



Études de l'OCDE sur la croissance verte

Pratiques de gestion des exploitations agricoles favorisant la croissance verte



Études de l'OCDE sur la croissance verte

Pratiques de gestion des exploitations agricoles favorisant la croissance verte

Cet ouvrage est publié sous la responsabilité du Secrétaire général de l'OCDE. Les opinions et les interprétations exprimées ne reflètent pas nécessairement les vues officielles des pays membres de l'OCDE.

Ce document et toute carte qu'il peut comprendre sont sans préjudice du statut de tout territoire, de la souveraineté s'exerçant sur ce dernier, du tracé des frontières et limites internationales, et du nom de tout territoire, ville ou région.

Merci de citer cet ouvrage comme suit :

OCDE (2016), *Pratiques de gestion des exploitations agricoles favorisant la croissance verte*, Études de l'OCDE sur la croissance verte, Éditions OCDE, Paris.
<http://dx.doi.org/10.1787/9789264252721-fr>

ISBN 978-92-64-25268-4 (imprimé)
ISBN 978-92-64-25272-1 (PDF)

Série : Études de l'OCDE sur la croissance verte
ISSN 2222-9531 (imprimé)
ISSN 2222-954X (en ligne)

Les données statistiques concernant Israël sont fournies par et sous la responsabilité des autorités israéliennes compétentes. L'utilisation de ces données par l'OCDE est sans préjudice du statut des hauteurs du Golan, de Jérusalem-Est et des colonies de peuplement israéliennes en Cisjordanie aux termes du droit international.

Crédits photo : Couverture © design by advitam for the OECD

Les corrigenda des publications de l'OCDE sont disponibles sur : www.oecd.org/about/publishing/corrigenda.htm.

© OCDE 2016

La copie, le téléchargement ou l'impression du contenu OCDE pour une utilisation personnelle sont autorisés. Il est possible d'inclure des extraits de publications, de bases de données et de produits multimédia de l'OCDE dans des documents, présentations, blogs, sites internet et matériel pédagogique, sous réserve de faire mention de la source et du copyright. Toute demande en vue d'un usage public ou commercial ou concernant les droits de traduction devra être adressée à rights@oecd.org. Toute demande d'autorisation de photocopier une partie de ce contenu à des fins publiques ou commerciales devra être soumise au Copyright Clearance Center (CCC), info@copyright.com, ou au Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), contact@cfcopies.com.

Avant-propos

Les stratégies de croissance verte en agriculture doivent permettre de répondre à la demande alimentaire mondiale en misant sur l'innovation et en améliorant la productivité dans une optique durable. Comme l'ont montré les travaux de l'OCDE, il s'agit là d'un impératif.

Le secteur agricole s'est révélé être un secteur extrêmement innovant. Dans de nombreux pays, la « révolution verte » a résulté des évolutions scientifiques intervenues en agriculture qui se sont traduites par une forte croissance de la productivité, la mise au point de nouvelles variétés végétales et l'amélioration des rendements. Les défis à relever restent cependant nombreux, de même que les opportunités à saisir pour orienter l'activité économique dans le sens d'une croissance verte. Les pratiques de gestion des exploitations qui accroissent la productivité, la stabilité et la résilience des systèmes de production doivent être encouragées et les technologies de développement durable doivent viser bien plus loin qu'une simple augmentation des rendements : elles doivent aussi économiser l'eau et l'énergie, réduire les risques, améliorer la qualité des produits et protéger l'environnement. Les technologies et pratiques agricoles qui peuvent contribuer au développement d'un secteur agricole économiquement efficient et assurer la viabilité financière des agriculteurs, tout en améliorant les performances environnementales d'une façon acceptable pour la société, généreront un « triple dividende » pour la croissance verte.

À partir d'un examen des publications, ce rapport analyse les effets des principales pratiques de gestion des exploitations propices à la croissance verte sur la productivité et l'efficacité d'utilisation des ressources, comparés à ceux de l'agriculture conventionnelle. Les pratiques examinées sont les suivantes : conservation des sols et de l'eau ; lutte intégrée contre les ennemis des cultures ; agriculture biologique ; biotechnologies agricoles modernes ; et agriculture de précision.

Ce rapport a été établi par la Direction des échanges et de l'agriculture de l'OCDE. Il a été déclassifié par le Groupe de travail mixte sur l'agriculture et l'environnement de l'OCDE (GTMAE) en décembre 2015 sous le titre *Effets de différentes pratiques de gestion des exploitations agricoles sur l'efficacité de l'utilisation des ressources et leur productivité*.

Dimitris Diakosavvas a assuré la direction du projet ; il est également co-auteur du présent rapport qui s'appuie sur trois documents établis par des consultants, les Professeurs Dimitris Psaltopoulos et Dimitris Skouras (Université de Patras, Grèce), et le Professeur Justus Wessler (Université de Wageningen, Pays-Bas). Les commentaires des délégués au GTMAE et des collègues de l'OCDE ont été grandement appréciés, en particulier ceux de Peter Kearns, Guillaume Gruère et Bertrand Dagallier (chapitre 6), et de Sylvie Poret (chapitre 4). Nos remerciements vont aussi à Hana Fratricova du ministère de l'Agriculture et du Développement rural de la République slovaque.

Ce travail a bénéficié du soutien financier du ministère de l'Agriculture, des Forêts et de la Pêche du Japon et du ministère de l'Agriculture et du Développement rural de la République slovaque. Theresa Poincet a assuré le secrétariat du projet, apportant une aide extrêmement précieuse durant tout le processus de production et Véronique de Saint-Martin a contribué à sa traduction en français. Le rapport a été mis en forme et préparé pour publication par Michèle Patterson qui a également coordonné sa production.

Table des matières

Résumé.....	9
<i>Chapitre 1. Quelles pratiques de gestion agricole pourraient concourir à la croissance verte</i>	13
<i>Chapitre 2. Rôle de la conservation des sols et de l'eau dans la transition vers une croissance verte</i>	17
Principaux messages.....	18
Pratiques de conservation de sol.....	18
Pratiques de conservation de l'eau	33
Notes.....	38
Bibliographie.....	39
Annexe 2A. Adoption de l'agriculture de conservation	48
<i>Chapitre 3. Agriculture biologique : quelle portée pour la croissance verte ?</i>	49
Principaux messages.....	50
Un secteur en plein essor.....	50
Diversité des interventions des pouvoirs publics dans les pays de l'OCDE	52
L'agriculture biologique peut-elle rivaliser avec l'agriculture conventionnelle ?.....	55
Gains environnementaux par unité de surface.....	58
L'agriculture biologique est-elle une source d'innovation ?	62
L'agriculture biologique crée des emplois	63
Notes.....	65
Bibliographie.....	66
Annexe 3A. Part de l'agriculture biologique sur le territoire agricole	71
<i>Chapitre 4. Libérer le potentiel de la lutte intégrée contre les ennemis des cultures pour une croissance verte</i>	73
Principaux messages.....	74
Un accord sur une définition commune de la lutte intégrée est indispensable pour que l'on puisse en évaluer les effets.....	74
Des effets économiques positifs très diversifiés à l'intérieur comme à l'extérieur de l'exploitation, mais peu de données concrètes.....	77
Effets positifs sur l'environnement	79
Facteurs expliquant l'émergence et la diffusion de la lutte intégrée	81
Enseignements à tirer des meilleures pratiques.....	89
Meilleures pratiques pour éliminer les obstacles et favoriser l'adoption de la lutte intégrée.....	91
Notes.....	93
Bibliographie.....	94
Annexe 4A. Lutte intégrée contre les ennemis des cultures.....	101

Chapitre 5. Dans quelle mesure la biotechnologie agricole moderne est-elle déterminante pour une productivité plus durable ?	111
Principaux messages.....	112
Qu'est-ce que la biotechnologie et quelle est son utilisation dans l'agriculture ?	112
Le génie génétique dans l'agriculture n'en est qu'à ses balbutiements.....	115
Les attentes en matière de rentabilité reposent principalement sur les rendements et les coûts relatifs	119
La lutte antiparasitaire écologiquement viable renforce les perspectives d'optimisation des avantages pour l'environnement et de réduction des risques.....	122
Perspectives d'avenir : priorités de fond pour dynamiser les retombées favorables de la biotechnologie agricole moderne.....	128
Notes.....	132
Bibliographie.....	135
Annexe 5A. Types de caractères transgéniques dans les cultures commerciales	144
Chapitre 6. L'agriculture de précision est-elle le début d'une nouvelle révolution ?	151
Principaux messages.....	152
Appliquer le bon traitement au bon endroit au bon moment	152
D'importants gains d'efficacité et de productivité des ressources.....	159
Effet positif sur l'emploi dans les secteurs amont et aval mais variable sur les exploitations.....	161
Amélioration de l'empreinte écologique de l'agriculture.....	162
Obstacles au développement du potentiel de la croissance verte	162
Notes.....	167
Bibliographie.....	169
Annexe 6A. Les avantages économiques de l'agriculture de précision	174

Tableaux

Tableau 2.1.	Effets du travail traditionnel du sol, des techniques culturales simplifiées et de l'agriculture de conservation	20
Tableau 2.2.	Évolution des concentrations en pesticides dans les eaux de ruissellement suite à la création de zones tampons	37
Tableau 2A.1.	Niveaux d'adoption de l'agriculture de conservation, année la plus récente.....	48
Tableau 3A.1.	Superficiés des terres en agriculture biologique et pourcentage du total des terres agricoles, par pays, 2005 et 2013.....	71
Tableau 5A.1.	Superficie des cultures issues des biotechnologies dans le monde en 2014, par pays	150
Tableau 6.1.	Instruments d'agriculture de précision utilisés par les membres de la Wimmera Conservation Farming Association en 2006	156
Tableau 6.2.	Proportion d'exploitations utilisant des techniques d'agriculture de précision	158
Tableau 6.3.	Coûts estimés de trois stratégies de fertilisation modulée	164
Tableau 6.4.	Raisons faisant hésiter à introduire l' agriculture de précision (plus d'une réponse possible).....	167
Tableau 6A.1.	Avantages économiques des technologies d'agriculture de précision.....	174

Graphiques

Graphique 2.1.	Adoption de l'agriculture de conservation dans les pays de l'OCDE : pourcentage du total des terres cultivées.....	23
Graphique 3.1.	L'agriculture biologique dans les pays de l'OCDE : pourcentage du total des terres agricoles, 2013	52
Graphique 4A.1.	Le concept de niveau de préjudice économique	103
Graphique 4A.2.	Niveau de préjudice économique et seuil d'intervention (seuil économique)	103
Graphique 5.1.	Part des investissements en R-D biotechnologique par application, dernière année consultable.....	128
Graphique 5A.1.	Superficie des cultures issues des biotechnologies dans le monde, par pays, plante et caractère, 2014 (%).....	149
Graphique 6.1.	Technologies de précision à débit variable - (base 2013 : 171).....	157
Graphique 6.2.	Adoption des technologies d'agriculture de précision dans le temps par type de service	158

Encadrés

Encadré 1.1.	Évaluation des impacts des pratiques de gestion des exploitations sur la productivité des ressources : définition des concepts.....	15
Encadré 2.1.	Qu'est-ce que l'agriculture de conservation ?.....	20
Encadré 2.2.	Des approches novatrices pour améliorer le potentiel de croissance verte dans les petites exploitations agricoles	22
Encadré 2.3.	Israël : une gestion efficiente des ressources hydriques.....	35
Encadré 3.1.	Le secteur de l'agriculture biologique en France.....	54
Encadré 4.1.	Qu'entend-on par « lutte intégrée contre les ennemis des cultures » ?	75
Encadré 4.2.	Pays-Bas : le projet « Farming with Future »	76
Encadré 4.3.	De quelles observations empiriques dispose-t-on sur les avantages de la lutte intégrée ?.....	78
Encadré 4.4.	Lutte intégrée et changement climatique	80
Encadré 4.5.	Initiatives internationales visant à limiter l'emploi des pesticides dangereux	82
Encadré 4.6.	Seuils d'intervention en Allemagne et initiative « eXtension » aux États-Unis	86
Encadré 5.1.	Définition de la biotechnologie par l'OCDE.....	114
Encadré 5.2.	Génomique : la nouvelle révolution.....	114
Encadré 5.3.	Bioenrichissement : la création du <i>riz doré</i>	115
Encadré 5.4.	Les cultures issues des biotechnologies aux États-Unis	117
Encadré 5.5.	Cadre législatif de l'UE relatif aux OGM.....	119
Encadré 5.6.	Répercussions possibles des cultures issues des biotechnologies sur la biodiversité : que démontrent les preuves scientifiques ?	125
Encadré 5.7.	Le <i>Gene Technology Act</i> australien	130
Encadré 6.1.	Qu'est-ce que l'agriculture de précision?	153
Encadré 6.2.	Impacts économiques : conclusions des observations empiriques.....	160

Résumé

Dans les pays de l'OCDE, pour les pouvoirs publics, utiliser les ressources avec efficacité est désormais une priorité essentielle et un élément fondamental des stratégies de croissance verte. Le présent document dresse un tableau synoptique de quelques pratiques de gestion des exploitations agricoles qui ont un potentiel de croissance verte, comme celles qui sont liées aux sols et à l'eau, l'agriculture biologique, la lutte intégrée contre les ennemis des cultures, les biotechnologies ou l'agriculture de précision. Cependant, le choix de ces exemples n'exclut pas que d'autres pratiques puissent être propices à la croissance verte.

Principaux résultats

La préservation des sols et de l'eau présente une attractivité économique très variable selon les sites, mais elle a des effets positifs sur l'environnement

Les données sur la productivité économique sont plus nuancées dans le cas des agriculteurs qui pratiquent la conservation des sols et de l'eau que dans l'agriculture conventionnelle : i) il existe une ambiguïté sur les rendements, dans la mesure où ils s'accroissent dans certaines conditions agroécologiques, mais diminuent dans d'autres, ii) le coût des matières, de l'énergie et des éléments nutritifs est réduit dans le cas des pratiques de conservation des sols, même lorsque des engrais minéraux sont nécessaires pour maintenir les rendements en l'absence de travail du sol, et iii) les méthodes de conservation des sols exigent parfois davantage de capitaux et presque toujours davantage de main-d'œuvre. Généralement, leurs rendements sont en moyenne inférieurs, même s'ils varient d'un pays de l'OCDE à l'autre et suivant les produits agricoles.

Les effets sur la productivité des ressources naturelles sont globalement positifs. Les répercussions bénéfiques de la conservation peuvent prendre plusieurs formes : réduction de la consommation de matières non énergétiques et de la production de déchets ; gestion écologiquement rationnelle des éléments nutritifs ; diminution du ruissellement des éléments nutritifs et des émissions de GES, et séquestration de grandes quantités supplémentaires de carbone ; production de services écosystémiques, notamment par le biais de la préservation de la biodiversité et des paysages ruraux ; et stimulation de l'innovation dans les secteurs non agricoles (machines, industrie chimique ou bioingénierie, par exemple). Néanmoins, il faut parfois plusieurs années pour apprécier les avantages environnementaux des systèmes de gestion conservatoire des sols et de l'eau et pour pouvoir mesurer l'efficacité de l'utilisation des ressources dans toute son ampleur.

En tout état de cause, ces résultats doivent être analysés à la lumière de l'augmentation de la demande d'aliments destinés à la population humaine et aux animaux. Même dans les cas où l'agriculture de conservation parvient à avoir des rendements équivalents à ceux de l'agriculture conventionnelle, la hausse de la demande d'aliments destinés à la consommation humaine et les signaux d'augmentation des prix peuvent accentuer la pression exercée sur les ressources en sol et, notamment, favoriser la conversion de nouvelles superficies à l'agriculture. Cela risque de pousser à convertir des terres dont d'autres usages peuvent être précieux (zones naturelles, par exemple). Dans l'ensemble, les pratiques de conservation des sols peuvent déboucher sur de nouvelles possibilités d'emploi.

L'agriculture biologique assure des services écosystémiques, mais son potentiel de rentabilité est plus incertain

La recherche, les essais au champ et l'expérience des agriculteurs montrent que, globalement, l'agriculture biologique est plus respectueuse de l'environnement que l'agriculture conventionnelle. Cependant, ses performances économiques sont incertaines, car les prix plus élevés de ses produits et le soutien public ne compensent pas en totalité ses rendements inférieurs et ses coûts économiques plus élevés dans l'ensemble.

L'agriculture biologique crée des emplois sur les exploitations et elle est susceptible d'en créer en dehors également, moyennant ses liens avec les transformateurs, les négociants et les détaillants. De plus, dans plusieurs pays, son image positive favorise le tourisme et la création de petites activités associées en milieu rural. Du point de vue écologique, elle a des effets positifs sur les sols, l'eau et la biodiversité. Toutefois, ses incidences sur les émissions de GES ne sont pas aussi avérées.

La lutte intégrée contre les ennemis des cultures peut être bénéfique à la fois à la rentabilité, à l'environnement et à la santé humaine

Dans la plupart des pays de l'OCDE, l'adoption de la lutte intégrée répond avant tout aux attentes des consommateurs et des producteurs, qui souhaitent que les aliments soient plus sûrs et que les risques sanitaires soient limités. Les effets sur les rendements, les bénéfices des exploitations, les revenus agricoles et l'environnement sont positifs. En adoptant des techniques intégrées qui exigent peu d'intrants, les agriculteurs peuvent faire diminuer la consommation de pesticides. Les données relatives aux effets sur l'emploi sont peu nombreuses. Il faudrait s'entendre sur une définition commune de la lutte intégrée contre les ennemis des cultures pour évaluer l'action publique et les impacts.

Les avantages potentiels des biotechnologies agricoles ne se concrétisent pas

Malgré la controverse qu'elles ont fait naître dans certains pays, les plantes issues des biotechnologies sont peu à peu de plus en plus utilisées. Leur emploi est toutefois variable d'un pays à l'autre et leur commercialisation concerne surtout les cultures fourragères (et quelques caractères). Aujourd'hui, les produits de deuxième et troisième générations visent des problèmes plus complexes, comme la tolérance à la sécheresse et l'efficacité de l'utilisation de l'azote, mais beaucoup de travaux de recherche sont encore nécessaires.

Il faut faire preuve de prudence dans l'extrapolation d'un caractère, d'une culture ou d'un pays à un autre, du court terme au long terme et d'un petit échantillon d'agriculteurs à un secteur tout entier, mais dans l'ensemble, les données semblent indiquer que l'application des biotechnologies modernes à l'agriculture a les résultats suivants : les exploitants enregistrent un bénéfice économique net du fait de la baisse des coûts des pesticides, d'une gestion plus souple et moins exigeante en main-d'œuvre des adventices, et de la facilitation du non-travail du sol ; les émissions de GES et les rejets d'ingrédients actifs toxiques dans l'environnement sont réduits ; la pression exercée sur les ressources en sol diminue et, par ricochet, il en va de même de celle que l'utilisation des terres agricoles fait peser sur les habitats naturels ; les effets sur l'emploi en amont et en aval du secteur agricole sont notables ; on constate une baisse des prix de certains produits agricoles de base importants, à savoir le coton, le maïs, le colza oléagineux et le soja. Néanmoins, les avantages environnementaux sont fonction des circonstances et il est indispensable de concevoir avec soin les pratiques de gestion pour éviter que les insectes et les adventices ne deviennent résistants.

Si les risques et les avantages que présentent les biotechnologies agricoles modernes ne peuvent pas être évalués objectivement sur la base des meilleures données scientifiques disponibles, nous passerons à côté d'une chance non négligeable de faire avancer la croissance verte dans l'agriculture. Imposer des obstacles réglementaires très restrictifs pour répondre à des incertitudes pourrait coûter cher à la société en limitant ou en ralentissant l'accès à des technologies bénéfiques. Cependant, l'un des principaux enseignements de l'analyse est que l'adoption des biotechnologies ne produit pas les gains économiques qui lui sont associés si elle n'est pas acceptée par la société.

L'agriculture de précision est prometteuse, mais les données à son sujet restent lacunaires

L'agriculture de précision est une démarche qui englobe toute l'exploitation et dont l'objectif est d'optimiser ce que rapportent les intrants tout en améliorant l'empreinte de l'activité sur l'environnement. Il existe un large éventail de technologies, mais celles qui sont le plus couramment adoptées relèvent d'activités à forte intensité de savoir (guidage par GPS, par exemple). Les informations sur l'agriculture de précision proviennent d'enquêtes sporadiques aussi bien dans le temps que dans l'espace, car les pays ne collectent pas de données régulièrement.

L'agriculture de précision peut contribuer à faire augmenter la productivité et l'efficacité de l'utilisation des ressources, qu'il s'agisse des ressources naturelles ou des intrants, ce qui atténue les problèmes environnementaux imputables aux activités agricoles. En outre, elle est à même de limiter l'empreinte écologique au-delà de l'exploitation (moyennant, par exemple, une gestion plus efficace de la productivité de l'eau). Ses effets sur l'emploi sont variables sur les exploitations agricoles, mais positifs en amont et en aval du secteur. Néanmoins, comme elle est peu répandue, on en sait encore peu sur ses effets environnementaux. Les lacunes techniques, le manque de connaissances, les coûts élevés au démarrage, le risque que la rentabilité de l'investissement soit insuffisante, et les contraintes structurelles (exploitations trop petites, par exemple) et institutionnelles sont des obstacles majeurs à l'adoption de l'agriculture de précision par les exploitants.

Recommandations à l'intention des pouvoirs publics

- La politique agricole devrait être caractérisée par la flexibilité, pour que les différentes pratiques ou combinaisons de pratiques puissent être appliquées dans les environnements qui conviennent le mieux.
- Il est essentiel que les pouvoirs publics veillent à ce que les diverses externalités environnementales (positives comme négatives) découlant des systèmes agricoles soient internalisées, de manière à ce que les agriculteurs puissent déterminer quel système il est préférable d'adopter pour produire ou éviter ces externalités.
- Veiller à ce que les politiques destinées à faciliter l'adoption de pratiques de gestion des exploitations présentant un potentiel de croissance verte soient cohérentes avec les politiques visant à accroître la productivité de manière durable.
- Faciliter la production d'informations scientifiques crédibles sur les pratiques de gestion des exploitations dues aux agriculteurs ou aux chercheurs, ainsi que leur diffusion auprès des exploitants et du grand public.
- Améliorer le suivi et l'évaluation des effets économiques, environnementaux et sociaux des pratiques de gestion des exploitations qui présentent un potentiel de croissance verte, pour approfondir l'analyse des risques, étayer les décisions des pouvoirs publics et optimiser leur contribution à la croissance verte.
- Mettre en évidence les facteurs qui empêcheraient l'adoption des pratiques de gestion des exploitations qui présentent un potentiel de croissance verte.
- Soutenir les initiatives internationales visant à concevoir des directives communes sur la définition de la lutte intégrée contre les ennemis des cultures et sur des principes qui établissent des critères permettant de mesurer son adoption et son impact.
- Développer la recherche sur les pratiques de gestion des exploitations qui présentent un potentiel de croissance verte, réduire le poids de la réglementation, encourager les partenariats public-privé et établir les cadres réglementaires nécessaires pour que ces pratiques satisfassent à des normes acceptables de biosécurité et de protection de l'environnement.

Chapitre 1

Quelles pratiques de gestion agricole pourraient concourir à la croissance verte

Ce chapitre présente la structure du rapport. Celui-ci analyse, à partir d'un examen de la documentation, les effets potentiels de certaines grandes pratiques de gestion des exploitations sur la productivité et l'efficacité d'utilisation des ressources, comparés à ceux de l'agriculture conventionnelle. Si certaines pratiques seulement sont étudiées ici, notons que tous les systèmes de gestion des exploitations (de l'agriculture intensive conventionnelle à l'agriculture biologique en passant par les technologies axées sur la science) sont à même de contribuer à une croissance verte. Leur contribution effective dépendra des technologies et pratiques adoptées par les agriculteurs, dont les choix seront eux-mêmes fortement conditionnés par le cadre d'action. Des systèmes plus intensifs peuvent coexister avec des systèmes plus extensifs, avec pour effet global d'accroître durablement la productivité et l'efficacité d'utilisation des ressources naturelles. Les pratiques examinées sont les suivantes : conservation des sols et de l'eau ; lutte intégrée contre les ennemis des cultures ; agriculture biologique ; biotechnologies agricoles modernes ; et agriculture de précision.

