de flore et d'adventices résistantes ont entraîné l'expérimentation et l'adjonction d'autres options de désherbage. Il existe une large littérature technique concernant la comparaison des meilleurs

programmes de désherbage sur différents types de variétés, mais il est difficile d'en tirer des enseignements généraux tant les milieux, les années climatiques, les programmes de désherbage et les cultivars sont variés. Ces publications montrent l'effet de différents régimes de traitement (types de produits, périodes et séquences d'application) sur la réduction des adventices les plus abondantes ou les plus menaçantes.

- Les systèmes TH aux Etats-Unis

La ré-augmentation des quantités d'herbicides épandues sur les cultures TH aux Etats-Unis, (cf. section 2.3.3.) s'explique par des évolutions du désherbage nécessitées par celles de la flore. La multiplication dans les champs des adventices difficiles à détruire avec le glyphosate (parce qu'elles y sont moins sensibles que d'autres espèces, ou qu'elles lèvent après le traitement herbicide) a conduit à une augmentation des doses et/ou du nombre de passages de glyphosate (+39% pour le maïs, +200% pour le coton et +98% pour le soja par rapport aux recommandations initiales), et à l'usage additionnel d'autres herbicides, pour détruire spécifiquement les plantes résistantes. Ainsi, le "Roundup Ready® Corn 2 system" préconise des traitements en pré-semis (avec des substances des groupes K3, C1, C2 ou O). Ces produits supplémentaires doivent être épandus à des doses de matières actives bien supérieures à celle du glyphosate, et leurs profils écotoxicologiques sont nettement moins bons. Cette option technique reste attractive financièrement (coût des produits très bas), et au pire fait revenir à la situation d'une culture non-TH, mais avec la possibilité d'utiliser une matière active herbicide supplémentaire.

4.2. Conditions spécifiques à l'introduction des VTH en France

Pour préciser davantage les conséquences de l'adoption d'une culture TH, il faut tenir compte des conditions spécifiques à son introduction ; ces conditions recouvrent le contexte agronomique français actuel ainsi que son évolution prévisible. Les conséquences sur la flore adventice (dérive, apparition de résistance) dépendent ainsi de la rotation culturale dans laquelle s'insère la VTH, et notamment des autres cultures les plus souvent associées dans la rotation, des pratiques de gestion de flore utilisées et des espèces adventices majoritaires dans ces cultures. Une dérive de flore est plus probable si l'introduction de la VTH s'accompagne d'une homogénéisation des rotations et des pratiques. De même, le risque d'apparition de résistance à l'herbicide associé est élevé s'il y a perte de diversité dans les pratiques chimiques, le risque étant maximum pour les espèces adventices exposées de façon continue à un même mode d'action herbicide.

Ne sont considérées ici que les hypothèses d'introduction dans les rotations de colza Clearfield® et de tournesol Clearfield® ou Express Sun®, variétés toutes obtenues à partir de mutants et tolérantes à des inhibiteurs de l'ALS : soit une tolérance à l'imazamox (famille des imidazolinones) pour les Clearfield®, soit au tribénuron-méthyle (famille des sulfonyle-urées) pour Express Sun®. Le cas du maïs DUO (résistant à un inhibiteur de l'ACCCase) est aussi évoqué.

4.2.1. Les évolutions actuelles des systèmes de culture en France

Plusieurs évolutions, récentes ou en cours, des systèmes de culture sont susceptibles de jouer sur l'adoption des VTH et ses conséquences. Il s'agit de tendances lourdes, correspondant aux "moteurs" des évolutions générales de l'agriculture : accroissement de la productivité du travail, réduction du risque, concentration sur les cultures les plus rentables, qui ont conduit à la spécialisation des régions agricoles et des exploitations et à la simplification des rotations et du travail du sol. Les évolutions des rotations et des pratiques culturales qui favorisent le développement des adventices pourraient inciter à recourir aux VTH.

Ces évolutions des systèmes de culture ne sont qu'imparfaitement connues. En France, la seule source de données statistiquement représentatives est l'enquête "Pratiques culturales" réalisée par le service statistique du ministère de l'agriculture. Les derniers résultats accessibles actuellement sont ceux de l'enquête 2006 ; les données de la suivante, qui portera sur la campagne culturale 2010-11, ne seront pas disponibles avant 2012.

- L'évolution du travail du sol

Le fort couplage entre non-labour et VTH, mis en évidence en Amérique (cf. Chapitre 2), conduit à porter une attention particulière à la simplification du travail du sol. En France, on assiste à une diversification des modalités de travail du sol, marquée par une baisse de fréquence du labour - qui est rarement totalement abandonné - et une grande diversité des pratiques. L'enquête "Pratiques culturales" de 2006 a montré une progression rapide du non-labour (Encadré 4-2). Le labour reste souvent nécessaire pour contrôler certaines adventices.

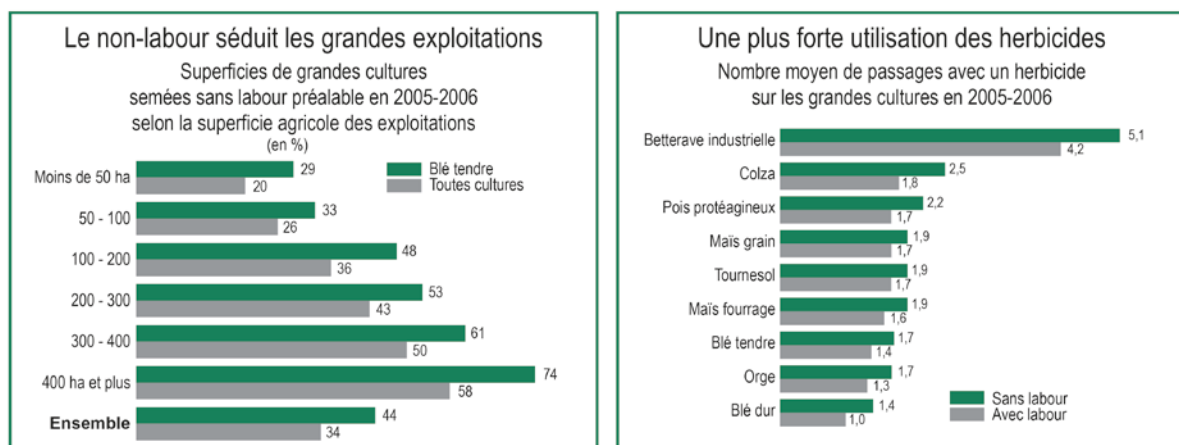
Encadré 4-2. Le non-labour en France en 2006

L'enquête "Pratiques culturales" de 2006, portant sur 12 900 parcelles en grandes cultures (9 espèces), a révélé que 34% des parcelles n'avaient pas été labourées pour la campagne 2005-06 ; ce taux n'était que de 21% en 2001. La pratique du semis direct est, elle, marginale : 0,5% seulement des surfaces. Cet abandon du labour est rarement complet et définitif : sur la plupart des parcelles, un recours périodique au labour est pratiqué pour gérer des situations difficiles de désherbage. Si 34% des parcelles n'ont pas été retournées en 2006, seuls 11% ne l'ont jamais été depuis 2000.

La proportion de parcelles non labourées et son évolution varient fortement selon les cultures : 58% en 2006 comme en 2001 pour le blé dur, 47% en 2006 pour le colza (contre 35% en 2001), 44% en blé tendre (21% en 2001), 28% en tournesol, 20% en maïs... Le non-labour est davantage pratiqué sur cultures d'hiver que de printemps ; une interculture brève incite à ne pas labourer. La simplification du travail du sol peut être limitée par les exigences de la culture : c'est le cas du tournesol, très sensible à l'état du sol lors de l'implantation (contact sol-graine puis développement du pivot).

Le taux de non-labour apparaît fortement corrélé à la taille des exploitations (Figure 4-1a) : il va de 20% pour les parcelles appartenant à des exploitations de moins de 50 ha à 58% pour celles des exploitations de plus de 400 ha. Le non-labour s'accompagne d'un emploi accru d'herbicides, avec 0,2 à 0,9 passage d'herbicide en plus selon les cultures (Figure 4-1b). Les rendements apparaissent légèrement inférieurs en cas de non-labour : l'écart entre les parcelles non labourées depuis 2000-01 et les parcelles labourées tous les ans est de 9% pour l'orge, 7% pour le maïs grain, 4% pour le blé tendre et le tournesol, 3% pour le colza.

Figure 4-1. Le non-labour en France en 2006



Source : Agreste - Enquête sur les pratiques culturales 2005

• La simplification des successions culturales

Les agronomes s'accordent sur l'évolution des successions culturales, qui seraient moins diversifiées, avec un retour plus rapide des mêmes cultures. On ne dispose pas de données, à l'échelle de la France, sur les rotations pratiquées et leurs évolutions. L'hypothèse d'une simplification des rotations est cependant confortée par l'évolution des assolements, dans lesquels quelques espèces (blé, colza, maïs) ont pris une place croissante – espèces les plus rentables et les plus sûres, qui bénéficient aussi d'un effort de R&D plus important d'amélioration génétique et de protection phytosanitaire, et d'un appui technique plus développé. Les cycles culturaux sont aussi moins diversifiés, avec l'augmentation de la part des cultures d'hiver - qui présentent l'intérêt d'une production supérieure grâce à un cycle de végétation plus long, et d'un évitement des stress liés aux sécheresses estivales. L'insertion d'une culture de printemps dans une rotation de type hiver dépend d'abord de contraintes climatiques et de calendrier de travail puis de facteurs économiques d'opportunité, et secondairement de stratégies de gestion de la flore adventice. Les inconvénients agronomiques et environnementaux de cette simplification des rotations ont conduit à la création d'une MAE (mesure agro-environnementale) "rotationnelle", visant à rediversifier les successions culturales : cette mesure, adoptée par un nombre limité d'agriculteurs, n'a pas modifié la tendance générale à la simplification.

La simplification des rotations est confirmée par une étude récente portant sur l'évolution des cultures, depuis 1970, dans le bassin de la Seine au sens large (23% de la SAU française). L'essor progressif du colza, à partir des années 1980, s'y est accompagné d'une simplification des successions, avec notamment l'importance prise par les rotations courtes colza - 2 céréales. Ces évolutions des assolements et rotations sont associées à une utilisation accrue de pesticides : une corrélation a été mise en évidence entre le % de surface en colza et le nombre de traitements herbicides (et insecticides) sur la culture, qui passe de 1,5 traitement herbicide lorsque le colza est peu présent à 2,5 s'il occupe plus de 20% des surfaces.

L'implantation de CIPAN (cultures intermédiaires pièges à nitrates), devenant obligatoire dans le cadre de la mise en œuvre de la directive "Nitrates", introduit en revanche dans les rotations un couvert présentant un cycle de végétation différent de

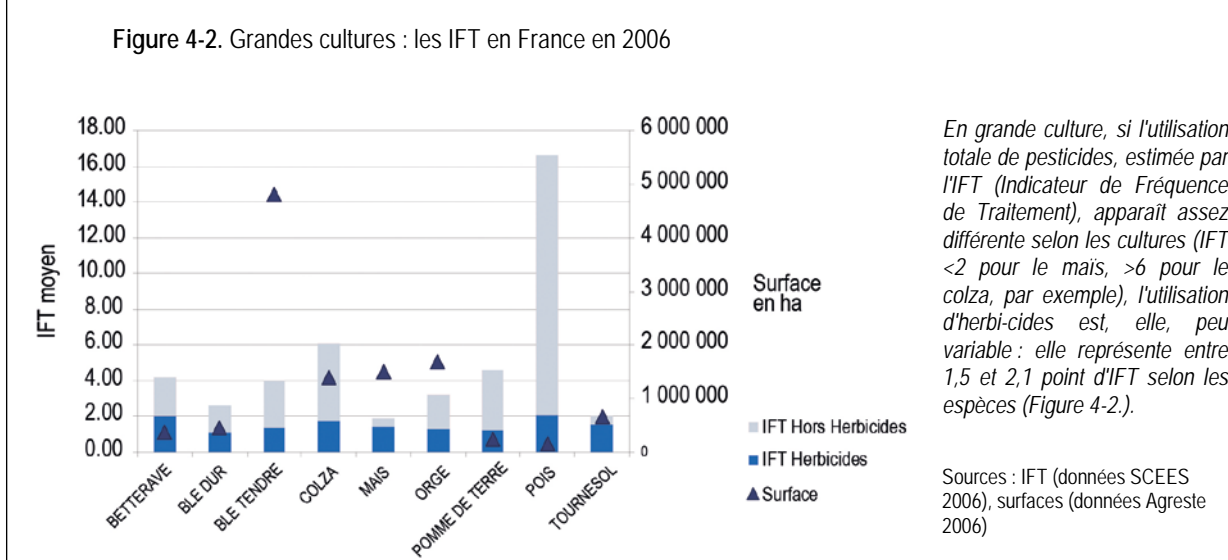
celui des cultures et susceptible d'"étouffer" certaines adventices. Certaines des espèces semées, telle l'avoine fourragère, sont connues pour leurs effets inhibiteurs sur les adventices dans la culture suivante. A côté de ces contributions à la maîtrise des adventices, l'implantation d'une CIPAN peut aussi avoir des effets négatifs, en empêchant la réalisation d'un faux-semis ou en nécessitant une destruction chimique du couvert.

- L'évolution des pratiques de désherbage

Le dépouillement des enquêtes "Pratiques culturales" de 1994, 2001 et 2006 avait montré (cf. étude Ecophyto R&D) qu'il n'y avait pas de baisse du recours aux pesticides, les IFT demeurant à des niveaux comparables sur la période - la baisse enregistrée des tonnages de pesticides vendus correspond à l'emploi de substances actives homologuées à des doses plus faibles. L'utilisation d'herbicides diffère peu en fonction des cultures : elle représente entre 1,5 et 2,1 point d'IFT selon les espèces (Encadré 4-3).

L'adoption en 2008, suite au Grenelle de l'environnement, du plan "Ecophyto 2018", a relancé l'intérêt pour les itinéraires techniques économes en pesticides et, concernant plus particulièrement les herbicides, pour les techniques de désherbage combinant contrôle mécanique et chimique des adventices. Si les expérimentations se sont développées dans ce sens, on ignore actuellement si les agriculteurs ont également modifié leurs pratiques. Les données de l'enquête "Pratiques culturales" 2011 montreront ce qu'il en est. Elles permettront également de mettre en évidence d'éventuelles évolutions du désherbage chimique (utilisation de classes d'herbicides différentes, de formulations commerciales ou de programmes de traitements associant plusieurs produits...). A l'échelle de la France, le bilan d'Ecophyto 2018 rendu public en octobre 2011 révèle une augmentation de 2,6% du nombre de doses unités (NODU) de pesticides vendues (hors traitements de semences) pour la période 2008-10, hausse due principalement aux herbicides.

Encadré 4-3. Le niveau de recours aux herbicides sur les principales grandes cultures en France



4.2.2. Types de rotations susceptibles d'intégrer des VTH et désherbage chimique des cultures concernées

En France, colza et tournesol sont intégrés majoritairement dans des rotations où ils succèdent à une céréale dans plus de 90% des cas. Les principales rotations sont ainsi : céréales-colza (colza-blé tendre-blé tendre ou colza-blé tendre-orge) dans l'Ouest, le Centre et le Nord-est ; céréales-colza-betteraves dans le Nord et céréales-tournesol (blé dur - tournesol) dans le Sud et le Sud-ouest. Le maïs est souvent cultivé en monoculture, ou en alternance avec un blé tendre. La betterave est semée presque uniquement après une céréale (blé tendre ou orge), dans des rotations pouvant aussi inclure un colza.

- Le désherbage des céréales

En céréales à paille (blé tendre, orge), l'usage renouvelé d'anti-dicotylédones dans les années 1960-70 a conduit à ce que les graminées constituent le principal problème adventice à maîtriser. Au cours des 20 dernières années, la lutte a reposé essentiellement sur l'utilisation d'anti-graminées foliaires appartenant à 2 modes d'action : les inhibiteurs de l'ACCase (classe A) et ceux de l'ALS (classe B). L'extension de la résistance aux premiers et un meilleur spectre d'action des seconds ont conduit à l'utilisation d'inhibiteurs de l'ALS en solution de remplacement. Actuellement, au moins un tiers de la surface en céréales serait traitée avec des inhibiteurs de l'ALS, et principalement l'association de 2 molécules de cette classe.

