

Chapitre 6.

Conclusions de l'ESCo

Auteurs :

Michel Beckert

Yves Dessaux

L'expertise scientifique collective menée par l'INRA¹ ne fournit ni avis ni recommandations. Cet exercice a examiné, au vu de la littérature scientifique validée, les bénéfices et les risques liés à l'introduction des VTH dans les systèmes de production. Les conclusions formulées ici sont donc tributaires des sources disponibles analysées, et soumises aux difficultés méthodologiques liées à toute évaluation d'une question systémique et approche pluridisciplinaire.

L'utilisation des herbicides chimiques de synthèse a considérablement facilité la réduction de la concurrence exercée par les adventices sur les plantes de culture, et contribué, avec l'amélioration génétique et celle des itinéraires techniques, à l'augmentation régulière des rendements. Cependant, l'usage des herbicides pose un problème de phytotoxicité pour la culture d'intérêt. L'industrie des produits phytosanitaires a donc recherché des molécules actives permettant de désherber de façon sélective les adventices, en affectant le moins possible la culture. Cette sélectivité n'a pas toujours pu être obtenue, notamment lorsqu'elle concerne une culture et des espèces adventices botaniquement proches.

Depuis quelques années, une alternative à la recherche et à la découverte de nouvelles familles d'herbicides ou d'herbicides spécifiques d'espèces cultivées, consiste à adapter des variétés cultivées aux substances actives existantes. Dans cette logique, l'idée a été de conférer aux espèces cultivées une capacité à tolérer une molécule herbicide, rendant notamment possible son utilisation en post-levée, et l'élimination des adventices sensibles perturbant la culture, sans dommages pour celle-ci.

Les pouvoirs publics et les instances d'évaluation français font actuellement face au développement de cultures de VTH chez certaines espèces et des demandes d'inscription issues de l'exploitation de la variabilité spontanée, ou induite par mutagenèse, au Catalogue officiel des espèces et des variétés cultivées. Dans ce contexte, les pouvoirs publics s'interrogent sur les bénéfices réels et de long terme de l'introduction de VTH, notamment sur la compatibilité de leur utilisation avec l'objectif du plan Ecophyto 2018 de réduction de l'utilisation des pesticides en France.

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 la dissémination des organismes génétiquement modifiés (OGM).

Les VTH disponibles sur le marché ou en cours de développement

L'ESCo porte sur le trait agronomique de tolérance à un herbicide (TH). Si la technique d'obtention de la VTH importe peu dans la conduite de la culture, 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

Des VTH sont actuellement commercialisées 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, et possèdent donc 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).

Les VTH actuellement commercialisées ont été obtenues par diverses méthodes. En premier lieu, la sélection dite "traditionnelle" exploite la variabilité génétique naturelle. Des mutants spontanés sont repérés au champ, notamment des repousses de culture résistantes à l'herbicide appliqué dans la culture suivante de la rotation, puis la mutation qui confère le caractère est introduite dans une lignée élite par croisements sexués successifs.

¹ Et dans le cas présent conjointement avec le CNRS

Les ressources génétiques des espèces cultivées couramment utilisées par les sélectionneurs ne permettent cependant pas toujours d'y trouver des individus présentant la résistance à un herbicide et qu'il est possible d'utiliser comme source du trait et de croiser avec les variétés d'intérêt. Les techniques de transgénèse et de mutagenèse peuvent permettre d'obtenir des VTH par d'autres voies. La transgénèse permet notamment 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. La mutagenèse engendre une variabilité supplémentaire (induction de mutations par traitement physique ou chimique). Les modifications génétiques que ces techniques induisent ont cependant une composante aléatoire, qui nécessite un important effort de vérification de l'insertion du trait, et de suppression d'une large partie des autres modifications non souhaitées dans le génome.

De nouvelles techniques sont en train d'émerger, elles permettent de produire des modifications ciblées d'un gène d'intérêt, sans modifier le reste du génome de la plante. La recombinaison homologe, outil biotechnologique maintenant disponible chez les plantes, permet ainsi de remplacer un gène par une nouvelle version conférant le trait TH, sans laisser de trace moléculaire de l'opération. Le TILLING – méthode générique permettant d'identifier des plantes porteuses d'allèles mutés pour n'importe quelle séquence génique – devrait quant à lui faciliter l'identification de mutants possédant le trait TH en permettant un criblage précis et rapide des plantes portant le caractère d'intérêt.

Deux mécanismes moléculaires principaux confèrent aux VTH actuellement disponibles sur le marché la tolérance à l'herbicide avec lequel elles sont commercialisées. Certaines variétés sont dotées d'une forme modifiée de la cible moléculaire de l'herbicide, les rendant insensibles (résistance de cible). D'autres ont été rendues capables de dégrader l'herbicide. Ainsi, les variétés Clearfield®, tolérantes à des imidazolinones, résultent de l'introgession de mutations naturelles ou induites leur conférant une tolérance de cible. Il en est de même pour le maïs DUO System®, tolérant au cycloxydime, issu de la sélection de mutations spontanées. Les variétés transgéniques commercialisées sous la marque RoundUp Ready, tolérantes au glyphosate, possèdent aussi une tolérance de cible. Parmi les variétés tolérantes par détoxification de la substance herbicide, les variétés transgéniques de marque LibertyLink® sont dotées d'un transgène d'origine bactérienne, déterminant leur tolérance au glufosinate par métabolisation de cette molécule. Par ailleurs, d'autres VTH existent mais ne sont pas revendiquées comme telles. Ainsi, de nombreuses variétés transgéniques sont porteuses d'un gène responsable de la tolérance à un herbicide, gène utilisé au cours du processus d'obtention, notamment comme marqueur de sélection lors des étapes de la transformation et de la régénération.

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

Mode d'obtention des VTH et statut réglementaire des variétés

En Europe, toute 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. Par ailleurs, 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 transgénèse sont définies par cette directive comme produisant des OGM, mais seules les variétés obtenues par transgénèse 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 exprimée par plusieurs arrachages militants de tournesols TH issus de mutagenèse. Il faut cependant rappeler qu'un certain nombre de lignées végétales (non-TH) cultivées depuis plusieurs dizaines d'années en France, ceci pour de nombreuses espèces différentes, sont issues de mutagenèse, et qu'elles ne semblent pas avoir fait l'objet de contestations (ex : cas de l'orge).

La distinction évoquée plus haut 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. Parmi elles, les techniques fondées sur la recombinaison homologue, qui ont permis l'obtention de VTH en laboratoire, sont génératrices de plantes ne portant aucune trace moléculaire de la modification autre que la séquence modifiée elle-même, et qui ne peuvent donc pas être distinguées sur cette base de plantes obtenues par sélection traditionnelle ou par mutagenèse. Ce dernier point a des conséquences qui s'étendent d'ailleurs au-delà du "simple" cadre des VTH. Il confronte les autorités compétentes au fait qu'il sera à court terme impossible de disposer de critères et de méthodes qui, en l'absence de déclaration préalable d'un obtenteur, permettraient de déterminer la nature conventionnelle, issue de mutagenèse ou transgénique, d'une variété végétale. Consciente de cet enjeu, l'union européenne, par le biais du "Joint Research Centre - Institute for Prospective Technological Studies" s'est saisie de la question. Le récent rapport publié par cet institut indique ainsi qu'une réflexion est en cours concernant la dénomination des variétés qui proviendront de l'usage de ces nouvelles technologies, particulièrement en regard de l'impossibilité de détection évoquée plus haut. Cet argument est par ailleurs déjà mis à profit par des laboratoires partenaires d'améliorateurs variétaux pour revendiquer que les variétés issues de recombinaison homologue ne soient pas considérées comme des OGM au sens de la directive 2001/18/EC.

Commercialisation des VTH et adoption par les agriculteurs

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 dans la littérature 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 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.

Une adoption rapide à l'échelle mondiale

En termes de surfaces cultivées, les VTH les plus représentées à l'échelle mondiale sont des variétés transgéniques, apparues dans les années 1990. Ainsi aux États-Unis, aujourd'hui, environ 70% des surfaces cultivées en coton, 75% des surfaces cultivées en colza, 90% des surfaces cultivées en soja, et la quasi-totalité des superficies de soja en Argentine sont cultivées avec des variétés Roundup Ready. Ces variétés ont d'ailleurs fait le succès agricole des cultures transgéniques, au point que le trait TH est le trait aujourd'hui le plus représenté chez les variétés transgéniques à l'échelle mondiale, et ce depuis leur introduction en 1996 : 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. En France les VTH inscrites ou qui sollicitent l'inscription au Catalogue français (notamment maïs, tournesol, colza) n'ont pas été obtenues par transgénèse mais par sélection variétale à partir de mutants spontanés ou induits.