En agriculture, l'objectif principal de la stratégie pour une « croissance verte » est de répondre à la demande mondiale de produits alimentaires de façon durable. Pour y parvenir, s'en remettre au cours normal des choses ne suffit pas. Il est nécessaire de provoquer l'avènement de nouveaux types de production agricole et d'améliorations novatrices des technologies et pratiques existantes durables et écologiquement saines, mais aussi à même de contribuer à l'atténuation du changement climatique.

Les pratiques de gestion des exploitations qui accroissent la productivité, la stabilité et la résilience des systèmes de production devraient être encouragées. Au-delà de l'accroissement des rendements, les technologies au service du développement durable doivent économiser l'eau et l'énergie, réduire les risques, améliorer la qualité des produits et protéger l'environnement.

À partir d'un examen des publications, ce rapport présente une analyse des effets potentiels de grandes pratiques de gestion des exploitations sur la productivité des ressources et sur l'efficacité, en comparaison avec ceux de l'agriculture conventionnelle. Seules certaines pratiques sont étudiées ici, mais il convient de noter que tous les systèmes de gestion des exploitations (de l'agriculture intensive conventionnelle à l'agriculture biologique en passant par les technologies dues à la science) sont à même de contribuer à une croissance verte. Pour qu'ils le fassent concrètement, il faut que les agriculteurs adoptent des technologies et des pratiques adaptées. Et pour cela, il est très important qu'un cadre d'action adapté soit en place. Des systèmes intensifs peuvent coexister avec des systèmes extensifs avec pour effet, globalement, d'accroître la productivité et l'efficacité de l'utilisation des ressources naturelles de façon durable. Les pratiques examinées ici sont les suivantes : pratiques de conservation des sols et de l'eau ; lutte intégrée contre les ennemis des cultures ; agriculture biologique ; biotechnologies agricoles modernes ; et agriculture de précision.

Dans le cas des pratiques de conservation des sols, le rapport s'intéresse aux techniques culturales simplifiées et à ses variantes, aux pratiques de rotation et aux techniques de gestion des éléments nutritifs des sols. S'agissant de l'eau, il porte sur la préparation des champs visant une irrigation efficace et l'élimination des excédents d'eau, les systèmes d'irrigation sur l'exploitation, les pratiques d'irrigation, la gestion de la consommation de l'eau d'irrigation, et la protection de l'eau contre la pollution diffuse et la sédimentation.

Représentant près de 1 % des superficies agricoles dans le monde, l'agriculture biologique est la pratique de gestion intégrée la plus développée. Bien que ses règles varient quelque peu d'un pays à l'autre, certaines pratiques générales s'appliquent à tous les systèmes de culture biologiques ainsi qu'au stockage, à la transformation, au conditionnement et au transport. D'autres systèmes de gestion intégrée, comme l'agriculture de précision et la lutte intégrée contre les ennemis des cultures, relèvent d'une approche « hybride » située entre les pratiques conventionnelles et l'agriculture biologique.

Les biotechnologies agricoles modernes peuvent être appliquées à toutes les classes d'organismes (des virus et des bactéries aux plantes et aux animaux) et sont une composante majeure de l'agriculture d'aujourd'hui. Les exemples d'application des biotechnologies à l'agriculture sont nombreux. Ils comprennent l'utilisation de micro-organismes pour transformer les matériaux (comme dans la fermentation), différentes méthodes de propagation (comme le clonage de plantes ou le greffage) et les modifications génétiques (par le biais de l'élevage sélectif, par exemple).

L'agriculture de précision est une pratique relativement nouvelle, rendue possible par les technologies de l'information et la télédétection. Elle prend en compte l'exploitation dans son ensemble pour optimiser le rendement des cultures au moyen de la collecte et du traitement systématiques de données sur les cultures et les champs, et elle peut contribuer à la gestion des éléments nutritifs en adaptant plus précisément la consommation et l'application d'intrants à la croissance idéale des plantes et aux besoins. Il existe un large éventail de technologies, mais celles qui sont adoptées le plus souvent relèvent d'activités à forte intensité de savoir (guidage par GPS, par exemple).

Pour évaluer la productivité des ressources qui découle de ces pratiques agricoles, il ne suffit pas de mesurer la productivité économique au sens habituel, loin de là. Telle qu'elle est définie ici plus largement, la productivité des ressources est donnée par le rapport entre les quantités produites et les

différentes ressources utilisées dans la production. Gérer les ressources naturelles consiste à faire concorder les pratiques agricoles avec les conditions agroécologiques et socioéconomiques de manière à optimiser leur productivité (c'est-à-dire à obtenir des rendements maximums en utilisant un minimum de ressources comme les éléments nutritifs, l'eau et le sol), la productivité de l'environnement et de l'énergie (c'est-à-dire à obtenir des rendements maximums avec un minimum d'émissions totales et d'énergie), et la production de biens publics (comme la biodiversité).

L'OCDE consacre plusieurs études aux pratiques de gestion des exploitations, notamment dans le cadre de l'analyse des performances environnementales de l'agriculture et de l'impact environnemental des politiques de soutien au secteur dans les pays membres de l'OCDE. Ces travaux sont principalement axés sur les effets écologiques des diverses pratiques étudiées, et peu sur le volet « croissance ». Au contraire, le présent rapport traite aussi bien de l'aspect « croissance » que de l'aspect « vert » des impacts des pratiques agricoles.

Quelques mises en garde sont à signaler. Tout d'abord, il est difficile de comparer l'impact global de ces pratiques agricoles sur la croissance verte avec celui des systèmes agricoles conventionnels, car la définition de critères de mesure adaptés soulève des difficultés techniques. Ensuite, il faudrait que l'analyse du nombre d'emplois que « l'agriculture verte » est susceptible de créer prenne en compte les emplois « supprimés » dans les segments plus « conventionnels » du secteur. Enfin, il convient de souligner que les effets sont en général fonction des circonstances et varient considérablement suivant les cultures et l'environnement agroécologique.

Encadré 1.1. Évaluation des impacts des pratiques de gestion des exploitations sur la productivité des ressources : définition des concepts

Productivité économique : mesure la capacité de produire en employant des facteurs de production et des ressources. A ce titre, les indicateurs les plus utilisés sont de simples ratios entre une quantité produite et les intrants employés pour l'obtenir. Dans ces ratios ou indices, le numérateur est un indicateur de la quantité produite et le dénominateur un indicateur des ressources/facteurs employés. Selon ce que le numérateur mesure, l'indicateur de la productivité est considéré soit comme partiel, soit comme multifactoriel. Dans le cas de la productivité partielle des facteurs, le numérateur ne recouvre l'apport que d'un facteur (heures de travail consacrées à la production de la quantité produite, par exemple). Dans celui de la productivité multifactorielle, on mesure la variation de la quantité produite par unité d'un ensemble de facteurs (apport conjugué du capital et du travail, par exemple). Les calculs multifactoriels sont conçus pour mesurer l'influence conjuguée du changement technologique, des améliorations de l'efficacité, des rendements d'échelle, de la réaffectation des ressources et d'autres facteurs de croissance économique, compte tenu des effets du capital et du travail.

Productivité des ressources : ratio entre une quantité produite et les différents types de ressources utilisés dans la production. Les différents types de ressources sont les matières non énergétiques, les éléments nutritifs, l'eau et les sols (du point de vue de l'aptitude à produire et de l'utilisation des terres). Les principaux éléments nutritifs sont l'azote et le phosphore, qui peuvent entraîner une pollution des eaux de surface et souterraines lorsque les engrais commerciaux sont utilisés en trop grandes quantités et lorsque l'élevage est intensif. Ainsi, une grande pression sur les ressources en eau et la faible productivité de l'eau qui en résulte sont liées à un usage inefficace de l'eau et à ses conséquences environnementales et socioéconomiques : faible débit des cours d'eau, pénuries d'eau, salinisation des eaux douces en zone côtière, problèmes de santé humaine, disparition de zones humides, désertification et diminution de la production alimentaire.

Productivité de l'énergie : ratio entre une quantité produite et la consommation d'énergie. La productivité de l'énergie est étroitement liée aux effets sur les émissions de gaz à effet de serre et sur la pollution de l'air à l'échelle locale et régionale. Elle reflète au moins en partie les efforts consentis pour améliorer l'efficacité énergétique et réduire les émissions de carbone, entre autres, dans l'atmosphère. Elle est aussi associée aux prélèvements d'eau et à l'intensité avec laquelle les terres sont utilisées, responsables tous deux de la plus grande partie de la consommation d'énergie de l'agriculture..

Chapitre 2

Rôle de la conservation des sols et de l'eau dans la transition vers une croissance verte

Le présent chapitre examine les pratiques de gestion des sols et de l'eau, ainsi que leur impact sur la productivité et l'efficacité d'utilisation des ressources. Les problèmes concernant les sols sont interdépendants et il n'existe pas de solution unique mais plutôt un large éventail de solutions pour répondre à toute la gamme des problèmes rencontrés. La volonté d'institutionnaliser ces solutions et de résoudre les problèmes pédologiques à l'échelon national a cependant conduit beaucoup de pays à rendre obligatoires certaines mesures de conservation des sols, dans le cadre de leurs politiques agricoles et des dispositifs de paiements de soutien. Sont aussi passées en revue plusieurs pratiques de gestion des terres ayant des répercussions sur la conservation de l'eau : préparation des champs en vue de rationaliser l'irrigation et de gérer les excédents d'eau, systèmes et pratiques d'irrigation sur l'exploitation, gestion de la consommation d'eau d'irrigation et protection de l'eau contre la pollution diffuse et la sédimentation. Les problèmes empiriques que pose l'évaluation de ces effets sur la productivité, l'efficacité et l'innovation sont examinés.

Principaux messages

- Du point de vue des gains de productivité économique au sens habituel, la comparaison entre les pratiques de conservation des sols ou de l'eau et les méthodes agricoles conventionnelles donne des résultats mitigés.
- Les rendements sont généralement inférieurs dans les exploitations utilisant des pratiques de conservation, mais des écarts de rendements importants sont observés entre pays de l'OCDE, entre produits agricoles et dans le temps. Les pratiques de conservation des sols améliorent les rendements dans les systèmes d'agriculture pluviale sous les climats secs.
- Les effets des pratiques de conservation des sols ou de l'eau sur la productivité des ressources sont globalement clairs. D'une manière générale, les pratiques de conservation des sols réduisent l'utilisation de matières non énergétiques et la production de déchets, et améliorent la gestion des éléments nutritifs sur le plan écologique.
- En ce qui concerne l'impact des pratiques de conservation des sols et de l'eau sur l'emploi, les données sont peu nombreuses et contrastées : les pratiques de conservation des sols semblent diminuer les besoins de main-d'œuvre, mais les mesures de conservation impliquant de déplacer des cultures ont tendance à nécessiter beaucoup de main-d'œuvre.

Pratiques de conservation de sol

Une révolution silencieuse ?

L'érosion des sols est un problème environnemental planétaire. Une bonne part de cette érosion, et la dégradation des sols plus généralement, résulte de mauvaises pratiques de gestion des sols, notamment de la culture sur brûlis, du déboisement et du surpâturage. Les conditions topographiques et climatiques extrêmes et les changements climatiques observés aujourd'hui ne font qu'accroître l'érosion des sols. Les niveaux actuels de dégradation des terres et des sols sont jugés intenable. Selon le PNUE (2012), la santé et la productivité de 24 % des terres du globe s'est détériorée au cours du dernier quart de siècle du fait d'une utilisation des sols non viable. Depuis le XIXe siècle, les dommages causés à la matière organique par le défrichement de terres pour l'agriculture ou l'aménagement urbain dans le monde représenteraient 60 % des pertes du carbone stocké dans le sol et la végétation.

Malgré cela, de plus en plus de terres sont cultivées selon des méthodes de production intensive, qui soumettent les ressources naturelles dont elles dépendent à de fortes pressions et menacent l'avenir de l'agriculture. D'après une étude cosignée par le Centre commun de recherche de l'Union européenne, l'appauvrissement de la biodiversité des sols dans l'Union européenne est ainsi dû principalement à l'exploitation intensive des terres pour l'agriculture (Gardi, Jeffery et Salteli, 2013).¹

La plupart des pays de l'OCDE ont mis en place des programmes pour encourager les pratiques agricoles visant particulièrement à réduire le risque d'érosion des sols, notamment par la conversion de terres cultivables en prairies, les pâturages extensifs, l'enherbement (principalement pendant la période hivernale), et la promotion des pratiques de conservation des sols comme les techniques culturales simplifiées, les rotations de cultures favorables à la conservation des sols et les pratiques de gestion des éléments nutritifs.

Le nombre et le type d'interventions de préparation du sol pratiquées dans les systèmes de gestion des résidus de récolte sont des questions essentielles tant pour les exploitants que pour les responsables publics, car le travail du sol a une incidence sur la présence d'éléments nutritifs, la structure du sol et la stabilité des agrégats, la résistance et la température du sol, la relation sol-eau et la couverture de résidus de récolte. En outre, le travail du sol consomme de l'énergie et influe sur la capacité de séquestration du carbone du sol, ce qui a des répercussions sur les émissions de GES. La perte de carbone organique du sol (COS) a été imputée principalement au travail du sol, et les terres labourées sont considérées comme un réservoir de carbone menacé d'épuisement (Reicosky, 2003). De même, les rotations des cultures ont

des conséquences sur le risque d'érosion des sols, le ruissellement de l'eau et les propriétés physico-chimiques des sols.

Les techniques culturales simplifiées constituent aujourd'hui l'une des plus importantes révolutions techniques en matière de conduite des cultures et sont vues comme une alternative viable au travail du sol conventionnel car, en maintenant une couverture faite de résidus, elles peuvent améliorer l'efficacité à la fois agronomique et économique tout en ayant des effets positifs pour l'environnement. En outre, comme les passages dans les champs sont moins nombreux, les économies réalisées sur les dépenses de carburant et de main-d'œuvre peuvent augmenter les bénéfices des exploitations. Ces économies peuvent toutefois être contrebalancées par l'augmentation des coûts de la lutte contre les ravageurs sous certains climats et pour certaines cultures (Ebel, 2012).

Les pratiques de rotation favorables à la conservation des sols réduisent le risque d'érosion des sols, contribuent à éviter le ruissellement de l'eau et améliorent les propriétés physico-chimiques des sols. Elles peuvent également fournir du fourrage supplémentaire et remplacer une partie des intrants agricoles, notamment les engrais, les herbicides et l'eau, du fait de l'importante capacité de stockage de l'azote et de l'amélioration de la fertilité du sol, de la suppression des adventices et de la rétention d'eau des sols.

Les exploitations pratiquant la gestion des résidus de récolte retiennent plus l'eau en piégeant la neige, en réduisant l'évaporation de l'eau de la couche superficielle du sol, et en améliorant l'infiltration d'eau dans les systèmes racinaires des plantes. Ce faisant, elles produisent des avantages environnementaux en diminuant l'érosion des sols et la pollution aquatique (par la réduction des quantités de sédiments, d'engrais et de pesticides entraînés dans les écoulements d'eau), et en améliorant la qualité de l'air (dans la mesure où les particules du sol ne passent pas dans l'atmosphère).

L'agriculture de conservation – apparue au Brésil dans les années 70 – repose sur l'application simultanée des trois principes suivants qui sont au cœur des systèmes de production agricole : i) les perturbations mécaniques du sol sont systématiquement limitées au minimum ; ii) le sol est protégé par le maintien d'une couverture végétale formée de résidus de récolte et d'engrais verts, en particulier de légumineuses ; et iii) les espèces cultivées sont diversifiées par rotation et association (encadré 2.1). L'application de ces trois principes a donné lieu à des pratiques très variées selon les endroits en raison de la grande diversité des conditions de production et des besoins des exploitants.

L'agriculture de conservation, qui intègre gestion écologique et techniques agricoles modernes, correspond plus à une famille de systèmes culturels qu'à une technique ou un système unique. Dans certains cas, les semences sont plantées directement à travers les résidus de récolte (le semoir traverse les chaumes), tandis que dans d'autres, il y a un léger travail de préparation du sol pour faciliter l'implantation. Dans tous les cas, le passage à une agriculture de conservation induit des changements qui vont au-delà d'une simple modification des techniques de travail du sol, et doit être envisagé dans une démarche plus vaste englobant d'autres innovations, par exemple l'utilisation de cultures de couverture et de cultures intercalaires.

L'agriculture de conservation présente certains avantages manifestes, comme l'augmentation constatée de la matière organique dans l'horizon de surface ainsi que l'amélioration d'autres propriétés du sol et de processus intervenant dans la fourniture des services écosystémiques associés. Les pratiques de conservation des sols protègent la surface du sol par les résidus laissés sur place, et augmentent l'infiltration de l'eau et diminuent le ruissellement par l'absence de travail du sol, ce qui réduit l'érosion hydrique et éolienne (Palm et al., 2014 ; Verhulst et al., 2012). La capacité de rétention d'eau et le stockage de l'eau sont également améliorés (atténuant ainsi le risque d'inondations) lorsque les pratiques de conservation protègent les cultures en période de sécheresse (Friedrich et al., 2009 ; Kassam et al., 2009). Enfin, l'agriculture de conservation permet d'intervenir avec une plus grande précision et à des moments plus propices, et d'accroître l'efficacité des intrants. Le tableau 2.1 présente une synthèse des effets et des avantages de l'agriculture de conservation comparée aux techniques culturales simplifiées (Hobbs et al., 2008).

Encadré 2.1. Qu'est-ce que l'agriculture de conservation ?

La FAO définit l'agriculture de conservation comme étant « une méthode de gestion des agro-écosystèmes qui a pour but une amélioration soutenue de la productivité, une augmentation des profits ainsi que de la sécurité alimentaire tout en préservant et en améliorant les ressources et l'environnement. » (www.fao.org/ag/ca/fr/1a.html ; FAO, 2001). Elle comprend les pratiques culturales suivantes :

Les techniques culturales simplifiées : l'ensemble des méthodes de culture qui laissent les résidus de récolte de l'année précédente (comme les pailles de maïs ou les chaumes de blé) sur les champs avant et après l'implantation de la culture suivante afin d'atténuer l'érosion des sols et le ruissellement. Ces pratiques réduisent au strict minimum (ou suppriment) le travail du sol et maintiennent une couverture végétale constituée par des résidus de récolte (elles comprennent le non-travail du sol, le labour en bande, la culture sur billons et le semis sur paillis) (Ministère de l'Agriculture du Minnesota, 2012). Chacune de ces quatre méthodes nécessite différents types de matériel spécialisé ou modifié et des adaptations du mode de conduite. Avec le non-travail du sol et le labour en bande, les cultures doivent être plantées directement dans les résidus. Dans le cas du non-travail du sol, le sol recouvert de résidus n'est pas travaillé du tout. Dans la méthode du labour en bande, le sol est travaillé sur des bandes étroites tandis que le reste du champ n'est pas labouré. Avec la culture sur billons, les cultures sont implantées sur des plateaux permanents hauts de 10 à 15 cm, débarrassés des résidus du précédent cultural qui sont déblayés dans les sillons adjacents. (Toutefois, il est indispensable d'entretenir les billons, ce qui demande du matériel modifié ou spécialisé.) Le semis sur paillis correspond à tout autre système réduisant le travail du sol, où au moins un tiers de la surface reste couverte de résidus de récolte.

La rotation des cultures favorable à la conservation des sols : une pratique culturale dans laquelle plusieurs cultures sont plantées successivement dans le même champ. Ces cultures doivent comprendre au moins une culture de conservation des sols, par exemple une plante fourragère pérenne, ou des espèces végétales fixant l'azote ou enrichissant le sol en éléments nutritifs, comme diverses légumineuses. Ce type de rotation des cultures se rapproche des activités de cultures de couverture et est souvent pratiquée simultanément.

Les cultures de couverture : toutes les cultures qui sont plantées pour former un couvert végétal saisonnier sur un sol qui serait autrement à nu. Les cultures de couverture comprennent différentes graminées, légumineuses et plantes herbacées et sont implantées avant que la principale culture de rapport ne lève au printemps ou après la récolte à l'automne. Le terme « cultures de couverture » regroupe différentes pratiques telles que les cultures de couverture d'hiver, les cultures dérobées, les cultures étouffantes, les engrais verts et les plantes fourragères à rotation courte. Les cultures de couverture d'hiver visent à réduire l'érosion hydrique et éolienne du sol pendant la période hivernale. Les cultures dérobées sont plantées immédiatement après la récolte de la culture de rapport afin de réduire le lessivage des éléments nutritifs. Les cultures étouffantes sont utilisées pour lutter contre les adventices d'une manière respectueuse de l'environnement. Ces cultures, comme le sarrasin et le seigle, sont capables de concurrencer efficacement les principales mauvaises herbes. D'autres cultures de couverture sont utilisées comme engrais verts car elles sont incorporées au sol pour améliorer sa fertilité. Enfin, des cultures de couverture peuvent servir de pâturages ou pour l'affouragement en vert et sont appelées cultures fourragères à rotation courte.

Tableau 2.1. Effets du travail traditionnel du sol, des techniques culturales simplifiées et de l'agriculture de conservation

Problème	Travail du sol traditionnel	Techniques culturales simplifiées	Agriculture de conservation
Pratique	Perturbe le sol et laisse la surface nue	Réduit la perturbation du sol par rapport au travail traditionnel et laisse une couverture en surface	Le sol est perturbé au minimum et recouvert en permanence
Érosion	Érosion hydrique et éolienne : maximale	Érosion hydrique et éolienne : sensiblement réduite	Érosion hydrique et éolienne : la moins importante des trois
Santé physique du sol	La moins bonne des trois	Sensiblement améliorée	La meilleure pratique des trois
Tassement	Employé pour réduire le tassement et peut aussi le provoquer en détruisant les pores biologiques	Le travail minimum du sol est employé pour réduire le tassement	Le tassement peut être un problème mais il est possible de l'atténuer en utilisant du paillis et en encourageant le travail du sol biologique
Santé biologique du sol	La moins bonne des trois à cause des perturbations fréquentes	Meilleure qu'avec un travail du sol traditionnel	Populations et propriétés biologiques plus variées et en meilleure santé

Tableau 2.1. Effets du travail traditionnel du sol, des techniques culturales simplifiées et de l'agriculture de conservation (suite)

Problème	Travail du sol traditionnel	Techniques culturales simplifiées	Agriculture de conservation
Infiltration de l'eau	La plus faible une fois les pores du sol bouchés	Bonne infiltration de l'eau	La meilleure des trois
Matière organique du sol	Oxyde la matière organique du sol et entraîne sa destruction	Accumulation de matière organique possible dans les horizons de surface	Accumulation de matière organique dans les horizons de surface encore meilleure
Plantes adventices	Élimine les adventices et entraîne aussi la germination d'un plus grand nombre de graines d'adventices	Le travail minimum du sol élimine les adventices et expose aussi d'autres graines d'adventices à la germination	Les adventices posent problème surtout dans les premiers stades de l'adoption de l'agriculture de conservation mais les problèmes s'atténuent avec le temps et les résidus peuvent empêcher la croissance des adventices
Température du sol	Température de surface du sol : plus variable	Température de surface du sol : variabilité intermédiaire	Température de surface du sol : la plus modérée
Consommation et coûts de gazole	Consommation de gazole : élevée	Consommation de gazole : intermédiaire	Consommation de gazole : très réduite
Coûts de production	Coût les plus élevés	Coûts intermédiaires	Coûts les plus faibles
Calage	Les interventions peuvent être retardées	Calage des interventions intermédiaire	Calendrier des interventions plus optimal
Rendement	Peut être inférieur quand l'implantation est retardée	Rendements identiques au travail du sol traditionnel	Rendements identiques au travail du sol traditionnel mais peuvent être plus élevés si l'implantation a lieu à un moment plus propice

Source : Tableau 2 dans Hobbs, P., K. Sayre et R. Gupta (2008), « The role of conservation agriculture in sustainable agriculture », *Philosophical Transactions of the Royal Society*, Vol. 363, série B, *Biological Sciences*.

L'agriculture de conservation et les techniques sans travail du sol se développent rapidement dans plusieurs pays. D'après les données rassemblées par la FAO, l'agriculture de conservation s'est étendue au rythme moyen d'environ 7 millions d'hectares par an entre 1999 et 2013 (avec une superficie passée de 45 à 125 millions d'hectares). Depuis 1990, le taux d'adoption dans le monde a progressé de façon exponentielle, principalement en Amérique du Nord et du Sud, en Australie et en Nouvelle-Zélande. Les principaux facteurs expliquant cette évolution sont la stagnation de la productivité due à l'érosion des sols, à leur appauvrissement en matière organique, à la dégradation de leur structure et à leur tassement, l'augmentation des coûts de production, l'action gouvernementale, l'adoption de cultures résistant aux herbicides et les effets possibles du changement climatique (Kassam, Friedrich et Derpsch, 2014).²

Des actions concertées sont menées pour promouvoir l'agriculture de conservation dans les petites exploitations agricoles d'Asie du Sud et d'Afrique subsaharienne (Hobbs et al., 2008 ; Valbuena et al., 2012), mais il n'est pas certain qu'elle soit adaptée aux petites exploitations des pays tropicaux et subtropicaux (encadré 2.2).