Avec le développement de résistance aux inhibiteurs de l'ALS, l'utilisation d'autres modes d'action est recherchée. Les choix possibles sont : d'une part les urées substituées (groupe C2, avec 2 molécules dont l'isoproturon), et d'autre part diverses molécules d'autres groupes (F1, K1, K3 et N). Ces alternatives présentent cependant des limites : les urées substituées ont une efficacité faible et irrégulière (dépendante des conditions climatiques) et peuvent poser des problèmes de phytotoxicité sur blé ; l'isoproturon n'est autorisé en France qu'à dose réduite et pour une seule application par campagne, et des résistances partielles ont déjà été identifiées (ray-grass au Royaume-Uni) ; les programmes qui associent les urées substituées à d'autres modes d'action (F1, K1, K3 ou N) ou combinent ces autres molécules entre elles auraient une efficacité variable et comprise entre 50 et 90% - c'est-à-dire moindre que celle du groupe B en l'absence de résistance. Les inhibiteurs de l'ALS restent donc très utilisés en céréales, et l'introduction d'un colza ou d'un tournesol tolérant à ces substances augmenterait la fréquence d'emploi de ces herbicides dans la rotation. La pression de sélection accrue et constante qu'ils exerceraient constituerait un risque pour la gestion des adventices en céréales à paille.

En maïs, le désherbage repose, depuis l'interdiction de l'atrazine, sur l'association de diverses molécules en pré- et post-semis. Les modes d'action disponibles sont très variés (classes B, C1, C3, F1, F2, K3 et O). Cependant, les sulfonyl-urées (groupe B) utilisées en post-levée constitueraient le mode d'action le plus utilisé, avec des substances des classes K3 et F2. La présence d'un maïs DUO dans une rotation maïs-blé est susceptible de favoriser l'évolution de la résistance aux inhibiteurs de l'ACCCase ou une résistance multiple aux inhibiteurs de l'ACCCase et de l'ALS, bien que les flores des deux cultures soient bien distinctes.

- **Le désherbage des oléagineux**

En colza, le désherbage passe essentiellement par l'application, entre le semis et la levée, d'herbicides à action racinaire : 5 substances appartenant à 3 modes d'action sont disponibles : classes F3 et O sur dicotylédones, classe K3 sur graminées et dicotylédones. Des anti-graminées spécifiques appartenant aux inhibiteurs de l'ACCCase peuvent être utilisés en post-levée. Alors que jusqu'en 2010 aucun inhibiteur de l'ALS n'était homologué sur colza, une molécule de cette classe (l'éthamet-sulfuron-méthyl) est actuellement en cours d'homologation en France. Efficace en post-levée sur diverses dicotylédones, elle constitue une solution de désherbage équivalente à l'usage d'une variété de colza tolérante aux inhibiteurs de l'ALS.

En tournesol, on ne disposait pas, jusqu'à présent, d'anti-dicotylédones de post-levée. En revanche, de nombreux modes d'action (classes K3, K1, F3, O) fournissent des herbicides à action racinaire utilisés en pré-semis et post-semis/pré-levée. Des inhibiteurs de l'ACCCase peuvent être employés en anti-graminées foliaires de post-levée. Hors VTH, aucun inhibiteur de l'ALS n'est homologué sur tournesol. Afin de conserver une diversité des modes d'action en désherbage des variétés Clearfield® et Express Sun®, le Cetiom recommande le maintien d'un traitement complémentaire de pré-levée à base d'herbicides des groupes K, O ou F.

Le désherbage chimique en oléagineux s'appuie actuellement sur une large gamme de molécules. L'introduction ou le remplacement d'une variété de colza ou de tournesol non-VTH par une VTH résulterait en une perte de diversité des modes d'action herbicides à l'échelle de la rotation céréales-VTH. Il faut rappeler par ailleurs que le désherbage mécanique et le désherbinage (qui associe désherbage mécanique de l'entre-rang et herbicide sur le rang) sont des alternatives efficaces à la gestion chimique des adventices dans les oléagineux, notamment en tournesol.

- **Le désherbage de la betterave**

Le désherbage des cultures de betterave comporte plusieurs applications d'herbicides en post-levée, associées à un désherbage mécanique. Le contrôle des graminées (vulpin, ray-grass) repose sur l'emploi d'anti-graminées inhibiteurs de l'ACCCase ; celui des dicotylédones fait appel à des mélanges de 2 à 6 molécules herbicides appartenant surtout à la classe C1, et aussi K3, N, O et B. Les dicotylédones les plus difficiles à éliminer sont le chénopode, la mercuriale et le chardon. Les betteraves adventices ne peuvent être désherbées que mécaniquement.

4.2.3. Les points critiques de la gestion des adventices en France

- **L'état des lieux des adventices résistantes**

Plusieurs adventices résistantes sont déjà présentes sur le territoire français. Six espèces sont concernées par la résistance aux **inhibiteurs de l'ACCCase** : le vulpin, deux folles avoines, deux ivraies (ray-grass et ivraie raide) et la digitale (graminée estivale). La résistance est surtout développée chez le vulpin et les ivraies, espèces très fréquentes en céréales d'hiver : actuellement, aucun bassin de production de grandes cultures n'est épargné. Un état des lieux réalisé en 2007 pour le vulpin a montré la présence de résistance à un ou plusieurs inhibiteurs de l'ACCCase dans la totalité des parcelles échantillonnées au hasard en Côte d'Or.

La résistance aux **inhibiteurs de l'ALS** est établie pour le vulpin, l'ivraie et le coquelicot ; elle vient d'être démontrée pour une troisième graminée, le brome stérile, et elle est suspectée pour une seconde dicotylédone, la matricaire camomille. L'extension de la résistance n'a pas fait l'objet d'enquête systématique. L'évolution semble préoccupante pour le coquelicot, espèce commune à la fois en céréales d'hiver et en colza, avec des populations très résistantes détectées récemment dans plusieurs régions. Des résistances doubles, aux inhibiteurs de l'ACCCase et aux inhibiteurs de l'ALS, sont présentes chez le vulpin et le ray-grass.

• Les espèces adventices présentant des risques de développement de résistance

Les adventices préoccupantes en termes d'apparition d'une résistance sont les espèces qui seraient présentes à la fois dans la VTH et dans les autres cultures de la rotation, et traitées avec le même mode d'action herbicide. Dans le cas de la résistance aux inhibiteurs de l'ALS, il s'agit donc principalement des adventices présentes à la fois en colza ou en tournesol et en céréales d'hiver. La situation diffère toutefois selon qu'il existe, ou non, des méthodes complémentaires pour gérer l'adventice (Tableau 4-1).

Les rotations céréales-colza TH sont les plus préoccupantes, car bon nombre d'adventices sont communes au colza et aux céréales d'hiver, et fréquentes dans les deux cultures. Les rotations céréales-tournesol TH sont *a priori* moins défavorables, car elles alternent des flores plus diversifiées (espèces hivernales ou printanières en céréales, estivales en tournesol). En rotation avec une autre culture d'été (soja, maïs ou sorgho), un tournesol TH conduirait à une forte homogénéité de la flore au cours de la rotation ; cependant, la situation semble moins défavorable du fait de la large gamme de modes d'action disponibles et utilisés dans ces autres cultures.

En **tournesol**, les espèces les plus susceptibles de développer des résistances sont l'ambrosie et l'ammi majeur, puis les crucifères, l'ivraie et la mercuriale. L'**ambrosie** est déjà localement présente en forte densité dans des parcelles en région Rhône-Alpes ; c'est une espèce qui produit de grandes quantités de semences. La richesse du sol en semences d'ambrosie, et la longévité (plusieurs dizaines d'années) de ces graines dans le sol, font qu'en cas d'adoption importante de tournesol tolérant à un inhibiteur de l'ALS (pour contrôler justement l'ambrosie), la sélection pourra s'opérer sur des populations extrêmement nombreuses d'une espèce dont on sait qu'elle a déjà développé de la résistance aux inhibiteurs d'ALS (aux Etats-Unis). L'**ammi majeur** est une adventice difficile à éliminer : en céréales, seules les sulfonyl-urées sont efficaces. Dans une rotation céréales-tournesol TH, les conditions sont réunies pour que l'espèce soit donc soumise à une pression de sélection constante par les inhibiteurs de l'ALS.

En **colza**, les espèces concernées sont nombreuses : quatre crucifères, trois géraniums, des graminées hivernales (dont les ivraies et le vulpin), cinq ombellifères (dont l'ammi majeur) et le coquelicot. Or les herbicides appartenant à d'autres modes d'action que les inhibiteurs de l'ALS sont d'une moindre efficacité, voire inefficaces, sur toutes ces espèces. Enfin, les résistances croisées semblent concerner particulièrement les graminées, les crucifères et le coquelicot (cf. Chapitre 3).

Tableau 4-1. Principales situations dans lesquelles l'introduction de colza ou de tournesol TH présente un risque vis-à-vis de l'apparition de résistance aux herbicides

Culture TH	Rotation	Adventices	Prévention-gestion de la résistance		Risque global
			Herbicides alternatifs	Méthodes non chimiques	
Colza tolérant à l'imazamox	colza-céréales	graminées hivernales	Risque de résistance multiple	Introduction culture de printemps, faux semis	+++
		crucifères			++
		géraniums			++
		coquelicot			++
		ombellifères (<i>Ammi majus</i> , <i>Anthriscus caucalis</i>)	En colza seulement		++
Tournesol tolérant à l'imazamox ou au tribenuron- methyl	tournesol-blé	tournesol adventice	Non		+++
		ray-grass	Risque de résistance multiple	Faux semis	+++
		ammi majeur	En tournesol seulement		++
		ambrosie	Nombre limité en tournesol	Faux semis, semis tardif du tournesol	++
		crucifères			+
		mercuriale			+

Les couleurs indiquent l'efficacité des méthodes de prévention-gestion : vert clair = efficace, orange = moyennement efficace, rouge = peu efficace.

Encadré 4-4. Les débuts des VTH en France

- Les recommandations actuelles des instituts techniques

Les recommandations diffusées par le Cetiom (<http://www.cetiom.fr>) pour prévenir la résistance dans les cultures de VTH Clearfield® ou Express Sun® préconisent la rotation des modes d'action et l'adoption de programmes herbicides, sur la VTH elle-même (maintien d'un traitement complémentaire de pré-semis ou pré-levée à base d'herbicides classiquement utilisés sur les variétés conventionnelles), ainsi que sur les céréales en rotation avec la VTH. En colza comme en tournesol, ces programmes intégreraient des molécules des groupes F1, F3, K1, K3 ou O. Sur céréales, il est recommandé de mettre en œuvre des programmes herbicides d'automne, utilisant surtout les groupes C2, K1, K2, K3 et N, contre la résistance des graminées aux inhibiteurs de l'ALS lorsque l'imazamox est introduit dans la rotation.

- Les adventices à risque de résistance multiple

Les espèces adventices présentes en France et ayant développé fréquemment une résistance dans d'autres régions du monde sont susceptibles de reproduire le même scénario en France. Bien qu'une diversité de modes d'action puisse être maintenue par la mise en œuvre de programmes herbicides dans chacune des cultures de la rotation, cette stratégie privilégie quelques modes d'action alternatifs aux inhibiteurs de l'ALS, parmi lesquels le groupe K3 (utilisables à la fois en céréales, colza et tournesol) et le groupe O (en colza et tournesol). Or des résistances sont apparues pour ces deux modes d'action. Pour le groupe K3, les espèces concernées sont des graminées (vulpin, ray-grass, ivraie, pied-de-coq). Pour le groupe O, 28 espèces résistantes sont répertoriées, dont 5 le sont à une molécule chimiquement très proche de celle utilisée en colza et tournesol. D'autre part, plusieurs espèces présentent des biotypes résistants à la fois aux inhibiteurs de l'ALS et aux modes d'action alternatifs en céréales, colza ou tournesol (cf. Chapitre 3). Les mécanismes de ces résistances ne sont pas toujours connus, mais il est probable qu'il s'agisse le plus souvent de résistances croisées non liées à la cible, particulièrement susceptibles de se développer lorsque l'efficacité d'un programme herbicide n'est pas totale.

- Une consommation accrue d'herbicides

Ces méthodes de prévention-gestion des résistances fondées sur la diversification des modes d'action utilisés ont un impact sur l'usage des herbicides mesuré par l'IFT (Indicateur de fréquence de traitement). La culture d'une VTH avec usage unique de l'herbicide associé en une seule application permet de réduire l'IFT à 1. L'utilisation recommandée d'un second mode d'action en séquence dans la VTH va donc tendre à ré-augmenter l'IFT, vers une valeur plus proche de celle observée en variété conventionnelle (l'IFT herbicide de référence 2008 pour la France entière est de 1,94 pour le colza et 1,75 pour le tournesol). La préconisation d'un programme de désherbage d'automne dans la céréale qui suit ou précède la VTH va également dans le sens d'un IFT majoré à l'échelle de la rotation, puisque beaucoup d'agriculteurs ne font actuellement qu'une seule application d'herbicide en blé (l'IFT herbicide de référence 2008 est de 1,64).

Tableau 4-2. Points de vigilance sur l'évolution de la flore adventice dans les rotations pouvant intégrer une VTH en France

Espèce pouvant faire l'objet de VTH en France <i>Classe d'herbicide associée (syst.TH)</i>	Bénéfices attendus de la stratégie TH en termes de contrôle des adventices	Principaux types de cultures avec lesquelles la VTH peut être en rotation	Classes d'herbicides utilisées dans la rotation	Points de vigilance en cas d'introduction d'une VTH dans la rotation
tournesol <i>classe B</i>	adventices difficiles à éliminer : datura, chanvre d'eau, liseron des haies adventice apparentée : tournesols "sauvages" espèces envahissantes : ambroisie, chanvre d'eau espèce parasite : <i>orobanche cumana</i>	en rotation avec céréale à paille (majoritairement blé)	soit A soit B quand il n'y a pas de résistances à la classe B dans les adventices	- croisements possibles avec les tournesols "sauvages" adventices - des résistances à des herbicides de la classe B (entre autres l'imazamox) repérées chez l' ambroisie aux USA et au Canada
colza (d'hiver) <i>classe B</i>	adventices difficiles à éliminer : géranium, anthriscue nombreuses adventices apparentées : moutardes, cameline, navette, ravenelle, roquette, autres Brassicées espèce parasite : <i>orobanche rameuse</i>	en rotation avec céréale à paille	soit C2, F1, K1, K3, N envisageables quand il y a déjà des résistances	- croisements possibles avec nombreuses adventices apparentées, notamment la sanve et la ravenelle , adventices communes aux autres cultures de la rotation - des résistances à des herbicides de la classe B détectées chez le coquelicot et le vulpin en France
maïs <i>classe A</i>	adventices difficiles à éliminer : graminées estivales, amarante, arroche, et vivaces (liseron des haies, chardons)	en rotation avec céréale à paille (blé tendre) monoculture		- des résistances à des herbicides de la classe A (folle avoine en France)

Conclusions

Les VTH apparaissent comme un outil de simplification du désherbage, efficace (à court terme du moins), dans des systèmes de culture qui favorisent le développement des adventices. Elles se positionnent ainsi très bien dans les évolutions à l'œuvre (orientées par l'accroissement de la productivité du travail, la réduction du risque, la spécialisation des régions et des exploitations, la simplification des rotations, le rôle majeur des pesticides dans la logique agronomique des systèmes dominants...), qu'elles auront tendance à renforcer.

En France, le recours aux VTH irait plutôt à l'encontre de la recherche d'une diversification des méthodes de contrôle des adventices, cherchant à davantage utiliser les méthodes agronomiques (rotations...) et mécaniques. Il lèverait des contraintes qui limitent actuellement la baisse de fréquence du labour. L'adoption des VTH et ses effets dépendront bien sûr des conditions de leur utilisation ; leur emploi volontairement limité dans l'espace et dans le temps, et leur insertion dans des systèmes de culture mettant en œuvre de bonnes pratiques agronomiques réduiraient les risques d'effets défavorables pour la pérennité de la stratégie TH et sur la consommation d'herbicides.