Les données quantitatives et qualitatives concernant la diffusion des variétés tolérantes à un herbicide sélectif sont (surfaces cultivées) 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 raisons de l'adoption de VTH

Dans les principaux pays où des VTH sont cultivées, on a constaté de façon générale une adoption assez forte et rapide de ces variétés par les agriculteurs. A priori, une augmentation des rendements liée à l'amélioration de l'efficacité de désherbage pourrait constituer un motif majeur d'adoption des VTH. Or si elle est mise en avant par les firmes qui commercialisent les VTH, cette augmentation du rendement n'est pas systématiquement vérifiée. D'autres éléments ont donc motivé l'adoption de VTH par les agriculteurs. La littérature permet d'identifier 4 principaux intérêts attendus des VTH :

- 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 ; cet itinéraire technique de culture simplifié, reposant en principe sur un traitement limité en post-levée, permet théoriquement d'économiser des passages d'engins et donc du carburant ; cette flexibilité accrue se retrouve dans l'usage d'une seule molécule et dans la possibilité de désherber sur des périodes plus longues ;
- 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, ainsi qu'une certaine assurance de réussite de la culture, en l'absence d'effet toxique des herbicides sur les VTH, y compris en raison de la présence de résidus d'herbicides utilisés précédemment dans les sols ou dans les mulchs.

A quelques exceptions près, relativement limitées, les principaux traits de qualité des produits issus des récoltes de cultures TH sont sensiblement équivalents à ceux des produits issus de lignées classiques non tolérantes.

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 :

- en termes de coût, on observe d'une part un surcoût lié au prix des semences, sans que celui-ci semble constituer un frein majeur à l'adoption des VTH, tout au moins pour ceux des agriculteurs qui les ont adoptées. D'autre part, on constate un moindre coût des herbicides, minoré par l'ajustement de la concurrence économique entre les différentes molécules et par l'évolution des formulations, phénomène principalement observé dans le cas du glyphosate. L'analyse économique fait ressortir que 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. Cependant, au

plan économique, les analyses réalisées ne mettent pas en évidence de sens préférentiel de causalité qui permettrait d'expliquer l'adoption de l'une des 2 technologies par le choix de l'autre.

Outre le profil des agriculteurs utilisant les VTH (grandes exploitations, niveau d'éducation), l'adoption n'apparaît d'ailleurs pas comme un choix isolé mais comme une adoption collective par effet de voisinage, au sens de choix simultanés rassurant les agriculteurs eux-mêmes. L'attachement des agriculteurs au "champ propre", valeur manifestant une éthique du paysage et une qualité de "bon manager de l'espace", est également cité comme élément facilitant l'adoption des VTH.

Récemment, une certaine remise en cause des bénéfices décrits ci-dessus est apparue dans la littérature économique, du fait de l'apparition d'adventices résistantes (voir plus bas). Environ la moitié des agriculteurs utilisant des VTH se disent conscients de l'existence de ce phénomène, et certains auteurs estiment qu'il est déjà suffisamment important pour remettre en question la pérennité de l'innovation. Des interrogations sur de nouvelles méthodes palliatives à mettre en place, suite à ce phénomène (multiplication de traitements, augmentation des doses, travail du sol renforcé, empilement de résistances, etc.) se font jour. Il reste cependant difficile de conclure sur l'efficacité économique de long terme, la remise en cause du modèle dominant (VTH transgénique / USA) pouvant devenir une réalité si un développement des adventices résistantes continue significativement.

Les conclusions présentées plus haut sont, le résultat d'analyses de données portant essentiellement sur le contexte nord-américain, obtenues dans des systèmes de production agronomique déjà très simplifiés, voire simplifiés à l'extrême. La question de leur transposition à l'Europe se pose, en particulier sur des successions de cultures et des itinéraires techniques parfois plus complexes qu'en Amérique du nord. La bibliographie actuellement disponible ne relate que peu d'expériences d'introduction de VTH dans des systèmes de production en contexte européen.

Un risque spécifique : la diffusion dans l'espace et le temps du trait TH

Si l'apparition des variétés transgéniques a fait émerger la question de l'échappement du transgène au-delà de la culture, cette problématique se pose également de façon générique pour tout caractère agronomique introduit chez une variété, que celle-ci soit issue de transgenèse ou non. Les risques associés à ce phénomène sont la contamination des cultures voisines et la dispersion incontrôlée et naturelle hors et dans des zones cultivées. Le caractère problématique de cet échappement dépend du trait agronomique considéré. Dans le cas du trait TH, la diffusion de ce caractère hors de la variété cultivée peut conduire à l'apparition de populations adventices ou férales tolérantes à l'herbicide, et poser de nouveaux problèmes de désherbage.

Cette diffusion du trait peut se produire par le biais :

- des semences produites par la VTH et ses descendants : persistance par les repousses dans la parcelle même, dissémination dans les parcelles voisines et hors des champs (installation de populations férales) ;
- du pollen de la VTH et de ses descendants : fécondation de cultures non TH et hybridation avec des adventices apparentées proches.

En ce qui concerne les **repousses**, leurs occurrences varient largement selon les espèces considérées. Celles-ci sont, en France, inexistantes ou presque chez le maïs et le blé, et ce en grande partie pour des raisons physiologiques (viabilité de la semence), agronomiques (période de levée) et climatiques (sensibilité au gel). Chez le **colza**, les repousses sont à l'opposé fréquentes et abondantes dans les parcelles. La dissémination des semences peut aussi donner lieu à l'installation de populations férales au dehors des champs.

Les travaux de modélisation et les suivis de culture de colza transgénique aux USA révèlent les transferts des gènes étudiés, et donc la migration inévitable du caractère TH vers des populations férales de colza, hors des parcelles cultivées, essentiellement en raison de la persistance des graines dans le sol. Dans ce cas, la gestion des repousses est donc critique pour éviter le développement de populations férales résistantes aux herbicides.

Les **flux de gènes par le pollen** et leurs conséquences dépendent de la biologie florale des espèces cultivées, de l'existence d'espèces inter-fertiles, et de la fertilité des hybrides qui peuvent en résulter. Ils dépendent aussi

de la simultanéité de leurs périodes de reproduction avec celle de l'espèce cultivée. En France, une situation de risque élevé de flux de gènes se rencontre avec le **colza**, la **betterave** et le **tournesol**. Dans le cas du colza, de nombreuses crucifères apparentées existent ; elles sont inter-fertiles et présentent des périodes de reproduction concomitantes avec celle du colza cultivé. Pour la betterave, si les cultures pour la production de racine ne fleurissent pas, des flux de gènes vers la forme adventice, induisant l'acquisition du trait TH, sont en revanche possibles dans les parcelles en production de semences. Pour le tournesol, le risque d'hybridation concerne essentiellement les tournesols "sauvages", formes adventices déjà présentes dans les parcelles. Plus les adventices sont proches botaniquement de la culture, plus les VTH paraissent intéressantes comme solution de désherbage sélectif de la culture, mais plus les fréquences de transfert du trait TH sont élevés.

Dans le cas du maïs en Europe, la transmission du trait TH n'est possible que par le pollen. Elle ne peut avoir de conséquences indésirables que si celui-ci féconde des variétés non TH, et ce, dans l'hypothèse où l'on souhaiterait établir une séparation de filières de consommation. Des distances d'isolement de quelques dizaines de mètres ainsi que le détournement d'une bande de plusieurs mètres des champs cultivés, pourraient permettre de réduire la probabilité de tels croisements, et donc de limiter la proportion d'hybrides dans les récoltes.

D'une façon générale, une dispersion du trait TH ne devrait pas modifier de manière essentielle le comportement des adventices devenues tolérantes hors pression de sélection liée à l'usage de l'herbicide. En effet, l'expression des caractères de tolérance induit le plus souvent des effets négatifs sur la croissance des hybrides, à une exception notable (croisement colza x navette), ce qui permet d'imaginer leur disparition et celle de leurs descendants en l'absence d'une pression sélective favorisante. La situation sera probablement toute autre en présence de l'herbicide ; dans ce cas le risque de voir se développer des repousses, des populations férales et/ou hybrides tolérants est élevé,

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 risque de transfert vers les adventices apparentées.