Encadré 2.2. Des approches novatrices pour améliorer le potentiel de croissance verte dans les petites exploitations agricoles

Si l'agriculture de conservation a bien pris dans les petites exploitations agricoles à haut rendement et à forte consommation d'intrants de la région riz-blé en Asie du Sud, son introduction est plus problématique dans les petites exploitations peu productives et à faible consommation d'intrants des pays tropicaux et subtropicaux. Les principaux handicaps ici sont le manque de résidus produits et la concurrence d'autres usages plus valorisés.

La quantité de résidus de récolte, soit laissés en surface, soit incorporés au sol, est un facteur déterminant pour l'agriculture de conservation. Contrairement à la plupart des exploitations en zones tempérées et des autres grandes exploitations où le non-travail du sol (ou le travail minimum du sol) génère une quantité importante de résidus de récolte pouvant être laissés sur le sol, de nombreuses petites exploitations en Afrique subsaharienne, dans certaines régions de l'Amérique latine et en Asie du Sud produisent peu de résidus parce que leur productivité est faible (Palm, et al., 2014 ; Paul et al., 2013 ; Thierfelder et al., 2013 ; Dube et al., 2012 ; Lahmar et al., 2012 ; Ngwira et al., 2012 ; Giller et al., 2009).

Les autres usages concurrents des résidus représentent un autre obstacle. La majorité des paysans combinent cultures et élevage et utilisent la plupart de leurs résidus pour nourrir leurs animaux. Dans certaines régions, les résidus de récolte sont brûlés pour défricher des parcelles agricoles, tandis qu'ailleurs, les résidus sont emportés par les termites. Dans beaucoup de régions d'Afrique subsaharienne, il existe également une norme culturelle qui veut que les résidus puissent être broutés par tout animal de la communauté (Wall, 2007). Parce que les résidus constituent une importante source d'alimentation animale, il sera difficile de changer cette norme culturelle.

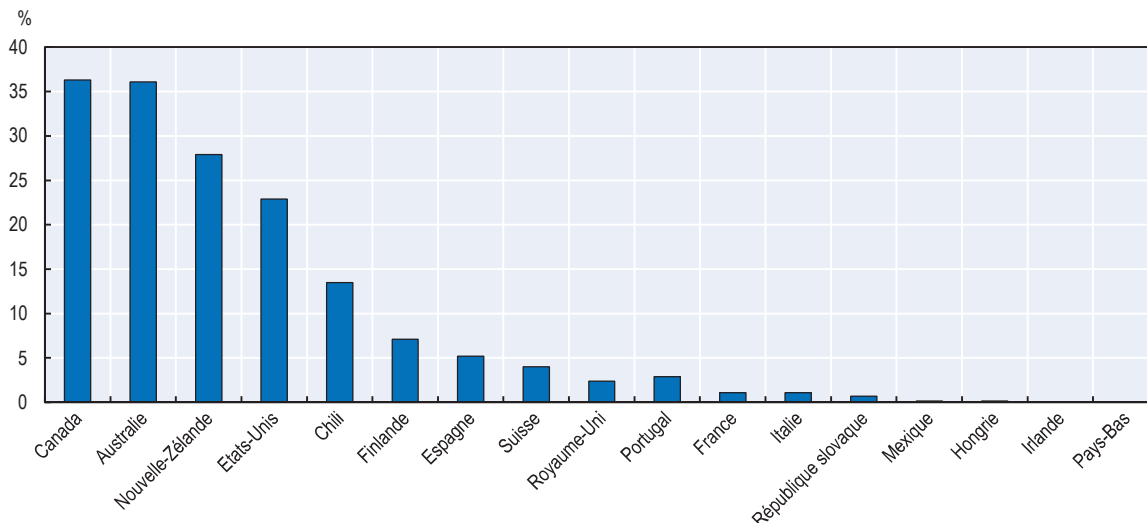
Ces restrictions montrent la nécessité d'avoir une attitude nuancée quant aux pratiques d'agriculture de conservation à promouvoir. Par exemple, une série d'interventions peut être plus appropriée (Lahmar et al., 2012). La première étape serait d'accroître la production végétale par la gestion des éléments nutritifs, puis par des pratiques de gestion des sols et de l'eau améliorant la qualité des sols et la rétention d'eau, avant d'introduire progressivement des pratiques d'agriculture de conservation là où le sol, le climat et la situation économique s'y prêtent. Ces étapes doivent être fondées sur des preuves que la pratique ou série de pratiques se traduit par un accroissement des services écosystémiques sans compromettre la hausse des rendements.

Sources : Pannell, D., R. Llewellyn et M. Corbeels (2014), « The farm-level economics of conservation agriculture for resource-poor farmers », *Agriculture, Ecosystems and Environment*, Vol. 187 ; Palm, C., H. Blanco-Canqui, F. DeClerck, L. Gatere et P. Grace (2014), « Conservation agriculture and ecosystem services: An overview », *Ecosystems and Environment*, Vol. 187, n°1 ; Brouder, S. et H. Gomez-Macpherson (2014), « The impact of conservation agriculture on smallholder agricultural yields: A scoping review of the evidence », *Agriculture, Ecosystems and Environment*, Vol. 187, n°1.

D'après les estimations, 10 % des surfaces cultivées dans le monde étaient exploitées selon les principes de l'agriculture de conservation en 2013, l'Amérique du Sud arrivant en tête (tableau A2.1). Cinq pays réunissent plus de 80 % du total des terres de la planète cultivées en agriculture de conservation : les États-Unis (23 %) ; l'Argentine et le Brésil (20 %) ; l'Australie (11 %) ; et le Canada (12 %) (tableau A2.1). Dans six pays, le pourcentage des surfaces cultivées en agriculture de conservation est supérieur ou égal à 30 % (Argentine, Brésil, Australie, Canada, Paraguay et Uruguay) (graphique 2.1 et tableau A2.1).

Aux États-Unis, les premières initiatives visant à moins perturber les sols et adopter le non-travail du sol ont fait suite aux dévastations provoquées par la grande sécheresse du milieu des années 1930. Au Canada et en Australie, c'est l'érosion éolienne et hydrique qui a tout d'abord motivé la démarche, mais d'autres facteurs ont ensuite pris de l'importance, comme l'augmentation de la productivité et des bénéfices, la diversification des cultures dans les environnements subtropicaux et tempérés froids, et la réduction des coûts d'engrais, de pesticides, d'énergie et de main-d'œuvre. Dans le cas de pays comme le Brésil, l'Argentine et le Paraguay, où le non-travail du sol a débuté dans les années 1970 et 1980, le principal élément déclenchant a été la dégradation des sols, conséquence des effets érosifs dévastateurs des très fortes tempêtes tropicales et subtropicales et des labours intensifs ayant ameubli et mis à nu les horizons superficiels du sol.

Graphique 2.1. Adoption de l'agriculture de conservation dans les pays de l'OCDE : pourcentage du total des terres cultivées



Source : FAO, base de données AQUASTAT, site Internet consulté le 2 juillet 2015.

En dehors de quelques pays (par exemple les États-Unis, le Canada, l'Australie, le Brésil, l'Argentine, le Paraguay et l'Uruguay), l'agriculture de conservation n'est pas « entrée dans les mœurs » des agriculteurs et des responsables publics, et les surfaces arables cultivées en agriculture de conservation dans le monde restent relativement minimales (environ 9 %). Les principaux facteurs qui freinent son adoption à plus grande échelle, tels qu'ils ressortent de la littérature, sont notamment : i) le manque de connaissances (ou de savoir-faire) ; ii) les attitudes et aspirations des agriculteurs ; iii) le manque de machines appropriées ; iv) le manque d'herbicides convenables pouvant faciliter la gestion des adventices ; v) le coût d'opportunité élevé des résidus de récolte pour l'alimentation animale ; et vi) des politiques publiques inadaptées (par exemple les soutiens à des produits de base dans certains pays de l'OCDE) (Kassam, Derpsch et Friedrich, 2014 ; D'Emden, Llewellyn et Burton, 2008 ; Thomas et al., 2007 ; Pannell et al., 2006 ; Prokopy et al., 2008 ; Gedikoglou et McCann, 2010 ; Gedikoglou et al., 2011).³

L'Australie est un exemple de pays ayant largement adopté les pratiques agricoles de conservation. Depuis la fin des années 90, elles sont utilisées par la majorité des cultivateurs qui en attendent principalement des rendements plus élevés grâce à la gestion de la teneur en eau du sol et à l'amélioration de la fertilité. En particulier, ces pratiques (qui comprennent un travail minimum du sol et le maintien des résidus de récolte) ont constitué un outil de conduite essentiel pour améliorer la productivité dans les régions céréalières sèches de l'intérieur du pays, qui représentent 80 % des terres cultivées. Les agriculteurs ont commencé d'expérimenter l'agriculture de conservation dans les années 60, et aujourd'hui 80 à 90 % des 23,5 millions d'hectares de cultures d'hiver du pays sont cultivés selon les principes de l'agriculture de conservation (Belloti et Rochecoste, 2014).

Le climat chaud et aride de l'Australie a été pour beaucoup dans le choix de développer la conservation de l'eau contenue dans le sol par des semis directs et le maintien des chaumes après récolte. Le gain de rendement obtenu avec des systèmes de production sans travail du sol dans le secteur des céréales est d'une tonne à l'hectare, avec davantage de possibilités de semis les années de sécheresse prolongée. D'autres secteurs (coton et sucre) ont suivi le mouvement. Selon une enquête nationale réalisée en 2012 par la Conservation Agriculture Alliance of Australia and New Zealand (CAAANZ), la principale raison ayant incité les agriculteurs à modifier leurs pratiques de travail du sol était la crainte que l'érosion des sols et la sécheresse ne mettent en péril la viabilité de leurs exploitations. En outre, les changements apportés aux pratiques culturales de conservation et les succès obtenus en termes de rendement ont motivé de nouvelles recherches sur les gains de productivité et sur

la nécessité de réduire le coût des intrants. Bien que l'objet principal de ces travaux ait été la productivité, ils ont eu d'autres retombées positives importantes pour l'environnement, en particulier la naissance de l'agriculture de précision (chapitre 6).

Aux États-Unis, la superficie de terres agricoles cultivées sans travail du sol a progressé dans toutes les grandes cultures. En 2010, environ 35.5 % des terres implantées en huit grandes cultures aux États-Unis étaient cultivées sans travail du sol (Ebel, 2012 ; Horowitz, Ebel et Ueda, 2010). Les producteurs de soja présentaient le pourcentage le plus élevé de terres cultivées sans travail du sol (près de 50 %), suivis par les producteurs de maïs (autour de 30 %) et de coton (24 %). Du point de vue de la superficie de terres implantées, le maïs est la première culture de plein champ aux États-Unis. De toutes les grandes cultures analysées, c'est le riz qui arrive en dernier pour le pourcentage de terres cultivées sans travail du sol (16.3 %).

La gestion des éléments nutritifs est une importante stratégie de conservation qui a une incidence sur les coûts de production. Elle englobe le type, la quantité et le calendrier d'épandage des principaux éléments nutritifs. Les agriculteurs ne savent souvent pas de quels éléments fertilisants leurs sols ont besoin ; l'épandage régulier d'engrais n'accroît pas les rendements mais augmente la contamination et les coûts de production. D'après les estimations, le surépandage d'engrais minéraux et organiques a accru la teneur des sols en azote, phosphore et potassium (de 2 000, 700 et 1 000 kg, respectivement par hectare de terres labourables) en Europe et en Amérique du Nord au cours des 30 dernières années (Banque mondiale, 1996). La gestion intégrée des éléments nutritifs est liée à l'agriculture de précision et abordée au chapitre 6.

Il est évident que tous les problèmes relatifs aux sols sont imbriqués et qu'il n'existe pas de solution unique – ou plutôt, il existe un large éventail de solutions pour remédier aux problèmes multidimensionnels du sol. La volonté d'institutionnaliser ces solutions et de résoudre les problèmes pédologiques à l'échelon national a conduit beaucoup de pays à adopter des mesures de conservation des sols obligatoires, liées ou non à leurs politiques agricoles.

Dans l'Union européenne, une directive relative à l'intégration de la conservation des sols a été proposée en 2006 mais n'a pas progressé depuis. Les règles d'écoconditionnalité de l'Union européenne comportent néanmoins une politique cohérente de conservation des sols pour l'agriculture. Ces règles sont un ensemble de conditions que doivent respecter les agriculteurs sollicitant des paiements directs au titre de la Politique agricole commune (par exemple le système de paiement unique par exploitation). Ces conditions constituent les exigences minimales imposées à l'exploitation et pour lesquelles l'agriculteur n'est pas dédommagé. Des exigences supplémentaires et les paiements associés peuvent être couverts par des dispositifs agro-environnementaux. Les bonnes conditions agricoles et environnementales (BCAE) sont des obligations légales relevant soit de lois en vigueur, soit de bonnes pratiques existantes dans les pays membres de l'UE avant l'introduction des règles d'écoconditionnalité. En ce qui concerne la conservation des sols, les exigences des BCAE portent sur l'érosion des sols, leur teneur en matière organique et leur structure, et sur un niveau minimum d'entretien à assurer.

S'agissant de l'érosion des sols, les BCAE imposent une couverture minimale des sols, une gestion minimale des terres en fonction des spécificités du site, et le maintien des terrasses dans la mesure du possible. Concernant la matière organique du sol, des normes sont définies en matière de rotation des cultures et de gestion des chaumes. Les recommandations relatives à la structure des sols portent notamment sur l'utilisation de machines appropriées et sur des densités minimales de bétail. Enfin, les règles d'écoconditionnalité dans l'Union européenne garantissent que la superficie de pâturages permanents rapportée à la surface agricole totale soit maintenue au niveau de 2003. Les pâturages permanents sont définis comme étant les terres ensemencées en plantes herbacées depuis au moins cinq ans et n'ayant pas été labourées pour l'implantation d'autres cultures durant cette période. Il existe aussi de nombreux programmes agro-environnementaux qui dédommagent les agriculteurs acceptant de fournir d'autres avantages publics en matière d'environnement et de conservation, en plus de ceux prévus dans le cadre de l'écoconditionnalité.

Aux États-Unis, le Food Security Act (1985 Farm Bill) a introduit deux importantes pratiques de conservation des sols et des ressources hydriques (collectivement appelées « *conservation compliance* »). Ces deux dispositions, toujours en vigueur aujourd'hui, imposent aux producteurs, en échange de certaines prestations accordées au titre de programmes du ministère de l'Agriculture des États-Unis (USDA), de maintenir un niveau minimal de conservation sur les terres très sensibles à l'érosion et de ne pas convertir de zones humides en terres cultivées. Il existe également de nombreux programmes facultatifs de conservation des sols et de l'eau.

Le programme Agricultural Management Assistance apporte une aide financière et technique aux exploitants qui souhaitent adopter des pratiques de gestion de l'eau, de qualité de l'eau et de lutte contre l'érosion en intégrant des principes de conservation dans leurs activités agricoles. L'Environmental Quality Incentives Program est un programme facultatif qui fournit une assistance financière et technique aux producteurs agricoles par le biais de contrats pouvant durer jusqu'à dix ans. L'objectif est de les aider à prévoir et mettre en œuvre des pratiques de conservation permettant de remédier à des problèmes de ressources naturelles et à exploiter les possibilités d'améliorer les ressources pédologiques, hydriques, végétales, animales, atmosphériques et autres, sur les terres agricoles et les zones boisées privées non industrielles.

Le programme de gestion de la conservation (Conservation Stewardship Program – CSP) est un programme de conservation facultatif qui encourage les producteurs à prendre en compte de manière globale les préoccupations en matière de ressources en entreprenant des activités supplémentaires de conservation et en améliorant, préservant et gérant les activités existantes de conservation. Deux types de paiements sont accordés au moyen de contrats sur cinq ans : des paiements annuels pour installer de nouvelles activités de conservation et maintenir les pratiques existantes ; et des paiements supplémentaires pour l'adoption de la rotation des cultures respectueuse des ressources. Les participants sont payés pour leurs performances en matière de conservation : plus celles-ci sont élevées, plus les paiements qu'ils reçoivent sont élevés.⁴

Des gains de productivité et d'efficacité, mais le bilan global varie selon les types de sol et les cultures

Les résultats économiques dépendent du contexte

Le sol est un actif dont la rentabilité est composée de trois éléments : i) la valeur du sol en tant qu'intrant agricole ; ii) la valeur du sol en tant qu'élément de capital susceptible d'influer – en fonction de son montant et de sa productivité – sur la valeur de revente potentielle du terrain ; et iii) la valeur attachée au sol en dehors de la production (c'est-à-dire la fourniture de services écosystémiques). Ces éléments déterminent la valeur de revente potentielle des terres agricoles.

La rentabilité des pratiques de conservation des sols et leur incidence sur la productivité et l'efficacité agricoles ont fait l'objet de nombreuses études en économie agraire.⁵ Au niveau des exploitations, l'impact économique de l'érosion de sols et de leur dégradation est souvent lié à la diminution de la productivité et des rendements observée dans certains pays.

L'évolution des prix (des intrants ou des extrants) peut avoir des effets contradictoires sur l'érosion des sols. Une hausse des prix à la production incite à augmenter l'érosion des sols du fait qu'elle pourrait encourager les agriculteurs à développer la production sur des terres moins productives ou à consacrer les terres agricoles moins productives à d'autres usages. Les politiques qui augmentent les incitations à stimuler la production sur les terres économiquement marginales peuvent avoir des conséquences disproportionnées et non intentionnelles sur l'environnement (OCDE, 2009). Lubowski et al. (2006) constatent qu'aux États-Unis les terres mises ou retenues en culture du fait des politiques d'assurance récolte sont en moyenne moins productives, plus exposées à l'érosion, et davantage susceptibles d'inclure des terres humides et des habitats d'espèces menacées que les terres arables cultivées.

Les coûts des intrants ont de fortes chances de varier entre pratiques de conservation du sol et pratiques conventionnelles. Sur le plan des coûts, les techniques culturales simplifiées sont un peu plus

avantageuses que le travail du sol conventionnel, bien que les spécificités de chaque site puissent modifier cette situation de différentes manières. L'adoption de techniques culturales simplifiées (ou du non-travail du sol) suppose que les agriculteurs puissent utiliser des tracteurs plus petits et fassent moins de passages dans les champs, d'où une diminution des coûts de carburant et de réparation. De même, la plupart des études confirment que, comme on s'y attendait, les coûts de carburant sont inférieurs à ceux encourus avec un travail du sol conventionnel.

Toutefois, il est possible que les coûts des intrants ne soient pas toujours diminués car réduire le travail du sol peut amener à utiliser davantage de produits phytosanitaires pour lutter contre les adventices, les ravageurs et les maladies. Les coûts de ces produits peuvent augmenter, tout du moins au début, et compenser ainsi les éventuelles économies de coûts de main-d'œuvre, de carburant, de réparations mécaniques et de frais généraux. La plupart des études menées dans les pays développés concluent néanmoins que l'agriculture de conservation se traduit au moins par quelques économies de coûts (FAO, 2001).

Uri (1999) constate qu'aux États-Unis, si le prix réel du pétrole brut n'a pas de répercussions sur le taux d'adoption des techniques culturales simplifiées, il en a sur le degré d'utilisation de ces pratiques. En règle générale, elles sont plus rentables dans les régions tropicales escarpées à forte pluviosité (par exemple en Amérique latine) que dans les zones tempérées plus plates (par exemple au Canada et aux États-Unis), car les premières seraient soumises à un risque d'érosion plus important avec un travail du sol conventionnel (FAO, 2001).

Une étude comparative de l'agriculture de conservation et des techniques culturales simplifiées réalisée dans le Wisconsin (États-Unis) a conclu que les coûts moyens à court terme en agriculture de conservation étaient supérieurs d'environ 7 % aux coûts moyens à long terme (Mueller et al., 1985). Les coûts moyens à court terme à l'hectare pour les techniques culturales simplifiées étaient supérieurs à ceux du travail du sol conventionnel. Cependant, après prise en compte du facteur capital, les coûts des techniques culturales simplifiées sont tombés en dessous de ceux du travail du sol conventionnel sur le long terme.

En ce qui concerne les effets sur la consommation d'engrais, Uri (1997) constate une légère hausse de celle-ci par les producteurs de maïs adoptant des techniques culturales simplifiées aux États-Unis. En outre, si l'épandage d'engrais demande davantage de compétences de conduite pour un agriculteur appliquant ces techniques, les coûts d'épandage pourraient augmenter même si la consommation d'engrais reste identique.

La FAO (2001) a analysé 40 études mesurant les valeurs actuelles nettes (VAN) financières pour l'agriculture de conservation et les méthodes agronomiques corrélées (cultures intercalaires, cultures en courbes de niveau, engrais vert), presque toutes réalisées dans des pays développés. Sur ce nombre, 34 indiquent que la VAN de l'agriculture de conservation serait positive. D'après Knowler et Bradshaw (2007), sur 11 études consacrées à l'économie de l'agriculture de conservation en Afrique subsaharienne, 10 ont abouti à une VAN positive.

Erenstein et Laxmi (2008) ont passé en revue plusieurs études (un mélange d'essais en exploitations, d'essais en stations agricoles et d'enquêtes auprès d'agriculteurs) sur les aspects économiques du non-travail du sol dans la plaine indo-gangétique. Les auteurs signalent que « les comparaisons de coût et de rentabilité sont parfois compliquées par les spécificités des sites et des différences de méthodologie ». Cependant, les résultats montrent systématiquement des améliorations, tant sous la forme d'économies de coûts que de hausses de rendement. En moyenne, un peu plus de la moitié des gains étaient imputables à des économies de coûts et un peu moins de la moitié à des hausses de rendement.

Globalement, les résultats des publications semblent montrer que, dans la plupart des cas, il serait rentable d'adopter les principes de l'agriculture de conservation ou certains d'entre eux (Pannell, et al., 2014). Il y aurait un léger avantage de coût par rapport aux pratiques culturales conventionnelles (entre 5 et 10 %), bien que les résultats varient beaucoup d'un site à l'autre, de nombreuses études

concluant à une moindre rentabilité des pratiques de conservation des sols. Des différences apparaissent également entre pays développés et pays en développement (Pannell et al., 2014 ; FAO, 2001 ; Uri, 1999).

La diversité des résultats peut avoir différentes explications. Les méthodes adoptées peuvent être trop simplistes ou partielles, et les coûts d'opportunité des ressources utilisées dans l'agriculture de conservation ne sont pas pris en considération. À titre d'exemple, l'analyse comprend seulement le coût financier direct des intrants, sans tenir compte des facteurs agronomiques et de conduite tels que le coût d'opportunité de l'utilisation des résidus de récolte comme paillis – résidus pouvant avoir une certaine valeur non monétaire lorsque l'on s'en sert pour nourrir des animaux ou qu'on les brûle pour améliorer la lutte contre les ravageurs, une valeur perdue en cas d'utilisation des résidus comme couverture du sol – ou le coût d'opportunité de la main-d'œuvre employée au désherbage. Deuxièmement, les hypothèses sur les incidences agronomiques sont peut-être trop optimistes. Par exemple, les données ne viennent pas directement des exploitations mais de stations locales dans des conditions bien contrôlées. Enfin, les risques et les incertitudes ne sont pas suffisamment pris en compte (Pannell et al., 2014). La littérature publiée souligne la grande hétérogénéité observée et la nécessité d'une analyse au cas par cas (Pannell et al., 2014).

Les meilleurs rendements sont obtenus en agriculture pluviale sous climats secs

Il est difficile de répondre avec certitude à la question de savoir si l'agriculture de conservation peut maintenir les rendements agricoles et être appliquée valablement dans des contextes agricoles extrêmement variés. Par exemple, bien que l'agriculture de conservation puisse améliorer la rétention d'eau des sols, entraînant des rendements supérieurs et plus stables pendant les saisons sèches, on ne connaît toujours pas les quantités de résidus et les teneurs en matière organique du sol nécessaires pour augmenter le taux d'humidité des sols. Les observations tendent à montrer que, dans l'ensemble, les effets sur les rendements sont mitigés, qu'ils dépendent des conditions environnementales ambiantes, notamment des types de sols et de cultures, et qu'ils pourraient varier dans le temps.