Seul un suivi des pratiques culturales accompagnant l'utilisation des VTH actuellement proposées permettrait de déterminer leurs conditions réelles d'emploi et de préciser leurs éventuelles conséquences sur la flore adventice et sur la consommation de pesticides.

5. Les effets sur l'environnement

Une des caractéristiques essentielles de l'innovation que constituent les VTH est d'associer une espèce végétale et une molécule herbicide dans le cadre d'un usage agricole. L'étude des impacts des VTH sur l'environnement doit donc prendre en compte cette caractéristique, leurs effets relevant potentiellement de la variété végétale et de la molécule herbicide associée.

Les effets sur l'environnement, examinés dans ce chapitre, concernent à la fois les composantes biotiques et abiotiques de l'écosystème. Sont donc présentées des données de contamination chimique de l'environnement ainsi que des données relatives aux impacts sur les entités biologiques non-cibles de l'herbicide. Les données de contamination concernent essentiellement les compartiments eau et sol, et les flux d'herbicides qui s'établissent au sein, ou entre ces compartiments. Les entités biologiques non-cibles incluent les microorganismes, la flore en dehors de la parcelle, ainsi que la faune vivant à l'intérieur et extérieur de la parcelle. Enfin, la première entité biologique non-cible est la VTH elle-même : elle constitue un des premiers milieux récepteurs. Ce chapitre présente donc également des informations se rapportant aux résidus des herbicides dans les VTH.

5.1. Contaminations de l'environnement, milieux aquatiques et sols

Après la pulvérisation, les molécules herbicides se trouvent réparties entre la plante, le sol, dans lesquels une partie pénètre et s'infiltré, les eaux de ruissellement et l'atmosphère. Selon le stade de développement de la plante et des adventices, la quasi-totalité de l'herbicide pulvérisé peut dans certains cas se retrouver dispersé directement dans l'environnement. La Figure 5-1 récapitule les différentes voies de transfert (mouvement des substances dans les plantes, le sol, les eaux et l'air) et de transformation (dégradation des molécules en métabolites) des pesticides dans l'environnement.

L'hydrolyse est la réaction de dégradation de l'herbicide avec l'eau.

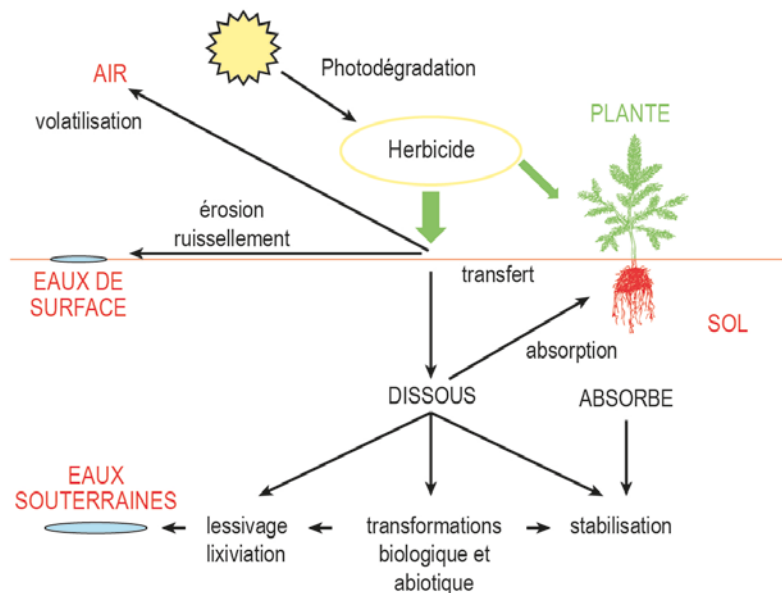
La phototransformation est une dégradation induite par la lumière solaire.

La biodégradation consiste en la dégradation par les microorganismes présents dans le milieu, pouvant mener à une minéralisation complète de l'herbicide.

Tous les herbicides ne sont pas sensibles à toutes ces voies de transformation.

Le transfert et la transformation des substances herbicides dépendent de leur structure chimique ainsi que de caractéristiques propres au milieu : conditions climatiques, nature et composition du sol et des eaux, nature des microorganismes présents dans ces environnements...

Figure 5-1. Processus de transfert et de transformation des pesticides dans l'environnement



D'après Mougin

5.1.1. Dégradation des substances herbicides dans les sols et les eaux

Après leur transfert dans les divers compartiments du milieu, les herbicides y sont dégradés avec des vitesses variables qui dépendent de la réactivité de l'herbicide lui-même (molécule mère) et de ses produits de dégradation. La persistance d'un herbicide est évaluée dans l'eau, le sol et les systèmes eau-sédiments ; elle est généralement exprimée en "durée de demi-vie". Cet indicateur correspond au temps nécessaire pour que 50% de l'herbicide soit dégradé. Plus la durée de demi-vie est courte, plus la persistance est faible. La persistance des produits de dégradation (ou métabolites), également exprimée en durée de demi-vie, peut être très différente (plus grande ou plus petite) de celle de l'herbicide lui-même.

• Dégradation par hydrolyse

Certaines molécules herbicides sont réactives au contact de l'eau. Leur hydrolyse est alors susceptible de se produire dans tous les milieux humides, y compris la surface d'un végétal, ou le sol dans lequel elle peut être éventuellement plus importante

que la biodégradation. Le pH du milieu conditionne souvent l'efficacité de l'hydrolyse, et donc la durée de demi-vie des herbicides. En conséquence, une même molécule peut présenter une persistance très faible ou très grande en fonction du pH.

- **Dégradation par photolyse**

Le rayonnement solaire peut également contribuer à la dégradation d'une molécule herbicide dans n'importe quel compartiment éclairé par le soleil, dès lors que cette molécule est capable de l'absorber, ce qui n'est pas toujours le cas. L'intensité de la photolyse est fonction de l'intensité de lumière reçue. Dans le cas des VTH, les herbicides sont en général pulvérisés sur des plantes déjà développées. Les feuilles s'orientant vers le soleil, elles reçoivent plus de lumière qu'un sol nu dont la surface est moins lisse, ce qui peut favoriser la photolyse si la substance herbicide y est sensible.

- **Dégradation microbienne (biodégradation)**

La biodégradation, ou dégradation microbienne, est le premier mécanisme de dégradation des herbicides **dans les sols**. Les herbicides étant pour la plupart des xénobiotiques, ils n'existent pas de façon naturelle dans les écosystèmes. De ce fait, contrairement aux mécanismes d'hydrolyse et de photolyse, les mécanismes biologiques de dégradation de ces molécules ne sont pas systématiquement et "spontanément" présents dans l'environnement. Cependant, les communautés microbiennes du sol sont capables d'adaptation rapide à ces molécules (phénomène dit "d'adaptation des sols"), ainsi que le démontre l'étude de la dégradation de l'atrazine. Dans les premiers temps d'utilisation de cet herbicide, aucune dégradation de la molécule n'était observée dans les sols des parcelles traitées. Après plusieurs années d'application, une dégradation microbienne relativement rapide a été mise en évidence.

La préexistence des mécanismes de biodégradation ou l'adaptation des sols permettent donc la biodégradation de toutes les molécules mères et de leurs métabolites, avec cependant une efficacité plus ou moins importante : les métabolites les plus mobiles et les moins biodégradés peuvent ainsi être retrouvés dans les eaux souterraines et de surface, y compris longtemps après que des interdictions d'usage aient été prononcées (cas de l'atrazine et de ses dérivés).

5.1.2. Déclinaison pour les herbicides concernés

Les propriétés physico-chimiques des herbicides étant directement liées à leur structure chimique, il n'est pas possible d'extrapoler les résultats obtenus pour une molécule à l'ensemble de la classe HRAC à laquelle elle appartient, ni même à sa famille de molécules. L'ESCo a donc collecté de façon spécifique les données relatives au devenir dans l'eau et le sol de 8 molécules herbicides associées à des VTH : cycloxydime (classe A), tribénuron-méthyle et chlorsulfuron (classe B, sulfonyle-urées), imazamox (classe B, imidazolinone), atrazine et bromoxynil (classes C), glyphosate (classe G), glufosinate (classe H).

Les propriétés physico-chimiques et toxicologiques des produits sont examinées lors des demandes d'homologation des molécules actives, traitées au niveau européen (EFSA). Les demandes d'homologation des préparations commerciales (molécule active + adjuvants) sont, elles, accordées au niveau national (ANSES). Les avis des agences sont rendus publics. Les données primaires, fournies par la firme, ne sont en général pas accessibles. De plus, elles n'ont pas toujours été vérifiées par des organismes indépendants. Les données de présence des substances dans les eaux de surface ou souterraines ont été extraites des rapports du Service de l'Observation et des Statistiques (SOeS, ex-IFEN) du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD), mais toutes les substances et leurs métabolites ne font pas l'objet de suivis. Le dernier rapport publié, daté de 2010, présente les données 2007.

- **Les propriétés des herbicides**

A l'exception de l'atrazine et du bromoxynil, moyennement solubles dans l'eau, les principaux herbicides utilisés avec des VTH sont très **solubles dans l'eau**, suggérant qu'ils peuvent être entraînés facilement par le ruissellement des eaux de pluie et d'irrigation. De plus, ces herbicides présentent peu d'affinité avec la matière organique du sol : ils sont donc susceptibles de contaminer les nappes d'eau souterraines par **infiltration** (ou lessivage) dans les sols. Seul le glyphosate a la propriété de se lier fortement à la matière organique du sol, mais il peut aussi être très mobile dans certains sols. Enfin, le bromoxynil est **volatil** à partir des plantes et du sol.

Les principaux mécanismes de dégradation, les durées de demi-vie et les données de contamination des eaux sont regroupées dans le Tableau 5-1. Les herbicides examinés sont tous sujets à la biodégradation, à l'hydrolyse et/ou à la photolyse. Cependant, de nombreuses lacunes existent dans les données accessibles. La majorité des durées de demi-vie ont en effet été mesurées en conditions de laboratoire. Des observations de terrain ont parfois été réalisées ; généralement elles confirment les valeurs obtenues en laboratoire. Cependant, aucune comparaison n'a été réalisée ou publiée entre l'utilisation classique de ces molécules et leur utilisation en système TH, c'est-à-dire en post-levée, avec des conditions de couvert végétal différentes. La contamination des eaux de surface ou souterraines a parfois fait l'objet de simulations. En revanche, le suivi dans les milieux naturels des molécules herbicides n'est réalisé que pour les plus utilisées actuellement, et les produits de dégradation, eux, ne sont pas suivis à l'exception de ceux issus de l'atrazine et du glyphosate.

Tableau 5-1. Transformation et persistance de 9 substances actives associées à des VTH

Substance active <i>Principaux métabolites</i>	Mécanismes de dégradation	Demi-vie mesurée en laboratoire *			Demi-vie en conditions réelles (sol)	Contamination des eaux (µg/l)	
		Eau (H ou P)	Eau-sédiments (H + B)	Sol (H + B)	Hydrolyse + Biodégradation + Photolyse	Simulation	Suivis de terrain
Cycloxydime	Hydrolyse Biodégradation Photolyse	H : 8 à 172 j (selon pH) P : < 1 j	20 j	< 1 j		< 0,1 6,5 dans un scénario pessimiste d'utilisation massive (600 g/ha) :	Non suivi
<i>2 principaux</i>					<5 j.	?	<i>Non suivis</i>
Tribénuron-méthyle	Hydrolyse Biodégradation (Photolyse)	H : 1-6 j à stable selon le pH	2-30 j	5-20 j	< 10 j	< 0,1	Confirmé dans les eaux de surface (<0,07) Aucune donnée pour les eaux souterraines
<i>4 principaux</i>		stables dans l'eau	1 seul mesuré : 5 j	22 à 230 j en fonction du composé		?	<i>Non suivis</i>
Chlorsulfuron	Hydrolyse Biodégradation lente (Photolyse)	24 j à stable selon pH	26 j	6,7-232 j	2,5-70 j	0,1 µg /l dans les eaux souterraines (sols basiques). 2,5 et 6,1 µg /l dans les eaux de surface	Pas ou peu détecté dans les eaux de surface et souterraines
<i>Nombreux dont 2 principaux</i>				43 à 436 j en fonction du composé		?	<i>Non suivis</i>
Imazamox	Photolyse Biodégradation faible	<6,8h	61-154 j	12-207 j	4-41 j	?	Non suivi
<i>4</i>						<i>Aucune donnée</i>	<i>Non suivis</i>
Atrazine	Biodégradation Photolyse lente	86 j (H)	80 j	28-150 j	6-108 j	?	Doses quantifiables dans les eaux de surface et souterraines
<i>3 principaux</i>						?	<i>Doses quantifiables dans les eaux de surface et souterraines</i>
Bromoxynil	Biodégradation Photolyse	Pas d'hydrolyse <10h (P)	9,6-16 j	1 à 7 j	?		Eau de surface: <0,1 µg/l Etangs/fossés : env. 0,3 Eaux souterraines : jusqu'à 0,5 Air : <0,1 ng/m ³ (jusqu'à 0,8 dans zones très agricoles Canada)
<i>2 principaux</i>					<5j	<i>Aucune donnée</i>	<i>Non suivis</i>
Glyphosate	Biodégradation Hydrolyse	> 35j (H)	12 – 70 j	valeur moyenne = 2 mois, mais peut varier de quelques jours à des années	1-130 j selon auteurs	?	Eaux de surface : jusqu'à 34 Eaux souterraines : doses quantifiables
AMPA	<i>Résistant à la biodégradation</i>					?	Eaux de surface : jusqu'à 12,1 Eaux souterraines : doses quantifiables
Glufosinate	Biodégradation uniquement, lente	stable	1,4 – 30 j	6 – 11 j	?	?	Peu ou pas détecté
<i>5</i>						<i>Potential de contamination des eaux souterraines par l'un des métabolites</i>	<i>Non suivis</i>

* Les voies de dégradation de la molécule, qui ne sont pas toujours différenciées dans les sources consultées, sont : l'hydrolyse (H), la photolyse (P) et/ou la biodégradation (B).

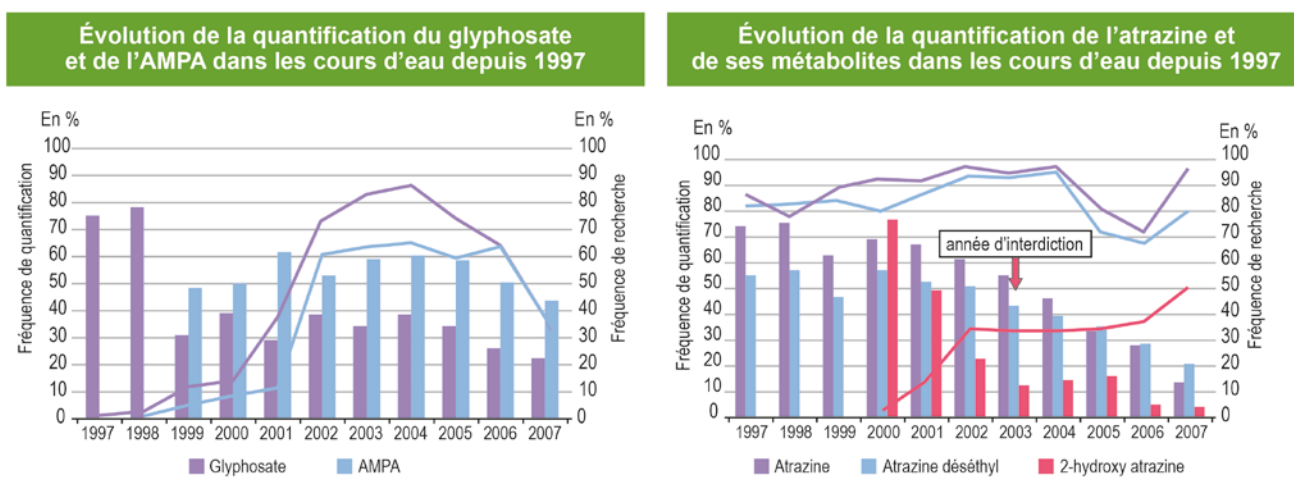
De façon notable, l'extrapolation des données de dégradation en conditions réelles, résumées ci-dessus, indique que 10% des doses initiales de certains herbicides (atrazine, glyphosate...) peuvent être présents un an après le traitement, dans les sols.