Un phénomène générique : les dérives de flore et l'apparition de résistances

Chaque changement d'herbicide ou de pratique de désherbage conduit à une adaptation et une évolution du cortège d'espèces constituant la flore des parcelles, générant potentiellement des problèmes nouveaux pour l'agriculteur. L'ESCO s'est attachée à évaluer à quel point ce phénomène d'évolution de la flore peut être plus ou moins exacerbé en système TH, et peut remettre en cause la durabilité du système de culture.

En premier lieu, l'évolution de la composition spécifique de la flore adventice est une conséquence de l'élimination efficace d'espèces auparavant problématiques, ce qui libère une niche écologique pour des espèces moins sensibles à l'herbicide. 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. Ainsi, des adventices qui n'étaient pas auparavant des espèces déterminantes dans le désherbage des cultures conventionnelles sont devenues préoccupantes dans le soja, le maïs ou le coton tolérants au glyphosate. Les espèces susceptibles de bénéficier de cette nouvelle situation dépendent aussi des caractéristiques pédologiques et hydriques, qui peuvent conditionner le type de flore présente. Il est impossible d'anticiper précisément ce phénomène sans avoir de modèles démographiques ni de base de données spécifiques sur la sensibilité des espèces aux différents produits, aux différents stades de croissance et sous des conditions climatiques et édaphiques particulières.

En second lieu, l'adaptation de la flore adventice sous l'effet de la pression sélective exercée par l'herbicide conduit au **développement spontané d'adventices résistantes**, quel que soit le mode d'apparition de la résistance. Ce phénomène est bien connu, observé depuis longtemps pour toutes les classes d'herbicides et repéré à ce jour chez 200 espèces végétales. La vitesse d'apparition puis d'expansion des adventices résistantes varie selon le mode d'action de l'herbicide, ses modalités d'applications (nombre et doses), selon la taille des populations adventices traitées, selon les surfaces concernées... En France par exemple, plus d'une vingtaine de

biotypes sauvages étaient déjà répertoriés en 1997 comme étant résistants à une ou plusieurs molécules d'herbicides utilisées largement dans les systèmes de culture classiques.

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. Cependant, dans le cas du glyphosate, son emploi massif dans des cultures TH (Roundup Ready®) à partir des années 1990 a accéléré l'évolution de la résistance à cet herbicide en Amérique. Actuellement au niveau mondial, 21 espèces présentent des populations résistantes au glyphosate. Pour d'autres modes d'action au contraire, l'acquisition de résistances, plus fréquente est liée à une utilisation antérieure à large échelle qui 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. Ainsi, dans le monde, 109 espèces présentent des résistances aux herbicides inhibiteurs de l'acétolactate synthase (notamment aux imidazolinones et/ou aux sulfonyl-urées). En France, ces herbicides sont déjà très largement utilisés en grandes cultures, et la résistance à ces molécules atteint déjà un niveau préoccupant pour quelques espèces. L'introduction, et la culture à large échelle, de variétés de nouvelles espèces tolérantes à ces herbicides (par exemple tournesol et colza) et l'évolution associée des pratiques de désherbage augmente potentiellement, dans l'espace et le temps, la pression de sélection sur les espèces ciblées qui n'ont pas encore acquis de résistance et contribue à l'extension de la résistance au sein des espèces adventices chez lesquelles elle a déjà évolué. Un élargissement de la pression de sélection à de nouvelles espèces d'adventices est également une possibilité.

Les changements de pratiques souvent associés à l'adoption des VTH – notamment la simplification ou l'abandon du travail du sol – peuvent contribuer à renforcer ces deux effets puisqu'il est avéré que l'abandon du labour entraîne rapidement une augmentation de la présence des adventices, surtout graminées et espèces pérennes, et des repousses des cultures. Du fait de l'augmentation des populations d'adventices qui subissent le désherbage, la sélection de plantes résistantes aux herbicides s'opère alors sur un plus grand nombre d'individus, ce qui a pour effet d'accroître la probabilité d'aboutir à la production d'une adventice résistante. Cette sélection sera d'autant plus rapide que les mêmes herbicides sont utilisés dans toutes les cultures de la rotation, et que ces cultures ont des périodes de croissance similaires, favorables au développement de la même flore. Ces phénomènes sont bien étayés par les observations faites en Amérique du Nord essentiellement (abandon travail du sol), mais aussi en Europe (abandon du labour).

Plus ou moins d'herbicide ?

Tous les éléments présentés plus haut amènent à se poser une question centrale dans cette étude : l'adoption des VTH conduit-elle à une réduction de l'usage des herbicides ? En effet, à 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.

L'analyse de la situation dans le continent américain confirme qu'en général l'adoption des VTH se traduit par un désherbage avec le seul herbicide total associé, en lieu et place de plusieurs herbicides spécifiques. Cette substitution de molécules actives est un phénomène clef lié à l'adoption des VTH, qui s'accompagne généralement d'une diminution de la quantité utilisée sur de courtes périodes (de 1 à 3/5 ans) après l'adoption des VTH. Ainsi, il apparaît aux USA une économie de 10% des doses d'herbicides agricoles utilisés en lien avec l'adoption de VTH transgéniques (de type Roundup Ready®). Toutefois, l'analyse des consommations réelles montre qu'à moyen terme (de 3 à 10/13 ans), cet avantage de moindre quantité épandue varie selon l'espèce cultivée et peut disparaître. Plusieurs études récentes indiquent ainsi une tendance générale à l'augmentation de la consommation d'herbicides dans les cultures TH : 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.

Toujours aux USA, ce surcroît d'utilisation d'herbicides se traduit au niveau des quantités employées mais également en termes de diversité des molécules utilisées, puisque les pratiques culturales mises en œuvre ont conduit à l'apparition d'adventices résistantes (voir section ci-dessus), difficiles à éliminer. Ce phénomène induit assez systématiquement une augmentation des doses d'herbicides utilisées et/ou un accroissement du nombre des traitements et/ou un **recours curatif à des traitements herbicides supplémentaires**.

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. En France, la prise en compte du phénomène d'apparition inéluctable d'adventices résistantes conduit certains obtenteurs et les instituts techniques à recommander aux agriculteurs d'accompagner l'introduction de VTH Clearfield® ou ExpressSun® dans la rotation, d'un **emploi préventif**, en mélange ou successivement, **de plusieurs substances herbicides**, stratégie dont l'intérêt a été établi par des études théoriques. Ainsi, sont préconisées, dès la première année de culture, la rotation des modes d'action et l'adoption de programmes herbicides (comportant l'application de plusieurs produits), 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. Si ces recommandations sont suivies dans les exploitations, elles induiront une augmentation immédiate du nombre de traitements herbicides sur l'ensemble de la rotation, annulant le bénéfice annoncé par un possible traitement unique en post-levée. De plus, cette stratégie de traitement avec un mélange de 2 classes est même 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).

Au-delà de la question de l'intérêt technique de ces VTH, liée au problème du désherbage, une augmentation des doses et du nombre de molécules utilisées pour la culture accroît la probabilité d'un impact pour les espèces non cibles, animales, algales, ou microbiennes, et renforce entre autres le questionnement relatif aux impacts des mélanges de molécules actives sur ces populations non cibles. Cette augmentation des doses et du nombre de traitements, pose également la question de la "rentabilité" de long terme de telles cultures pour l'exploitant agricole puisque, on l'a vu plus haut, un des déterminants forts de l'adoption des VTH est la réduction des coûts et simplification des pratiques associées au programme de désherbage.

La contamination chimique des milieux

L'examen de la littérature a permis de répertorier différentes conséquences de l'usage des VTH, qui ne sont - pour la plupart - pas liées à la variété en elle-même, mais à l'usage des herbicides qui y sont associés. Le risque de contamination chimique du sol et des eaux, déjà existant dans des conditions d'usage hors système VTH, pourrait être plus élevé dans un contexte d'adoption massive de VTH, en raison de l'amplification consécutive de l'usage de ces herbicides ("scale up"), tant en quantités d'herbicides utilisées par unité de surface qu'en taille des surfaces traitées. Il ne s'agit pas des doses d'herbicides "toutes molécules confondues", mais de celles du ou des quelques herbicides associés à ces VTH. Or on a pu constater que dans les pays du continent américain où ces lignées sont disponibles, elles ont été massivement et rapidement adoptées, se substituant complètement aux variétés antérieures sur un pas de temps de 10 à 15 ans, et faisant évoluer de manière concomitante les stratégies de désherbage. Ce phénomène de substitution de molécules actives pourrait conduire à l'apparition d'effets secondaires qui étaient restés jusque-là très limités voire non mis en évidence.