Les données existantes sur l'impact du non-travail du sol sur les rendements sont extrêmement variables (Giller et al., 2009). Quand il est associé à un paillage, on constate souvent une baisse initiale des rendements suivie d'une hausse sur la dizaine d'années suivante, pour finalement dépasser les rendements obtenus avec l'agriculture conventionnelle reposant sur le travail du sol (Pittelkow et al., 2015 ; Giller et al., 2009 ; Rusinamhodzi et al., 2011). Il arrive aussi que, dans certains essais, les rendements ne soient quasiment pas modifiés, ou que l'on obtienne des augmentations ou des diminutions selon le cas.

L'impact économique de la gestion des résidus de récolte dépend aussi fortement du contexte, notamment de facteurs comme la densité démographique et la densité du bétail, l'intensité de culture, l'accès à d'autres sources d'alimentation animale, terres et marchés, et les revenus non agricoles. En dehors des effets à long terme du paillage sans travail du sol sur les rendements, le paillage peut accroître le taux d'humidité des sols l'année suivante, entraînant une hausse des rendements, en particulier les années sèches. Cependant, certaines données montrent que si le paillage est important pour obtenir des rendements élevés dans les zones arides, les rendements après paillage peuvent diminuer dans un contexte de fortes précipitations. Il est clair que les conditions agro-écologiques entrent beaucoup en ligne de compte pour déterminer les avantages de l'agriculture de conservation.

Pittelkow et al. (2015) ont synthétisé les informations de plus de 5 000 observations issues de 610 études. Elles montrent que les exploitations qui utilisent plusieurs techniques d'agriculture de conservation peuvent obtenir des rendements équivalents ou supérieurs à ceux des exploitations travaillant en agriculture conventionnelle dans certaines conditions. En particulier, les principaux constats sont les suivants : i) le non-travail du sol utilisé seul a un impact négatif sur les rendements (-11.9 %) ⁶ ; ii) la baisse des rendements est moindre lorsque les trois principes sont utilisés, par rapport à une situation où un seul principe est appliqué ; iii) le non-travail du sol augmente sensiblement les rendements (7.3 %) en agriculture pluviale sous climat sec lorsque les deux autres principes sont aussi

mis en œuvre, du fait d'une amélioration de l'infiltration de l'eau et d'une meilleure conservation de l'eau dans le sol ; iv) le non-travail du sol diminue les rendements les premières années suivant son adoption, que les deux autres principes de l'agriculture de conservation soient appliqués ou non ; v) les baisses des rendements dues au non-travail du sol ont tendance à diminuer avec le temps, même s'ils ne rattrapent pas ceux obtenus avec un travail du sol conventionnel après dix ans ; et vi) rien n'indique que l'un des principes donne des résultats supérieurs à un autre.⁷

Les résultats présentés par Pittelkow et al. (2015) ont des incidences importantes sur le plan de la politique publique. Tout d'abord, pour maximiser les rendements, les techniques culturales simplifiées doivent être appliquées dans des systèmes de culture utilisant le maintien des résidus et la rotation des cultures. Le passage au non-travail du sol associé aux deux autres principes de l'agriculture de conservation est difficile car il représente un changement de conduite global qui demande une certaine adaptation au niveau des exploitations individuelles, et les résidus de récolte peuvent avoir une grande valeur fourragère. En second lieu, l'agriculture de conservation peut devenir une importante stratégie d'adaptation au changement climatique dans les régions du monde de plus en plus arides. Cependant, le développement de l'agriculture de conservation dans ces zones doit se faire avec précaution, car les deux autres principes sont souvent complexes à appliquer dans les petites exploitations vulnérables et pauvres en moyens, ce qui augmente le risque que les rendements baissent au lieu de progresser.

Van den Puttea et al. (2010) présentent une analyse économétrique de 47 études européennes, comprenant 563 observations qui comparent les rendements des cultures dans le cas du travail du sol conventionnel, du travail minimum du sol et du non-travail du sol. Ils arrivent à la conclusion surprenante que le non-travail du sol donne de moins bons résultats dans des conditions climatiques plus sèches, et font valoir que dans un contexte climatique plus humide, les effets négatifs – par exemple la multiplication des ravageurs – semblent compenser les éventuels gains retirés de plus grandes disponibilités en eau. Sur les sols argileux et sablonneux toutefois, cet effet négatif du non-travail du sol est contrebalancé, et toutes les techniques culturales simplifiées donnent de meilleurs résultats dans des conditions climatiques plus sèches. Un autre constat important concerne les rotations constituées uniquement de céréales, où les rendements relatifs avec des techniques culturales simplifiées ont tendance à diminuer avec le temps. Les auteurs pensent que les techniques culturales simplifiées peuvent représenter une solution viable pour l'agriculture européenne du point de vue de la productivité agricole. Il est possible de réduire fortement les éventuels effets négatifs sur la productivité agricole par un travail du sol suffisamment profond et en pratiquant la rotation des cultures, y compris avec des cultures non céréalières.

deVita et al. (2007) a examiné l'effet du non-travail du sol et du travail du sol conventionnel sur du blé dur cultivé en agriculture pluviale méditerranéenne sur une période de trois ans (2000-02) dans deux lieux différents du Sud de l'Italie (Foggia et Vasto). Les deux premières années, les rendements ont augmenté à Foggia après le passage au non-travail du sol. En revanche, les paramètres de rendement et de qualité moyens à Vasto ont été similaires pour les deux traitements au cours des deux premières années, et supérieurs pour le travail du sol conventionnel la troisième année. Ce résultat a été attribué à la forte corrélation entre précipitations et rendements, avec un système de non-travail du sol favorisant des taux plus élevés d'humidité des sols. Dans ce cas, les pratiques de conservation des sols sont plus productives (davantage d'extrants et moins d'intrants) que les pratiques conventionnelles. À l'inverse, une étude réalisée sur le blé et le maïs dans la Pampa, en Argentine, a conclu que, même si l'adoption de systèmes de travail minimum du sol se traduisait par une amélioration des sols, elle nécessitait aussi d'accroître la consommation d'engrais azotés pour maintenir les rendements (Alvarez et Steinbach, 2009).

Li et al. (2007) présentent une expérience au champ menée sur 15 ans dans la province chinoise de Shanxi, qui compare les effets à long terme du non-travail du sol avec une couverture de résidus et le travail du sol conventionnel dans une monoculture de blé d'hiver. Les rendements et l'efficacité d'utilisation de l'eau ont eu tendance à être plus élevés en non-travail du sol qu'en travail du sol conventionnel, en particulier les années à faibles précipitations, ce qui laisse penser que la modification de la structure du sol avait été plus favorable au développement des cultures. Ainsi, le non-travail du sol

est un système de production plus viable qui peut améliorer la structure du sol et accroître la productivité avec des conséquences positives sur l'environnement dans les zones sèches du Nord de la Chine où l'on pratique une agriculture pluviale.

Farooq et al. (2011) ont tracé la courbe de l'écart de rendements constaté entre l'agriculture de conservation et l'agriculture conventionnelle en fonction des précipitations à partir des résultats de 25 études et ont constaté que l'avantage de l'agriculture de conservation en termes de rendement diminuait lorsque les précipitations augmentaient, les rendements de l'agriculture de conservation étant pour la plupart supérieurs à ceux des systèmes conventionnels quand les précipitations annuelles descendaient en dessous de 560 mm. Dans leur méta-analyse de la production de maïs en agriculture de conservation, Rusinamhodzi et al. (2011) ont conclu que l'agriculture de conservation ne faisait aucune différence sur le plan de la stabilité des rendements en situation de sécheresse ou d'excès de précipitations.

Dans leur revue de la littérature, Brouder's et Gomez-Macpherson's (2014) constatent également que les très rares études fournissant des métadonnées ou des données critiques complètes montrent qu'à court terme, le non-travail du sol entraîne généralement des rendements plus faibles que le travail du sol conventionnel. Ces diminutions pourraient occasionnellement être liées à des effets directs (par exemple un tassement accru du sol dans le cas du riz), mais l'incapacité à adapter d'autres outils de conduite (par exemple la lutte contre les adventices) au système d'agriculture de conservation était un effet indirect fréquent et surprenant. Les auteurs estiment qu'il n'est pas possible de tirer des conclusions générales évidentes sur les avantages de l'agriculture de conservation et du non-travail du sol sur les rendements et l'efficacité d'utilisation des ressources dans les petites exploitations en raison du nombre trop restreint d'études au champ disponibles.

L'amélioration de la précision et du calage des interventions culturales se traduit par une plus grande efficacité d'utilisation des intrants

Les pratiques de conservation des sols permettent aux grandes exploitations de combiner la circulation raisonnée et l'agriculture de précision utilisant la géolocalisation (GPS), qui améliorent l'efficacité d'utilisation de l'énergie et des intrants. Ces gains d'efficacité ont amené certains pays à prendre des mesures telles que le dispositif de compensation des émissions de carbone en vigueur dans l'Alberta (Canada) depuis plusieurs années. Ce dispositif, fondé sur l'agriculture de conservation, est en passe d'intégrer la circulation raisonnée et l'agriculture de précision à géolocalisation (Lindwall et Sonntag, 2010).

Les pratiques de conservation des sols, qui augmentent la teneur des sols en eau en favorisant l'infiltration et en réduisant le ruissellement et l'évaporation, améliorent l'efficacité d'utilisation de l'eau et protègent les cultures des sécheresses. Le paillage protège aussi les sols contre les extrêmes de température. Au Mexique par exemple, dans les hautes terres semi-arides non irriguées, la teneur en eau des sols pendant les périodes sèches était supérieure de 10 à 20 mm dans les champs de maïs cultivés en agriculture de conservation par rapport à ceux cultivés avec un travail du sol conventionnel sans maintien des résidus. Les données montrent clairement que le paillage réduit l'érosion des sols (Giller et al., 2009).

Concernant la productivité des éléments nutritifs, l'étude réalisée par Moussa-Machraouia et al. (2010) en Tunisie indique que le non-travail du sol améliore sensiblement la composition des sols, plus particulièrement leur teneur en K, K₂O, P₂O₅ et N, tandis que la matière organique du sol (MOS) et le carbone organique du sol (COS) sont améliorés mais pas de manière sensible. Moussa-Machraouia et al. (2009) ont conclu que l'emploi prolongé de techniques culturales simplifiées augmentait de 21.4 % la matière organique du sol sur les 20 premiers centimètres, de 31.8 % l'azote total et de 34.5 % le phosphore sur les 5 premiers centimètres, par rapport au travail du sol traditionnel. Les auteurs ont également constaté que les gains de rendement les plus élevés avec la plus grande efficacité d'utilisation de l'eau étaient obtenus par un non-travail du sol avec une couverture de paille.

Dans une étude de longue durée (sur 32 ans) de la production de blé en zone semi-aride en Afrique du Sud, Loke et al. (2012) ont constaté que le non-travail du sol aboutissait à des COS supérieurs à ceux obtenus avec un paillis de chaume et un labour dans l'horizon 0–50 mm, mais les parcelles labourées présentaient des niveaux de COS plus élevés au-delà de 100 mm de profondeur. Le non-travail du sol et le paillis de chaume augmentent l'azote total du sol sur tout le profil du sol, par rapport au labour. Les auteurs estiment que, pour maintenir ou améliorer la MOS dans certains types de sols (plinthosols), la priorité doit être donnée aux pratiques de non-travail du sol avec paillis de chaume.

Hobbs et al. (2008) analysent le rôle de l'agriculture de conservation dans l'agriculture durable et présentent les avantages de l'agriculture de conservation par rapport aux techniques culturales simplifiées. Leur étude conclut que l'agriculture de conservation constitue un système de conduite plus viable et respectueux de l'environnement pour les cultures. Des études de cas en Asie et au Mexique montrent que les pratiques agricoles de conservation dans ces deux environnements différents ont permis d'augmenter la production d'une manière à la fois viable et rentable.

La capacité des pratiques agricoles de conservation des sols à atténuer le changement climatique n'est pas claire

Les pratiques de conservation des sols, en particulier le non-travail du sol, ont été encouragées en tant que moyen potentiel d'atténuer le changement climatique en séquestrant le carbone (West et Post, 2002 ; Lal, 2004). Cette vision optimiste a néanmoins été mise en doute, et il est aujourd'hui admis que le stockage du carbone du sol avec les pratiques de conservation des sols et les pratiques conventionnelles présente de très grandes variations (Govaerts et al., 2009 ; Luo et al., 2010). La capacité potentielle des pratiques agricoles de conservation des sols à favoriser le stockage du carbone dépend de tout un ensemble de facteurs, dont la teneur en carbone du sol préexistante, le système cultural, la conduite de l'exploitation, le type de sol et le climat.

De nombreuses incertitudes demeurent sur les relations entre le travail du sol, le carbone du sol et les autres gaz à effet de serre (Vanden Bygaert et al., 2003). Le travail minimum du sol ou le non-travail du sol peuvent augmenter le carbone du sol par rapport au travail conventionnel, mais ces hausses sont souvent limitées aux horizons très superficiels (les 10 premiers centimètres) et, par conséquent, l'augmentation observée représente une redistribution du carbone organique et non pas une accumulation nette.

Baker et al. (2007) estiment qu'il n'est pas avéré que le travail minimum du sol entraîne une hausse systématique du carbone organique du sol. Boddey et al. (2010) et Franzluebbers (2009), en revanche, contredisent Baker et al. Blanco-Canqui et Lal (2008) concluent que les effets du non-travail du sol sur le carbone organique du sol et l'hémioxyde d'azote dépendent des sols : le non-travail augmente les concentrations en carbone organique du sol dans les horizons supérieurs de certains sols, mais il n'induit pas un stockage de carbone organique dans le sol plus élevé sur tout le profil du sol.

Pour Palm et al. (2014), la littérature mondiale passée en revue montre clairement que la matière organique des horizons supérieurs augmente en agriculture de conservation, et avec, d'autres processus et propriétés du sol qui réduisent l'érosion et le ruissellement et améliorent la qualité des eaux. Toutefois, les effets sur les autres services écosystémiques sont moins clairs. Seulement la moitié environ de la bonne centaine d'études qui comparent la séquestration du carbone du sol entre non-travail du sol et travail conventionnel indiquent une augmentation de la séquestration avec le non-travail du sol. L'association du non-travail et du maintien des résidus de récolte accroît le potentiel de séquestration du carbone en augmentant les apports de biomasse dans le sol. L'étude de Govaerts et al. (2009) constate que sur 100 comparaisons, le stock de carbone du sol en non-travail du sol était inférieur dans 7 cas, supérieur dans 54 cas, et égal dans 39 cas par rapport au travail conventionnel sur les 30 premiers centimètres après cinq ans ou plus de non-travail du sol. Ces études ont été menées principalement au Canada et aux États-Unis, et dans une moindre mesure au Brésil, au Mexique, en Espagne, en Suisse, en Australie et en Chine.

La méta-analyse de Luo et al. (2010) fait ressortir une augmentation du carbone du sol dans l'horizon de surface (10 premiers centimètres) avec le passage du travail conventionnel au non-travail, mais aucune différence significative sur l'intervalle 0-40 cm en raison d'une redistribution du carbone dans le profil du sol (Luo et al., 2010). Selon Eve et al. (2002), en moyenne, un agriculteur de la « Corn Belt » des États-Unis qui passe du travail conventionnel au travail minimum du sol ne piègerait que 0.33 tonne de CO₂ de plus par acre et par an sur une période de 20 ans, tandis qu'en passant du travail conventionnel à l'absence totale de travail du sol, la quantité supplémentaire de CO₂ piégée par acre et par an s'établirait à 0.64 tonne.

En dehors de la perturbation minimum du sol, le niveau de séquestration du carbone dépend des bonnes rotations ou associations de cultures, et de la quantité de la biomasse du système de production qui est maintenue en surface comme paillis et qui est aussi incorporée ou piégée dans le sol. Les effets des rotations des cultures sur le carbone du sol sont souvent mitigés (Corsi et al., 2012). Les cultures produisant un grand volume de résidus peuvent piéger davantage de carbone que celles qui produisent peu de résidus. L'intensification des systèmes de culture, par exemple l'augmentation du nombre de récoltes par an, les doubles cultures et l'ajout de cultures de couverture, peut entraîner une augmentation du carbone stocké dans le sol en non-travail du sol (West et Post, 2002 ; Luo et al., 2010). West et Post (2002) ont trouvé des interactions avec les rotations de cultures et les pratiques de travail du sol ; en règle générale, les rotations de cultures piégeaient plus de carbone que les monocultures après passage en non-travail, même s'ils ont mis en évidence des exceptions notables avec les rotations maïs-soja abaissant la teneur du sol en carbone par rapport à une monoculture de maïs.

Une étude de la FAO a passé en revue la littérature scientifique s'intéressant aux effets positifs et négatifs des deux types d'agriculture les plus courants – « l'agriculture traditionnelle fondée sur le travail du sol » et « l'agriculture de conservation, un système sans travail du sol » – en ce qui concerne leurs conséquences sur les stocks de carbone du sol (Corsi et al., 2012). Les résultats tirés de l'analyse de la littérature sur la séquestration du carbone en agriculture traditionnelle ont été comparés à ceux de l'agriculture de conservation. Il ressort que cette dernière permet des niveaux de séquestration du carbone dans le sol plus élevés qu'en agriculture traditionnelle. Lorsqu'aucune séquestration de carbone n'est enregistrée ou qu'une perte de carbone est constatée dans un système agricole, cela est dû le plus souvent à l'une ou plusieurs des raisons suivantes : i) perturbation du sol ; ii) monoculture ; iii) rotation de cultures particulières ; iv) mauvaise gestion des résidus de récolte ; et v) échantillons de sol prélevés au-delà de 30 cm de profondeur.

Bien que les résidus laissés dans le système constituent un élément essentiel de la quantité de carbone stockée dans le sol, on a peu d'indications sur la quantité de résidus nécessaire pour maintenir ou accroître le carbone du sol. En pratique, des niveaux insuffisants de résidus en surface conjugués à un non-travail du sol n'entraînent pas d'augmentation de la matière organique du sol, de la teneur en eau du sol ou des services écosystémiques associés et peuvent même aboutir à une baisse de rendement (Palm et al., 2014). La quantité de résidus requise pour augmenter le carbone du sol et les effets bénéfiques associés dépend des types de sol, des rendements obtenus et de l'équilibre entre les apports de carbone et la décomposition du carbone qui varient avec les sols et le climat.

Les effets de ces trois types de pratiques sur les stocks de carbone du sol sont d'habitude analysés séparément dans la littérature. Pourtant, ces composantes de l'agriculture de conservation sont interdépendantes. Par exemple, les types de végétaux cultivés, l'intensité et la durée des cultures déterminent la quantité des apports et donc la capacité de l'agriculture de conservation à stocker davantage de carbone que le travail du sol conventionnel. L'intensification de systèmes cultureux fournissant une quantité importante de biomasse aérienne et souterraine (c'est-à-dire des espèces végétales à racines profondes) peut permettre aux systèmes d'agriculture de conservation de stocker davantage de carbone dans le sol que le travail du sol conventionnel (Luo et al., 2010).

L'agriculture de conservation réduit également les besoins en électricité et en énergie. Le non-travail du sol diminue la consommation de carburant, demande moins d'heures de travail et ralentit la dépréciation du matériel par unité produite. Ces facteurs contribuent à réduire les émissions non

seulement des exploitations agricoles mais aussi des usines de fabrication des machines. En outre, les résidus de récolte laissés dans les champs restituent au sol le carbone fixé dans les plantes cultivées par le biais de la photosynthèse, améliorant ainsi la santé et la fertilité des sols. Cela abaisse à son tour la consommation d'engrais et les émissions de CO₂.

Plusieurs études font état d'émissions de GES (hémioxyde d'azote et méthane) plus élevées en agriculture de conservation qu'en agriculture conventionnelle, tandis que d'autres font le constat inverse. Dans le cas du non-travail du sol, les résidus sont restitués au sol sous la forme de paillis superficiel susceptible de diminuer les taux d'évaporation, et donc d'augmenter le taux d'humidité du sol et sa teneur en carbone organique labile (Galbally et al., 2005), d'où une hausse des émissions de N₂O par rapport au travail du sol conventionnel. L'augmentation de la densité apparente du sol observée en agriculture de conservation par rapport au travail du sol conventionnel peut aussi accroître les émissions.

Toutefois, l'abaissement des températures des sols et l'amélioration de leur structure associée au non-travail du sol peuvent diminuer la fréquence de la saturation des sols et réduire les émissions de N₂O. En ce qui concerne ces émissions, la comparaison de l'agriculture de conservation et des pratiques conventionnelles ne permet pas de tirer de conclusions définitives et donne au contraire des résultats contradictoires. L'hétérogénéité des données sur les émissions de N₂O en agriculture de conservation pourrait s'expliquer par le manque de comparabilité des études et par des problèmes méthodologiques relatifs à la mesure du N₂O au champ (Palm, et al., 2014).

Il existe très peu d'études analysant l'impact des différentes pratiques d'agriculture de conservation sur tous les GES concernés, notamment la séquestration du carbone du sol et le potentiel de réchauffement global net résultant. L'une des rares études détaillées menées sur plusieurs années n'a trouvé aucune différence entre l'agriculture de conservation et le travail du sol conventionnel, que ce soit pour les émissions de N₂O ou de CH₄, dans un essai cultural de longue durée en zone non irriguée dans le centre du Mexique (Dendooven et al., 2012a et Dendooven et al., 2012b). Elle a conclu que le potentiel de réchauffement global était sensiblement moindre en agriculture de conservation qu'en travail du sol conventionnel, uniquement du fait des modifications du stock de carbone du sol.

West et Marland (2002) estiment les émissions de dioxyde de carbone dues à l'utilisation de machines et d'autres intrants agricoles (engrais, pesticides, semences, etc.) pour trois types de travail du sol dans les zones non irriguées des États-Unis. Les auteurs procèdent à une analyse complète du cycle du carbone dans l'agriculture des États-Unis. Ils concluent que le passage du travail du sol conventionnel au non-travail du sol n'augmente pas les émissions de CO₂, et dans la plupart des cas contribue à les réduire, et aussi que cette conversion offre un moyen à la fois d'augmenter la séquestration du carbone et de réduire simultanément les émissions de carbone de l'agriculture.

Diminution des besoins de main-d'œuvre, mais la disponibilité de main-d'œuvre est cruciale pour l'adoption des pratiques

On s'est beaucoup intéressé à la réduction apparente des besoins de main-d'œuvre en agriculture de conservation, dans la mesure où la préparation des sols demande moins de travail au début de la campagne de culture. Pour certains, la réduction s'établirait entre 50 et 60 % durant cette période. Dans le cas de petites exploitations, les façons culturales anti-érosives ont plus de probabilités de générer des économies de main-d'œuvre lorsque des herbicides sont utilisés contre les adventices, mais moins de probabilités là où le désherbage est manuel. Dans ce dernier cas, les façons culturales anti-érosives pourraient même nécessiter plus de main-d'œuvre que l'agriculture conventionnelle.

Herren et al. (2012) indiquent que la plupart des interventions culturales en non-travail du sol demandent moins de main-d'œuvre par unité produite et par unité de surface. Globalement, compte tenu du fait que les rendements des exploitations en non-travail du sol étaient systématiquement supérieurs à ceux des exploitations conventionnelles, la rentabilité économique du travail agricole était sensiblement plus élevée en non-travail du sol.

Le niveau des revenus non agricoles des ménages agricoles est un facteur qui intervient dans leur décision d'adopter de nouvelles techniques. La littérature semble toutefois montrer qu'il peut jouer dans les deux sens, à savoir favorablement pour certaines pratiques et défavorablement pour d'autres. On peut penser que l'emploi non agricole rétrécit le réservoir de main-d'œuvre disponible et pourrait donc freiner l'adoption de pratiques agricoles de conservation à forte intensité de main-d'œuvre.