- La détection des herbicides dans les eaux

A l'exception de l'imazamox et de la cycloxydime, qui ne font pas l'objet de suivis dans l'environnement, toutes les substances actives listées dans le Tableau 5-1 sont détectées dans les eaux superficielles et/ou de surface. Le rapport SOeS 2010 montre d'ailleurs que les quinze pesticides les plus présents aux plus fortes concentrations en 2007 sont tous des herbicides ou leurs dérivés. Sur le terrain, l'atrazine, le glyphosate et leurs métabolites font l'objet des recherches les plus fréquentes dans les eaux (voir Figure 5-1). En résumé :

- l'AMPA, principal produit de dégradation du glyphosate, est en 2007 la substance la plus souvent détectée et quantifiée dans les cours d'eau ;
 - le glyphosate se situe en 3^e position, derrière le diuron ;
 - malgré son interdiction en France depuis 2003, l'atrazine et son principal métabolite font actuellement partie des substances les plus souvent détectées dans les eaux souterraines (respectivement 6^e et 4^e molécules les plus souvent détectées).
- Les autres molécules fréquemment détectées sont par ordre décroissant le 2,4-D, le métolachlore et l'isoproturon.

Figure 5-2. Evolution de la quantification du glyphosate, de l'atrazine et de leurs principaux métabolites



Les histogrammes représentent la fréquence de quantification des molécules dans les eaux. Les courbes illustrent leurs fréquences de recherche. Source : rapport SOeS 2010.

Les mesures de contamination des eaux sont souvent cohérentes avec les données de laboratoire, mais le cas de l'atrazine montre bien que la cinétique de dégradation déterminée expérimentalement (une demi-vie de l'ordre d'une centaine de jours) ne permettait pas de prédire sa présence, ainsi que celle de ses métabolites, plusieurs années après l'interdiction de son utilisation. Les lacunes dans la connaissance de la contamination des eaux par les herbicides en conditions réelles (grâce à des suivis), ainsi que la forte variabilité de leur devenir en fonction du climat, du type de sols, des modalités d'application, etc., empêchent de prévoir les risques de contamination chimique dans des scénarios possibles d'utilisation massive de ces herbicides. Toutefois, les flux d'herbicides vers les eaux de surface et souterraines étant démontrés, il est certain qu'une augmentation des tonnages utilisés se traduira mécaniquement par une augmentation des quantités transférées dans ces compartiments, avec un risque de dépassement des normes de potabilité, comme cela est toujours le cas pour l'atrazine dans certaines eaux souterraines en France.

5.1.3. La modélisation de la contamination et l'estimation des effets environnementaux

Des outils ont été développés pour évaluer les risques environnementaux liés à l'utilisation des herbicides, en termes de contamination chimique. Les plus simples reposent sur la comparaison du nombre de traitements pesticides ou des doses appliquées, de la mobilité et de la persistance des herbicides. D'autres méthodes plus sophistiquées donnent des informations qualitatives ou quantitatives, et constituent une alternative aux mesures *in situ* coûteuses, contraignantes et affectées d'une grande variabilité en fonction des conditions agropédoclimatiques.

Les méthodes simples ne permettent qu'une évaluation limitée des risques. L'Indicateur de Fréquence de Traitement (IFT – voir Chapitre 2) évalue l'intensité du recours aux pesticides, mais sans prise en compte des propriétés des molécules et du milieu. Les méthodes qualitatives comme l-I-Phy⁸ ou le Quotient d'impact environnemental (EIQ)⁹ considèrent quelques

⁸ L'I-Phy repose sur l'hypothèse que l'impact d'un pesticide dans l'environnement dépend de la quantité de produit, de sa dispersion hors de la parcelle et de sa toxicité sur divers organismes cibles.

⁹ L'EIQ intègre dans son calcul l'effet toxique des pesticides sur les cibles potentielles, la durée de demi-vie des pesticides, leur aptitude au transfert et les quantités de pesticides utilisées.

variables de l'environnement et donnent accès à un classement relatif de l'impact potentiel des pesticides sur certains compartiments de l'environnement. Cependant, elles reposent sur des représentations simplifiées du devenir des herbicides dans les milieux, et ne prennent pas en compte les métabolites des matières actives.

Les méthodes quantitatives nécessitent l'utilisation de modèles numériques. Elles proposent une estimation à long terme des flux et concentrations en pesticides dans l'environnement, et bien que des incertitudes persistent, elles peuvent permettre d'identifier des sols ou des systèmes de culture à risques. Elles reposent cependant souvent sur des données connues avec peu de précision, et ne prennent que peu ou pas en compte les produits de dégradation des herbicides.

Toutes ces méthodes ont été comparées dans une évaluation de la contamination chimique induite par les cultures tolérantes au glyphosate, par rapport aux cultures non tolérantes. Les méthodes simples montrent un effet positif des cultures tolérantes au glyphosate en termes d'usage d'herbicides. L'indicateur EIQ a lui aussi été utilisé pour comparer l'impact environnemental de cultures TH et conventionnelles entre 1996 et 2009 aux Etats-Unis : d'une façon générale, les données recueillies montrent que les cultures TH conduisent à une baisse de l'EIQ en valeurs corrigées et cumulées, avec toutefois une tendance à une ré-augmentation en fin de période. Cependant, les méthodes qui intègrent plus de paramètres aboutissent à une estimation plus faible de l'avantage des cultures TH par rapport aux non-TH ; ce résultat est principalement dû à la prise en compte du métabolite du glyphosate (AMPA), très persistant dans l'environnement et plus toxique que le glyphosate lui-même. Des compléments d'étude s'imposent donc d'autant que ces travaux n'ont pas pris en compte l'ensemble des herbicides utilisés classiquement en système non-TH, et qu'aucun autre couple VTH-herbicide n'a fait l'objet d'études similaires.

5.2. Les résidus d'herbicides dans les végétaux

Premier milieu récepteur de l'herbicide, la VTH est donc susceptible de présenter des concentrations variables de cet intrant, fonction, en particulier, des durées écoulées entre traitement et recherche de résidus. L'analyse de la bibliographie scientifique a tout d'abord révélé la faible disponibilité des données issues des laboratoires sur ces questions. La plupart des informations compilées proviennent donc des avis formulés par l'ANSES (anciennement AFSSA) lors de demandes d'autorisation de mise sur le marché de préparations.

Dans tous les cas examinés, il ressort que le respect des bonnes pratiques agricoles et celui des doses d'usage et de délai avant récolte (DAR) permettent de maintenir les concentrations résiduelles d'herbicides sous les valeurs des limites maximales de résidus (LMR) autorisées à la date de la récolte. Cependant, s'agissant de simples avis, il a été impossible pour les experts de cette ESCo de vérifier la qualité des expérimentations ayant conduit à ces conclusions.

Les rares travaux scientifiques portant sur ce sujet ont cependant fait ressortir des informations plus contrastées (parce que plus détaillées) que ne le sont celles fournies par les avis de l'ANSES. L'examen des résidus de 2,4-D et de dicamba sur soja, aux USA, a montré l'absence de résidus en quantité détectable 24 et 48 jours, respectivement, après traitement. Les résidus de bromoxynil sur triticale sont, quant à eux, indétectables 21 jours après traitement. Ces résultats vont dans le même sens que les informations provenant des avis de l'ANSES. En revanche, la littérature scientifique indique que les concentrations de résidus varient fortement en fonction des stades de développement du végétal auxquels le traitement est réalisé, mais également en fonction des années et des sites, probablement en lien avec la météorologie. Dans le cas de traitement au glyphosate de soja aux USA, les valeurs résiduelles varient ainsi d'un facteur 1 à 20, et peuvent atteindre les LMR même avec des doses appliquées inférieures aux doses préconisées.

Enfin, l'ESCo n'a pas été en mesure de préciser si certains mécanismes de résistance associés à une VTH pouvaient induire un phénomène de bioaccumulation qui n'existerait pas avec des tolérances natives d'espèce. Encore une fois, la bibliographie concernant les résidus d'herbicides sur plantes cultivées reste limitée, si l'on excepte les travaux relatifs à la mise en place de techniques ou de protocoles de détection. En accord avec le cahier des charges, l'ESCo pose là un diagnostic de lacunes dans les connaissances nécessitant éventuellement la mise en œuvre de nouvelles recherches.

5.3. Effets de la culture de VTH sur la biodiversité sauvage

Deux types d'effets sont à observer, pour caractériser l'impact de la culture de VTH sur la biodiversité sauvage :

- les effets de l'acquisition du trait TH sur la plante elle-même, hors utilisation dans un système TH. En effet, le Chapitre 1 a montré que la possession de ce trait peut avoir des conséquences métaboliques, visibles au niveau phénotypique. Il s'agit donc d'examiner si les spécificités phénotypiques des VTH ont un impact sur les composantes biotiques sauvages ;

- les effets du système de culture TH, caractérisé par :

 - * l'utilisation de l'herbicide associé à la VTH : nature et mode d'application spécifiques au cas TH ;

 - * la mise en place de pratiques culturales : contrôle non chimique des adventices, nature des successions culturales, utilisation d'autres pesticides, modification de la date de semis.

Dans ce dernier cas, plusieurs facteurs interviennent dans les effets observés. *A priori*, chacun de ces facteurs peut avoir des effets directs et indirects sur les composantes biotiques.

5.3.1. Effets propres aux plantes TH cultivées

Le trait TH peut induire chez la plante la présence de protéines nouvelles (cas de VTH exprimant un gène codant une enzyme de détoxification) ou de formes modifiées des cibles des herbicides, enzymes impliquées dans des voies de biosynthèse majeures chez les variétés TH. Elles exercent dans certains cas des effets secondaires certes limités, mais répertoriés (voir Chapitre 1). En raisonnant par analogie, il est légitime de s'interroger sur de possibles conséquences de l'insertion du trait TH en termes d'interactions entre la plante et les autres organismes vivants de l'agro-écosystème.

Très peu de travaux ont cherché à mettre en évidence d'éventuels effets propres à la plante possédant le trait TH, sur la biodiversité sauvage. Les études de ce type identifiées dans le cadre de l'ESCo visent à comparer l'activité de colonies d'abeilles domestiques principalement dans des cultures de colza transgénique tolérant au glufosinate. La seule étude ayant donné lieu à publication dans une revue scientifique conclut, comme les autres travaux, qu'aucune différence de comportement de butinage des abeilles domestiques n'est décelable entre colzas TH et non-TH quasi-isogéniques. La conclusion est la même concernant la diversité et la densité des espèces d'insectes pollinisateurs visitant ces deux cultures. Cependant, ces travaux sont en très faible nombre, présentent de nombreux biais et faiblesses méthodologiques, et ne précisent pas toujours les modalités de mise en place des expérimentations. Aussi, en l'absence de travaux robustes, il n'est pas possible de conclure sur l'existence ou l'absence d'effets des colzas TH, et plus généralement des VTH, transgéniques ou non, sur les colonies d'abeilles, mais c'est aussi le cas de la quasi-totalité des innovations variétales.

Quelques publications concernent la mise en évidence d'effets de variétés tolérantes au glyphosate cultivées sans leur herbicide, en relation avec la microflore associée. Ainsi, les nodosités fixatrices d'azote apparues sur des lignées TH GM de soja Roundup Ready en l'absence d'application de glyphosate sont moins nombreuses et plus petites que celles apparues sur lignées non TH.

5.3.2. Effets des herbicides et pratiques culturales en système TH

Destinés à supprimer la flore adventice, les herbicides associés aux VTH ont, par définition, un impact toxicologique élevé sur celle-ci, mais sont également susceptibles d'exercer des effets directs et indirects sur la faune inféodée à la parcelle. Lors de l'introduction d'une culture TH en remplacement de son équivalent non-TH, les traitements herbicides ne sont pas les seules pratiques qui évoluent. D'autres modifications de pratiques culturales sont associées aux variétés TH (voir Chapitre 4), qui peuvent influencer fortement la biodiversité de manière synergique ou antagoniste avec les herbicides.

Parmi les études visant à mettre en évidence les effets de la culture des VTH sur la biodiversité, une vaste étude de terrain baptisée *Farm Scale Evaluations* (FSE) a été réalisée en Grande-Bretagne entre 2000 et 2003, pour mesurer les impacts directs et indirects de l'utilisation de 4 VTH transgéniques sur les mauvaises herbes des parcelles et de leurs abords, ainsi que sur les organismes utilisant cette flore comme ressource trophique (voir Encadré 5-1).

• Effets sur la flore

De manière générale, quel que soit le système de culture adopté (TH ou non), de nombreuses études mettent en évidence que la diversité spécifique (diversité et abondance des espèces) des plantes sauvages présentes dans les parcelles et leurs abords décline avec la fréquence d'application de pesticides, et notamment d'herbicides, en particulier par le biais d'une diminution de leurs banques de graines dans le sol. Outre ces effets directs de toxicité, l'utilisation répétée et massive des herbicides exerce une pression de sélection sur les espèces qui y sont sensibles, conduisant à des dérives de flore et à l'apparition de populations résistantes (voir Chapitres 3 et 4).

Concernant plus spécifiquement les VTH, les travaux FSE montrent que dans les cultures de betterave et de colza TH, la densité d'adventices peu après le semis est environ 5 fois plus élevée qu'en culture non-TH. Cette tendance s'inverse avec l'application du traitement post-levée associé aux TH, et se traduit *in fine* par une diminution de 20% de la banque de graines du sol en culture TH par rapport à non-TH. Le résultat est différent dans les cultures de maïs TH, où la densité et la biomasse totale des adventices est restée plus élevée durant tout le cycle de la culture en système TH. Le glufosinate utilisé avec le maïs TH exerce une pression moins forte sur les adventices que l'herbicide persistant classiquement utilisé dans le maïs non-TH qu'était l'atrazine (interdite en Europe depuis 2004). Cela explique que certaines espèces de mauvaises herbes soient moins affectées dans les cultures de maïs TH que dans celles de maïs non-TH. Par ailleurs, dans les bordures labourées contiguës à la culture, les effets observés sont les mêmes : en système TH (excepté en maïs), on y trouve 25% de plantes sauvages en moins, chacune produisant également moins de fleurs et de graines qu'en système conventionnel.

Encadré 5-1. Les "Farm Scale Evaluations" (FSE)

Les FSE sont des expérimentations mises en place pour examiner les effets des VTH sur la biodiversité et la gestion des champs en Grande-Bretagne. Elles ont été motivées par la crainte d'accentuer l'élimination des adventices par un contrôle plus efficace qui réduirait, encore plus que les pratiques actuelles, les chaînes alimentaires pour un grand nombre d'organismes.

Elles comparent l'état de différentes composantes de la biodiversité dans des champs gérés par les agriculteurs moitié avec une variété conventionnelle et son désherbage habituel, moitié avec une VTH (ici une variété transgénique tolérante au glufosinate) désherbée en post-levée selon une procédure déterminée par un comité de pilotage. L'étude a porté sur les betteraves sucrière et fourragère, le maïs ensilage, le colza d'hiver et de printemps.

La mise en place des cultures s'est étalée sur trois ans à partir de 2000, avec deux années de suivi post culture TH, sur 60 à 70 sites pour chaque culture, donc représentatifs des zones de culture du pays et de son climat. Seuls le calendrier de traitement, le nombre de traitements et la nature des herbicides ont été étudiés. Les façons culturales habituelles n'ont pas été modifiées ni analysées du fait des disparités régionales et individuelles, ce qui limite la portée des conclusions vis-à-vis des changements de systèmes de culture privilégiant d'autres techniques telles que le non-labour, d'autres rotations, etc.

Les mesures sur la flore comprennent les stocks de semences dans le sol, le nombre d'individus de chaque espèce adventice avant et après traitement et leur biomasse en cours de végétation, et la production de semences ; les échantillons ont été prélevés à l'intérieur des parcelles et dans les bordures pour les années n (VTH) à $n+2$. Les bordures ont aussi été prises en compte pour le dénombrement des invertébrés de surface (gastéropodes, carabes, collemboles, araignées) et des insectes ailés (abeilles, papillons). Les observations ont été présentées en terme d'abondance spécifique et de rôle fonctionnel (granivores, pollinisateurs, groupe trophique) en fonction des cultures.