En lien avec ce qui précède, il convient de rappeler que seuls quelques pour cent des volumes de solutions d'herbicides dispersés sur les parcelles seront *in fine* absorbés par les végétaux, le reste étant dispersé dans l'air, ou se déposant sur le sol. Les molécules herbicides utilisées avec les VTH proposées aujourd'hui sont en majorité très solubles dans l'eau. Elles sont donc susceptibles d'être entraînées par ruissellement vers les cours d'eau, ou de contaminer les nappes d'eau souterraines par infiltration dans les sols. Certains herbicides, même peu volatiles, sont aussi retrouvés dans l'air, certes à des doses faibles, possiblement en lien avec la dispersion des aérosols lors des pulvérisations.

L'accumulation dans l'environnement des herbicides, voire leur concentration dans les chaînes trophiques, peut bien sûr engendrer des impacts écologiques et écotoxicologiques notables. Deux points méritent d'être soulignés. Le premier est que ces herbicides subissent dans le milieu des modifications chimiques (ex. photolyse) et biologiques (ex. biodégradation) qui engendrent des dérivés parfois plus écotoxiques et persistants que les molécules d'origine. De plus, si les prévisions de rémanence dans l'environnement déduites des mesures réalisées au laboratoire sont le plus souvent cohérentes avec la réalité du terrain, les suivis de terrain ont cependant révélé que le devenir de certaines molécules en conditions réelles peut diverger de ces prévisions. Cette divergence entre systèmes modèles et réalité du milieu naturel est d'autant plus marquée que les rapports entre percolation et lessivage varient d'un type de sol à l'autre, d'une région à l'autre, etc. Le cas de l'atrazine et celui de l'AMPA, métabolite dérivé du glyphosate, sont emblématiques puisque les rémanences mesurées sont très supérieures aux rémanences calculées d'après les valeurs obtenues en laboratoire.

Le deuxième point concerne les résidus d'herbicides dans les végétaux traités. Cette question se pose de façon spécifique dans le cas des VTH, étant données les conditions d'application particulières des herbicides associés et des mécanismes de tolérance : traitement appliqué en post-levée sur une plante déjà bien développée, mécanisme de dégradation ou accumulation possible de la substance herbicide dans la plante. A ce sujet, l'ESCo souligne que très peu de données issues de littérature scientifique existent sur ce sujet. Si les instances autorisant l'usage d'un herbicide sur une espèce cultivée disposent probablement de ces données au travers des dossiers d'homologation, elles ne sont cependant pas facilement accessibles.

Effets sur les espèces non cibles : des questions de recherche en suspens

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 questionable, 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. 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. Par ailleurs, la présence d'herbicides n'entrave pas le fonctionnement global de l'écosystème microbien ni le niveau d'activité des grandes fonctions

associées aux microorganismes. Néanmoins, ces molécules sont susceptibles de perturber certains des équilibres microbiens des sols.

Cette expertise rappelle le manque de données qui permettraient de mieux apprécier l'impact écotoxicologique réel des herbicides, que ce soit aux doses actives utilisées au champ, ou sous forme de traces, par exemple sous forme de résidus sur les surfaces végétales. En effet, les questions des effets liés : aux expositions chroniques aux faibles doses ; à la combinaison matière active / adjuvants ; aux "cocktails" de molécules herbicides ; aux phénomènes d'accumulation des molécules herbicides dans la chaîne trophique, restent en suspens car la littérature relative à ce sujet reste 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.

Les questions abordées dans cette section s'inscrivent en grande partie dans le cadre des phénomènes susceptibles d'engendrer une érosion de la biodiversité. Parmi les éléments importants à prendre en compte et pourtant peu documentés, figure la question récurrente des "témoins", ou en d'autres termes celle de la définition d'un état initial et d'équilibre d'un écosystème.

La pérennité agro-économique du système de culture impliquant des VTH

L'ensemble des données analysées dans l'ESCo montre les limites de l'usage de VTH et des herbicides associés. Les raisons en sont multiples mais restent essentiellement liées aux questions de dérives de flore et d'apparition de populations adventices résistantes, évoquées plus haut, en relation avec la durabilité agronomique et économique du système de culture. Ces phénomènes ont cependant été mis en évidence en conditions essentiellement nord-américaines, c'est-à-dire dans des systèmes de culture très simplifiés, ce qui pose la question de leur transposition aux systèmes de culture européens et français. Or, bien que les systèmes de culture européens soient plus diversifiés, la tendance actuelle est à leur simplification, à la fois en termes de raccourcissement des rotations, et de simplification du travail du sol – déjà à l'origine de difficultés de désherbage.

A partir des conclusions des études portant sur les VTH dans des systèmes de culture américains, et en raisonnant *a contrario*, d'autres scénarios d'utilisation des VTH restent cependant envisageables et demanderaient à être plus explorés. Ainsi un recours temporaire, localisé et raisonné à des VTH, réservé à la gestion de situations particulières de désherbage problématique, peut constituer une solution technique. Les VTH utilisées de manière raisonnée et intégrée à d'autres pratiques, constitueraient alors un élément d'enrichissement de la palette des outils agronomiques à la disposition des agriculteurs.

Il paraît également important de souligner que la technologie VTH, comme d'autres technologies lourdes, pourrait conduire à une réduction de la biodiversité cultivée. En effet, la mise en place de cette innovation est coûteuse en termes d'investissement en recherche, et de temps de développement des variétés. Il existe donc un risque de concentration des efforts d'amélioration variétale sur un plus petit nombre d'espèces, probablement celles de très grande culture, et peut-être également sur un petit nombre de variétés "élites". Ce scénario se double de la possibilité de voir les VTH remplacer à terme complètement les variétés conventionnelles (réduction de la biodiversité cultivée intraspécifique) selon des stratégies de firmes liées à la protection du trait TH ou de l'herbicide par un brevet, comme cela est déjà observé sur des marchés où la demande de variétés conventionnelles reste faible en raison de problèmes de désherbage importants. Ceci aurait pour conséquence de réduire les possibilités de choix permettant aux agriculteurs de réaliser des rotations diversifiées.

La pérennité économique du système de culture incluant des VTH pourrait également être remise en cause en regard d'un coût potentiel associé à l'éventuelle création de filières spécifiques aux variétés TH et non-TH, et dans l'hypothèse où ce coût ne serait pas compensé par une création de valeur. L'observation du cas des OGM indique d'ailleurs que cette séparation repose sur deux éléments fondamentaux, à savoir : (i) l'idée de permettre

au consommateur un libre choix des produits qu'il achète, et (ii) l'exigence d'une traçabilité des produits, devenue obligation légale. Cette dernière est un outil de transparence, de gestion des risques et d'information vis-à-vis de la société. C'est également un moyen d'imputation de responsabilité. A l'heure actuelle, il n'existe cependant pas de réglementation spécifique aux VTH, ni de demande explicite pour la création de filières séparées si ce n'est celle qui conditionne l'usage et la commercialisation des OGM. Si une telle demande émergeait, il serait possible de s'appuyer sur les dispositions relatives aux OGM, pour lesquelles différentes stratégies permettent d'envisager une coexistence au champ existant (exemples : instauration de distance d'isolement fixe, mise en place de zones tampons, c'est-à-dire zone non OGM autour de zones OGM avec possibilité de mettre en place un marché des zones tampons, auto-organisation au niveau local vers la construction de zones de culture homogènes). Dans cette hypothèse, il resterait à déterminer si le coût associé doit être pris en compte par une chaîne de valeurs qui crée un surplus de valeur, ou, de manière plus large, par la société.

Les VTH dans le contexte français

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 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. Récemment, les controverses autour du "dossier OGM" ont fortement évolué en France et dans d'autres pays européens, pour basculer de façon probablement irréversible d'une logique d'opposition vers une logique de conflit, qui fait que le discours sur les OGM est maintenant stabilisé autour de positions clivantes. Celles-ci reprennent en partie les oppositions qui existent entre une agriculture dite productiviste et une agriculture se revendiquant comme "paysanne" et cherchant à valoriser les services fournis par les écosystèmes.