Selon une étude de Gedikoglu et al. (2011) se fondant sur une enquête menée auprès de 3 104 éleveurs de l'Iowa et du Missouri (États-Unis), le fait que les agriculteurs aient un emploi en dehors de l'exploitation a un impact très net sur l'adoption de pratiques à forte intensité de capital, au détriment des pratiques à plus forte intensité de main-d'œuvre. En particulier, la pratique de l'injection de fumier dans le sol, qui est une intervention à haute intensité capitalistique (et qui contribue à tasser la couche superficielle du sol en raison du passage d'engins lourds) est privilégiée par rapport à l'épandage non mécanique (et plus favorable à la conservation des sols) parce qu'elle représente un gain de temps. Ces résultats vont dans le sens de précédentes études selon lesquelles, dans les régions où l'emploi non agricole occupe une grande place, les agriculteurs sont moins susceptibles de prélever de la main-d'œuvre pour des interventions favorisant la conservation des sols si la rentabilité économique de l'activité non agricole est supérieure aux avantages qu'ils voient dans le fait d'investir dans la conservation des sols une main-d'œuvre rare (Neill et Lee, 2001 ; Moser et Barrett, 2003 ; Jansen et al., 2006 ; Lee et al., 2006 ; Wollni et al., 2010).

À l'échelle d'un bassin versant ou même à un niveau spatial plus élevé, l'application de pratiques de conservation des sols et de l'eau peut être très bénéfique à l'économie rurale et à la création d'emploi. Pincus et Moseley (2013) analysent l'impact de pratiques de restauration des bassins versants sur l'économie de l'Oregon (États-Unis) au moyen d'une analyse entrées-sorties. Ils constatent que le programme suivi de travaux de restauration mis en œuvre dans l'Oregon a eu des retombées positives sensibles sur l'économie. Ils notent également que ces effets profitent pour une grande part aux zones rurales où les perspectives de développement économique sont faibles du fait du déclin des activités de gestion des ressources traditionnelles. D'après leurs estimations, en plus des quelque 16 emplois soutenus par million de dollars investi dans la restauration écologique, un investissement prolongé dans la restauration a créé à la fois de nouvelles capacités d'organisation locales dans les conseils de bassins versants et dans d'autres structures de proximité partenaires, et des ouvertures économiques, en particulier dans les zones rurales.

Dans leur analyse plus globale, Herren et al. (2012) appliquent une méthode de modélisation dynamique intégrée à l'échelle mondiale pour évaluer la capacité de création d'emploi de l'agriculture verte. Les auteurs caractérisent l'adoption de mesures telles que les pratiques de gestion durable (par exemple le non-travail du sol, la fertilisation naturelle), la recherche-développement, la lutte intégrée contre les ennemis des cultures et la production rurale de produits alimentaires transformés à valeur ajoutée, et prennent comme hypothèse que des investissements de 100 milliards USD par an, puis de 180 milliards USD par an, sont réalisés pour appuyer ces actions. Les investissements, financés par des subventions et des modifications de la fiscalité, allaient soit à l'agriculture verte, soit à l'agriculture conventionnelle. Les projections montrent que le choix de l'agriculture verte se traduit par 3 % d'emplois en plus dans les secteurs agricole et agro-alimentaire en 2050 par rapport à l'agriculture conventionnelle.

Pratiques de conservation de l'eau

L'agriculture représente environ 70 % de la consommation d'eau dans le monde aujourd'hui (45 % dans la zone OCDE). La demande d'eau croissante des villes, des industries et des fournisseurs d'énergie, et les effets du changement climatique réduiront les quantités d'eau disponibles pour l'irrigation dans le futur. Il est important que les agriculteurs reçoivent les bons signaux pour accroître l'efficacité d'utilisation de l'eau et améliorer la gestion de l'eau agricole, tout en préservant les écosystèmes aquatiques.

Le champ de la gestion durable des ressources en eau dans l'agriculture est délimité par la responsabilité des gestionnaires et des usagers de l'eau, qui consiste à faire en sorte que ces ressources

soient allouées de façon rationnelle et équitable, et utilisées de manière à obtenir des résultats bénéfiques sur le plan social, écologique et économique. Elle englobe l'irrigation qui permet de lisser les approvisionnements en eau durant toutes les saisons de production, la gestion de l'eau en agriculture pluviale, la gestion des inondations, des sécheresses et du drainage, et la préservation des écosystèmes et de leurs valeurs culturelles et récréatives.

Les pratiques de gestion économe de l'eau comprennent les pratiques de gestion des terres permettant de préparer les champs en vue de rationaliser l'irrigation et de gérer les excédents d'eau, les systèmes d'irrigation sur l'exploitation et les pratiques d'irrigation, la gestion de la consommation de l'eau d'irrigation, et la protection de l'eau contre la pollution diffuse et la sédimentation. La pollution diffuse est due à des constituants tels que les éléments nutritifs, et à des substances organiques et toxiques provenant de sources diffuses, comme le ruissellement causé par l'utilisation et l'aménagement des terres agricoles. Les pratiques de conservation des sols, en particulier les techniques culturales simplifiées et les rotations des cultures favorables à la conservation des sols, sont aussi considérées comme des pratiques de conservation de l'eau car elles améliorent la teneur du sol en eau du fait de la perturbation minimum du sol et du maintien d'une couverture sur le sol, de la réduction du ruissellement et de l'amélioration de l'infiltration.

Le bon nivellement initial des terrains conserve l'eau en réduisant le ruissellement et en permettant une distribution uniforme des eaux pluviales et des eaux d'irrigation. Au Texas (États-Unis) par exemple, un nivellement correct peut réduire la consommation d'eau de 20 à 30 % et accroître les rendements des cultures de 10 à 20 % (Texas Water Development Board). Il est possible de former de petites cuvettes dans les sillons pour retenir l'eau de pluie et l'eau d'irrigation. La connaissance des conditions météorologiques, de la capacité du sol à absorber et retenir l'eau, et de la capacité des plantes cultivées à utiliser l'eau, en fonction de la profondeur des racines et des propriétés du sol à différentes profondeurs, peut être déterminante pour conserver les ressources en eau.

Il existe trois grands types d'irrigation : l'irrigation de surface (ou gravitaire), l'irrigation par aspersion et l'irrigation au goutte à goutte. Cette dernière permet d'obtenir les économies d'eau les plus importantes. Elle peut être très efficace avec certaines cultures et en terrains accidentés. Les systèmes d'aspersion, en particulier ceux utilisant la technique ancienne de la haute pression, ne sont pas efficaces, surtout par temps chaud et venteux. C'est pourquoi des systèmes à faible pression et à faible hauteur ont été mis au point. Israël offre un exemple remarquable de système concret de gestion intégrée de l'eau, apporte des enseignements utiles pour gérer de manière efficace une ressource rare (encadré 2.3).

Pour minimiser la pollution diffuse et la sédimentation, certaines pratiques culturales consistent à créer différents types de zones tampons : bandes filtrantes enherbées, chenaux enherbés, zones tampons boisées implantées le long des cours d'eau, terrasses, fossés de dérivation, bassins de sédimentation et de rétention, etc. Une zone tampon est une aire de végétation naturelle ou plantée gérée pour protéger des sites abritant des ressources essentielles, tels que zones humides, plans d'eau, cours d'eau ou même puits, d'une dégradation importante provoquée par la perturbation des sols et le ruissellement chimique d'éléments nutritifs.

Les bandes filtrantes enherbées sont plantées entre un champ et des eaux de surface (rivières, ruisseaux, lacs et fossés de drainage) pour protéger la qualité de l'eau. Elles ralentissent le ruissellement des champs en piégeant et en filtrant les sédiments, les éléments nutritifs, les pesticides et d'autres polluants potentiels avant qu'ils n'atteignent les eaux superficielles. Des bandes filtrantes sont aussi plantées aux abords des drains agricoles. Les chenaux enherbés sont un type de zone tampon large et peu profonde conçue pour prévenir l'érosion des sols tout en drainant les ruissellements des terres cultivées adjacentes. Ils contribuent aussi à éviter le ravinement dans les zones d'écoulement concentré.

Encadré 2.3. Israël : une gestion efficace des ressources hydriques

L'agriculture israélienne s'est distinguée par sa capacité à améliorer l'efficacité d'utilisation de l'eau agricole. Cette amélioration a concerné l'efficacité physique (technique) de la consommation d'eau par tonne de production (ou par hectare irrigué), l'efficacité économique d'utilisation de l'eau (hausse de valeur de la production par unité d'eau utilisée et réduction de la consommation d'eau potable, remplacée en partie par de l'eau recyclée pour irriguer).

Le succès de l'agriculture israélienne dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches du pays repose en grande partie sur une gestion efficace des ressources hydriques. L'invention et le développement de l'irrigation au goutte à goutte en Israël à partir des années 60 a joué un rôle essentiel dans l'amélioration de l'efficacité technique de l'utilisation de l'eau, ainsi que dans l'évolution vers d'autres systèmes d'irrigation sous pression (asperseurs, micro-asperseurs, microjets) et l'abandon de l'irrigation par submersion. Le principe consiste à augmenter le rendement hydraulique en limitant les pertes par ruissellement et par évaporation et en réduisant l'infiltration de contaminants sous la rhizosphère. Si l'irrigation est aussi performante, c'est qu'elle fournit aux plantes des conditions optimales d'absorption de l'eau et des éléments nutritifs. Les systèmes d'irrigation localisée permettent aussi d'utiliser plus efficacement des eaux salines, saumâtres et marginales.

L'irrigation au goutte à goutte a d'abord suscité un intérêt limité et n'était pas dépourvue d'inconvénients, tels que le bouchage et la rupture des canalisations. La situation a changé dans les années 80 grâce au perfectionnement du système et à l'évolution vers une nouvelle génération de techniques d'irrigation localisée passant notamment par des systèmes informatisés et des goutteurs à pression qui assurent une distribution de l'eau. En Israël, plus de la moitié de la superficie irriguée est désormais couverte par des dispositifs au goutte à goutte.

Le goutte à goutte enterré, de conception plus récente, est aujourd'hui utilisé sur 5 à 10 % de la superficie irriguée. L'enfouissement du système répond aux besoins suivants : économiser l'eau ; lutter contre les mauvaises herbes ; limiter le plus possible le ruissellement et l'évaporation (qui peut être réduite de 20 %) ; augmenter la durée de vie des canalisations et des buses ; faciliter l'utilisation de matériel lourd dans les champs ; et éviter les contacts avec de l'eau de mauvaise qualité. Autre avantage, ce système économise de la main-d'œuvre, par rapport aux effectifs nécessaires pour installer et enlever chaque saison les dispositifs d'irrigation localisée de surface. Enfin, le goutte à goutte enterré permet de jouer sur la distribution des racines et les conditions pédologiques dans les zones arides de manière à mieux maîtriser les variables environnementales, notamment les quantités d'éléments nutritifs, la salinité, la concentration en oxygène et la température.

Source : OCDE (2010), *Review of Agricultural Policies: Israel*, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264079397-en>.

Les zones tampons boisées ripariennes sont des rangées d'arbres, d'arbustes ou d'herbacées implantées le long de rivières, ruisseaux, lacs ou zones humides et sont destinées principalement à protéger la qualité des eaux et à offrir des habitats naturels. Elles empêchent les polluants pouvant être contenus dans les ruissellements agricoles (sédiments, éléments nutritifs, pesticides, agents pathogènes) d'atteindre les eaux de surface. Les terrasses sont formées par des remblais en terre ou en pierre, des fossés ou des ensembles talus-fossés construits dans la pente d'un champ (USEPA, 1993). Elles peuvent réduire la vitesse d'érosion de l'horizon superficiel du sol et diminuer la teneur en sédiments et en polluants des ruissellements superficiels. Aux États-Unis, les terrasses auraient permis de réduire les pertes de sol de 94 à 95 %, les pertes d'éléments nutritifs de 56 à 92 %, et le ruissellement de 73 à 88 % (Cestti, Srivastava et Jung, 2003).

Un fossé de dérivation a pour but de diriger les ruissellements superficiels ou de les détourner d'une zone, ou de recueillir et diriger l'eau vers un bassin. Les fossés de dérivation sont surmontés de bandes filtrantes destinées à piéger les sédiments et protéger le fossé, et le talus est végétalisé. Un bassin de sédimentation et de rétention est un petit remblai en terre ou un ensemble talus-fossé construit dans un petit cours d'eau ou dans une zone d'écoulement concentré à l'intérieur d'un champ.

Un bon exemple de politique intégrée de conservation de l'eau ayant des conséquences directes sur l'agriculture est la Directive-cadre sur l'eau (DCE) de l'Union européenne introduite par la « Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau ». La classification utilisée par la DCE pour caractériser l'état écologique des eaux de surface comprend cinq catégories : très bon, bon, moyen, médiocre et mauvais. La DCE impose que les cours d'eau, les lacs, les eaux souterraines et les eaux côtières atteignent un bon état écologique et chimique d'ici 2015. La DCE a donc des conséquences majeures sur les pratiques agricoles et la gestion des terres ainsi que sur la gestion de l'eau en ce qui concerne la pollution diffuse et la consommation d'eau. L'une des mesures les plus importantes pour parvenir à cet objectif consiste

notamment à réduire les émissions d'azote (N) et de phosphates (P_2O_5) provenant des effluents d'élevage et des engrais minéraux dans l'environnement. Cette mesure occasionne des coûts considérables pour le secteur agricole et, dans certains cas, ces coûts vont bien au-delà de ce qu'il est possible d'obtenir dans le cadre du budget des mesures agro-environnementales (OCDE, 2012).

Des effets importants sur le plan de la productivité, de l'efficience et de l'innovation, mais difficiles à évaluer concrètement

Les pratiques de conservation de l'eau portent sur la quantité et la qualité des ressources hydriques et peuvent être mises en œuvre à tous les stades du stockage, de la distribution et de l'utilisation de l'eau, aussi bien dans les exploitations qu'en dehors. En principe, les mesures de conservation de l'eau optimisent l'utilisation des ressources parce qu'elles agissent sur la capacité de rétention d'eau des sols. Les pratiques de conservation de l'eau donnent les meilleurs résultats dans les cultures pluviales. Presque tous les types de zones tampons permettent d'atteindre une réduction sensible des concentrations de pesticides et d'éléments nutritifs dans l'eau et sont donc efficaces sur le plan écologique.

Les techniques de conservation de l'eau sont également économes en énergie car les pratiques qui économisent l'eau diminuent les émissions et les besoins énergétiques. Ces pratiques contribuent à la production de biens publics. Elles réduisent les externalités négatives principalement en réduisant la sédimentation ainsi qu'en atténuant par là même les risques d'inondation, en protégeant les cours d'eau et en améliorant la qualité de l'eau.

Les pratiques de conservation de l'eau comportent des innovations vertes bien connues en matière d'irrigation, telles que l'irrigation au goutte à goutte. Elles s'appuient aussi sur un vaste fonds de connaissances pour mettre au point de nouveaux systèmes prometteurs de gestion de l'eau en agriculture pluviale, notamment un large éventail de pratiques de collecte de l'eau, de systèmes agricoles de conservation, de techniques de conservation de l'eau et de pratiques de gestion intégrée de la fertilité des sols.

Malgré ces évolutions positives, il est difficile d'évaluer concrètement les gains de productivité économique engendrés par les pratiques de conservation de l'eau en termes de rendements. La littérature souligne les problèmes complexes rencontrés pour établir des prédictions simples des économies d'eau (au niveau du champ) et des hausses des rendements, ainsi que l'illustrent Burt et O'Neill (2007, cités par Perry et al., 2009). Se fondant sur les données d'une vaste étude entreprise par le Centre de recherche et de formation en irrigation de l'Université polytechnique de Californie (États-Unis), les auteurs analysent les méthodes de culture de la tomate (et les rendements obtenus) dans 187 champs irrigués par des rigoles et 164 champs irrigués au goutte à goutte, avec une dimension de champ typiquement de 50 ha. Après comparaison des rendements et des quantités d'eau utilisées, les auteurs estiment qu'il serait risqué de présumer que l'irrigation au goutte à goutte confère systématiquement d'importants avantages immédiats.

Warda et Pulido-Velazquez (2008) étudient les pratiques d'irrigation économes en eau au niveau des bassins et arrivent à une conclusion controversée. Ils avancent l'idée que « lorsque les écoulements restitués constituent une source importante d'approvisionnement en eau en aval, la diminution des apports d'eau due à l'adoption de mesures d'irrigation plus efficaces va redistribuer l'approvisionnement en eau au sein du bassin, ce qui pourrait porter préjudice aux actuels détenteurs de droits sur l'eau qui dépendent de ces écoulement restitués ».

Cela indiquerait que, du point de vue économique, les subventions aux mesures de conservation de l'eau n'inciteront pas les agriculteurs à freiner le déclin des ressources en eau, et il est donc peu probable que des quantités d'eau supplémentaires deviennent disponibles pour d'autres usages. En réalité, les subventions risquent d'accélérer ce déclin. Par exemple, l'irrigation au goutte à goutte est importante pour de nombreuses raisons, notamment parce qu'elle améliore la productivité de l'eau et la sécurité alimentaire, mais elle ne permet pas nécessairement d'économiser l'eau à l'échelle d'un bassin versant. Il est apparu que les subventions favorisant l'efficacité de l'irrigation augmentent l'utilisation

de l'eau dans la mesure où des rendements plus élevés des cultures conduisent à l'augmentation de l'évapotranspiration sans restitution d'eau ou recharge des aquifères (OCDE, 2015).

Au niveau des exploitations, les méthodes d'irrigation perfectionnées diminuent la consommation d'eau par surface cultivée et donc les besoins énergétiques, ce qui entraîne une réduction des émissions.⁸ Par rapport aux méthodes d'irrigation traditionnelles, les méthodes d'irrigation perfectionnées augmentent la productivité des ressources (eau), de l'environnement et de l'énergie. Mais une productivité de l'eau en hausse peut générer un effet de déplacement, à savoir que l'eau économisée peut être utilisée pour arroser des terres précédemment non irriguées. Par exemple, bien qu'il soit généralement admis que des infrastructures d'irrigation perfectionnées puissent apporter à l'agriculteur des économies d'eau importantes, l'adoption d'« innovations vertes » comme les goutte à goutte n'a pas forcément un effet net positif sur l'environnement si l'agriculteur choisit d'utiliser ces économies d'eau pour produire plus ou pour vendre l'eau économisée à d'autres producteurs (dans le cas où il existe un système de commerce de l'eau).

En outre, certaines méthodes de conservation de l'eau génèrent des coûts en ressources, notamment des hausses (parfois prohibitives) de la demande énergétique. Selon des observations réalisées en Australie, si l'adoption d'un système sous pression conduirait sans aucun doute à réduire les déperditions, par exemple par évaporation et infiltration, le passage à un nouveau système entraînerait une hausse de la demande énergétique par rapport aux systèmes actuels d'irrigation gravitaire par rigoles. Les données montrent que certains irrigants australiens choisissent de ne pas moderniser leurs systèmes d'irrigation et de distribution d'eau en raison des coûts énergétiques plus élevés des systèmes sous pression.

Conservation de l'eau en dehors des exploitations

Les mesures de conservation de l'eau ne concernant pas l'irrigation, comme les zones tampons et les terrasses, ont des effets sensibles sur la productivité des ressources car elles augmentent l'infiltration et diminuent le ruissellement tout en protégeant l'environnement proche contre la pollution diffuse et la sédimentation. De plus, les zones tampons et les chenaux enherbés favorisent les habitats et la biodiversité.

Kay et al. (2009) passent en revue l'ensemble de la littérature et mesurent la capacité des bandes tampons et des zones humides à éliminer les éléments nutritifs (azote total, nitrates, phosphore total et phosphore soluble) contenus dans les ruissellements agricoles. Les pourcentages communiqués montrent des écarts importants, allant de 5 % à 100 %. Les mêmes résultats, avec des variations moindres, sont présentés pour les substances actives de pesticides et reproduits au tableau 2.2 (Kay et al., 2009).

Tableau 2.2. Évolution des concentrations en pesticides dans les eaux de ruissellement suite à la création de zones tampons

Pesticide	Effet de la zone tampon	Référence
Atrazine	53 % de réduction	Arora et al. (2003)
	25–49 % de réduction	Popov et al. (2006)
Chlorpyrifos	83 % de réduction	Arora et al. (2003)
Metolachlore	54 % réduction	Arora et al. (2003)
	30–61 % réduction	Popov et al. (2006)

Source : Tableau 4 in Kay, P., A. Edwards et M. Foulger (2009), « A review of the efficacy of contemporary agricultural stewardship measures for ameliorating water pollution problems of key concern to the UK water industry », *Agricultural Systems*, Vol. 99, n 2/3.

Ces résultats mettent en évidence la nécessité de modifier la manière dont des zones tampons enherbées sont implantées le long des cours d'eau canalisés de tête de bassin. Il semblerait intéressant de combiner l'utilisation de ces zones tampons à des pratiques de gestion des zones de montagne, à la création de zones humides ripariennes, et/ou à des pratiques favorisant les habitats ripicoles qui soient capables de remédier à la dégradation physico-chimique des habitats dans les cours d'eau agricoles canalisés de tête de bassin. L'étude souligne les risques inhérents aux approches fragmentaires par rapport à une gestion intégrée des bassins versants.

Notes

1. L'étude indique que sur 56 % du territoire de l'UE, il existe un degré variable de menaces potentielles, l'exploitation intensive des sols étant considérée comme la principale pression sur la biodiversité des sols. Plus précisément, en utilisant les informations du Centre européen de données sur les sols (ESDAC) et d'autres bases de données européennes, l'étude est arrivée à la conclusion que 1 % des terres de l'UE étaient exposées à des menaces « extrêmement élevées », 4 % à des menaces « très élevées » et 9 % à des menaces « élevées ». L'agriculture intensive, fondée sur la charge en azote, est pointée comme étant la menace la plus grave, suivie de l'appauvrissement en carbone organique, des espèces envahissantes, du tassement, de l'érosion et de la contamination. Les pressions potentielles ont été jugées particulièrement fortes au Royaume-Uni et en Europe centrale en raison du degré élevé d'intensivité de l'agriculture conjugué au nombre important d'espèces envahissantes et à un risque accru de perte de carbone organique.
2. Par ailleurs, certaines des trois composantes de l'agriculture de conservation ont été adoptées plus souvent, en particulier les techniques culturales simplifiées, mais sans être associées aux deux autres composantes (Friedrich, Derpsch et Kassam, 2014).
3. De nombreux travaux, tant théoriques et qu'empiriques, ont été publiés sur l'adoption des pratiques et techniques agricoles. Parmi les analyses récentes portant sur l'adoption de pratiques de conservation, citons Pannell, et al. 2006, Prokopy et al., 2008 ; Gedikoglou et McCann, 2010.
4. Voir : www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/national/programs/financial/ama/
5. Par exemple, Ciriacy-Wantrup a étudié en 1947 la rentabilité financière des pratiques de conservation.
6. D'après Pittelkow et al. (2015), les rendements baissent le plus lorsque le non-travail du sol est appliqué seul (-9.9 %) ou avec un seul autre principe de l'agriculture de conservation (-5.2 et -6.2% pour le maintien des résidus de récolte et la rotation des cultures, respectivement).
7. En moyenne, les effets individuels du maintien des résidus de récolte et de la rotation des cultures réduisent les impacts négatifs du non-travail du sol de 4.8 % et 3.8 %, respectivement. Toutefois, sous les climats secs, ces principes ont chacun une incidence beaucoup plus importante sur les rendements des cultures pluviales, réduisant les pertes de rendement de 10 % et 11 %, respectivement.
8. Une étude expérimentale détaillée utilisant des modèles mathématiques afin d'analyser les effets des pratiques de culture sur les variables du bilan hydrique en Californie (États-Unis) a conclu que les pratiques de culture n'avaient pas d'impact sensible sur la teneur en eau du sol ; en revanche, la rotation des cultures et la variabilité spatiale des sols influent fortement sur la répartition des ressources en eau et leur disponibilité dans le système souterrain (Islam et al. 2006).