Les effets des herbicides sont difficiles à distinguer de ceux des pratiques associées. Cependant, la principale modification de pratique à l'introduction d'une VTH est la simplification du travail du sol, qui favorise le développement des espèces adventices (voir Chapitre 4). Or, le cas du maïs mis à part, le bilan de l'évolution de la flore adventice indique une diminution de sa diversité et de sa biomasse. Il semble donc que le type d'herbicide employé soit le facteur le plus déterminant dans les effets observés.

• Effets sur la faune

Toxicité directe et indirecte des herbicides associés aux VTH

La toxicité directe des herbicides est principalement évaluée dans des conditions de laboratoire, pour les dossiers d'homologation des substances, sur une série d'organismes modèles qui ne reflètent pas la réalité des territoires agricoles. Lorsque les pollinisateurs font l'objet de ces tests, il est difficile de faire le lien entre les doses toxiques pour ces organismes au laboratoire, et les doses auxquelles ils peuvent être confrontés au champ. La toxicité de certaines molécules sur des composantes de la faune est cependant avérée. Le bromoxynil (classe C) est par exemple toxique pour les abeilles par voie orale. Le tribénuron-méthyle et le chlorsulfuron (classe B) sont toxiques pour certaines algues et plantes aquatiques.

Les limites de ces évaluations sont connues, et résident dans l'absence de recherche d'effets sublétaux néanmoins susceptibles d'affecter la survie des populations, des effets d'une exposition chronique à faible dose, des effets de "cocktails" de substances... Elles sont illustrées par la mise en évidence, chez les amphibiens, d'effets sublétaux sur le développement de l'atrazine même à très faible concentration, et d'effets létaux ou fortement délétères sur la métamorphose du mélange d'atrazine et de S-métolachlor alors que cette dernière molécule est sans effet sur les amphibiens. Cette question des effets de molécules en association *versus* de molécules prises isolément reste une question de recherche ouverte, qui dépasse d'ailleurs le cadre de cette expertise.

Il existe peu de publications sur l'écotoxicité des herbicides, peut-être parce que les herbicides n'ont pas pour objectif l'élimination de la faune. Un nombre limité d'études aborde la question de l'impact direct des herbicides sur les **microorganismes du sol**, avec des effets variables selon que l'on considère la molécule active seule ou la formulation commerciale. Quel que soit l'herbicide, des effets sur la viabilité de certains microorganismes sont observés aux doses d'utilisation recommandées, mais les tests d'écotoxicité ne sont réalisés que sur certains taxons modèles. Ils sont donc parcellaires et pas forcément représentatifs des communautés de microorganismes des sols agricoles ou des agro-écosystèmes. L'étude des communautés de microorganismes présentes dans les cultures de diverses VTH indique cependant et sans ambiguïté que les herbicides associés peuvent affecter certaines populations connues pour favoriser la croissance des plantes cultivées, dont des fixateurs libres ou symbiotiques de l'azote et des microorganismes antagonistes de pathogènes. Ces effets en chaîne illustrent la complexité des relations entre microorganismes et plantes, et leur sensibilité aux perturbations d'origine anthropique.

L'étude FSE a étudié de manière ponctuelle les impacts des herbicides sur certains organismes présents dans les territoires agricoles. Les études montrent que les herbicides présentent généralement une toxicité directe faible sur la **faune du sol**.

Mise à part l'observation d'effets directs de quelques herbicides (dont l'atrazine et le glyphosate dans le cas d'herbicides associés à des VTH) sur les vers de terre, les pratiques agricoles (utilisation d'insecticides, travail du sol) et le contexte pédologique sont les facteurs les plus déterminants dans les impacts observés sur les réseaux trophiques du sol (mésosofaune).

Concernant les **arthropodes**, les effets des herbicides sur la faune s'avèrent plutôt indirects, via la modification de la flore adventice induite par le traitement herbicide. Ces effets indirects dépendent donc de l'efficacité du désherbage chimique. Dans le cas des VTH, l'application de l'herbicide en post-levée, qui permet l'émergence d'adventices peu après le semis, favorise les collemboles et leurs prédateurs, présents en plus grand nombre dans les cultures TH. Cependant, cet effet sur les populations adventices est temporaire, et de manière générale, la réduction de la flore suite à l'application de l'herbicide dans les cultures de colza et de betterave TH s'accompagne d'un déclin des populations d'insectes herbivores, de ceux qui s'en nourrissent et des pollinisateurs. L'effet est inverse dans les parcelles de maïs TH, du fait d'un contrôle plus strict des adventices en système non-TH (atrazine) qu'en système TH (glufosinate).

Ces effets se répercutent sur les niveaux supérieurs de la chaîne trophique, et notamment sur les populations de **micromammifères** et **oiseaux** : l'appauvrissement de la ressource alimentaire directe et indirecte que constitue la flore adventice pour ces taxons – diminution des plantes dont se nourrissent les herbivores et granivores, diminution des insectes dépendant de cette flore – est le principal facteur contribuant à la diminution de leurs populations.

Effets des pratiques agricoles

En dehors des effets directs et indirects des herbicides, les autres pratiques agricoles associées à l'introduction d'une VTH sont également des facteurs de modifications de la biodiversité sauvage. L'effet global de la culture d'une VTH en comparaison avec la même culture non-TH est d'autant plus difficile à évaluer que ces pratiques peuvent avoir un effet synergique ou antagoniste selon les cas, sur la flore et la faune associées à la culture.

La réduction du travail du sol - qui peut aller jusqu'au semis direct, c'est-à-dire l'abandon de tout travail du sol – est la principale pratique culturale couplée à l'utilisation des VTH. Il existe cependant une gradation dans le travail du sol mis en œuvre en système TH, et toutes les études ne comparent pas la biodiversité des cultures VTH *versus* non-TH dans les mêmes conditions de travail du sol. Il n'est donc souvent pas possible, dans les cas où les herbicides et le travail du sol ont des effets contraires, de prédire lequel des deux facteurs l'emportera, et quel sera le bilan final des impacts des cultures TH sur la biodiversité.

Cependant, les effets du travail du sol ont été étudiés sur quelques taxons, mais rarement dans le cadre de cultures TH. Un exemple permet d'illustrer la complexité des interactions entre les différentes pratiques agricoles. Le travail du sol et le labour sont globalement dommageables aux populations de **vers de terre**. La simplification du travail du sol associée à la culture de VTH pourrait donc favoriser ces taxons, et amplifier leur action réputée bénéfique pour les cultures. *A contrario*, un travail du sol en profondeur (labour) peut protéger ces organismes de l'effet néfaste de certains herbicides : son abandon pourrait donc pénaliser les vers de terre. Aucune étude ne vérifie ou n'infirme ces hypothèses dans le cas de cultures TH, et de nombreux autres facteurs peuvent interférer (diversité des espèces de vers de terre et profondeur à laquelle ils vivent, diversité des autres organismes présents, quantité de matière organique disponible, climat, dates du travail du sol...).

Des effets plus indirects ont par ailleurs été étudiés chez quelques **arthropodes**, et deux études ont été menées sur maïs TH (glyphosate). Un travail du sol minimum (sans labour) favorise les carabes, et un semis direct favorise les araignées par rapport au travail du sol en système non TH. Ces observations vont dans le même sens que les effets identifiés dans l'étude FSE, mais il n'est pas possible d'identifier quel facteur en est vraiment responsable, entre la simplification du travail du sol et l'efficacité du traitement herbicide.

Parmi tous les effets environnementaux observés, la part des impacts induits par les traitements herbicides et ceux induits par les autres pratiques culturales associées aux VTH sur la biodiversité est difficilement quantifiable. Si la majorité des études ne parvient pas à les identifier précisément, il n'est probablement pas nécessaire de chercher à tout prix à dissocier ces deux composantes : en effet, la biodiversité des territoires agricoles réagit à l'ensemble des conditions du milieu, et c'est bien l'impact global du système de culture qu'il importe d'évaluer (voir ESCo "Agriculture et biodiversité").

Conclusions

• Risques de contamination liés à l'utilisation des herbicides

Les herbicides sont une source majeure de contamination chimique du sol, des eaux et de l'air. Or le devenir de chaque molécule herbicide dans ces compartiments est très difficile à prévoir, car il est très dépendant des conditions du milieu et des conditions d'utilisation des substances. Soulignons également que le comportement des herbicides dans les milieux étant directement lié à leur structure chimique, les résultats obtenus pour une molécule donnée ne sont pas extrapolables aux autres molécules de la même classe HRAC, ni même de la même famille chimique.

Des données de laboratoire renseignent sur la capacité de chaque substance active à être transférée ou dégradée dans des conditions représentatives de l'environnement. Cependant les paramètres influençant ces phénomènes sont nombreux et très variables. Les conditions choisies lors des mesures correspondent donc souvent à des cas particuliers, et ne sont pas généralisables à l'utilisation réelle de ces substances au champ.

Au-delà des expérimentations de laboratoire qui donnent un ordre de grandeur de la durée de vie des molécules (persistance) et parfois celle de leurs produits de dégradation dans les eaux et le sol, les suivis de terrain restent peu nombreux et ne sont pas réalisés pour toutes les molécules. De tels suivis permettent pourtant de valider les estimations de laboratoire ou à l'inverse de mettre en évidence une rémanence *in situ* très différente de la rémanence calculée, comme cela est le cas pour l'atrazine ou pour l'AMPA, principal produit de dégradation du glyphosate. Ainsi, bien que ce dernier soit présenté comme un herbicide très vite dégradé et ne contaminant pas l'environnement, le glyphosate et son principal produit de dégradation apparaissent respectivement en 3^e et 1^{re} places des pesticides les plus détectés dans les eaux de surface et souterraines.

Notons également que la contamination du premier milieu récepteur de l'herbicide, la VTH, semble avoir fait l'objet d'un nombre très limité d'études, hors des données fournies par les entreprises agrochimiques lors des processus d'autorisation de mise sur le marché, difficilement et incomplètement accessibles aux experts. L'ESCo a ici identifié une lacune de connaissances certifiées.

• Effets sur la biodiversité sauvage

A priori, l'introduction d'une VTH, en remplacement d'une variété non-TH de la même espèce, se traduit par :

- le développement d'une plante dont le métabolisme peut être légèrement différent du fait de la possession d'un trait génétique particulier ;
- l'application d'un herbicide à large spectre après la levée des adventices ;
- une évolution/adaptation du système de culture, avec notamment l'accentuation de la simplification du travail du sol, en cours depuis plusieurs années pour réduire les coûts de production ou la charge de travail.

Les effets directs éventuels de plantes possédant le trait TH sur la biodiversité sauvage ont fait l'objet de peu de travaux, bien qu'en théorie, l'introduction du trait TH dans une variété puisse s'accompagner d'autres effets non désirés sur le génome, se traduisant par des différences phénotypiques inattendues (voir Chapitre 1). Aucune différence de comportement des pollinisateurs entre variétés TH et non-TH n'a été mise en évidence, mais ces études restent très rares, leur robustesse méthodologique parfois questionnable, et seuls les colzas résistant au glufosinate ou au glyphosate en ont fait l'objet. Il n'est donc pas possible de conclure, sans réserve, à l'absence d'impact détectable des VTH sur ces insectes.

Globalement, les connaissances relatives aux effets non intentionnels propres aux variétés TH sur leur environnement apparaissent lacunaires. Les effets directs et indirects sur la flore, des herbicides et des pratiques agricoles associés aux VTH, ont fait l'objet d'études plus nombreuses, sur une plus large gamme d'espèces cultivées. La plus significative est la série de relevés effectués dans le cadre des *Farm Scale Evaluations*, entre 1999 et 2003. Comme dans toute parcelle cultivée, l'usage d'herbicides entraîne une diminution de la banque de graines du sol et en modifie la composition. Dans le cas de la culture de VTH, bien que certaines des pratiques agricoles associées puissent favoriser le développement des adventices (voir Chapitre 4), les effets des herbicides à large spectre semblent plus forts que ceux des pratiques culturales, expliquant que la flore adventice des parcelles cultivées avec des variétés TH présente une diversité spécifique plus faible que dans les parcelles non TH. Il faut ajouter que le développement inévitable d'adventices résistantes conduit à l'application de traitements herbicides supplémentaires en pré-levée. Les instituts techniques et certaines firmes obtentrices recommandent d'ailleurs, dès l'introduction d'une VTH, de renforcer le traitement herbicide initialement prévu avec un programme de désherbage qui intègre souvent un autre mode d'action herbicide en pré-levée (voir Chapitre 3).

La toxicité des herbicides sur la faune inféodée aux territoires agricoles n'a pas été largement étudiée, mais à quelques exceptions près, les herbicides utilisés avec les VTH ne semblent pas avoir d'effets directs majeurs sur ces organismes. Toutefois, les questions de la chronicité des effets liés aux expositions aux faibles doses et des effets des mélanges de molécules herbicides, restent en suspens car la littérature est extrêmement limitée. La culture des VTH exerce donc un effet majoritairement indirect sur la faune, conditionné par l'efficacité du contrôle des adventices : la réduction de la diversité spécifique et la spécialisation de la flore qui constitue une ressource trophique entraîne la diminution des animaux consommateurs de graines et de plantes, se répercutant sur les taxons situés plus haut dans la chaîne alimentaire. A cet égard, la culture de VTH entraîne une diminution de la diversité de la faune plus importante que dans les parcelles non TH équivalentes.

Conclusions générales de l'ESCo

Les principales variétés végétales tolérantes aux herbicides (VTH) actuellement commercialisées et leurs statuts

L'ESCo porte sur le **trait agronomique de tolérance à un herbicide (TH)**. Introduit dans une variété végétale, ce trait permet notamment l'utilisation dudit herbicide en post-levée, c'est-à-dire sur une culture et des adventices déjà développées. Si la technique d'obtention de la VTH importe peu pour son utilisation au champ, elle est déterminante, en amont, par le type d'herbicide auquel elle est associée, et par le statut réglementaire qu'elle confère à la variété.

• Modes d'obtention, espèces et herbicides concernés

Les VTH commercialisées actuellement ont été obtenues par diverses méthodes :

- la sélection dite "traditionnelle" qui exploite la variabilité génétique naturelle (repérage de mutations spontanées puis intégration au génome de la plante cultivée par croisement sexué) ;
- la mutagenèse qui engendre une variabilité supplémentaire (induction de mutations par traitement physique ou chimique) ;
- la transgénèse qui permet l'insertion dans le génome de la plante cultivée d'un gène d'intérêt prélevé dans un organisme génétiquement trop éloigné pour être croisé avec celle-ci.

Des VTH sont disponibles pour les principales espèces de grande culture : maïs, soja, coton, colza, tournesol, betterave, blé, riz, chicorée/endive.

Les herbicides associés aux VTH appartiennent à diverses classes d'herbicides, c'est-à-dire possèdent des modes d'action différents : l'enzyme-cible qu'ils inhibent dans la plante est en effet caractéristique de la classe. Leur spectre d'activité est aussi plus ou moins large : certains herbicides sont sélectifs, c'est-à-dire efficaces sur certains groupes botaniques seulement (cas des classes A, B et C, par exemple) ; d'autres, dits totaux, sont au contraire efficaces sur l'ensemble des espèces végétales, adventices et cultivées (classes G et H).

• Tolérances à un herbicide total ou à un herbicide sélectif

Le tour d'horizon des principales variétés porteuses de ce trait, actuellement commercialisées et cultivées dans le monde, pour les plantes de grande culture, fait apparaître deux grands groupes de VTH selon la sélectivité des herbicides qui leurs sont associés :

- la **tolérance à un herbicide total** introduite chez la majorité des VTH actuellement cultivées, notamment sur le continent américain (maïs, soja, colza, betterave). Développées au milieu des années 1990, les variétés actuellement commercialisées rentrant dans ce premier groupe sont exclusivement transgéniques. Il s'agit des variétés commercialisées sous les marques RoundUp Ready® (RR®) tolérantes au glyphosate (classe G) et Liberty Link® (LL®) tolérantes au glufosinate (classe H), ces dernières étant plus récentes et moins développées ;
- la **tolérance à un herbicide à large spectre mais sélectif**. La plupart des variétés porteuses de ce trait sont aujourd'hui obtenues par sélection traditionnelle ou par des techniques de mutagenèse. Il s'agit principalement d'une large gamme de cultures tolérantes à des herbicides de la classe B (offre commerciale Clearfield® notamment) et de variétés de maïs tolérantes à des herbicides de classe A. Peu représentées à l'échelle mondiale, certaines de ces variétés sont cultivées en France (maïs et tournesol) ; d'autres font l'objet de demandes d'inscription au Catalogue officiel français (tournesol et colza).