Actuellement, 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. En effet, le moratoire interdisant en France la culture des OGM porteurs de l'événement mon810 (variétés de maïs Bt) a été levé fin novembre par le Conseil d'Etat. De plus, le comité scientifique et le comité économique, éthique et social du Haut Conseil des Biotechnologies, ont été saisis à plusieurs reprises en 2010 et 2011 par les autorités françaises pour rendre des avis et recommandations au sujet de demandes d'AMM pour diverses VTH transgéniques².

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 la poursuite de ces tendances, dans l'attente des résultats de l'enquête 2011).

² <http://www.hautconseildesbiotechnologies.fr/spip.php?rubrique1>

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 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 des classe A, B et G 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 ou de tournesol tolérants aux herbicides de cette classe 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, pourrait être 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 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.

Les variétés tolérantes à des herbicides sélectifs telles que celles utilisées en France et en Europe, peuvent apparaître comme des outils complémentaires intéressants face à certaines situations de désherbage difficile ou dans le cadre d'une diversification des itinéraires de désherbage. Cependant, leur utilisation répétée, et/ou ne prenant pas en compte l'évolution concomitante de la flore adventice, peut rapidement les rendre inefficaces et

faire ressurgir les mêmes difficultés, éventuellement plus complexes encore à gérer. Cette problématique n'est pas spécifique aux VTH et concerne plus généralement l'utilisation des produits phytosanitaires ou des résistances variétales à des bioagresseurs. Le caractère pérenne de l'innovation dépend de l'efficacité de l'accompagnement de leur mise en œuvre sur la parcelle et au niveau régional. La connaissance et la compréhension plus fines de la biologie et de l'écologie des adventices difficiles à éliminer, et des effets des rotations culturales sur leur développement, contribueraient à la mise au point de tels outils de gestion. Enfin, la mise en œuvre de ces innovations pose la question des objectifs pertinents de maîtrise de la flore adventice, compatibles avec les politiques actuelles de préservation de la biodiversité des espaces agricoles et de réduction de l'utilisation des pesticides.

Glossaire

Vocabulaire relatif au fonctionnement biologique d'un organisme vivant

ADN ligase : enzyme créant de nouvelles liaisons covalentes (liaisons phosphodiester) entre deux segments d'ADN. Ces enzymes sont souvent impliquées dans la réparation des cassures affectant les brins d'ADN *in vivo*.

Alkyl / alkylant : un alkyl est un groupe chimique hautement réactif, formé par exemple par la perte d'un atome d'hydrogène sur une chaîne carbonée. Les agents alkylant peuvent réagir avec les bases de l'ADN entraînant soit un arrêt de la réplication, soit une erreur de réplication.

Allèles : une des différentes formes que peut prendre un même gène. Les allèles occupent la même position (locus) sur les chromosomes homologues. Chaque allèle se différencie par une ou plusieurs différences de la séquence de nucléotides.

Allogame, allogamie : système de reproduction à fécondation croisée.

Allopolyploïdie : état d'un génome formé par la juxtaposition de plusieurs génomes diploïdes. Exemple : avec 2 génomes le colza est un allotétraploïde, avec 3 génomes le blé est allohexaploïde.

Apomixie (apomictique) : système de reproduction sans fécondation croisée (sans croisement sexué).

Appariements : capacité des bases d'ADN et d'ARN de s'associer pour former un ADN double brin ou un complexe double brin ADN /ARN. Les bases A font face aux bases T (ou U), et les bases C aux bases G.

ATP : adénosine triphosphate. Dans le métabolisme des procaryotes et des eucaryotes, l'Atp est la molécule principale permettant de stocker l'énergie sous forme de liaison phosphate.

Autofécondation : système de reproduction par lequel une plante se reproduit avec elle-même.

Cytosol : composante liquidienne du cytoplasme de la cellule.

Diploïde (voir aussi "ploïdie") : état génétique d'une cellule caractérisé par une organisation des chromosomes en paires.

Endocytose : processus par lequel une région de la membrane cytoplasmique s'invagine pour former une petite vésicule membranaire fermée, capable de migrer dans le milieu intracellulaire.

Encombrement stérique : volume occupé par un atome, un groupe fonctionnel ou une partie d'une molécule susceptible de gêner l'approche d'une autre partie de la molécule ou d'une autre molécule.

Endonucléase (ou endonucléase de restriction) : enzyme dont l'activité conduit à la coupure des brins d'ADN.

Endosymbiote : caractérise un organisme symbiotique qui vit à l'intérieur d'une autre cellule ou d'un autre organisme (ex. les *Rhizobiaceae* sont des organismes endosymbiotiques lorsqu'ils sont associés aux légumineuses dans les nodosités).

Enzyme allostérique : enzyme dont l'activité peut être modifiée par un effecteur dit effecteur allostérique. En se liant à un site autre que le site actif, cet effecteur induit un changement de configuration de l'enzyme, ce qui en module l'activité.

Enzyme de restriction : enzyme qui peut couper un fragment d'ADN au niveau d'une séquence de nucléotides caractéristique appelée site de restriction.

Épigénétique : terme s'appliquant aux modifications transmissibles et réversibles de l'expression des gènes, ne s'accompagnant pas de changements des séquences nucléotidiques. Ce type de régulation peut cibler l'ADN, l'ARN ou les protéines et agir au niveau du noyau ou du cytoplasme. Les modifications épigénétiques constituent l'un des fondements de la diversité biologique.

Epinastie : courbure des tissus en croissance.

Fasciation : épaississements de tissus végétaux (tiges, fleurs, etc.) et/ou croissance en faisceau de l'extrémité d'une tige. Les fasciations sont souvent causées par des agents pathogènes (virus ou bactéries).

Génotype : Ensemble des caractères génétiques d'un organisme. Le génotype d'un individu implique la connaissance des différentes formes d'allèles de gènes portés par cet individu.

Hétérozygote (voir aussi homozygote) : Un organisme est dit hétérozygote pour un gène quand il possède au moins deux allèles différents de ce gène à un même locus.

Homoplasmie/mique : se dit d'un individu dont tous les organistes sont génétiquement identiques.

Homozygote (voir aussi hétérozygote) : Un organisme est dit homozygote pour un gène quand tous les allèles de ce gène à un même locus sont identiques. Par définition les organismes haploïdes (ne possédant qu'une copie de leur(s) chromosome(s)) sont homozygotes.

Immunoglobuline : Protéines multimériques jouant un rôle essentiel dans la reconnaissance cellulaire et la défense de l'organisme contre les agressions. Les anticorps sont des immunoglobulines.

Inhibiteurs allostériques : inhibiteur induisant un changement de conformation spatiale de la protéine enzymatique ayant pour conséquence de modifier le site de liaison au(x) substrat(s), réduisant l'activité de l'enzyme.

Inhibiteurs compétitifs : inhibiteur empêchant la fixation du substrat sur le site actif de l'enzyme en se fixant sur ce site ou au voisinage du site. Cette inhibition peut être réversible ou irréversible, si dans ce dernier cas il s'établit une liaison covalente entre inhibiteur et enzyme.

Liposome : vésicule en général artificielle formée par une bicouche lipidique. Les liposomes sont souvent utilisés pour exporter vers des cellules des molécules bioactives.

Mésenchyme foliaire : terme utilisé de façon quelque peu abusive pour désigner le parenchyme de la feuille, c'est-à-dire l'ensemble des tissus photosynthétiques situé en général en dessous de l'épiderme.

Monomère/monomérique : se dit d'une protéine constituée d'une seule chaîne peptidique (le monomère).

Multimère/multimérique : se dit d'une protéine constituée de plusieurs chaînes peptidiques identiques ou différentes.

Myélomateux : relatif au myélome, tumeur de la moelle osseuse.

Organite : structures spécialisées contenues dans le cytoplasme et délimitées du reste de la cellule par une membrane lipidique. Il existe de nombreux types d'organites dans les cellules eucaryotes, dont les plus connus sont les mitochondries et les chloroplastes.

Phage : virus spécifique des bactéries. Ceux-ci se fixent à la surface de bactéries, injectent leur matériel génétique dans l'hôte qui : a) soit le multiplie et l'empaquette dans des structures protéiques pour former de nouveaux virus libérés par lyse de la cellule ; ou b) l'intègre dans son génome où le phage devient silencieux et se trouve répliqué dans toutes les bactéries filles lors des divisions. Ce phage peut dans certaines conditions se « réveiller » et amorcer le cycle lytique décrit plus haut.

Plasmide : chez les procaryotes, molécule d'ADN à répllication autonome et non indispensable à vie de la cellule. Les plasmides portent des déterminants génétiques conférant souvent un avantage sélectif dans des environnements particuliers (ex. virulence, résistance aux antibiotiques, aux métaux lourds, etc.).