Bibliographie

- Affholder, F., D. Jourdain, D. Quang, T. Tuong, M. Morize et A. Ricome (2010), « Constraints to farmers' adoption of direct-seeding mulch-based cropping systems: A farm scale modeling approach applied to the mountainous slopes of Vietnam », *Agricultural Systems*, vol. 103.
- Al-Kaisi, M.M. et X. Yin (2004), « Stepwise time response of corn yield and economic return to no tillage », *Soil Tillage Research*, vol. 78, pp. 91-101.
- Alvarez, R. et H.S. Steinbach (2009), « A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas », *Soil and Tillage Research*, vol. 104, n° 1, pp. 1-15.
- Anderson, G. (2009), *The Impact of tillage practices and crop residue (stubble) retention in the cropping system of Western Australia*, Bulletin Number 4786, Western Australian Government.
- Armstrong, R.D., G. Millar, N. Halpin, D. Reid et J. Standley (2003), « Using zero tillage, fertilisers and legume rotations to maintain productivity and soil fertility in opportunity cropping systems on a shallow vertosol », *Australian Journal of Experimental Agriculture*, vol. 43, n° 2, pp. 141-53.
- Arora, K., S.K. Mickelson et J.L. Baker (2003), « Effectiveness of vegetated buffer strips in reducing pesticide transport in simulated runoff », *Transactions of the ASAE*, vol. 46, n° 3, pp. 635-44.
- Bailey, K.L. (1996), « Diseases under conservation tillage systems », *Canadian Journal of Plant Science*, vol. 76, n° 4.
- Baker, J., T. Ochsner, R. Venterea et T. Griffin (2007), « Tillage and soil carbon sequestration—What do we really know? », *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 118, pp. 1-5.
- Barbier, E.B. (1990), « The Farm-Level Economics of Soil Conservation: The Uplands of Java », *Land Economics*, vol. 66, n° 2, pp. 199-211.
- Bayer, C., J. Gomes, F. Vieira, J. Zanatta, M. De Cássia Piccolo et J. Dieckow (2012), « Methane emission from soil under long-term no-till cropping systems », *Soil and Tillage Research*, vol. 124, pp. 1-7.
- Bellotti, B. et J. Rochecoste (2014), « The development of conservation agriculture in Australia – Farmers as innovators », *International Soil and Water Conservation Research*, vol. 2, n° 1.
- Berck, P., S. Robinson et G. Goldman (1991), « The use of computable general equilibrium models to assess water policies », dans A. Dinar et D. Zilberman (dir. pub.), *The Economics and Management of Water and Drainage in Agriculture*, pp. 489-509, Boston, Kluwer Academic Publishers.
- Blanco-Canqui, H. et R. Lal (2008), « No-tillage and soil-profile carbon sequestration: An on-farm assessment », *Soil Science Society of America Journal*, vol. 72, n° 3.
- Blevins, R.L., G.W. Thomas, M.S. Smith, W.W. Frye et P.L. Cornelius (1983), « Changes in soil properties after 10 years of continuous no-tilled and conventionally tilled corn », *Soil and Tillage Research*, vol. 3, pp. 135-46.
- Bloomer, D. et J. Powrie (2011), « Precision agriculture: Doing the right thing in the right place at the right time », dans D. Bloomer et J. Powrie (dir. pub.), *A Guide to Smart Farming*, Landwise, Feilding, Nouvelle-Zélande.

- Boddey, R.M., C.P. Jantalia, B. Alves et S. Urquiaga (2010), « Comments on 'No-tillage and soil-profile carbon sequestration: An on-farm assessment' », *Soil Science Society of America Journal*, vol. 73, n° 2.
- Branson, M. (2011), « Using conservation agriculture to improve water use efficiency in wheat crops on the Branson farm in South Australia », 5th World Congress of Conservation Agriculture incorporating 3rd Farming Systems Design Conference - Resilient Food Systems for a Changing World, Brisbane.
- Brouder, S. et H. Gomez-Macpherson (2014), « The impact of conservation agriculture on smallholder agricultural yields: A scoping review of the evidence », *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 187, n° 1.
- Burt, C. et B. O'Neill (2007), « Drip and furrow on processing tomato-field performance », 28th Annual Irrigation Association, Technical Conference, San Diego, CA, 9 décembre.
- Butler, G. (dir. pub.) (2008), *Conservation Agriculture: Moving Beyond Adoption*, SANTFA, Clare, South Australia.
- Chan, K.Y., D. Heenan et H.B. So (2003), « Sequestration of carbon and changes in soil quality under conservation tillage on light-textured soils in Australia: A review », *Australian Journal of Experimental Agriculture*, vol. 43, n° 4.
- Ciriacy-Wantrup, S.V. (1947), « Capital returns to soil conservation practices », *Journal of Farm Economics*, vol. 29, n° 4, pp. 1.181-96.
- Commission des Communautés européennes (2006), « Proposition de Directive du Parlement européen et du Conseil définissant un cadre pour la protection des sols et modifiant la directive 2004/35/CE (présentée par la Commission) », COM(2006) 232 final.
- Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) (2009), *Identification of Areas within Australia with the Potential to Enhance Soil Carbon Content*, by J. Baldock, M. Grundy, P. Wilson, D. Jacquier, T. Griffin, G. Chapman, J. Hall, D. Machmet, D. Crawford, J. Hill et J. Kidd, CSIRO.
- Corsi, S., T. Friedrich, A. Kassam, M. Pisante et J. de Moraes Sà (2012), « Soil organic carbon accumulation and greenhouse gas emission reductions from conservation agriculture: A literature review », *Integrated Crop Management*, vol. 16, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome.
- D'Emden, F.H., R.S. Llewellyn et M.P. Burton (2008), « Factors influencing adoption of conservation tillage in Australian cropping regions », *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, vol. 52, n° 2, pp. 169-82.
- Das, R. et S. Bauer (2012), « Bio-economic analysis of soil conservation technologies in the mid-hill region of Nepal », *Soil and Tillage Research*, vol. 121, pp. 38-48.
- de Vita, P., E. di Paolo, G. Fecondo, N. di Fonzo et M. Pisante (2007), « No-tillage and conventional tillage effects on durum wheat yield, grain quality and soil moisture content in southern Italy », *Soil and Tillage Research*, vol. 92, n° 1-2.
- Dendooven, L., L. Patiño-Zúñiga, N. Verhulst, M. Luna-Guido, R. Marsch et B. Govaerts (2012b), « Global warming potential of agricultural systems with contrasting tillage and residue management in the central highlands of Mexico », *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 152, n° 50-58.
- Dendooven, L., V. Gutiérrez-Oliva, L. Patiño-Zúñiga, D. Ramírez-Villanueva, N. Verhulst, M. Luna-Guido, R. Marsch, J. Montes-Molina, A. Gutiérrez-Miceli, S. Vásquez-Murrieta et B. Govaerts (2012a), « Greenhouse gas emissions under conservation agriculture compared to traditional cultivation of maize in the central highlands of Mexico », *Science of the Total Environment*, vol. 31, pp. 237-44.
- Dumanski, J. et R. Peiretti (2013), « Modern concepts of soil conservation », *International Soil and Water Conservation Research*, vol. 1, n° 1.

- Eaton, D. (1996), « The economics of soil erosion: a model of farm decision-making », Environmental Economics Programme, Pennsylvania State University, *Discussion Paper* DP 96-01.
- Ebel, R. (2012), « Soil management and conservation », in C. Osteen, J. Gottlieb et U. Vasavada (dir. pub.), « Agricultural resources and environmental indicators, 2012 edition », U.S. Department of Agriculture (USDA), Economic Research Service (ERS), *Economic Information Bulletin*, n° 98, Washington, D.C.
- Erenstein, O. et V. Laxmi (2008), « Zero tillage impacts in India's rice-wheat systems: a review », *Soil and Tillage Research*, vol. 100, n° 1-2.
- Eve, M., M. Sperow, K. Howerton, K. Paustian et R. Follett (2002), « Predicted impact of management changes on soil carbon storage for each cropland region of the coterminous United States, » *Journal of Soil and Water Conservation*, vol. 57.
- FAO (2011), *Save and Grow: A Policymaker's Guide to the Sustainable Intensification of Smallholder Crop Production*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, www.fao.org/3/a-i2215e.pdf.
- FAO (2001), *The Economics of Conservation Agriculture*, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome, www.fao.org/docrep/004/y2781e/y2781e04.htm#P5_763.
- Farooq, M., K. Flower, K. Jabran, A. Wahid et K. Siddique (2011), « Crop yield and weed management in rainfed conservation agriculture », *Soil Tillage Research*, vol. 11.
- Foley, J. et al. (2010), « Solutions for a cultivated planet », *Nature*, vol. 478, pp. 337-42, <http://doi:10.1038/nature10452>.
- Fox, G., A. Weersink, G. Sarwar S. Duff et B. Deen (1991), « Comparative economics of alternative agricultural production systems: a review », *Northeast Journal of Agricultural Resource Economics*, vol. 20, n° 1.
- Franzluebbers, A.J. (2009), « Comments on 'No-tillage and soil-profile carbon sequestration: an on-farm assessment' », *Soil Science Society of America Journal*, vol. 73, n° 2.
- Fuss, R., B. Ruth, R. Schilling, H. Scherb et J. Munch (2011), « Pulse emissions of N₂O and CO₂ from an arable field depending on fertilization and tillage practice », *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 144, pp. 61-68.
- Galbally, I., M. Meyer, S. Bently, I. Weeks, R. Leuning, K. Kelly, F. Phillips, F. Barker-Reid, W. Gates, R. Baigent, R. Eckard et P. Grace (2005), « A study of environmental and management drivers of non-CO₂ greenhouse gas emissions in Australian agro-ecosystems », dans E.A. Van Amstel (dir. pub.), *Non-CO₂ Green-house Gases: Science, Control, Policy and Implementation: Proceedings of the 4th International Symposium on Non-CO₂ Greenhouse Gases*, Millpress, pp. 47-55.
- Gardi, C., S. Jeffery et A. Salteli (2013), « An estimate of potential threat levels to soil biodiversity in the EU », *Global Change Biology*, vol. 19, <http://doi:10.1111/gcb.12159>.
- Gedikoglu, H. et L. McCann (2010), « What causes farmers to adopt agricultural and conservation technologies and how can we use that knowledge to improve policies, programs and technologies? », dans T.L. Napier (dir. pub.), *Human Dimensions of Soil and Water Conservation: A Global Perspective*, Hauppauge, Nova Science Publishers, Inc., New York.
- Gedikoglu, H., L. McCann et G. Artz (2011), « Off-farm employment effects on adoption of nutrient management practices », *Agricultural and Resource Economics Review*, vol. 40, n° 2.
- Giller, E., E. Witter, M. Corbeels et P. Tittonell (2009), « Conservation agriculture and smallholder farming in Africa: the heretics' view », *Field Crops Research*, vol. 114.
- Govaerts, B., N. Verhulst, A. Castellanos-Navarrete, K. Sayre, J. Dixon et L. Dendooven (2009), « Conservation agriculture and soil carbon sequestration: between myth and farmer reality », *Critical Reviews in Plant Sciences*, vol. 28, n° 3.

- Gruhn, P., F. Goletti et M. Yudelman (2000), *Integrated Nutrient Management, Soil Fertility, and Sustainable Agriculture: Current Issues and Future Challenges*, International Food Policy Research Institute, Washington, D.C.
- Hassall, G. (2010), *The Implication of Greenhouse Mitigation Policies on the Demand for Agricultural land - Research Report*, Australian Farm Institute, Surry Hills, Australie.
- He, J., N. Kuhn, X.M. Zhang, X.R. Zhang et H. Li (2009), « Effects of 10 years of conservation tillage on soil properties and productivity in the farming-pastoral ecotone of Inner Mongolia, China », *Soil Use and Management*, vol. 25, n° 2, pp. 201–09, <http://doi:10.1111/j.1475-2743.2009.00210.x>.
- Hiitsch, B. (2011), « Methane oxidation in non-flooded soils as affected by crop production », *European Journal of Agronomy*, vol. 14, pp. 237-260.
- Hobbs, P., K. Sayre et R. Gupta (2008), « The role of conservation agriculture in sustainable agriculture », *Philosophical Transactions of the Royal Society*, vol. 363, pp. 543-55, series B, Biological Sciences.
- Hobbs, P.R. et R.K. Gupta (2004), « Problems and challenges of no-till farming for the rice-wheat systems of the Indo-Gangetic Plains in South Asia », dans R. Lal, P. Hobbs, N. Uphoff et D.O. Hansen (dir. pub.), *Sustainable Agriculture and the Rice-wheat System*, Paper 6, pp. 101-19, Marcel Dekker, Inc.
- Horowitz, J., R. Ebel et K. Ueda (2010), « 'No-till' farming is a growing practice », USDA, ERS, *Economic Information Bulletin*, n° 70, Washington, D.C.
- Huggins, D. et J. Reganold (2008), « No-till: The quiet revolution », *Scientific American*, vol. 299, n° 1.
- Islam, N., W. Wallender, J. Mitchell, S. Wicks et R. Howitt (2006), « A comprehensive experimental study with mathematical modelling to investigate the effects of cropping practices on water balance variables », *Agricultural Water Management*, vol. 82.
- Jaleta, M., M. Kassie et B. Shiferaw (2012), « Tradeoffs in crop residue utilization in mixed crop-livestock systems and implications for conservation agriculture and sustainable land management », communication destinée à la triennale de l'Association internationale des économistes agronomiques (AIEA), Foz do Iguacu, Brésil, 18-24 août, <http://ageconsearch.umn.edu/handle/126282>.
- Jansen, H.G.P., J. Pender, A. Damon, W. Wielemaker et R. Schipper (2006), « Policies for sustainable development in the hillside areas of Honduras: A quantitative livelihoods approach », *Agricultural Economics*, vol. 34, n° 2.
- Kassam, A. (2014), « Overview of the Global Spread of Conservation Agriculture », *Field Actions Science Reports*, vol. 7, <http://factsreports.revues.org/3720>.
- Kassam, A., R. Derpsch et T. Friedrich (2014), « Global achievements in soil and water conservation: The case of Conservation Agriculture », *International Soil and Water Conservation Research*, vol. 2, n° 1.
- Kassam, A., T. Friedrich, T. Shaxson et J. Pretty (2009), « The spread of Conservation Agriculture: Justification, sustainability and uptake », *International Journal of Agriculture Sustainability*, vol. 7, pp. 292-320.
- Kassam, A., T. Friedrich, T. Shaxson, T. Reeves, J. Pretty et J. de Moraes Sà (2011), « Production systems for sustainable intensification: Integrated productivity with ecosystem services », *Technikfolgenabschätzung-Theorie und Praxis*, vol. 2, pp. 39-45.
- Kay, P., A. Edwards et M. Foulger (2009), « A review of the efficacy of contemporary agricultural stewardship measures for ameliorating water pollution problems of key concern to the UK water industry », *Agricultural Systems*, vol. 99, n° 2-3.
- Kirby, G., V. Hristova et S. Murti (1996), « Conservation tillage and ley farming in the semi-arid tropics of Northern Australia: Some economic aspects », *Australian Journal of Experimental Agriculture*, vol. 36, n° 8.
- Knowler D. et B. Bradshaw (2007), « Farmers' adoption of conservation agriculture: A review and synthesis of recent research », *Food Policy*, vol. 32, pp. 25-48.

- Lahmar, R. (2010), « Adoption of conservation agriculture in Europe: Lessons of the KASSA project », *Land Use Policy*, vol. 27, n° 1, pp. 4-10.
- Lal, R. (2004), « Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security », *Science*, vol. 304, pp. 1 623-27.
- Lal, R., J.M. Kimble, R.F. Follett et C.V. Cole (1998), *The Potential of U.S. Croplands to Sequester Carbon and Mitigate the Greenhouse Effect*, Ann Arbor Press, Ann Arbor, Michigan.
- Lee, D.R., C.B. Barrett et J.G. McPeak (2006), « Policy, technology, and management strategies for achieving sustainable agricultural intensification », *Agricultural Economics*, vol. 34, pp. 123-27.
- Li, H., H. Gao, H. Wu, W. Li, X. Wang et J. He (2007), « Effects of 15 years of conservation tillage on soil structure and productivity of wheat cultivation in northern China », *Soil Research*, vol. 45, n° 5, pp. 344-50, <http://doi:10.1071/SR07003>.
- Li, Y.X., J.N. Tullberg et D.M. Freebairn (2007), « Wheel traffic and tillage effects on runoff and crop yield », *Soil and Tillage Research*, vol. 97, n° 2.
- Lindwall, C. et B. Sonntag (dir. pub.) (2010), *Landscape Transformed: The History of Conservation Tillage and Direct Seeding, Knowledge Impact in Society*, Saskatoon, University of Saskatchewan, Canada.
- Liu, D.L., K.Y. Chan et M. Conyers (2009), « Simulation of soil organic carbon under different tillage and stubble management practices using the Rothamsted carbon model », *Soil and Tillage Research*, vol. 104.
- Llewellyn, R., F. Demden et D. Gobbett (2009), *Adoption of No-till and Conservation Farming Practices in Australian Grain Growing Regions: Current Status and Trends*, CSIRO, Glen Osmond SA.
- Loke, P.F., E. Kotzé et C.C. DuPreez (2012), « Changes in soil organic matter indices following 32 years of different wheat production management practices in semi-arid South Africa », *Nutrient Cycle Agroecosystems*, vol. 94, pp. 97-109, <http://doi:10.1007/s10705-012-9529-6>.
- Lubowski, R., S. Bucholtz, R. Claassen, M. Roberts, J. Cooper, A. Gueorguieva and R. Johansson (2006), *Environmental Effects of Agricultural Land-Use Change The Role of Economics and Policy*, USDA, Economic Research Service (ERS), Economic Research Report Number 25, www.ers.usda.gov/media/469928/err25_1_.pdf.
- Luo, Z.K., E.L. Wang et O.J. Sun (2010), « Soil carbon change and its responses to agricultural practices in Australian agro-ecosystems: A review and synthesis », *Geoderma*, vol. 155, n° 3-4.
- Malinda, D.K. (1995), « Factors in conservation farming that reduce erosion », *Australian Journal of Experimental Agriculture*, vol. 35, n° 7.
- McConnell, K.E. (1983), « An economic model of soil conservation », *American Journal of Agricultural Economics*, vol. 65, n° 1.
- Minnesota Department of Agriculture (2012), « Definitions and information on conservation tillage practices », www.mda.state.mn.us/home.aspx.
- Moser, C.M. et C.B. Barrett (2003), « The disappointing adoption dynamics of a yield-increasing, low external-input technology: The case of SRI in Madagascar », *Agricultural Systems*, vol. 76, n° 3.
- Moss, B. (2008), « Water pollution by agriculture », *Philosophical Transactions of the Royal Society, Londres, Series B*, n° 363, pp. 659-66, <http://doi:10.1098/rstb.2007.2176>.
- Moussa-Machraoui, S., F. Errouissi, M. Ben-Hammouda et S. Nouira (2010), « Comparative effects of conventional and no-tillage management on some soil properties under Mediterranean semi-arid conditions in northwestern Tunisia », *Soil and Tillage Research*, vol. 106, n° 2.
- Mueller, D., R. Klemme et T. Daniel (1985), Short- and long-term cost comparisons of conventional and conservation tillage systems in corn production », *Journal of Soil and Water Conservation*, vol. 40, n°5.

- Neill, S.P. et D.R. Lee (2001), « Explaining the adoption and dis-adoption of sustainable agriculture: The case of cover crops in Northern Honduras », *Economic Development and Cultural Change*, vol. 49, n° 4.
- OCDE (2015), *Les périls du tarissement : Vers une utilisation durable des eaux souterraines en agriculture*, Études de l'OCDE sur l'eau, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264248427-fr>
- OCDE (2012), *Qualité de l'eau et agriculture: Un défi pour les politiques publiques*, Études de l'OCDE sur l'eau, Éditions OCDE, Paris. <http://dx.doi.org/10.1787/9789264121119-fr>
- OCDE (2010), *OECD Review of Agricultural Policies: Israel 2010*, Éditions OCDE, Paris. <http://dx.doi.org/10.1787/9789264079397-en>
- OCDE (2009), *Farmland Conversion: The spatial dimension of agricultural and land-use policies*, Éditions OCDE, Paris, www.oecd.org/agriculture/44535648.pdf
- OCDE (2006), *Water and Agriculture: Sustainability, Markets and Policies*, Éditions OCDE, Paris. <http://dx.doi.org/10.1787/9789264022577-en>
- Palm, C., H. Blanco-Canqui, F. DeClerck, L. Gatere et P. Grace (2014), « Conservation agriculture and ecosystem services: An overview », *Ecosystems and Environment*, vol. 187, n° 1.
- Pannell, D., R. Llewellyn et M. Corbeels (2014), « The farm-level economics of conservation agriculture for resource-poor farmers », *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 187.
- Pannell, D., G. Marshall, N. Barr, A. Curtis, F. Vanclay et R. Wilkinson (2006), « Understanding and promoting adoption of conservation practices by rural landholders », *Australian Journal of Experimental Agriculture*, vol. 46, n° 11.
- Pannell, D. (1995), « Economic aspects of legume management and legume research in dryland farming systems of southern Australia », *Agricultural Systems*, vol. 49, n° 3.
- Paul, B., B. Vanlauwe, F. Ayuke, A. Gassner, M. Hoogmoed, T. Hurisso, S. Koala, D. Lelei, T. Ndabamenye, J. Six et M. Pulleman (2013), « Medium-term impact of tillage and residue management on soil aggregate stability, soil carbon, and crop productivity », *Agriculture Ecosystems and Environment*, vol. 164.
- Perry, C., P. Stedut, P. Allen et C. Burt (2009), « Increasing productivity in irrigated agriculture: Agronomic constraints and hydrological realities », *Agricultural Water Management*, vol. 96, n° 11.
- Pincus, M.N. et C. Moseley (2013), « The economic and employment impacts of forest and watershed restoration », *Restoration Ecology*, published on-line, vol. 21, n° 2.
- Pink, B. (2009), *Land Management and Farming in Australia 2007-08*, Australian Government, Hobart, Tasmanie.
- Pittelkow, C., X. Liang, B. Linqvist, K. Groenigen, J. Lee, M. Lundy, N. Gestel, J. Six, R. Venterea et C. Kessel (2015), « Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture », *Nature*, vol. 517.
- Powlson, D., C. Stirling, M. Jat, B. Gerard, C. Palm, P. Sanchez and K. Cassman (2014), « Limited potential of no-till agriculture for climate change mitigation », *Nature Climate Change*, vol. 4, août.
- Pretty J., C. Toulmin et S. Williams (2011), « Sustainable intensification in African agriculture », *International Journal of Agricultural Sustainability*, vol. 9, n° 1.
- Pretty, J. (2008), « Agricultural sustainability: Concepts, principles and evidence », *Philosophical Transactions of the Royal Society*, London, Series B, *Biological Sciences*, vol. 363, n° 1 491.
- Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) (2012), *Year Book 2012: Emerging Issues in our Global Environment*, Nairobi, Kenya, www.unep.org/yearbook/2012.

- Prokopy, L., K. Floress, D. Klotthor-Weinkauff et A. Baumgart-Getz (2008), « Determinants of agricultural best management practice adoption: Evidence from the literature », *Journal of Soil and Water Conservation*, vol. 3, n° 5.
- Reicosky, D. (2003), « Tillage-induced CO₂ emissions and carbon sequestration: Effect of secondary tillage and compaction », dans L. Garcia-Torres, J. Benites, A. Martinez-Vilela et A. Holgado-Cabrera (dir. pub.), *Conservation Agriculture*, Kluwer Academic Publishing, Dordrecht, Pays-Bas.
- Rowlings, D., P. Grace, C. Scheer et R. Kiese (2013), « Influence of nitrogen fertiliser application and timing on greenhouse gas emissions from a lychee (*Litchi chi-nensis*) orchard in humid subtropical Australia », *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 179, pp. 168-178.
- Rusinamhodzi, L., M. Corbeels, M. van Wijk, M. Rufino, J. Nyamangara et K. Giller (2011), « A meta-analysis of long-term effects of conservation agriculture on maize grain yield under rain-fed conditions », *Agronomy Sustainable Development*, vol. 31.
- Sanderman, J., R. Farquharson et J. Baldock (2010), *Soil Carbon Sequestration Potential: A Review for Australian Agriculture*, CSIRO Land and Water, Canberra.
- Scott, B.J., P.L. Eberbach, J. Evans et L.J. Wade (2010), *Stubble Retention in Cropping Systems in Southern Australia: Benefits and Challenges*, EH Graham Centre Monograph 1, Industry & Investment NSW, Orange.
- Shi, Q., X. Deng, F. Wu, J. Zhan et L. Xu (2012), « Best management practices for agricultural non-point source pollution control using PLOAD in Wuliangshuai watershed », *Journal of Food, Agriculture and Environment*, vol. 10, n° 2.
- Siebert, S. et P. Döll (2010), « Quantifying blue and green virtual water contents in global crop production as well as potential production losses without irrigation », *Journal of Hydrology*, vol. 384, n° 3-4.
- Silburn, D.M., D.M. Freebairn et D.J. Rattray (2007), « Tillage and the environment in sub-tropical Australia - Tradeoffs and challenges », *Soil and Tillage Research*, vol. 97, n° 2.
- Smiley, P.C., K. King et N. Fausey (2011), « Influence of herbaceous riparian buffers on physical habitat, water chemistry, and stream communities within channelized agricultural headwater streams », *Ecological Engineering*, vol. 37, n° 9.
- Smith, K., D. Watts, T. Way, H. Torbert et S. Prior (2012), « Impact of tillage and fertilizer application method on gas emissions in a corn cropping system », *Pedosphere*, vol. 22, pp. 604-15.
- Snyder, C., T. Bruulsema, T. Jensen et P. Fixen (2009), « Review of greenhousegas emissions from crop production systems and fertilizer management effect », *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 133, pp. 247-66.
- Soil Association (2006), *Organic Works*, Soil Association UK, Bristol.
- Stevenson, R., R. Serraj et K. Cassman (2014), « Evaluating conservation agriculture for small-scale farmers in sub-Saharan Africa and South Asia », *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 187.
- Texas Water Development Board (non daté), « Agricultural water conservation practices », Texas Water Development Board, Austin, Texas, www.hcmud82.com/water_conservation/Ag%20Water%20Conservation.pdf.
- Thierfelder, C., M. Mwila et L. Rusinamhodzi (2013), « Conservation agriculture in eastern and southern provinces of Zambia: Long-term effects on soil quality and maize productivity », *Soil Tillage Research*, vol. 126, pp. 246-58.
- Thomas, G.A., G.W. Titmarsh, D.M. Freebairn et B.J. Radford (2007), « No-tillage and conservation farming practices in grain growing areas of Queensland - A review of 40 years of development », *Australian Journal of Experimental Agriculture*, vol. 47, n° 8.