Cette superposition actuellement observée entre mode d'obtention du trait TH et sélectivité des herbicides associés résulte du lien existant entre disponibilité des ressources génétiques exploitables et techniques d'obtention utilisables. En effet, s'il existe chez les végétaux des mutations spontanées qui confèrent des résistances, pour toutes les classes d'herbicides, ces mutations apparaissent avec des fréquences et des "coûts physiologiques" associés (pénalisant la plante) très variables selon les classes. Seules les résistances repérées chez les espèces cultivées ou des apparentées inter-fertiles peuvent être exploitées en amélioration variétale par le biais de méthodes de sélection traditionnelle ou par mutagenèse (cas des résistances aux classes A, B et C). Tel n'avait pas été le cas pour les résistances au glyphosate ou au glufosinate, que les obtenteurs n'avaient identifiées que chez les microorganismes, et qui ont donc été introduites dans les plantes à l'aide de techniques de transgénèse.

Plus récemment, des variétés tolérantes à deux herbicides de classes différentes sont apparues sur le marché. Elles sont issues de transgénèse, et peuvent associer deux herbicides sélectifs, deux herbicides totaux, ou un sélectif et un total.

• Mode d'obtention des VTH et statut réglementaire des variétés

En Europe, une nouvelle variété doit être inscrite à l'un des Catalogues officiels nationaux des Etats-membres pour prétendre à la mise sur le marché dans l'ensemble de l'Union européenne. Pour obtenir cette inscription, elle doit satisfaire un certain nombre de critères, notamment en termes de qualités agronomiques et technologiques. La directive 2001/18/CE relative à la dissémination volontaire d'OGM dans l'environnement prévoit en outre des dispositions supplémentaires pour certaines variétés considérées comme génétiquement modifiées. Parmi les techniques permettant actuellement d'obtenir des VTH, la mutagenèse et la transgenèse sont définies par cette directive comme produisant des OGM, mais seules les variétés obtenues par transgenèse entrent dans le champ d'application de la directive, les soumettant à une évaluation environnementale et sanitaire préalable et à l'obligation d'étiquetage des produits.

Cette distinction de deux statuts au sein des OGM est contestée par certains acteurs, qui perçoivent la mise en culture de variétés TH obtenues par mutagenèse comme une façon de contourner la réglementation qui encadre et contraint la culture des OGM en Europe – contestation qui s'est traduite par plusieurs arrachages militants de tournesols TH issus de mutagenèse.

Cette distinction est par ailleurs interrogée par le développement de nouvelles technologies d'amélioration génétique, à des stades plus ou moins proches de l'application industrielle, qui suscitent une réflexion au niveau communautaire quant au statut réglementaire des variétés qui en seront issues. Deux d'entre elles ont permis l'obtention de VTH en laboratoire : ce sont des techniques fondées sur la recombinaison homologue qui permettent l'insertion d'un nouveau gène ou la modification ponctuelle ciblée du génome. Les plantes qui en sont issues ne portent aucune trace moléculaire de la modification, autre que la séquence modifiée elle-même, et ne peuvent donc être distinguées sur cette base de plantes obtenues par sélection traditionnelle.

La dynamique de développement des VTH

• Une adoption rapide à l'échelle mondiale

La dynamique d'adoption des VTH n'est bien documentée que pour les variétés RR[®], dont l'expansion a fait l'objet de suivis, aux Etats-Unis notamment. La diffusion y a été particulièrement rapide et massive : en moins de 10 ans, les VTH ont conquis 80% des surfaces pour le coton et le soja ; pour la betterave sucrière, les VTH ont atteint 98% des surfaces en 2 années.

Les données quantitatives et qualitatives concernant l'adoption des variétés tolérantes à un herbicide sélectif sont en revanche très peu nombreuses et proviennent principalement des firmes obtentrices. Dans le seul cas documenté où ces variétés ont été autorisées en même temps que des variétés tolérantes à un herbicide total (cas par exemple, du colza de printemps au Canada), leur diffusion semble avoir été limitée, les variétés RR[®] et LL[®] ayant rapidement conquis la majorité des parts de marché.

• Les facteurs d'adoption des VTH par les agriculteurs

Plusieurs intérêts techniques des VTH sont mis en avant par les firmes obtentrices et les semenciers, et diffusés par les structures de conseil agricole. Des expérimentations ont permis dans certains cas de tester en conditions réelles la validité de ces bénéfices attendus des VTH. Ces diverses sources bibliographiques permettent d'identifier 4 principaux intérêts attendus des VTH, mais non de mesurer leurs poids respectifs dans la décision d'adoption :

- un **élargissement du spectre des adventices contrôlées** par rapport aux herbicides sélectifs classiquement utilisés en système non-TH, et notamment une efficacité sur les espèces apparentées aux cultures, les espèces envahissantes, les espèces parasites ;
- une **facilitation du travail** de l'agriculteur, par la réduction du nombre de traitements herbicides et la souplesse d'emploi du traitement en post-levée, et par l'abandon du labour, voire de tout travail du sol, que facilite la stratégie TH ;
- la **réduction des quantités d'herbicides utilisées** permise par la substitution de programmes herbicides par une unique molécule, et l'adaptation des quantités épandues en fonction des adventices effectivement présentes ;
- la **sécurisation du désherbage** et la diminution des risques de pertes de rendement induites par la concurrence des adventices.

Sur le terrain, les enquêtes auprès des agriculteurs ayant adopté des VTH constituent un moyen d'identifier a posteriori les motifs de ce choix. Les seules enquêtes disponibles ont été réalisées auprès de cultivateurs nord-américains de VTH RR[®]. Les premières études révèlent que les gains de rendement attendus, qui pouvaient a priori expliquer le choix d'une VTH, n'ont été confirmés que lorsque les difficultés de désherbage antérieures affectaient le rendement. Les travaux ultérieurs sur les raisons de l'adoption des VTH permettent de conclure sur 2 points principaux :

- si le prix des semences TH, sensiblement supérieur à celui des semences non-TH, peut être un frein à l'adoption, les **économies de coût dans la gestion des adventices** (tant directs – prix des herbicides –, qu'indirects – flexibilité et économie de temps de travail), au moins à court terme, constituent un motif majeur d'adoption ;

- un **couplage** fort est observé entre **adoption d'une VTH et simplification du travail du sol**. La mise en œuvre conjointe des deux techniques est d'ailleurs favorisée dans les régions sensibles à l'érosion, où l'abandon du labour bénéficie d'incitations financières (Etats-Unis). Le succès commercial du soja TH RR® en Argentine s'explique par la possibilité offerte par les VTH de mettre en œuvre efficacement le semis direct.

- **Les stratégies des firmes sur le marché des VTH**

Du côté de l'offre commerciale de VTH, les stratégies des firmes obtentrices ont majoritairement été étudiées de manière théorique, et ce dans le contexte du marché nord-américain. Contrairement au cadre législatif européen qui prévoit la protection industrielle d'une variété par Certificat d'Obtention Végétale (COV), assorti éventuellement d'un brevet sur un trait génétique particulier, le cadre américain permet de breveter les variétés elles-mêmes ; le brevet a été largement adopté par les firmes obtentrices car il leur accorde une protection plus étendue que les protections de possibles type COV.

L'utilisation couplée de la VTH et de l'herbicide associé crée sur le marché un lien entre la demande de semences et la demande d'herbicides. Les firmes qui ont développé des VTH sont le plus souvent des entreprises du secteur phytosanitaire, qui possédaient déjà ou ont acquis une filiale semencière. Toutefois, afin d'accroître leurs ventes de l'herbicide, elles ont généralement intérêt à aussi accorder des licences non exclusives d'exploitation du trait TH à d'autres semenciers.

Lorsque la firme perd le monopole sur la molécule herbicide (cas du glyphosate dont le brevet a expiré en 2000), elle conserve la possibilité de réaliser des profits sur la vente de la semence TH. Pour "préserver" sa place sur le marché de l'herbicide, elle pourrait être tentée par des pratiques de vente dite "liée" (achat de la semence conditionné à celui de l'herbicide), mais celles-ci enfreindraient les lois de la concurrence. La firme tend donc plutôt, pour limiter la concurrence des herbicides génériques, à différencier ses formulations commerciales et/ou à offrir aux utilisateurs du trait TH des garanties plus fortes s'ils emploient "son" herbicide.

Effets sur la flore adventice, pérennité de l'innovation TH et évolution des consommations d'herbicides

L'adaptation de la flore adventice à la pression de sélection exercée par l'herbicide conduit à l'apparition et à l'expansion d'adventices qui ne sont pas ou plus détruites par l'herbicide, rendant ainsi la stratégie TH moins efficace, voire inopérante. L'évaluation de ce phénomène constitue donc une question majeure dans l'ESCo. Il ne s'agit pas d'un risque "théorique" : il est confirmé par des études de terrain, et se traduit dans l'évolution de la consommation d'herbicides sur les VTH aux Etats-Unis. L'ampleur et la rapidité des phénomènes diffèrent selon les situations agronomiques.

- **Les phénomènes d'adaptation de la flore adventice et ses conséquences sur la pérennité de la stratégie TH**

L'espace libéré par la destruction des adventices sensibles à l'herbicide est rapidement occupé par d'autres espèces. Si ce phénomène de "**dérive de flore**" est évident avec un herbicide sélectif, qui par définition n'est pas actif contre toutes les familles botaniques, il existe également avec un herbicide "total", dont l'application sélectionne les espèces naturellement moins sensibles ou qui se développent après la période d'efficacité de l'herbicide.

Le **développement spontané de plantes résistantes** est un phénomène général, connu pour toutes les classes d'herbicides et repéré à ce jour chez 200 espèces végétales. L'apparition et l'expansion de telles résistances n'est pas une conséquence spécifique de la culture des VTH, mais peuvent être amplifiées par les conditions d'utilisation de l'herbicide en système TH.

Cet effet est net en Amérique dans le cas du glyphosate, où l'adoption rapide et massive des variétés RR® (sur lesquelles l'herbicide est utilisé à des doses plus faible que pour ses autres usages) marque le début du développement des adventices résistantes par l'effet de la pression de sélection exercée. Pour certaines classes d'herbicides sélectifs, une utilisation antérieure à large échelle a induit le développement de nombreux mutants résistants avant l'introduction de VTH. Le phénomène est particulièrement marqué pour les classes A, B et C, qui ont pu donner lieu à la création de VTH à partir de mutations spontanées.

Les variétés tolérantes à ces herbicides sélectifs, dans des conditions d'usage massif, sont donc celles qui seront les plus rapidement confrontées au développement d'adventices résistantes, et ce d'autant plus que les herbicides concernés sont déjà largement utilisés hors systèmes de culture ayant recours aux VTH. Le non-labour, souvent associé aux VTH, contribue également à la sélection de résistances spontanées, en favorisant le développement des adventices.

La **diffusion du trait TH** peut s'opérer par le biais des graines produites par la VTH et ses descendants, et de leur pollen susceptible de féconder des plantes cultivées non-TH ou sauvages apparentées inter-fertiles. Les risques de diffusion du trait TH sont donc surtout fonction de l'espèce cultivée et de son aire géographique de culture, qui conditionnent la survie des repousses, l'installation de populations dites férales (hors des champs) et l'existence de mauvaises herbes inter-fertiles. Le maïs, sans apparentées en Europe et dont les repousses ne survivent pas à l'hiver, est ainsi beaucoup moins concerné que le colza.

La question des flux de gènes entre la culture et des adventices apparentées apparaît cruciale pour la pérennité de la stratégie TH. De tels flux de gènes ont été démontrés dans les cas de la betterave, du riz, du tournesol, du colza, du blé. Ils rendent inéluctable le transfert du trait TH à des adventices apparentées. Les situations de désherbage difficile dû à des adventices botaniquement très proches de la culture et inter-fertiles, qui rendent particulièrement attractive l'utilisation de VTH, sont donc aussi celles qui présentent la plus forte probabilité d'acquisition du trait TH par l'adventice ciblée.

Diverses options biologiques (ex. décalage dans le temps des périodes de floraison) ou biotechnologiques (ex. insertion du transgène dans l'ADN des chloroplastes, qui ne sont pas transmis par le pollen...) ont été proposées pour réduire la probabilité de transfert du gène de tolérance par reproduction sexuée ; aucune ne permet cependant d'éliminer totalement ce transfert.

• Le bilan sur l'évolution des consommations d'herbicides

A court terme, la substitution d'un programme de désherbage comportant plusieurs produits sélectifs par un seul herbicide à large spectre induit potentiellement une réduction des doses pour une même efficacité. Dans le cas de la tolérance à un herbicide total (glyphosate), les évaluations *a priori* comme les données statistiques confirment cette réduction à court terme de la quantité d'herbicides utilisée.

Cependant, les enquêtes récentes réalisées aux Etats-Unis montrent que le différentiel de consommation d'herbicides entre cultures RR® et non-TH, initialement en faveur des VTH, régresse en quelques années jusqu'à devenir défavorable pour le soja et le coton. Cet accroissement au fil du temps des quantités d'herbicides utilisées sur des VTH s'explique par le **recours curatif à des traitements herbicides supplémentaires** : augmentation des doses et/ou du nombre de traitements au glyphosate, en réponse au phénomène de dérive de flore, puis recours à des herbicides complémentaires, notamment contre les espèces devenues résistantes au glyphosate.

Les pratiques phytosanitaires associées à l'adoption de variétés tolérantes à un herbicide sélectif sont peu documentées au niveau mondial. Avec ces variétés, la réduction d'utilisation d'herbicides n'est d'ailleurs pas nécessairement visée : la VTH peut permettre de compléter un désherbage classique de pré-levée pour remédier à un problème particulier.

La possibilité de traiter en post-levée permet, en théorie du moins, d'adapter le désherbage à la flore réellement présente et d'éviter ainsi le traitement ou de le limiter aux zones infestées – ce qui permet de réduire les doses utilisées à l'hectare. La littérature analysée ne mentionne pas de tels cas de suppression du traitement sur certaines zones de la parcelle. Le souci d'éliminer dès leur apparition les éventuels individus résistants conduit au contraire à des préconisations techniques d'une application renforcée des herbicides (à dose pleine sur l'intégralité de la parcelle et sur ses bordures).

La prise en compte du risque de développement de résistances conduit aujourd'hui les obtenteurs et conseillers agricoles à recommander d'emblée un **emploi préventif**, en mélange ou successivement, **de plusieurs substances herbicides** – stratégie dont l'intérêt a été établi par des études théoriques. Pour faciliter cet emploi combiné de plusieurs herbicides, les firmes développent des variétés cumulant plusieurs tolérances - au glyphosate et à un, voire deux, autre(s) mode(s) d'action herbicide. Cette stratégie de traitement avec un mélange de 2 classes est cependant inappropriée lorsqu'une résistance à l'une des classes préexiste dans les flores cibles présentes (le mélange conduit alors à l'acquisition de la double résistance parmi les individus déjà dotés d'une résistance).

En offrant la possibilité d'utiliser un seul herbicide, les variétés tolérantes au glyphosate permettent une simplification du désherbage à court terme. L'emploi récurrent de la même molécule dans la rotation a cependant entraîné des dérives de flore et l'apparition d'adventices résistantes. Ces problèmes émergents ont altéré l'efficacité de la stratégie TH et nécessité le recours à des solutions de désherbage complémentaires, revenant à des programmes comportant plusieurs traitements, et induisant une augmentation des tonnages d'herbicides utilisés par rapport aux économies initiales réalisées. Cet accroissement des quantités appliquées est amplifié par la prise en compte du risque de développement des adventices résistantes, qui privilégie un usage préventif des combinaisons d'herbicides. Telles qu'elles ont été mise en œuvre jusqu'à présent, les VTH s'inscrivent ainsi dans – et renforcent - la tendance au recours, préventif et curatif, au cumul d'herbicides, associé à une réduction de la lutte mécanique (simplification du travail du sol) et agronomique (simplification des successions culturales) contre les adventices.