Ploïdie (voir aussi diploïde / polyploïde) : état génétique d'une cellule caractérisé par l'organisation de ses chromosomes. Une cellule diploïde possède deux paires de chromosomes homologues, une cellule triploïde, trois paires, etc. On oppose, en termes de ploïdie, les cellules haploïdes (un seul chromosome, donc aucune paire, comme chez les bactéries) aux cellules polyploïdes (n paires de chromosomes).

Polymorphisme : terme désignant l'existence de différences au sein d'individus d'une même population ou de populations différentes. Le polymorphisme peut être visible à l'œil nu ou non, comme l'est le polymorphisme biochimique ou génétique, qui ne peut être révélé que par des techniques moléculaires.

Polyploïde : voir ploïdie.

Porine : protéine de la membrane des cellules formant pore, permettant les échanges avec le milieu extérieur.

Recombinases : terme générique désignant toutes les enzymes impliquées dans la recombinaison d'ADN. Certaines de ces enzymes agissent comme des endonucléase (voir glossaire) provoquant une coupure sur un des brins de l'ADN, d'autres en rapprochant les brins d'ADN coupés, ou en relâchant ou modifiant les contraintes physiques d'enroulage de l'ADN sur lui-même.

Séquence d'adressage : séquence protéique permettant le transfert d'une protéine dans un compartiment cellulaire précis.

Site actif : partie de la molécule de la substance active qui interagit avec son récepteur dans la cellule (cible moléculaire) pour exercer son activité biocide.

Site d'action : étape d'un site métabolique perturbé par la substance active dans les cellules cibles.

Splénique : relatif à la rate.

Stérilité mâle : caractéristique d'un végétal relatif à son incapacité à produire les gamètes mâles.

Tapetum : tissus nourriciers des sacs à pollen, dans les anthères et indispensable à la maturation du pollen.

Thylakoïde : vésicule ou empilement membranaire des chloroplastes, siège de la photosynthèse.

Translocation : Echange de segments entre deux chromosomes ou deux régions d'un même chromosome.

Transposons : séquence d'ADN (aussi appelée élément mobile ou élément transposable) capable de se déplacer et de se multiplier de manière autonome dans un génome par un mécanisme appelé transposition.

Vocabulaire relatif au fonctionnement des communautés d'organismes vivants

Adventice : Plante qui pousse dans les champs sans avoir été semée.

Dérive de flore : évolution de la composition (en espèces) de la flore adventice, suite à la modification des pratiques culturales et notamment de désherbage.

Diversité spécifique : concerne l'ensemble des espèces d'un groupe taxonomique donné, ou la totalité des espèces présentes dans un milieu donné.

Ecosystème : ensemble formé par une communauté d'organismes vivants (biocénose) et leur environnement (biotope). Unité écologique (structurale et fonctionnelle) de base en laquelle peut se réduire les systèmes écologiques plus complexes. Un agroécosystème est un écosystème transformé par l'agriculture.

Ecotype (Biotype en anglais) : Au sein d'une espèce, l'écotype caractérise une population ou les individus d'une population adaptés à des conditions environnementales et des pressions sélectives particulières (ex. sol, climat). L'écotype ne présente pas obligatoirement de signes extérieurs distinctifs, la différence étant surtout physiologique.

Espèce : unité taxonomique correspondant à un ensemble d'individus semblables en eux pouvant naturellement se reproduire entre eux en donnant des descendants fertiles.

Fitness : peut être traduit par "capacité de survie", ou "valeur adaptative" Dans une population comprenant plusieurs souches, la "fitness" d'une souche pathogène correspond à sa capacité relative à se développer, de se reproduire et de survivre au sein de cette population. Cette notion implique une comparaison entre des phénotypes différents dans un environnement donné.

Mauvaise herbe : plante herbacée ou ligneuse indésirable à l'endroit où elle se trouve.

Peuplement : ensemble des populations des espèces qui présentent une écologie semblable et occupent le même habitat.

Population : ensemble des individus appartenant à une même espèce, occupant une même fraction du milieu de vie et qui se reproduisent entre eux.

Richesse spécifique : nombre d'espèces présentes dans un écosystème donné.

Vocabulaire relatif aux herbicides

Biocide (ou produit biocide) : substance active ou préparation contenant une ou plusieurs substances actives destinées à détruire, repousser ou rendre inoffensifs les organismes nuisibles, à en prévenir l'action ou à les combattre de toute autre manière, par une action chimique ou biologique.

Dose létale 50 (DL50) : dose d'une substance provoquant la mort de 50% d'un lot de cellules, colonies cellulaires ou individus dans un protocole expérimental précis. Elle s'exprime en milligramme par kilogramme de poids vif (mg/kg).

Ecotoxicité : toxicité pour tous les éléments vivants du milieu naturel, à l'exception de l'homme.

Herbicide sélectif : herbicide que peut tolérer une espèce cultivée dans des conditions d'emploi définies. Si ces conditions ne sont pas respectées, il peut devenir non sélectif.

Herbicide total : herbicide efficace sur l'ensemble des mauvaises herbes et des espèces cultivées.

Hydrolyse : décomposition d'une substance chimique par l'action des ions issus de la dissociation de l'eau.

Lessivage : transport de substances chimiques en phase solide (dans le sol, dû aux déplacements de particules solides en suspension (argiles, substances humiques) sur lesquelles elles sont retenues).

Lixiviation : transport de substances chimiques en phase liquide (écoulement de la solution du sol).

Métabolite/produit de transformation : molécule qui résulte des réactions de transformation subies par les substances actives. On parle de métabolites pour les réactions de biodégradation et de produits de transformation pour les réactions abiotiques (hydrolyse ou photolyse).

Persistance chimique : durée d'existence d'un produit phytosanitaire dans l'environnement.

Photolyse : décomposition d'une substance chimique sous l'action de la lumière.

Phytotoxicité : altération passagère ou irréversible occasionnée à des végétaux cultivés par un produit phytosanitaire.

Résidu de produit phytosanitaire : substance susceptible d'être présente dans ou sur des végétaux, des produits végétaux ou animaux, dans un milieu ou l'un des compartiments de l'environnement à la suite de l'emploi d'un produit phytosanitaire. Ce terme englobe les substances actives et leurs produits de dégradation ou de conversion dont la prise en compte est jugée pertinente des points de vue toxicologique et écotoxicologique.

Sublétale : concentration d'un toxique immédiatement inférieure à celle provoquant la mort.

Substance active (matière active) : substance ou micro-organisme exerçant une action générale ou spécifique sur les organismes nuisibles ou les végétaux, parties de végétaux ou produits végétaux.

Xénobiotique : qualifie une substance introduite par l'homme dans un milieu donné, mais non produite naturellement par un être vivant.

Vocabulaire relatif à l'obtention de variétés

ADN-T : région de l'ADN circulaire d'un plasmide d'*Agrobacterium* qui est transférée puis insérée dans le génome des plantes (agrotransformation).

Amorces : petits fragments (en général de 12 à 30 paires de base) d'ADN synthétique (ou oligonucléotides) utilisés dans l'amplification par PCR pour amorcer la réaction de réplication.

Backcross ou rétrocroisement : opération qui consiste à transférer, par une série de croisements suivis de sélection, un gène d'un génotype (donneur) à un autre génotype (receveur). Recroisement d'un individu issu de croisement avec l'un de ses parents.

Biolistique : technique de transformation directe de l'ADN par bombardement de cellules isolées ou de tissus au moyen de microbilles revêtues de l'ADN à introduire dans le génome.

Catalogue officiel des variétés : établi par le Comité technique permanent de la sélection, liste des variétés d'une espèce cultivée qui peuvent être commercialisées en France ou en Europe (l'inscription au Catalogue national donne lieu à l'inscription automatique au Catalogue communautaire). Ces variétés satisfont aux critères de DHS et VAT :

- DHS : distinction, homogénéité, stabilité. Ensemble de critères étudiés pour l'identification d'une variété et sa protection.

- VAT : valeur agronomique et technologique. Ensemble de caractères d'intérêts agronomique et technologique étudiés pour l'inscription d'une variété au Catalogue officiel français et communautaire.

Certificat d'obtention végétal. : certificat qui protège l'obtenteur d'une variété, lui permet d'avoir des droits de licence et interdit son utilisation par un tiers sauf comme ressource génétique.