- Tullberg, J. (2009), « CTF and climate change », paper presented to 6th Australian Controlled Traffic Farming Conference, Dubbo, Nouvelles-Galles du Sud, 12-14 août 2008, www.actfa.net/further_reading/documents/Tullberg.Jeff.pdf.
- Tullberg, J.N., D.F. Yule et D. McGarry (2007), « Controlled traffic farming - From research to adoption in Australia », *Soil and Tillage Research*, vol. 97, n° 2.
- Turner, N.C. et S. Asseng (2005), « Productivity, sustainability, and rainfall-use efficiency in Australian rainfed Mediterranean agricultural systems », *Australian Journal of Agricultural Research*, vol. 56, n°11.
- US Environmental Protection Agency (USEPA) (1993), « Guidance specifying management measures for sources of non-point pollution in coastal waters », USEPA, Office of Water, Washington, D.C., janvier, www.epa.gov/OWOW/NPS/MMGI/Chapter2/index.html.
- Uri, N. (2000), « An evaluation of the economic benefits and costs of conservation tillage », *Environmental Geology*, vol. 39, n° 3-4.
- Uri, N. (1999), « Energy and the use of conservation tillage in U.S. agriculture », *Energy Sources*, vol. 21, n°8.
- Uri, N. (1997), « Conservation tillage and input use », *Environmental Geology*, vol. 29, n° 3-4.
- Vagen, T., R. Lal et B. Singh (2005), « Soil carbon sequestration in Sub-Saharan Africa: A review », *Land Degradation & Development*, vol. 16, n° 1.
- Van den Puttea, A., G. Goversa, J. Dielsa, K. Gillijnsb et M. Demuzerea (2010), « Assessing the effect of soil tillage on crop growth: A meta-regression analysis on European crop yields under conservation agriculture », *European Journal of Agronomy*, vol. 33, n° 3.
- VandenBygaart, A.J., E.G. Gregorich et D.A. Angers (2003), « Influence of agricultural management on soil organic carbon: A compendium and assessment of Canadian studies », *Canadian Journal of Soil Science*, vol. 83.
- Vanloqueren, G. et P.V. Baret (2009), « How agricultural research systems shape a technological regime that develops genetic engineering but locks out agro-ecological innovations », *Research Policy*, vol. 38.
- Verhulst, N., I. Francois et B. Govaerts (2012), « Conservation agriculture and soil carbon sequestration: Between myth and farmer reality », *Critical Reviews in Plant Science*, vol. 28, n° 3, <http://dx.doi.org/10.1080/07352680902776358>.
- Wang, E.L., L. Zhongkui et C.J. Smith (2010), « Potential change of soil carbon in Australia agro-ecosystems as affected by conservation management: Data synthesis and modelling », communication présentée au 19e Congrès mondial de la science du sol, « Soil Solutions for a Changing World », Brisbane.
- Warda, F. et M. Pulido-Velazquez (2008), « Water conservation in irrigation can increase water use », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 105, n° 47, pp. 18.
- Watson, S., E. Segarra, R. Lascano, K. Bronson et A.M. Schubert (2005), « Guidelines for recommending Precision Agriculture in southern crops », *Journal of Extension*, vol. 43, n° 2, Article n° 2RIB7, www.joe.org/joe/2005april/rb7p.shtml.
- West, T. et G. Marland (2002), « A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States », *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 91, n° 1-3.
- West, T. et W. Post (2002), « Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation », *Soil Science Society of America Journal*, vol. 66, pp. 1930-46.

Wollni, M., D. Lee et J. Thies (2010), « Conservation agriculture, organic marketing, and collective action in the Honduran hillsides », *Agricultural Economics*, vol. 41, n° 3-4.

World Bank (1996), “A Concept Paper and Action Plan for Natural Resource Degradation in Sub-Saharan Africa: Restoration of Soil Fertility”, *Internal Report*, World Bank, Washington, D.C.

Annexe 2A

Adoption de l'agriculture de conservation

Tableau 2A.1. Niveaux d'adoption de l'agriculture de conservation, année la plus récente

	Total ('000 ha)	En % de la surface cultivée (%)
Pays membres de l'OCDE		
Australie	17 695	36.1
Canada	18 313	36.3
Nouvelle-Zélande	162	27.9
États-Unis	35 613	22.9
Chili	180	13.5
Finlande	200	7.1
Espagne	792	5.2
Suisse	17	4.0
Royaume-Uni	150	2.4
Portugal	32	2.9
France	200	1.1
Italie	380	1.1
République slovaque	35	0.7
Mexique	41	0.2
Hongrie	5	0.2
Allemagne	200	n.d.
Irlande	0.2	0.0
Pays-Bas	0.5	0.0
Pays non membres de l'OCDE		
Argentine	29 181	68.7
Paraguay	3 000	54.4
Uruguay	1 072	37.3
Brésil	31 811	43.8
Bolivie	706	18.4
Kazakhstan	2 000	7.9
Zambie	200	5.3
Russie	4 500	3.8
Colombie	127	8.0
Afrique du sud	368	3.0
Mozambique	152	2.7
Chine	6 670	2.9
Ukraine	7 100	1.8
Monde	157 434	10.9

n.d. non disponible

Source : FAO, base de données AQUASTAT, site Internet consulté le 2 juillet 2015.

Chapitre 3

Agriculture biologique : quelle portée pour la croissance verte ?

L'agriculture biologique est un mode de production alimentaire qui vise à mettre en place des systèmes de production écologiquement et économiquement viables en s'efforçant d'utiliser des ressources renouvelables locales, et de réduire au minimum l'usage d'intrants externes. Depuis les années 70, un marché mondial s'est développé pour les produits biologiques, et des normes de production obligatoires ont été mises en place au bénéfice des producteurs et des consommateurs. Au cours des deux dernières décennies, l'agriculture biologique est devenue l'un des segments les plus porteurs du secteur agricole dans plusieurs pays de l'OCDE. Le présent chapitre passe en revue les différentes démarches adoptées par les pays de l'OCDE pour soutenir l'agriculture biologique, et les effets possibles de cette filière sur l'efficacité d'utilisation et la productivité des ressources.

Principaux messages

- Les données disponibles ne permettent pas de tirer des conclusions sur la performance économique de l'agriculture biologique par rapport à l'agriculture conventionnelle ; les surprix et les aides publiques compensent généralement des rendements inférieurs et des coûts des intrants souvent supérieurs.
- L'agriculture biologique demande plus de main-d'œuvre que l'agriculture conventionnelle et génère moins de risques pour la santé des producteurs.
- Au total, on constate des effets environnementaux positifs sur les sols, l'eau et la biodiversité, mais les résultats sont mitigés en ce qui concerne les émissions de GES.

Un secteur en plein essor

L'agriculture biologique est un mode de production alimentaire qui vise à mettre en place des systèmes de production viables sur le plan écologique et économique en s'efforçant d'utiliser des ressources renouvelables, locales, et de réduire au minimum l'usage d'intrants externes. Depuis les années 70, un marché s'est développé pour les produits biologiques au niveau mondial, et des normes de production obligatoires ont été introduites afin de protéger les producteurs et les consommateurs.

Il existe de nombreuses définitions de l'agriculture biologique. Selon la plus simple, il s'agit d'un système de production fondé sur des processus écologiques tels que le recyclage des déchets, les engrais organiques (par exemple fumier ou compost de légumes) et les pesticides naturels (par exemple des animaux prédateurs), au lieu d'intrants synthétiques comme les engrais et pesticides chimiques. Les antibiotiques et les autres produits de santé sont employés uniquement pour soigner les animaux malades, lorsqu'ils sont autorisés, et non pour augmenter les rendements.¹ D'autres définitions de l'agriculture biologique vont beaucoup plus loin. Ainsi, la définition donnée par la Fédération internationale des mouvements d'agriculture biologique (IFOAM) intègre le bien-être animal, la biodiversité et la justice sociale.² Il faut néanmoins faire la distinction entre l'agriculture biologique certifiée et une agriculture qui suit les méthodes biologiques de production mais qui n'a pas obtenu de certification officielle.

Bien que les règles de l'agriculture biologique diffèrent légèrement d'un pays à l'autre, certaines pratiques générales s'appliquent à tous les systèmes culturels biologiques et aux stades de la production végétale, du stockage, de la transformation, du conditionnement et du transport. La première caractéristique de la culture biologique et la plus importante est d'éviter ou de limiter l'utilisation d'intrants chimiques synthétiques, notamment des engrais et des pesticides, et la surconsommation d'antibiotiques et d'additifs alimentaires. Chaque pays adopte une liste de substances autorisées et interdites pour l'agriculture biologique.

Par ailleurs, l'agriculture biologique n'emploie pas d'organismes génétiquement modifiés, de techniques d'obtention de cultivars telles que l'irradiation, de biosolides, ni de boues d'épuration non humaines pour fertiliser le sol ou nourrir les animaux. Pour qu'une production puisse être déclarée « biologique », les terres cultivées doivent être exemptes de tous les produits chimiques de synthèse interdits, en général depuis trois ans. Les cultivateurs doivent enregistrer leur production et leurs ventes à des fins de contrôle, maintenir une séparation physique stricte entre la production certifiée biologique et la production non certifiée, et accepter des inspections périodiques sur site par les organismes agréés.

Au cours des deux dernières décennies, l'agriculture biologique est devenue l'un des segments les plus porteurs du secteur agricole dans plusieurs pays de l'OCDE. Les ventes d'aliments et boissons biologiques ont atteint 72 milliards USD dans le monde en 2013, soit pratiquement cinq fois plus que les 15 milliards USD enregistrés en 1999 (FiBL/IFOAM, 2015). L'agriculture biologique se développe dans tous les pays de l'OCDE en réponse à une demande croissante des consommateurs pour des produits alimentaires jugés sains et respectueux de l'environnement. L'agriculture biologique n'est plus

limitée à des paysans pour lesquels la production biologique s'inscrit dans un mode de vie et qui commercialisent leurs produits dans des points de vente spécialisés ; elle s'est étendue à toute la chaîne agro-alimentaire où elle apparaît comme un créneau intéressant permettant de satisfaire un marché étroit à des prix majorés.

Néanmoins, la part de l'agriculture biologique dans la production agricole totale et la consommation alimentaire reste relativement faible dans la plupart des pays. En dépit d'une forte croissance, l'agriculture biologique représente un pourcentage minime de la superficie agricole mondiale (1 %) (tableau 3A.1).

Par région, l'Océanie arrive en tête avec 4.1 % des terres agricoles, suivie de l'Europe (2.4 %) et de l'Amérique latine (1.1 %). Dans l'UE27, la part des terres conduites en agriculture biologique s'élève à 5.7 %. Au niveau mondial, 43.1 millions d'hectares de terres sont exploitées en agriculture biologique (y compris celles en cours de conversion). L'Australie est le pays qui en possède le plus (dont 97 % sont des pâturages extensifs), suivie de l'Argentine et des États-Unis. En 2013, on recensait 2 millions de producteurs, dont plus des trois quarts basés en Asie, en Afrique et en Amérique latine. L'Inde compte le plus grand nombre de producteurs (650 000), suivie de l'Ouganda (189 610) et du Mexique (169 703).

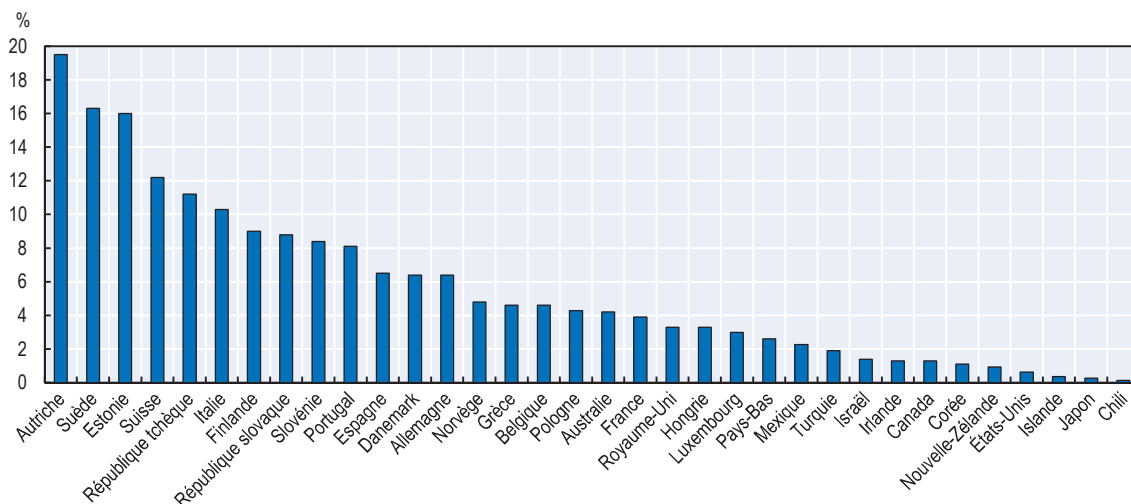
Dans plusieurs pays de l'OCDE, l'agriculture biologique est le secteur agricole le plus dynamique avec une croissance annuelle comprise entre 15 et 30 %, certes partant de très bas. Par rapport à 1999, première année pour laquelle on dispose de données mondiales sur l'agriculture biologique, la surface de terres en agriculture biologique a presque quadruplé. En 2013, cette surface a progressé de 15 % par rapport à 2012, principalement suite à une nette progression des terres totalement certifiées biologiques en Australie, où des zones de parcours ont été mises en production biologique pour répondre à la forte demande de viande de bœuf biologique. En moyenne, l'agriculture biologique représente environ 2 % du total des terres agricoles dans la zone OCDE, avec toutefois des variations très importantes puisque les pourcentages vont de moins de 0.2 % au Japon jusqu'à 20 % en Autriche (graphique 3.1). Les principaux marchés biologiques sont les fruits et les légumes, les volailles fraîches et les œufs, et les produits laitiers frais (lait, beurre et fromage), mais les céréales occupent également une place importante dans certains pays.

La demande de produits biologiques est concentrée en Amérique du Nord et en Europe, qui représentent plus de 90 % du chiffre d'affaires mondial. On voit là qu'il existe une immense disparité entre les zones de production et de consommation. En 2013, le plus grand marché pour les produits biologiques était, de loin, les États-Unis, avec 32 milliards USD de ventes de produits alimentaires biologiques, suivis par l'Allemagne avec 10 milliards USD et la France avec 6 milliards USD. Pour ce qui est de la consommation annuelle par habitant, la Suisse et le Danemark dominaient avec 279 USD et 216 USD, respectivement. Enfin, c'est au Danemark, en Suisse et en Autriche que l'on trouve les pourcentages les plus élevés de ventes de produits alimentaires biologiques.

La croissance de l'agriculture biologique a été en grande partie tirée par la demande des consommateurs des pays à revenu élevé qui privilégient les produits biologiques pour différentes raisons : leur supériorité présumée du point de vue des effets sur la santé et l'environnement, de la qualité et du goût, la fraîcheur des fruits et légumes, et l'occasion de soutenir les petits producteurs, les communautés et les marchés locaux.

Les obstacles qui freinent son adoption par les agriculteurs sont notamment les coûts de gestion élevés, les risques associés à la conversion à un autre mode d'exploitation, et le manque de connaissances sur les systèmes de production biologique et les circuits de commercialisation associés (Greene et Ebel, 2012 ; Greene, et al., 2009).

Graphique 3.1. L'agriculture biologique dans les pays de l'OCDE : pourcentage du total des terres agricoles, 2013



Note : Les données comprennent les terres en cours de conversion.

Source : Institut de recherche de l'agriculture biologique (FiBL) et Fédération internationale des mouvements d'agriculture biologique (IFOAM) (FiBL/IFOAM) (2015), *The World of Organic Agriculture 2015*, www.organic-world.net/yearbook-2015.html.

Diversité des interventions des pouvoirs publics dans les pays de l'OCDE

Dans toute la zone OCDE, les pouvoirs publics ont recours à un vaste arsenal de mesures pour gérer la problématique de l'agriculture biologique. Certaines visent à mettre en place l'environnement nécessaire (par exemple en créant des systèmes de certification et d'étiquetage et en fournissant des services de recherche et de vulgarisation agricole), d'autres à encadrer les pratiques (par exemple en élaborant des réglementations et des normes) ou à encourager le développement du secteur (par exemple par des incitations financières, par la création de partenariats entre agents de la chaîne de production et par des politiques d'achat).

Pour justifier leur intervention dans le secteur de l'agriculture biologique, les pouvoirs publics invoquent l'argument de « l'industrie naissante » ou des avantages environnementaux publics (Jaeck, Lifran et Stahn, 2013 ; Halpin, Daugbjerg et Schwartzman, 2011 ; DEFRA, 2002). La justification de l'industrie naissante repose sur les coûts de conversion de l'agriculture conventionnelle à l'agriculture biologique. La période de conversion peut durer plusieurs années, durant lesquelles les agriculteurs doivent utiliser les méthodes biologiques sans pouvoir vendre leurs produits sous l'appellation « biologiques ». Lorsque les rendements diminuent et/ou que les coûts augmentent, le manque à gagner peut constituer un handicap. Cela est souvent le cas pour les petites exploitations agricoles, en particulier.

La justification de la défaillance du marché renvoie aux situations où le marché ne rémunère pas les avantages environnementaux générés par les systèmes de production biologiques. Elle est doublement valable lorsque les exploitations – en agriculture biologique ou conventionnelle – n'ont pas à répondre des dommages qu'elles causent à l'environnement. Il est toutefois extrêmement difficile d'évaluer ces effets sur l'environnement, qu'ils soient positifs ou négatifs. Un autre exemple de défaillance du marché est l'information imparfaite des acteurs du marché sur les bienfaits potentiels des aliments biologiques pour la santé, qui peut entraîner une mauvaise affectation des ressources.

Bien que les forces du marché soient le principal moteur du développement de l'agriculture biologique dans certains pays de l'OCDE, plusieurs États, la plupart européens, accordent aux agriculteurs des aides financières (et d'autres incitations) pour passer, ou se maintenir, en production

biologique. Dans l'Union européenne, la plupart des pays soutiennent l'agriculture biologique via le second pilier de la PAC – en plus des paiements standard prévus au premier pilier – par un paiement à l'hectare pour les mesures agro-environnementales au titre de l'« axe 2 ». D'autres financements sont également accessibles dans le cadre des axes 1 et 3 au profit de la foresterie, de l'amélioration de la qualité de vie rurale et de la diversification de l'économie rurale.

En France, les autorités ont lancé un nouveau plan d'action national en faveur de l'agriculture biologique en 2013 afin de restructurer le secteur. Entre autre objectifs, le programme vise à doubler la surface de terres en cultures biologiques et à stimuler la consommation de produits biologiques (encadré 3.1). Le plan prévoit des paiements directs plus élevés pour les agriculteurs, tant pendant la période de conversion qu'après, et des aides financières pour les acteurs de la filière d'approvisionnement ; il fixe comme objectif d'atteindre 20 % de produits biologiques dans les marchés publics de produits alimentaires, débloque davantage de fonds pour la recherche et la diffusion, appuie l'amélioration de la formation et de l'information des agriculteurs et des acteurs de la filière, et veille à la prise en compte des spécificités de l'agriculture biologique, conformément aux exigences de la réglementation de l'UE, notamment des règles sur la réglementation de l'agriculture biologique.

Dans la quasi-totalité des pays de l'OCDE, des dispositifs fondés sur les lois du marché, notamment des systèmes de certification et d'étiquetage, sont aujourd'hui en place ou en cours d'élaboration pour aider les consommateurs dans leurs choix. Mais la prolifération des labels et des normes peut être pour eux une source de confusion. Les différences existant entre les systèmes de certification et d'étiquetage, tant publics que privés, peuvent gêner les échanges commerciaux, de même que les différences entre les méthodes utilisées par les États pour évaluer les équivalences (OCDE, 2015).

Plusieurs pays ont lancé des campagnes d'information et des activités de promotion afin d'encourager la consommation de produits biologiques. Dans quelques pays, en particulier en Europe, les politiques de passation des marchés publics encouragent ou imposent l'achat de produits alimentaires biologiques par des institutions publiques comme les écoles et les hôpitaux.³

Les grands pays agricoles ont adopté un ensemble de règles et créé des institutions pour assurer la certification, l'audit, l'inspection et le contrôle des cultures biologiques. Aux États-Unis, une loi (l'Organic Foods Production Act, OFPA) a été adoptée en 1990 en vue de créer une norme nationale applicable à la production d'aliments et de fibres biologiques. En vertu de l'OFPA, l'USDA devait élaborer des réglementations pour expliquer la loi aux producteurs, aux intermédiaires et aux certificateurs. La loi prévoyait aussi la mise en place d'un conseil national, le National Organic Standards Board, chargé de formuler des recommandations. Les règlements sont entrés en vigueur à l'automne 2002.⁴

La législation fédérale définit trois niveaux d'aliments biologiques multi-ingrédients transformés. La première catégorie correspond aux produits entièrement fabriqués avec des méthodes et des ingrédients certifiés biologiques, qui sont étiquetés « 100 % biologiques », la deuxième comprend les produits contenant au moins 95 % d'ingrédients biologiques, qui sont étiquetés « biologiques », et la troisième, les produits contenant un minimum de 70 % d'ingrédients biologiques, qui sont étiquetés « fabriqué à partir d'ingrédients biologiques ». La dernière catégorie ne peut pas être marquée avec le logo « Biologique » de l'USDA. Tous les agriculteurs, les transformateurs et les distributeurs de la filière biologique doivent respecter la norme nationale et être certifiés par un organisme d'État (ou privé) agréé par l'USDA, sauf si leurs ventes de produits biologiques sont inférieures à 5 000 USD par an (Greene et Ebel, 2012).

Encadré 3.1. Le secteur de l'agriculture biologique en France

L'agriculture biologique française est un secteur dynamique. Entre 2007 et 2012, la superficie de terres qui y était consacrée en France a presque doublé, passant de 557 000 ha à plus d'un million d'hectares ; durant la même période, le nombre de producteurs en agriculture biologique est passé de 12 000 à 24 500, soit plus du double ; le nombre de transformateurs et de distributeurs de produits biologiques a suivi la même progression, passant de 6 400 à 12 300. Le chiffre d'affaires généré par la vente de produits alimentaires biologiques aux consommateurs a progressé pour passer de 2 milliards EUR à 4.1 milliards EUR, et les consommations intermédiaires de produits biologiques dans le secteur de la restauration ont augmenté, entraînant une hausse de 7 % du chiffre d'affaires qui a ainsi atteint 169 millions EUR dans l'ensemble du secteur de la restauration collective. En 2012, le secteur biologique a employé plus de 36 700 personnes (producteurs, transformateurs, distributeurs, etc.), contre 18 400 en 2007, et occupé 3.8 % de la surface agricole utilisée (plus de 2.47 millions d'hectares). D'après une enquête commandée par l'Agence Bio, le pourcentage de consommateurs qui achètent régulièrement des produits biologiques a atteint 43 % en 2012.