Effets sur l'environnement

• Impacts sur les organismes non-cibles et sur la biodiversité

Les effets éventuels de l'utilisation des VTH sur l'environnement peuvent a priori être dus aux variétés elles-mêmes et/ou aux herbicides qui leur sont associés. Les VTH s'insérant dans des systèmes de culture conventionnels, leurs avantages ou inconvénients sont évalués en référence à un système conventionnel sans VTH. Dans la mesure où l'adoption des VTH est couplée à d'autres évolutions du système de culture – voire du système de production, c'est à ces échelles que l'évaluation de leurs impacts est pertinente.

Aucun impact des plantes cultivées TH en elles-mêmes n'a été mis en évidence, mais peu de recherches ont été conduites en ce sens ; les quelques études réalisées sur abeilles, en culture de colza TH, n'ont ainsi pris en compte qu'une partie des effets envisageables.

Un seul programme de recherches, mené en Angleterre, a cherché à comparer les cultures conventionnelles et TH en conditions agricoles réelles. Il montre que les effets sur la biodiversité semblent surtout être liés au désherbage : réduction de la flore adventice, conséquences directes sur la faune associée, et répercussions sur l'ensemble de la chaîne alimentaire. Les effets de l'adoption des VTH sur la biodiversité dépendent donc de l'efficacité du désherbage associé, comparée à celle des méthodes antérieures de désherbage – qui sont en général moins performantes, excepté pour le maïs (avant interdiction de l'atrazine).

- Contamination chimique des ressources en eaux et des sols

Là encore, des difficultés méthodologiques, non spécifiques aux VTH, sont rencontrées dans toute tentative de prévision de la contamination des masses d'eau : incertitudes sur le devenir (persistance, transfert vers les milieux aquatiques) de la molécule due à la variabilité des phénomènes de transfert et de transformation en fonction des caractéristiques des sols (pH, taux de matière organique...) et des conditions climatiques ; manque et difficultés d'accès aux données analytiques produites par les firmes dans les dossiers de demande d'homologation.

Les réactions de dégradation et de transfert des molécules herbicides dans l'environnement dépendent des propriétés physico-chimiques de chaque molécule ; les données acquises pour une molécule ne peuvent donc être ni extrapolées ni généralisées à la classe à laquelle elle appartient. Les deux cas les plus documentés et pour lesquels existent des suivis de terrain en plus des données de laboratoire sont ceux de l'atrazine et du glyphosate. Bien qu'il soit réputé peu persistant dans l'environnement, le glyphosate et, surtout, son principal produit de dégradation (l'AMPA), font partie des pesticides les plus détectés dans les eaux françaises.

Le premier argument environnemental en faveur des VTH serait une réduction des quantités d'herbicides épandues : l'analyse (cf. supra) des pratiques de désherbage effectives (aux Etats-Unis) a montré ses limites. Le second argument est le remplacement de substances anciennes par des molécules ayant des profils écotoxicologiques plus favorables. Si les résultats des tests d'écotoxicité, réalisés en laboratoire, sont difficilement extrapolables à la diversité des conditions réelles, les données sur la persistance du glyphosate relativisent ce diagnostic lorsque les produits de dégradation sont pris en compte. Le principal effet lié à l'adoption de VTH paraît être l'emploi accru des mêmes molécules (sur des surfaces plus importantes), conduisant mécaniquement à des teneurs plus élevées dans les eaux et augmentant le risque d'atteindre les taux limites réglementaires pour la potabilité.

De plus, l'évaluation des impacts environnementaux de l'utilisation des VTH est confrontée à des questions et difficultés méthodologiques classiques, mentionnées par exemple dans les ESCo "Pesticides" et "Biodiversité", que l'ESCo VTH ne pouvait traiter de façon exhaustive : impacts des herbicides sur les organismes non-cibles et plus largement sur la biodiversité (la question de la toxicité pour l'homme n'entrant pas dans le champ de l'ESCo VTH), devenir et transfert des pesticides dans l'environnement physique, évaluations comparées des impacts de différents systèmes et pertinence des indicateurs utilisés...

Culture des VTH en France

Si l'analyse du cas nord-américain a mis en évidence des risques associés à une culture massive de certaines VTH, ces résultats ne sont pas directement transposables à la situation française. Les implications d'une éventuelle diffusion significative de VTH en France sont à raisonner en fonction des caractéristiques actuelles des systèmes de culture, mais aussi en fonction des évolutions en cours susceptibles de favoriser l'adoption des VTH ou d'influer sur ses conséquences. Ces effets dépendront également du type de VTH concernées.

Le contexte social (perception des innovations biotechnologiques par la société) et le cadre réglementaire distinguent aussi les cas américain et européen. En Amérique, les OGM n'ont pas rencontré d'opposition significative, et les VTH transgéniques se sont développées depuis une quinzaine d'années. En Europe au contraire, et particulièrement en France, le contexte social n'est pas favorable aux OGM, et le conflit qui s'est développé à leur propos a conduit à encadrer leur évaluation préalable et leur éventuelle mise en culture, et à limiter pour l'instant le nombre de variétés transgéniques inscrites dans les catalogues communautaire et français. En effet, 2 variétés de maïs transgéniques TH sont inscrites au Catalogue européen ; en France, leur culture n'est pas interdite par un moratoire mais l'herbicide auquel elles sont tolérantes n'est pas homologué pour cet usage. Les seules VTH cultivées et en cours d'inscription sont donc non transgéniques. Elles font cependant l'objet, à leur tour, d'une contestation qui s'est traduite par plusieurs arrachages publics de parcelles portant des VTH obtenues par mutagenèse. A noter que si la culture de VTH transgéniques n'est actuellement pas pratiquée en Europe, ni envisagée à court terme, elle ne peut être exclue à plus longue échéance.

• Contexte agronomique français

A l'exception des enquêtes "Pratiques culturales" réalisées par le service statistique du ministère en charge de l'Agriculture, l'important déficit de données concernant les pratiques des agriculteurs ne permet qu'une vision très globale et imparfaite de la situation actuelle et de son évolution. De grandes tendances peuvent néanmoins être décrites sur la base de ces enquêtes, d'analyses plus qualitatives et de l'application des raisonnements agronomiques (avec une réserve sur leur poursuite, dans l'attente des résultats de l'enquête 2011).

Les cas d'école nord et sud-américains ont mis en évidence le couplage fort entre adoption des VTH et abandon du labour. Ces agricultures américaines sont de plus fondées sur des rotations très courtes ou des monocultures, qui sont susceptibles d'amplifier les difficultés de désherbage. Ce contexte contribue à une adoption massive, voire généralisée, des VTH. En France, le non-labour est encore minoritaire mais en expansion (en 2006, il concernait déjà 34% des parcelles de grandes cultures, plus de 50% dans les exploitations de plus de 300 ha). Les assolements et successions culturales restent aussi plus diversifiés, cependant la tendance est à la simplification des rotations, plus courtes et insérant de moins en moins des cultures de printemps dans des assolements de cultures d'hiver.

• Utilisation de VTH et points de vigilance

La principale spécificité de la situation française/ européenne réside dans le fait que, pour l'instant du moins, seules des variétés obtenues par sélection traditionnelle ou mutagenèse sont cultivables. Elles sont tolérantes à un herbicide sélectif (classe B), et peuvent apparaître comme une solution à des difficultés de désherbage effectivement rencontrées dans les principales espèces cultivées en France, et notamment celles dues aux adventices apparentées inter-fertiles voire de même espèce que la culture (betterave, tournesol, colza), aux espèces envahissantes telles que l'ambrosie, et aux plantes parasites comme l'orobanche (tournesol). Or on a vu que le risque de transfert du trait TH aux adventices appartenant aux espèces inter-fertiles est particulièrement élevé. Il existe par ailleurs une forte probabilité de développement de résistance chez l'ambrosie, espèce à forte dissémination, déjà très abondante en France et devenue résistante à des herbicides de la classe B dans d'autres régions du monde.

Par ailleurs, les herbicides de la classe B sont déjà très employés sur les céréales. L'introduction dans des rotations céréales-oléagineux de colza TH ou de tournesol TH augmentera donc la fréquence d'utilisation de ce mode d'action herbicide dans les parcelles concernées, et par conséquent la pression de sélection exercée sur les adventices.

Pour prévenir ce risque de développement de résistance et celui de diffusion du trait TH, les conseils techniques diffusés actuellement pour la mise en culture du tournesol TH préconisent de réserver l'usage de ces variétés aux situations de flores difficiles, et dans ce cas en combinant plusieurs modes d'action sur la culture TH elle-même ou/et à l'échelle de la rotation. Le respect de tels programmes de désherbage suppose des consommations d'herbicides supérieures à celles enregistrées en cultures conventionnelles (en 2006).

En France, les phénomènes de transfert du trait TH et de développement de résistances, ainsi que leurs répercussions sur la consommation d'herbicides, dépendront des conditions d'utilisation des VTH. Une utilisation de ces VTH limitée dans le temps et dans l'espace, dans le cadre de "bonnes pratiques agronomiques", intégrant des moyens mécaniques de gestion des adventices et des rotations diversifiées, serait à même de limiter ces risques et de préserver l'efficacité de la technologie TH dans le temps. La question se pose alors de l'instauration de mesures d'accompagnement de la culture de VTH, incitant à ces bonnes pratiques. Aux Etats-Unis, des résultats d'enquête auprès ont toutefois montré que les agriculteurs apparaissent peu enclins à adopter préventivement les mesures susceptibles de réduire les risques de développement des résistances lorsque celles-ci vont à l'encontre des simplifications (du travail du sol et des traitements herbicides) qui ont motivé le choix des VTH.

Les premières cultures de tournesols tolérants à des herbicides de la classe B (Clearfield® tolérant à une imidazolinone, et Express Sun® tolérant à une sulfonyle-urée) sont apparues en France, en 2010, et ont couvert une surface estimée à 80 000 ha en 2011 (soit plus de 10% de la sole de tournesol française). Ces surfaces devraient déjà apparaître dans l'enquête nationale "Pratiques culturales" 2011, et pourraient également justifier la mise en place d'enquêtes spécifiques, enregistrant les motifs et les situations agronomiques d'adoption, les pratiques phytosanitaires effectivement appliquées et les évolutions conjointes de la flore adventice.

Annexe 1. Cahier des charges de l'ESCo VTH

Document établi en septembre 2010.

L'arrivée après-guerre des herbicides chimiques de synthèse a considérablement facilité la réduction de la concurrence des adventices, en posant toutefois le problème du risque de phytotoxicité pour la culture. L'industrie phytopharmaceutique recherchait donc des molécules sélectives désherbant au maximum en affectant le moins possible la culture. Depuis quelques années, une alternative à la découverte de nouvelles familles d'herbicides est l'adaptation des variétés cultivées aux substances actives existantes.

Le terme "variétés tolérantes à un herbicide" (VTH) désigne ainsi les plantes cultivées caractérisées par la possession d'un trait génétique de tolérance (ou de résistance) à un herbicide ou certains herbicides (trait TH), trait exploité et/ou revendiqué chez la variété végétale. Toutes les espèces végétales cultivées présentent des tolérances à des herbicides actifs contre d'autres familles botaniques ; le terme VTH distingue des variétés portant des tolérances qui soit ne sont pas natives dans l'espèce, soit sont non encore identifiées lors de l'inscription au Catalogue. Ce caractère TH peut avoir été introduit en ayant eu recours exclusivement à des techniques classiques de sélection, mais également à la transgénèse ou à la mutagenèse. Dans le cas des variétés génétiquement modifiées (dites OGM), la tolérance à un herbicide peut aussi être un caractère introduit avec le transgène d'intérêt pour faciliter le criblage des cellules ayant effectivement intégré le transgène ; de nombreuses plantes OGM présentent donc le trait TH sans qu'il soit revendiqué.

En décembre 2009, le ministère en charge de l'agriculture et le secrétariat d'Etat à l'écologie ont manifesté, par le biais d'un courrier transmis à l'INRA, leur souhait que le CNRS et l'INRA mènent conjointement une expertise scientifique collective (ESCo) sur les variétés tolérantes aux herbicides. Le CNRS, l'INRA, et les commanditaires, se sont accordés sur le cadrage suivant de cet exercice.

1. Contexte et enjeux

Des sélectionneurs proposent des variétés présentant une tolérance à un herbicide ou une famille d'herbicides particuliers généralement à large spectre – avec lequel elles peuvent être commercialisées sous la forme d'un "paquet" VTH-herbicide associé. Le trait génétique TH paraît attractif pour l'agriculteur, notamment en termes de facilité d'utilisation et d'efficacité agronomique des herbicides utilisés pour la culture de VTH. Les obtenteurs mettent également en avant un intérêt environnemental, si ledit herbicide présente un profil écotoxicologique plus favorable que les herbicides habituellement utilisés, et/ou parce que la possibilité de traiter une culture déjà développée permet d'adapter le désherbage chimique à la flore adventice effectivement présente dans la parcelle, c'est-à-dire de ne traiter qu'en cas de besoin, et donc a priori moins que par traitement préventif systématique.

Les obtentions revendiquant le trait TH sont soit des variétés transgéniques (non autorisées actuellement en France), soit plus récemment, des variétés obtenues sans recours à la transgénèse et donc exclues du champ d'application de la Directive européenne 2001/18/CE¹⁰ qui encadre la procédure d'autorisation de dissémination volontaire et de mise sur le marché des organismes génétiquement modifiés (OGM).

Ces VTH non-OGM sont actuellement au centre de préoccupations des pouvoirs publics et des instances d'évaluation :

- tout d'abord, face aux demandes d'inscription de ces variétés au Catalogue officiel des espèces et variétés, les ministères en charge de l'agriculture et de l'écologie s'interrogent sur leurs bénéfices réels et de long terme, et notamment sur leur compatibilité avec l'objectif du plan Ecophyto 2018 de réduction de l'utilisation des pesticides en France, et d'autres politiques à visée environnementale ;
- par ailleurs, ces VTH non transgéniques commencent à faire l'objet d'une contestation sociale - des opposants aux OGM les suspectant de n'être qu'un contournement de la réglementation encadrant les OGM -, mais aussi d'interrogations parmi les agriculteurs. Or le développement rapide des techniques de mutagenèse et de séquençage à haut débit des génomes, qui permettent de repérer les mutations affectant un gène particulier, accroît sensiblement l'intérêt que les améliorateurs portent à ces techniques de mutagenèse ;
- enfin, la France souhaite être force de proposition dans le contexte d'une possible évolution de la réglementation européenne encadrant l'évaluation des variétés non-OGM, obtenues par des techniques telles que la mutagenèse.

Toutefois, il apparaît opportun de ne pas limiter l'ESCo à ces variétés obtenues par mutagenèse. Tout d'abord, de nombreux travaux d'évaluation des impacts d'une VTH ont été conduits sur des OGM ou en rapport avec des OGM.

¹⁰ La directive 2001/18/CE couvre les techniques d'obtention suivantes : transgénèse, cisgénèse et fusion cellulaire au moyen de méthodes qui ne sont pas mises en œuvre de façon naturelle. Sont exclues de son champ d'application les techniques entraînant des modifications génétiques mais produisant des organismes non-OGM, que sont notamment la mutagenèse et la fusion de cellules végétales qui peuvent naturellement échanger du matériel génétique.

Par ailleurs, de nombreux risques agronomiques ou environnementaux potentiellement associés à cette tolérance à un herbicide (difficultés de gestion des repousses de la VTH, emploi accru d'un même herbicide augmentant les risques de pollution et d'apparition et d'invasion d'adventices résistantes, par exemple) sont indépendants du mode d'obtention et d'introduction de ce trait ; ils résultent plus largement de l'utilisation de caractères de tolérance à un ou des herbicides, et de l'herbicide associé.