Comité technique permanent de la sélection : organisme qui, sous la tutelle du ministère de l'Agriculture, est en particulier chargé de l'inscription des variétés au Catalogue officiel français.

Electroporation : technique de transformation directe de l'ADN par application d'un champ électrique induisant la formation de micro-orifices dans les membranes d'une cellule.

Gène de sélection, marqueur de sélection : gène qui permet d'identifier les individus ayant incorporé le transgène dans leur génome.

Hybridomes : Cellules chimériques résultant de la fusion de deux cellules différentes, dont les chromosomes se mélangent pour former des noyaux hybrides possédant les caractères génétiques des deux espèces de cellules.

Introgression : insertion dans le génome d'un individu, d'un gène ou d'un segment chromosomique d'une autre espèce ou variété.

Isogénique : se dit de deux cellules, organismes, individus qui portent les mêmes allèles des mêmes gènes. Deux vrais jumeaux sont isogéniques. Une plante génétiquement modifiée est dite quasi-isogénique par rapport à la lignée dont elle dérive car elle porte les mêmes allèles et même gènes que sa parente, mais possède une ou deux copies du transgène que la lignée mère ne possède pas.

PCR : acronyme des termes anglais « polymerase chain reaction ». Par l'usage d'une enzyme de type polymérase, la PCR permet de recopier une séquence d'ADN, même présente de très faible quantité. Plusieurs cycles d'action de la polymérase permettent *in fine* d'amplifier le fragment d'ADN ciblé, donc de le visualiser et éventuellement d'en déterminer la séquence.

Protoplaste : cellule végétale, bactérienne ou fongique, non sexuelle, débarrassée de sa paroi, en général par un traitement enzymatique ou osmotique. Les protoplastes peuvent être fusionnés, ce qui conduit à la mise en commun de contenus cellulaires.

Puce transcriptomique : dispositif (souvent une lame de verre) sur lequel sont déposées de courtes séquences d'ADN correspondant aux gènes potentiellement transcrits d'un organisme. L'étude de la transcription se fait en extrayant de l'organisme à étudier les ARN messagers, en les marquant, et en hybridant ces ARN sur la puce transcriptomique.

Somaclonale : relatif aux étapes de cultures *in vitro* de cellules ou tissus végétaux.

Transgenèse / transgène : Technique visant à introduire un ou plusieurs gène(s) étranger(s) (appelé(s) transgène(s)) dans le génome d'un organisme.

Variété (au sens du généticien sélectionneur) : population artificielle, à base génétique plus ou moins étroite, reproductible et de caractéristiques agronomiques bien définies.

Vocabulaire relatif à la description du système de culture

Agroécosystème : Ensemble des relations entre les cultures, les techniques de production agricole et le milieu environnant.

Intrants : Tous éléments (consommables) entrant dans la production d'une culture.

Itinéraire technique : Combinaison logique et ordonnée des techniques mises en œuvre pour conduire une culture en vue d'atteindre un ou plusieurs objectifs donnés (de production, de protection de l'environnement...).

Labour : voir Travail du sol.

Pratiques culturales : Interventions techniques ou opérations culturales mises en œuvre sur une parcelle.

Semis direct : Semis sans aucun travail préalable du sol.

Simplification du travail du sol : Réduction de la fréquence, voire abandon, de certaines techniques culturales de préparation du sol, en particulier le labour.

Succession culturale : Nature des cultures se succédant dans le temps sur une parcelle agricole.

Système de culture : Ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles traitées de manière identique. Chaque système de culture se définit par la nature des cultures et leur ordre de succession, et par les itinéraires techniques appliqués à ces différentes cultures.

Terre arable : terre qui peut être labourée ou cultivée. Les terres arables comprennent les terrains en jachère, les cultures maraichères et céréalières et les prairies artificielles.

Traitement : opération consistant à appliquer ou à mettre en œuvre un ou plusieurs agents physiques, chimiques ou biologiques en vue de protéger ou d'améliorer la production agricole.

Travail du sol : série de façons culturales réalisées à l'aide d'instruments aratoires et destinées à créer dans le sol un milieu favorable au développement des plantes cultivées. Elles peuvent être exécutées avant la mise en place d'une culture, ou pendant son développement. Le labour est l'une des façons culturales du travail du sol.

Index des abréviations

AFNOR : Association Française de Normalisation

ANSES : Agence Nationale de Sécurité Sanitaire

COV : Certificat d'obtention végétale

CTPS : Comité technique permanent de la sélection

EFSA : European Food Safety Agency

EC : European Community

HCB : Haut Conseil des Biotechnologies

IFEN : Institut Français de l'Environnement

INERIS : Institut National de l'Environnement et des Risques

OGM : Organisme Génétiquement Modifié par les techniques de modification génétique listées aux annexes IA première partie et IB de la directive 2001/18/CE (voir Annexe 3 du présent rapport)

ONEMA : Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques

PPDB : Pesticide properties database

SOeS : Service de l'Observation et des Statistiques

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/CE¹ 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

¹ 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.

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.

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'agrofourmiture...).

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	Molécules		
A	Inhibiteurs de l'acétyl CoA carboxylase (ACCase) (synthèse des lipides)	Aryloxyphenoxy-propionate 'FOPs'	clodinafop-propargyl cyhalofop-butyl diclofop-methyl	fenoxaprop-P-ethyl fluaifop-P-butyl haloxyfop-R-methyl	propaquizafop quizalofop-P-ethyl
		Cyclohexanedione 'DIMs'	alloxydim butoxydim clethodim	cycloxydim <i>profoxydim</i> sethoxydim	<i>tepraloxydin</i> tralkoxydim
		Phenylpyrazoline 'DEN'	pinoxaden		
B	Inhibiteurs de l'acétolactate synthase ALS (acétohydroxyacid synthase AHAS) (synthèse de certains acides aminés)	Sulfonylurea	amidosulfuron azimsulfuron bensulfuron-methyl chlorimuron-ethyl chlorsulfuron cinosulfuron cyclosulfuron ethamsulfuron-methyl ethoxysulfuron flazasulfuron flupyrsulfuron-methyl-Na	foramsulfuron halosulfuron-methyl <i>imazosulfuron</i> iodosulfuron mesosulfuron metsulfuron-methyl nicosulfuron <i>oxasulfuron</i> primisulfuron-methyl prosulfuron pyrazosulfuron-ethyl	rimsulfuron sulfometuron-methyl sulfosulfuron thifensulfuron-methyl triasulfuron tribenuron-methyl trifloxysulfuron triflusulfuron-methyl <i>tritosulfuron</i>
		Imidazolinone	imazapic imazamethabenz-methyl	imazamox imazapyr	imazaquin imazethapyr
		Triazolopyrimidine	cloransulam-methyl diclosulam	florasulam flumetsulam	metosulam penoxsulam
		Pyrimidinyl(thio)benzoate	bispyribac-Na pyribenzoxim	pyriftalid pyrithiobac-Na	pyriminobac-methyl
		Sulfonylaminocarbonyl-triazolinone	flucarbazone-Na propoxycarbazone-Na		
		C1	Inhibiteurs de la photosynthèse au niveau du photosystème II	Triazine	ametryne atrazine cyanazine desmetryne <i>dimethametryne</i>
Triazinone	hexazinone			metamitron	metribuzin
Triazolinone	amicarbazone				
Uracil	bromacil			lenacil	terbacil
Pyridazinone	pyrazon = chloridazon				
Phenyl-carbamate	desmedipham			phenmedipham	
C2	Inhibiteurs de la photosynthèse au niveau du photosystème II	Urea	chlorobromuron <i>chlorotoluron</i> chloroxuron <i>dimefuron</i> <i>diuron</i> ethidimuron	fenuron <i>fluometuron (see F3)</i> <i>isoproturon</i> isouron <i>linuron</i> <i>methabenzthiazuron</i>	metobromuron <i>metoxuron</i> <i>monolinuron</i> neburon <i>siduron</i> <i>tebuthiuron</i>
		Amide	propanil	pentanochlor	
C3	Inhibiteurs de la photosynthèse au niveau du photosystème II	Nitrile	bromofenoxim	bromoxynil	ioxynil
		Benzothiadiazinone	bentazon		
		Phenyl-pyridazine	pyridate	pyridafol	
D	Inhibiteurs de la photosynthèse au niveau du photosystème I	Bipyridylum	diquat paraquat		
E	Inhibiteurs de la ProtoPorphyrinogène oxidase (PPO) (synthèse des chlorophylles)	Diphenylether	acifluorfen-Na bifenox chlométhoxyfen	fluoroglycofen-ethyl fomesafen halosafen	lactofen oxyfluorfen
		Phenylpyrazole	fluazolate	pyraflufen-ethyl	
		N-phenylphthalimide	cinidon-ethyl	flumioxazin	flumiclorac-pentyl
		Thiadiazole	fluthiacet-methyl	thidiazimin	
		Oxadiazole	oxadiazon	oxadiargyl	
		Triazolinone	azafenidin	carfentrazone-ethyl	sulfentrazone
		Oxazolidinedione	pentoxazone		
		Pyrimindione	benzfendizone	butafenacil	
Other	flufenpyr-ethyl	profluazol	pyraclonil		

F1	Inhibiteurs de la synthèse des caroténoïdes à l'étape de la phytoène désaturase (PDS)	Pyridazinone	norflurazon			
		Pyridinecarboxamide	diflufenican	picolinafen		
		Other	beflubutamid fluridone	flurochloridone flurtamone		
F2	Inhibiteurs de la synthèse des caroténoïdes au niveau de la 4-hydroxyphényl-pyruvate-dioxygénase (4-HPPD)	Triketone	mesotrione	sulcotrione		
		Isoxazole	soxachlortole	isoxaflutole		
		Pyrazole	benzofenap	pyrazolynate	pyrazoxyfen	
		Other	benzobicyclon			
F3	Inhibiteurs de la synthèse des caroténoïdes (cible inconnue)	Triazole	amitrole			
		Isoxazolidinone	clomazone			
		Urea	fluometuron			
		Diphenylether	aclonifen			
G	Inhibiteurs de l'EPSP synthase (synthèse d'acides aminés)	Glycine	glyphosate sulfosate			
H	Inhibiteurs de la glutamine synthétase (photosynthèse)	Phosphinic acid	glufosinate-ammonium bialaphos = bilanaphos			
I	Inhibiteurs de la dihydroptéroate synthase (DHP)	Carbamate	asulam			
K1	Inhibiteurs de l'assemblage des microtubules	Dinitroaniline	benefin = benfluralin <i>butralin</i> <i>dinitramine</i>	ethalfuralin oryzalin pendimethalin	trifluralin	
		Phosphoroamidate	amiprofos-methyl	butamiphos		
		Pyridine	dithiopyr	thiazopyr		
		Benzamide	propyzamide = pronamide	tebutam		
		Benzoic acid	DCPA = chlorthal-dimethyl			
K2	Inhibiteurs de la mitose / organisation des microtubules	Carbamate	chlorpropham carbetamide	propham		
K3	Inhibiteurs de la division cellulaire (VLCFAs)	Chloroacetamide	acetochlor alachlor butachlor <i>dimethachlor</i>	dimethanamid metazachlor metolachlor <i>pethoxamid</i>	pretilachlor propachlor <i>propisochlor</i> thenylchlor	
		Acetamide	diphenamid	naproanilide	napropamide	
		Oxyacetamide	flufenacet	mefenacet		
		Tetrazolinone	fentrazamide			
		Other	anilofos	cafenstrole	piperophos	
L	Inhibiteurs de la synthèse de la cellulose des parois cellulaires	Nitrile	dichlobenil	chlorthiamid		
		Benzamide	isoxaben			
		Triazolocarboxamide	flupoxam			
		Quinoline carboxylic acid	quinclorac (for monocots) (also group O)			
M	Découplage de la phosphorylation oxydative (chaîne respiratoire)	Dinitrophenol	DNOC dinoseb dinoterb			
N	Inhibiteurs de la synthèse de lipides (mécanisme différent de la classe A)	Thiocarbamate	butylate cycloate dimepiperate EPTC esprocarb	mollinate orbencarb pebulate prosulfocarb thiobencarb = benthiocarb	tiocarbazil triallate vernolate	
		Phosphorodithioate	bensulide			
		Benzofuran	benfuresate	ethofumesate		
		Chloro-Carbonic-acid	dalapon	flupropanate	TCA	
O	Substances mimétiques de l'acide indole acétique	Phenoxy-carboxylic-acid	clomeprop 2,4-D 2,4-DB	dichlorprop = 2,4-DP MCPA MCPB	mecoprop = MCPP = CMPP	
		Benzoic acid	chloramben	dicamba	TBA	
		Pyridine carboxylic acid	clopyralid fluroxypyr	picloram triclopyr		
		Quinoline carboxylic acid	quinclorac (also group L)		quinmerac	
		Other	benazolin-ethyl			

Z Mode d'action inconnu	Arylamino propionic acid	Flamprop-M-methyl /-isopropyl		
	Pyrazolium	difenzoquat		
	Organo selenate	DSMA	MSMA	
	Other	bromobutide (chloro)- flurenolcinmethylin cumyluron dazomet dymron = daimuron	fosamine methyl-dimuron = methyl-dymron etobenzanid indanofan	metam oxaziclomefone oleic acid pelargonic acid pyributicarb

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

Annexe 3. Extraits de la Directive 2001/18/CE relative à la dissémination volontaire d'organismes génétiquement modifiés dans l'environnement

Les extraits ci-dessous concernent la définition du terme "organisme génétiquement modifié" par la Directive ainsi que son champ d'application.

Deux articles sont concernés, ainsi que les Annexes auxquelles ils font référence.

Article 2. Définitions

Aux fins de la présente directive, on entend par :

[...]

2) "organisme génétiquement modifié (OGM)": un organisme, à l'exception des êtres humains, dont le matériel génétique a été modifié d'une manière qui ne s'effectue pas naturellement par multiplication et/ou par recombinaison naturelle.

Aux fins de la présente définition:

a) la modification génétique se fait au moins par l'utilisation des techniques énumérées à l'**annexe I A, première partie**;

b) les techniques énumérées à l'**annexe I A, deuxième partie**, ne sont pas considérées comme entraînant une modification génétique.

[...]

Article 3. Exemptions

1. La présente directive ne s'applique pas aux organismes obtenus par les techniques de modification génétique énumérées à l'**annexe I B**.

[...]

Annexe I A : Techniques visées à l'article 2, point 2)

PREMIÈRE PARTIE

Les techniques de modification génétique visées à l'article 2, point 2, sous a), sont, entre autres:

1) les techniques de recombinaison de l'acide désoxyribonucléique impliquant la formation de nouvelles combinaisons de matériel génétique par l'insertion de molécules d'acide nucléique, produit de n'importe quelle façon hors d'un organisme, à l'intérieur de tout virus, plasmide bactérien ou autre système vecteur et leur incorporation dans un organisme hôte à l'intérieur duquel elles n'apparaissent pas de façon naturelle, mais où elles peuvent se multiplier de façon continue;

2) les techniques impliquant l'incorporation directe dans un organisme de matériel héréditaire préparé à l'extérieur de l'organisme, y compris la micro-injection, la macro-injection et le microencapsulation;

3) les techniques de fusion cellulaire (y compris la fusion de protoplastes) ou d'hybridation dans lesquelles des cellules vivantes présentant de nouvelles combinaisons de matériel génétique héréditaire sont constituées par la fusion de deux cellules ou davantage au moyen de méthodes qui ne sont pas mises en oeuvre de façon naturelle.

DEUXIÈME PARTIE

Les techniques visées à l'article 2, point 2, sous b), qui ne sont pas considérées comme entraînant une modification génétique, à condition qu'elles n'impliquent pas l'emploi de molécules d'acide nucléique recombinant ou d'OGM obtenus par des techniques/méthodes autres que celles qui sont exclues par l'annexe I B, sont:

1) la fécondation in vitro;

2) les processus naturels tels que la conjugaison, la transduction, la transformation, ou

3) l'induction polyploïde.

Annexe I B : Techniques visées à l'article 3

Les techniques/méthodes de modification génétique produisant des organismes à exclure du champ d'application de la présente directive, à condition qu'elles n'impliquent pas l'utilisation de molécules d'acide nucléique recombinant ou d'OGM autres que ceux qui sont issus d'une ou plusieurs des techniques/méthodes énumérées ci-après, sont :

- 1) la mutagenèse;
- 2) la fusion cellulaire (y compris la fusion de protoplastes) de cellules végétales d'organismes qui peuvent échanger du matériel génétique par des méthodes de sélection traditionnelles.

L'intégralité du texte est consultable sur :

<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2001:106:0001:0038:FR:PDF>