2. Objet et champ de l'expertise

Les éléments d'analyse précédents ont conduit à retenir comme objet/thème de l'expertise : **le trait génétique de tolérance à un herbicide (auquel la famille botanique est normalement sensible), quel que soit le mode d'obtention de cette caractéristique, et l'analyse des diverses conséquences de l'usage de ce trait.**

L'objectif de l'ESCo est de fournir aux pouvoirs publics, et plus largement à la société, un bilan critique des connaissances scientifiques disponibles pour identifier les questions spécifiques que posent ces VTH et pour évaluer les intérêts et risques que peuvent présenter leurs usages, sur les plans agronomiques, environnementaux et socio-économiques – les impacts éventuels sur la santé humaine étant exclus du champ.

Il s'agit, plus précisément, de rassembler et analyser les connaissances disponibles pour établir :

- un bilan des résultats scientifiques disponibles et validés concernant les effets des VTH déjà cultivées ;
- un état des méthodes et protocoles utilisables pour l'évaluation préalable et le suivi de telles variétés ;
- un diagnostic des lacunes et des controverses dans les connaissances et les méthodologies d'évaluation nécessitant la conception et la mise en œuvre de nouvelles recherches.

L'ESCo s'intéressera donc à toutes les variétés TH, quel que soit leur mode d'obtention, et concernera les espèces cultivées annuelles (grandes cultures et légumes de plein champ) des pays à climat tempéré. Une attention particulière sera portée aux espèces faisant actuellement l'objet de demandes d'inscription de VTH au Catalogue français : le maïs, le colza, le tournesol, la betterave, le soja, l'endive et la chicorée.

3. Questions et thématiques scientifiques

L'analyse de la littérature scientifique disponible vise l'identification et l'évaluation des effets potentiels liés aux conditions de production et d'utilisation des VTH. Ces impacts finaux, agronomiques, environnementaux ou socio-économiques, peuvent résulter d'effets directs de l'emploi de la VTH et de l'herbicide associé, mais aussi d'effets plus indirects, liés par exemple aux modifications des pratiques culturales et des choix de production induites ou permises par les VTH. Ces impacts peuvent différer selon les caractéristiques des VTH, de l'herbicide qui leur est associé et des systèmes de culture concernés. Les critères potentiellement déterminants pour différencier les situations de risque sont les suivants : les **caractéristiques de l'herbicide** (mode d'action, écotoxicité...), les **mécanismes biochimiques de la tolérance** (contournement de l'action de l'herbicide par la plante), les **techniques d'obtention** de la VTH (utilisées actuellement ou envisageables), les **caractéristiques biologiques de l'espèce cultivée** concernée, ses **caractéristiques technico-économiques** (place/fonction dans les rotations culturales, part dans les assolements régionaux, usage, poids dans les filières économiques...), les **conditions d'application des herbicides** (matériel de pulvérisation...), les **caractéristiques du système de culture et de production** dans lequel s'insère la culture TH, les **conditions de diffusion de la VTH** (stratégie de la firme obtentrice, réglementation, stratégie de l'agrofourniture...).

Les grandes catégories d'impacts

Il s'agit d'extraire les éléments de la littérature scientifique permettant d'examiner si les bénéfices revendiqués de ces VTH sont réels et durables, techniquement possibles et effectivement obtenus sur le terrain, s'ils ne sont pas annulés ou contrecarrés par des effets indirects, et si les risques invoqués apparaissent actuellement scientifiquement fondés. L'ESCo veillera à envisager tous les impacts possibles de l'emploi des VTH, ceux énoncés dans les débats actuels, comme ceux que la recherche pourrait identifier. Ces impacts sont à étudier à différentes échelles temporelles et spatiales, notamment pour prendre en compte les effets cumulatifs et/ou secondaires, liés à l'emploi massif de la VTH et/ou de l'herbicide auquel elle est associée.

- Impacts agronomiques (sur le système de culture ; pour l'agriculteur)

Les impacts à envisager sont :

- à court terme et à l'échelle de la parcelle : la modification de la stratégie de gestion des adventices et de l'itinéraire technique pour la culture ; au-delà, des modifications du système de culture (longueur des rotations, travail du sol...) ;

- à moyen terme et à l'échelle supra-parcellaire : les effets éventuels d'un "succès" des VTH se traduisant par le développement de rotations (et donc de territoires agricoles) avec un nombre réduit de cultures, de variétés et/ou de molécules herbicides.

Les aspects suivants seront examinés en particulier :

- Impact sur l'utilisation des pesticides : évolution des itinéraires de désherbage pour la culture TH, en termes d'emploi de l'herbicide associé à la VTH et de recours éventuel à des herbicides complémentaires (pour gérer les repousses et mauvaises herbes devenues tolérantes), mais aussi en termes d'emploi d'autres pesticides (les évolutions du système de culture associées à la culture des VTH pouvant favoriser des ravageurs ou maladies et nécessiter des traitements phytosanitaires supplémentaires).
- Impact sur la qualité génétique des variétés, les performances génétiques des cultures : on examinera les risques de perturbations du génome induites par l'introduction de la TH chez la plante, non détectées lors de la phase de sélection mais pouvant présenter des conséquences phénotypiques à moyen terme, telles qu'une vulnérabilité accrue à des bioagresseurs ou à des stress abiotiques. A une échelle plus globale, on évaluera les risques liés à une grande homogénéité génétique des cultures, pouvant compromettre une utilisation durable des VTH.
- Impact sur la production (quantité de matière première produite et qualité).

• Impacts sur l'environnement

- Contaminations de l'environnement par les herbicides : on examinera les spécificités de l'emploi des herbicides dans le cas des cultures de VTH qui sont susceptibles d'influer sur les risques de contamination de divers compartiments, biologiques ou physiques, de l'environnement.

Deux compartiments du milieu naturel seront particulièrement ciblés : les sols agricoles et les masses d'eau, superficielles ou souterraines. Le compartiment aérien sera également examiné, mais la bibliographie associée est a priori peu fournie.

- Effets éventuels sur la biodiversité des territoires agricoles :

- effets de l'utilisation des VTH sur la diversité génétique des cultures, par réduction éventuelle du nombre de variétés semées ;
- effets de l'herbicide sur la diversité de la flore non cultivée inféodée à la parcelle (diversité et abondance de la flore adventice, impacts en termes de résistance aux herbicides) ;
- effets de l'utilisation des VTH sur la faune associée à la culture et/ou aux adventices (pollinisateurs sauvages et abeilles domestiques, impacts spécifiques sur les mammifères) ;
- effets de la dispersion de la VTH sur la biodiversité sauvage ; caractère éventuellement envahissant des populations de VTH (dispersion sur des distances fonction de la capacité de dissémination des graines, capacité de maintien par des repousses végétatives, ...) ;
- transferts horizontaux de la tolérance à d'autres composantes du couvert végétal (espèces sauvages apparentées à la culture, adventices ou des espaces semi-naturels).

Conséquences sur la consommation d'énergie, la gestion de l'eau et le bilan d'émission de gaz à effet de serre de la culture, liées aux modifications des pratiques culturales associées à l'usage de VTH (suppression du labour, par exemple), si la littérature scientifique le permet.

• Impacts socio-économiques (pour les acteurs / filières agricoles)

L'ESCO examinera, dans la mesure où des publications scientifiques sont disponibles, les effets économiques de l'emploi des VTH, à l'échelle des exploitations agricoles (impacts sur l'organisation du travail de l'agriculteur et les coûts de production, risque de dépendance vis-à-vis de la firme obtentricrice...) et des filières agricoles (effets de segmentation des marchés...), et au niveau des secteurs semenciers et agrochimiques.

Les conditions susceptibles d'influer sur ces effets relèvent notamment de la gouvernance dans ce domaine : législation encadrant la mise sur le marché et l'utilisation de ces produits et de ces variétés, régime de propriété intellectuelle adopté, politiques publiques...

La perception, par les différents acteurs, de l'innovation dans le contexte de l'exploitation du trait TH sera également caractérisée, dans la mesure où la littérature académique est disponible sur cette thématique et que les données sont transposables au cas français. La perception des OGM en tant que telle ne fera cependant pas l'objet d'une analyse par l'ESCO, celle-ci se limitant à la perception du trait TH.

Annexe 2. Classification HRAC des herbicides

classe HRAC	Mode d'action	Famille - Principales molécules utilisées actuellement avec des VTH	
A	Inhibiteurs de l'acétyl CoA carboxylase (ACCase) (synthèse des lipides)	Aryloxyphenoxy-propionates (FOPs)	Phénylpyrazolines (DEN)
		Cyclohexanediones (DIMs) - cycloxydime, séthoxydime	
B	Inhibiteurs de l'acétolactate synthase ALS (acétohydroxyacid synthase AHAS) (synthèse de certains acides aminés)	Sulfonyl-urées - chlorsulfuron, tribénuron-méthyl	Pyrimidinyl(thio)benzoates
		Imidazolinones - imazamox	Sulfonylaminocarbonyl-triazolinones
		Triazolopyrimidines	
C1	Inhibiteurs de la photosynthèse au niveau du photosystème II	Triazines - atrazine	Uraciles
		Triazinones	Pyridazinones
		Triazolinones	Phényl-carbamates
		Urées	Amides
C2			
C3		Nitriles - bromoxynil	Phényl-pyridazines
		Benzothiadiazinones	
D	Inhibiteurs de la photosynthèse au niveau du photosystème I	Bipyridylum	
E	Inhibiteurs de la ProtoPorphyrinogène oxidase (PPO) (synthèse des chlorophylles)	Diphénylethers	Triazolinones
		Phénylpyrazoles	Oxazolidinediones
		N-phénylphthalimides	Pyrimindiones
		Thiadiazoles	Autres
		Oxadiazoles	
F1		Pyridazinones	Autres
		Pyridinecarboxamides	
F2	Inhibiteurs de la synthèse des caroténoïdes	Triketones	Pyrazoles
		Isoxazoles	Autres
F3		Triazoles	Urées
		Isoxazolidinones	Diphénylethers
G	Inhibiteurs de l'EPSP synthase (synthèse d'acides aminés)	Glycines - glyphosate	
H	Inhibiteurs de la glutamine synthétase (photosynthèse)	Acides phosphiniques - glufosinate-ammonium	
I	Inhibiteurs de la dihydroptéroate synthase	Carbamates	
K1	Inhibiteurs de l'assemblage des microtubules	Dinitroanilines	Benzamides
		Phosphoroamidates	Acides benzoïques
		Pyridines	
K2	Inhibiteurs de la mitose / organisation des microtubules	Carbamates	
K3	Inhibiteurs de la division cellulaire	Chloroacetamides	Tetrazolinones
		Acetamides	Autres
		Oxyacetamides	
L	Inhibiteurs de la synthèse de la cellulose des parois cellulaires	Nitriles	Triazolocarboxamides
		Benzamides	Acides quinoline carboxyliques
M	Découplage de la phosphorylation oxydative (chaîne respiratoire)	Dinitrophenols	
N	Inhibiteurs de la synthèse de lipides (mécanisme différent de la classe A)	Thiocarbamates	Benzofuranes
		Phosphorodithioates	Acides chloro-carboniques
O	Substances mimétiques de l'acide indole acétique (auxine)	Acides phénoxy-carboxyliques - 2,4-D	Acides quinoline carboxyliques
		Acides benzoïques - dicamba	Autres
		Acides pyridine carboxyliques	
Z	Mode d'action inconnu	Acides arylaminopropioniques	Organo selenates
		Pyrazolium	Autres

Tableau d'après le HRAC (site : <http://www.hracglobal.com/>) et selon Schmidt, 1997.

Auteurs et éditeurs de l'expertise

► Experts

Responsables de la coordination scientifique

Michel BECKERT, INRA, Président du centre de Clermont-Ferrand – Theix

Yves DESSAUX, ISV*-CNRS, ancien chargé de mission à l'INEE* (CNRS)

Contributeurs

Gérard ARNOLD, CNRS, Gif-sur-Yvette, Laboratoire Evolution, Génomes et Spéciation (LEGS). *Ecologie des pollinisateurs.*

Marc BARBIER, INRA-SAD*, Grignon, unité Sciences en Société (SenS). *Sociologie des risques.*

Michel BECKERT**, INRA, Clermont-Ferrand – Theix. *Génétique végétale, amélioration des plantes.*

Christophe CHARLIER, Université Nice-Sophia Antipolis - CNRS, Groupe de Recherche en Droit, Economie, Gestion (GREDEG). *Economie agricole et de l'environnement.*

Nathalie COLBACH, INRA-EA*, Dijon, unité Biologie et Gestion des Adventices (BGA). *Agronomie des systèmes de culture, gestion des adventices.*

François COLENO, INRA-SAD, unité Sciences, Action, Développement, Activités, Produits, Territoires (SAD-APT), Grignon. *Sciences de gestion, organisation des territoires agricoles.*

Henri DARMENCY, INRA-SPE*, Dijon, unité Biologie et Gestion des Adventices (BGA). *Biologie et génétique des populations d'adventices.*

Yves DESSAUX, ISV-CNRS, Gif-sur-Yvette. *Ecologie microbienne du sol, biotechnologies.*

Christian GAUVRIT, INRA-SPE, Dijon, unité Biologie et Gestion des Adventices (BGA). *Phytopharmacie, résistances aux herbicides.*

Christian HUYGHE, INRA, Lusignan. *Génétique végétale, amélioration des plantes.*

Jane LECOMTE, Université Paris XI, Orsay. *Ecologie, génétique des populations.*

Valérie LE CORRE, INRA-SPE, Dijon, unité Biologie et Gestion des Adventices (BGA). *Génétique des populations d'adventices, évolution des résistances aux herbicides.*

Stéphane LEMARIE, INRA-SAE2*, Grenoble, Laboratoire d'Economie Appliquée de Grenoble (GAEL). *Microéconomie, économie de l'innovation.*

Thierry MARTEU, Université Nice-Sophia Antipolis – CNRS, Groupe de Recherche en Droit, Economie, Gestion (GREDEG). *Droit de la propriété intellectuelle.*

Patrick MAZELLIER, IUT de Périgueux. *Chimie environnementale, devenir des micropolluants dans l'eau.*

Isabelle NAVARRO, Ecole Centrale Lyon. *Microbiologie.*

Mai-Anh NGO, CNRS - Université Nice-Sophia Antipolis, Groupe de Recherche en Droit, Economie, Gestion (GREDEG). *Droit agroalimentaire.*

Francis QUETIER, Université Evry - Génoscope. *Génétique végétale, plasticité des génomes.*

Claire RICHARD, CNRS - Université Clermont-Ferrand, Laboratoire de photochimie. *Photochimie environnementale, dégradation des contaminants organiques.*

Cette liste n'inclut pas les chercheurs qui ont pu être sollicités (par l'un des experts ci-dessus) pour contribuer ponctuellement à la rédaction d'une section du rapport. Ces chercheurs sont cités dans les contributions écrites auxquelles ils ont apporté leur concours.

► Conduite du projet

Anais TIBI, INRA-DEPE*, Paris : conduite du projet, rédaction et coordination éditoriale

Isabelle SAVINI, INRA-DEPE, Paris : suivi du projet, rédaction et coordination éditoriale

Fabienne GIRARD, INRA-DEPE, Paris : logistique

Christine VOCORET INRA-DEPE, Paris : logistique

► Documentation

Eric MARCHOUX, INRA, Lusignan (Coordination)

Marie DEVILLERS, INIST*-CNRS, Nancy

Dominique VACHEZ, INIST-CNRS, Nancy

* Entités INRA et CNRS : DEPE : Délégation à l'Expertise scientifique, à la Prospective et aux Etudes ; EA : Environnement et Agronomie ; INEE : Institut de l'écologie et de l'environnement ; INIST : Institut de l'information scientifique et technique ; ISV : Institut du végétal ; SAD : Sciences pour l'action et le développement ; SAE2 : Sciences sociales, agriculture et alimentation, espace et environnement ; SPE : Santé des Plantes et Environnement.

** En gras : fonction de coordination.



Centre national
de la recherche scientifique
3, rue Michel-Ange
75794 Paris cedex 16 - France
Tél : +33 1 44 96 40 00
Fax : +33 1 44 96 53 90
www.cnrs.fr



INRA

Institut National
de la Recherche Agronomique
147 rue de l'Université
75338 Paris cedex 07 - France
Tél : +33 1 42 75 90 00
Fax : +33 1 42 75 91 72
www.inra.fr