Le premier plan de développement de l'agriculture biologique a été mis en œuvre entre 2007 et 2012. Le 31 mai 2013, un nouveau plan d'action, le programme *Ambition bio 2017*, a été lancé afin de poursuivre le développement du secteur biologique. Six grands objectifs ont été fixés :

- *Développer la production en agriculture biologique* : Un dispositif incitatif encourage les agriculteurs à conserver leurs champs en agriculture biologique. Une subvention de 160 millions EUR par an sera accordée pour financer la conversion au biologique (ou soutenir le maintien de cultures en agriculture biologique) dans le cadre du second pilier de la Politique agricole commune (PAC) de l'UE pour la période allant de 2014 à 2020.
- *Restructurer le secteur* : Deux priorités ont été définies. La première est de soutenir la culture de plantes protéagineuses (comme le canola, le tournesol et le soja) afin de réduire la dépendance vis-à-vis des importations de protéines fourragères. Deuxièmement, pour améliorer l'organisation du secteur, il est nécessaire d'améliorer les données sur les prix à la production et à la distribution. À cette fin, les observatoires national et régionaux seront renforcés et leurs travaux coordonnés. Un fonds spécial réservé à l'agriculture biologique, Avenir Bio, sera géré par l'Agence Bio française et recevra 1 million EUR supplémentaire par an, en plus de sa dotation annuelle actuelle de 3 millions EUR. Avenir Bio informe les consommateurs, coordonne les professionnels et repère les changements nécessaires pour structurer le secteur et financer les projets.
- *Développer les marchés biologiques et améliorer l'information des consommateurs* : Dans le cas de la restauration collective d'État, le plan fixe comme objectif d'atteindre une part de 20 % pour les produits biologiques. Des campagnes de sensibilisation du public seront également menées, dans l'optique de toucher particulièrement la jeune génération par des publicités ciblées, des visites scolaires dans des fermes biologiques, et des projets de jardins communautaires.
- *Encourager la recherche-développement* : La R-D consacrée à l'agriculture biologique recevra davantage de fonds dans le cadre du programme financé par le CASDAR (compte d'affectation spéciale pour le développement agricole et rural) qui sera mis en œuvre entre 2014 et 2020, et la diffusion des résultats au public sera améliorée.
- *Former les acteurs agricoles et agroalimentaires* : Ce point porte sur l'offre de formation et de formation spécialisée, une attention particulière étant accordée à l'amélioration de la collaboration entre l'administration du secteur agricole et les experts de l'agriculture biologique. Des programmes de formation continue seront lancés pour les agriculteurs, et les cours et formations spécifiques déjà proposés dans les établissements d'enseignement agricole seront développés et élargis.
- *S'adapter à la réglementation de l'UE* : Ce point porte sur l'application par les agriculteurs de dispositions spéciales de la réglementation de l'UE en matière d'agriculture biologique. Deux organes ont été créés pour resserrer les liens futurs entre les régions et le ministère de l'Agriculture.

On trouvera plus d'informations sur le site Internet du ministère de l'Agriculture : www.agriculture.gouv.fr/ambition-bio-2017.

Dans l'Union européenne, une législation étendue sur les produits biologiques est en vigueur depuis 1992 (Règlement (CEE) n° 2092/91 du Conseil). Cependant, beaucoup de pays membres avaient déjà des lois en place sur la production biologique et encadraient la production biologique bien avant l'introduction de la législation de l'Union européenne. C'est le cas par exemple de la France, où la certification biologique est apparue en 1985, et de l'Allemagne, où des labels de produits alimentaires biologiques sont utilisés depuis 1928. La législation européenne initiale de 1992 a été modifiée par le Règlement (CE) n° 834/2007 du Conseil. Ce règlement a défini les objectifs et les principes de l'agriculture biologique et fixé les règles générales de production, et a été complété par le Règlement (CE) n° 889/2008 énonçant ses modalités d'application, avec des dispositions détaillées relatives à la production et à l'étiquetage, et des exigences en matière de contrôle.

En 2010 et 2012, le cadre législatif a été étoffé avec l'introduction de deux règlements sur l'aquaculture et la production de vin biologique, et des travaux sont en cours sur la production avicole, la production sous serre, la production d'aliments pour animaux et la production agro-alimentaire. Le logo européen « Agriculture biologique » est obligatoire sur les produits alimentaires depuis juillet 2010. Les pays membres de l'UE n'adoptent pas tous le même nombre ni le même type de mesures pour promouvoir l'agriculture biologique (on trouvera dans Sanders et al., 2011, une description et une analyse détaillées des mesures publiques de soutien à l'agriculture biologique actuellement en place, ainsi qu'une typologie des combinaisons de mesures utilisées).

Au Japon, le système de normes agricoles japonaises (JAS) a été mis en place en 2001 et profondément révisé en 2005. Au Canada, une certification est en vigueur à l'échelon fédéral depuis 2009, tandis qu'en Australie, des normes ont été introduites en 1991 et leur sixième révision est en cours. Enfin, l'Inde, important exportateur de produits biologiques, réglemente la certification des produits biologiques par les normes nationales pour la production biologique (NSOP), qui ont été reconnues par l'Union européenne, l'USDA et d'autres agences de grands pays importateurs.

L'agriculture biologique peut-elle rivaliser avec l'agriculture conventionnelle ?

Les rendements sont inférieurs, mais le total des coûts économiques de production est variable

Un facteur de rentabilité important est le rendement de la production biologique. Les rendements à l'hectare sont généralement inférieurs dans les exploitations biologiques parce qu'elles utilisent moins d'intrants. Elles consomment moins de pesticides et d'engrais à l'hectare que leurs homologues conventionnelles, même si les quantités sont comparables pour le carburant et les lubrifiants. Là où les exploitations conventionnelles se servent de produits chimiques, les exploitations biologiques ont habituellement recours à des techniques mécaniques (par exemple pour le désherbage) et les interventions dans les champs sont aussi fréquentes dans les deux cas. En ce qui concerne l'élevage, les taux de charge sont moins élevés dans les exploitations en agriculture biologique. Celles-ci cultivent moins de maïs fourrager que leurs homologues conventionnelles, mais les pâturages représentent une plus grande part de leur surface agricole utilisée.

Dans la mesure où les exploitations biologiques utilisent moins d'intrants, leur niveau de consommations intermédiaires par unité produite est inférieur à celui des exploitations conventionnelles. En revanche, les coûts fixes par unité produite sont en général plus élevés dans les exploitations biologiques (McBride, *et al.*, 2015 ; Lampkin, Gerrard et Moakes, 2014 ; CE, 2013).

Comparer les rendements dans les deux modes d'exploitation n'est pas simple. Seufert et al. (2012) ont réalisé une méta-analyse fondée sur 62 sites d'étude et 316 comparaisons des rendements biologiques et conventionnels pour 34 espèces cultivées différentes. D'une manière générale, les auteurs concluent que le ratio moyen des rendements biologiques rapportés aux rendements conventionnels s'établit à 0.75, c'est-à-dire que les rendements en agriculture biologique sont 25 % inférieurs aux rendements en agriculture conventionnelle.

Toutefois, ces résultats varient sensiblement d'un type de culture et d'une espèce cultivée à l'autre. Pour les fruits et les oléagineux, l'écart est faible et statistiquement non significatif. Les cultures biologiques pérennes donnent de meilleurs résultats que les cultures annuelles, et les légumineuses font mieux que les autres végétaux. Après analyse, les auteurs voient quatre explications possibles à ces différences. En premier lieu, ils avancent que l'azote est souvent le facteur limitant dans les systèmes biologiques, qui sont plus performants lorsqu'ils reçoivent de plus grandes quantités d'azote.⁵

Deuxièmement, les auteurs font valoir que le phosphore est difficile à gérer dans les systèmes biologiques. Les données montrent que les cultures biologiques donnent de meilleurs résultats sur des sols pauvres acides que sur des sols pauvres basiques, et il a déjà été établi que, dans des conditions très basiques ou très acides, le phosphore était moins facilement assimilable par les plantes car il forme des phosphates insolubles. Ainsi, les cultures biologiques sont plus dépendantes des engrais et des amendements.

La troisième explication avancée est la relation entre l'eau et les rendements, les systèmes biologiques étant plus performants que les systèmes conventionnels en l'absence d'irrigation, ainsi que dans des conditions de sécheresse et d'excès de précipitations. D'un autre côté, les cultures conventionnelles donnent de meilleurs résultats sous irrigation. Cela peut être attribué au fait que, comme indiqué plus haut, les éléments nutritifs sont le facteur limitant dans les systèmes biologiques, qui ne réagissent pas à l'irrigation de la même manière que les systèmes conventionnels. En outre, compte tenu des pratiques de gestion des sols employées en agriculture biologique, les sols présentent une meilleure capacité de rétention d'eau et des taux d'infiltration plus élevés, et sont donc capables de supporter des sécheresses ou des excès de précipitations.

Enfin, les rendements en agriculture biologique dépendent des connaissances et des bonnes pratiques de conduite. Les auteurs constatent que, lorsque des bonnes pratiques de conduite sont appliquées à la fois dans des exploitations conventionnelles et biologiques, ces dernières sont plus performantes. Les rendements des exploitations biologiques sont bas les premières années suivant la conversion et augmentent ensuite progressivement en raison de l'amélioration de la fertilité du sol et des compétences de conduite. Les auteurs avancent même que « les améliorations des techniques de conduite qui permettent de remédier à des facteurs limitant les rendements des systèmes biologiques et/ou la conversion à l'agriculture biologique dans les conditions agro-écologiques où elle donne les meilleurs résultats pourraient supprimer l'écart des rendements entre agriculture biologique et agriculture conventionnelle ».

Dans une méta-analyse portant sur 115 études, Ponisio et al. (2014) concluent que les rendements biologiques sont 19.2 % inférieurs aux rendements conventionnels. Ce chiffre est équivalent à celui estimé par De Ponti et al. (2012), mais inférieur à l'écart de 25 % qui ressort de la méta-analyse de Seufert et al. (2012). Ponisio et al. (2014) ont montré aussi que les pratiques de diversification, comme les cultures multiples et la rotation des cultures, réduisent sensiblement l'écart des rendements entre agriculture biologique et agriculture conventionnelle (le faisant descendre à 9 % et 8 %, respectivement). De plus, les chercheurs ont relevé que les rendements dépendaient aussi du type de plante cultivée.

Les surprises du marché et les aides publiques jouent un rôle important dans le revenu des agriculteurs

Les prix plus élevés et les aides publiques compensent souvent des rendements inférieurs et des coûts économiques globaux généralement supérieurs. Les *surprises* traduisent les effets bénéfiques collectifs supposés de l'agriculture biologique. Ces majorations sont compensées à des degrés divers par les coûts de production plus élevés et les coûts de certification, mais semblent équilibrer dans une certaine mesure les marges brutes des agriculteurs biologiques et celles des agriculteurs non-biologiques.

Il importe de se demander ce que deviendront ces surprises avec le développement du secteur biologique. S'il suit le même chemin que les autres filières de l'alimentaire et des fibres, on pourrait s'attendre à ce que les coûts de production, de transformation, de transport et de commercialisation à la tonne diminuent au fil du temps. D'après des observations ponctuelles, il semblerait que cela soit effectivement le cas (Lampkin, Gerrard et Moakes, 2014). Des exemples sont visibles notamment dans les systèmes de production (progrès dans la lutte contre les ravageurs), les opérations de transport (gains d'efficacité) et les installations de transformation (utilisation plus efficiente).

L'étude de McBride et al. (2015), qui analyse la rentabilité de la production biologique certifiée de cultures de plein champ (maïs, blé et soja) aux États-Unis, constate que les coûts économiques supplémentaires de la production biologique par rapport à ceux de la production conventionnelle sont largement compensés, en moyenne, par les rendements supérieurs du système de production biologique pour le maïs et le soja, bien que cela ne soit pas le cas pour le blé. Ainsi, les profits moyens par acre enregistrés par le maïs et le soja biologiques sont supérieurs à ceux du maïs et du soja conventionnels lorsque les autres facteurs sont maîtrisés. Le potentiel de profits de l'agriculture biologique vient principalement des surprises importants payés pour les cultures certifiées biologiques. L'étude confirme

également les rendements inférieurs et les coûts économiques totaux à l'hectare (coûts variables et fixes) le plus souvent supérieurs en agriculture biologique.

Dans l'Union européenne, la part des paiements publics dans la valeur ajoutée nette est généralement plus élevée pour les exploitations biologiques (Bellon et Penvern, 2014 ; Lampkin, Gerrard et Moakes, 2014 ; CE, 2013). Chavas et al. (2009) présentent l'analyse économique et l'analyse des risques d'une série de données de longue durée (1993-2006) obtenue dans le cadre du programme d'essais des systèmes culturaux intégrés du Wisconsin (WISCT) aux États-Unis. Quand les auteurs ont estimé le résultat net en utilisant exclusivement les prix du marché (c'est-à-dire sans aides publiques ni surpris), le système maïs-soja sans travail du sol s'est révélé être le système de production céréalière le plus rentable, et le pâturage tournant le système fourrager le plus rentable. Une fois les paiements publics inclus, le résultat augmentait pour tous les systèmes de cultures céréalières de rapport, en particulier la culture continue de maïs, avec des hausses de 50 à 190 %.

Quand les surpris étaient ajoutés aux paiements publics, l'augmentation des recettes était comprise entre 85 à 110 % pour le système céréalière biologique, et entre 35 et 40 % pour le système fourrager biologique. Ces niveaux sont plus élevés que la normale dans la région du Midwest pour la production de maïs-soja sans travail du sol, de maïs en culture continue ou de luzerne en culture intensive. Les auteurs concluent que lorsque les cours des céréales sont élevés, si les surpris des produits biologiques restent importants, le différentiel entre les systèmes céréalières va s'élargir à l'avantage de la production céréalière et fourragère biologique. Une solution observée par les auteurs face à ces fluctuations du marché est celle de la production parallèle. Certains agriculteurs convertissent ainsi une partie de leurs parcelles à l'agriculture biologique, tout en maintenant des systèmes de production conventionnels sur les autres.

Aucune constante claire ne se dégage lorsqu'on compare la performance économique de l'agriculture biologique et celle de l'agriculture conventionnelle

Le fait que les producteurs en agriculture biologique aux États-Unis encaissent plus de recettes ne se traduit pas toujours par des revenus plus élevés. Sur le plan du revenu du ménage agricole, les producteurs en agriculture biologique ne sont pas sensiblement plus favorisés que les producteurs en agriculture conventionnelle. Bien que le revenu monétaire brut moyen soit supérieur pour les exploitations biologiques certifiées par rapport aux exploitations conventionnelles, les premières supportent des coûts de production sensiblement plus élevés. Ces coûts s'expliquent par le niveau plus élevé des coûts de main-d'œuvre, des dépenses d'assurance et des charges de commercialisation (Uematsu et Mishra, 2012). Les auteurs ont constaté également que les producteurs en agriculture biologique se couvraient beaucoup contre les incertitudes et les risques plus importants inhérents à l'agriculture biologique. Les exploitations biologiques paient 12 000 USD de plus par an en primes d'assurance que les exploitations conventionnelles. Enfin, les exploitations biologiques paient jusqu'à 120 000 USD de plus par an en charges de commercialisation que les exploitations conventionnelles. Cependant, cette étude se base sur un très petit échantillon (65 exploitations biologiques certifiées), qui pourrait ne pas être représentatif du secteur de l'agriculture biologique aux États-Unis⁶.

L'étude de la CE (2013), qui compare la performance financière des exploitations biologiques et conventionnelles pour la filière laitière en Autriche, en Allemagne et en France, et pour le secteur des cultures de plein champ (céréales, oléagineux et protéagineux) dans les trois mêmes pays plus l'Espagne et la Pologne, a conclu à l'absence de schéma clair car chaque pays et secteur présente des niveaux différents de revenu par unité de travail : les pratiques de l'agriculture biologique produisent des rendements plus faibles car elles sont plus extensives – sauf pour ce qui est de l'utilisation de main-d'œuvre, où elles sont plus intensives, mais les prix plus élevés ont tendance à compenser cette situation ; les coûts de production ne sont pas toujours inférieurs car leur niveau de dépréciation par unité produite est comparable ou supérieur à celui des exploitations conventionnelles ; et le revenu par unité de travail est souvent inférieur, même si des paiements agro-environnementaux ou relatifs au bien-être animal pourraient compenser cette situation.

La vaste étude entreprise en France par l'Institut national de la recherche agronomique (INRA) fait ressortir la difficulté de tirer une conclusion claire sur la performance économique de l'agriculture biologique en France par rapport à l'agriculture conventionnelle, d'après l'analyse de la littérature existante, du fait : i) des définitions imprécises de l'agriculture biologique (ex. : exploitations en cours de conversion ou certifiées) ; ii) de la petite taille des exploitations biologiques ; iii) de problèmes méthodologiques ; et iv) de la multiplicité et de l'hétérogénéité des indicateurs de performance économique utilisés dans les différentes études (Bellon et Pervern, 2014).

Gains environnementaux par unité de surface

Des effets positifs sur l'environnement en ce qui concerne les sols, l'eau et les émissions de GES par unité de surface, mais des résultats mitigés pour les émissions de GES par unité produite

Sur le plan de la productivité des ressources, l'agriculture biologique fait mieux que l'agriculture conventionnelle. Par définition, l'agriculture biologique utilise peu de pesticides et d'éléments nutritifs (les cultures biologiques se révèlent souvent en déficit d'éléments nutritifs), et en raison de l'utilisation de compost, de résidus et d'effluents, elle présente aussi une productivité des ressources élevée pour ce qui est des déchets. Les pratiques biologiques améliorent les propriétés du sol (la matière organique laissée sur place permet à l'eau de s'infiltrer dans le sol et d'être retenue, c'est pourquoi les cultures biologiques donnent de meilleurs résultats que les systèmes conventionnels en période de sécheresse et de fortes pluies).

Fondamentalement, la manière dont l'agriculture biologique est pratiquée a un impact direct sur la conservation des sols et de l'eau, la biodiversité et le changement climatique. Du fait de l'absence d'engrais de synthèse, les producteurs en agriculture biologique sont attentifs aux conditions pédologiques, et les méthodes biologiques visent à augmenter la matière organique et le carbone organique du sol (COS) et à maintenir la bonne structure du sol. Ces objectifs supposent de pratiquer la rotation des cultures, de restituer de la matière organique au sol et de gérer les résidus, de maintenir une couverture du sol toute l'année par des cultures intercalaires, des cultures de couvert végétal et des plantes fourragères pérennes.

En principe, ce type de pratiques devrait diminuer l'érosion et améliorer la protection contre les inondations, augmenter la tolérance à la sécheresse, réduire l'acidification des sols du fait de l'absence d'émissions d'ammoniac, augmenter les niveaux de biodiversité (en particulier chez les organismes vivant dans le sol), et améliorer la fertilité du sol grâce à une gestion réfléchie des éléments nutritifs. Par définition, aucun pesticide chimique de synthèse n'est utilisé – ainsi, l'impact sur la contamination associée à l'usage de pesticides est positif. En ce qui concerne les éléments nutritifs, leur utilisation est réduite, dans l'ensemble, et les éléments nutritifs proviennent uniquement du fumier organique ; donc les eaux de ruissellement ont des concentrations en éléments nutritifs généralement moins élevées.

Enfin, les pratiques biologiques pourraient être considérées comme des stratégies d'atténuation du changement climatique et d'adaptation à ses effets. Leur potentiel d'atténuation vient de ce que les systèmes de production biologique n'utilisent pas d'engrais chimiques (ce qui diminue les émissions de CO₂ et de N₂O) et permettent d'augmenter les niveaux de COS. Leur potentiel d'adaptation tient au fait que les systèmes biologiques sont jugés mieux se comporter en cas de sécheresses, assurer la restauration des sols après des inondations, accroître la biodiversité et réduire la toxicité, et en même temps que la plupart des cultures biologiques sont des activités de production qui réduisent les risques et minimisent les coûts de production. De plus, l'agriculture biologique améliore la diversification et la résilience du système.

En revanche, l'agriculture biologique pourrait nécessiter des labours plus nombreux que si des herbicides étaient utilisés. Il a été avancé que, sur certains sols, les labours répétés tassaient les horizons profonds du sol et diminuaient les rendements ; l'eau ruisselle plus facilement sur les sols tassés, ce qui favorise à son tour l'érosion (New Scientist, 2002).

Comparer les émissions de GES de l'agriculture biologique et de l'agriculture conventionnelle est un exercice complexe et qui dépend des méthodes de mesure employées (par exemple de l'unité de mesure – émissions par unité de surface ou par unité de production alimentaire, de l'échelle de temps, et de la prise en compte ou non des changements d'affectation des sols causés par la modification des stratégies de production). Globalement, rien ne prouve que l'agriculture biologique émette systématiquement moins de GES, bien que ce soit assurément le cas de certaines pratiques biologiques (par exemple l'utilisation de légumineuses comme intrants azotés dans l'élevage pastoral), qui pourraient être plus largement appliquées dans d'autres systèmes de production.

Gomiero et al. (2011) ont réalisé une étude comparative des performances environnementales de l'agriculture biologique et de l'agriculture conventionnelle et ont conclu qu'en agriculture biologique, la perte de sol était fortement diminuée et que la teneur en matière organique du sol augmentait. Par ailleurs, les caractéristiques écologiques et biochimiques du sol s'avèrent aussi améliorées, et les sols gérés selon les méthodes de l'agriculture biologique présentent une capacité de rétention de l'eau bien supérieure à celle des sols gérés de manière conventionnelle, d'où des rendements beaucoup plus élevés en situation de pénurie d'eau. Les quantités de matière organique plus importantes et la pratique du travail minimum du sol que l'on trouve dans les systèmes biologiques augmenteraient la percolation de l'eau et la capacité de rétention d'eau du sol, réduisant les besoins d'irrigation. Ainsi, l'agriculture biologique amène des gains de productivité des ressources très élevés en ce qui concerne l'eau et les sols. Dans le cas de la qualité de l'eau, en particulier, plusieurs études montrent que le lessivage de l'azote peut être réduit dans une fourchette de 40 à 64 % par des pratiques d'agriculture biologique (Schader et al., 2012 ; Schader, 2009).

L'étude de 2014 de l'INRA, qui compare la performance environnementale de l'agriculture biologique par rapport à celle de l'agriculture conventionnelle à la fois au niveau mondial et en France, arrive aux conclusions suivantes : la performance environnementale est meilleure lorsque l'utilisation des ressources naturelles (énergie, eau et phosphore) est évaluée par unité de surface, tant pour les cultures que pour l'élevage, mais cet avantage de l'agriculture biologique décroît ou s'inverse même si elle est exprimée par unité produite ; la consommation d'énergie directe et indirecte est inférieure, en particulier pour les grandes cultures et l'élevage bovin, mais plus élevée pour la production de légumes et lorsque la durée d'engraissement des animaux augmente (ex. : porcs à l'engrais, volailles de table) ; moins de besoins d'irrigation et donc de consommation d'eau ; moins de consommation de phosphore, bien que cet avantage soit en partie compensé par le fait que, comme les sols cultivés en agriculture biologique ont une moindre teneur en phosphore, la nutrition phosphatée des sols pourrait devenir un facteur limitant de la production (Guyomard, 2014).

En ce qui concerne la qualité de l'eau, l'agriculture biologique entraîne généralement des taux de lessivage des nitrates inférieurs ou équivalents à ceux de l'agriculture conventionnelle. Néanmoins, l'enfouissement des cultures de légumineuses (une opération nécessaire dans les exploitations biologiques) et la décomposition du fumier peuvent conduire à un lessivage des nitrates dans les aquifères et les cours d'eau dans les mêmes proportions que dans les exploitations conventionnelles. Les effets sur l'environnement de l'emploi d'effluents d'élevage dans les systèmes biologiques dépendent de la manière dont ces effluents sont stockés, du moment où ils sont utilisés et de la façon dont ils sont épandus.

Les effets de l'agriculture biologique sur la consommation d'énergie peuvent être analysés en se basant sur différentes unités fonctionnelles comme la surface ou le poids des extrants agricoles. Dans Lampkin (2007), la plupart des évaluations de la consommation d'énergie par unité de surface ou de production en agriculture biologique à ce jour montrent une consommation d'énergie moindre à l'hectare. La consommation d'énergie (directe et indirecte) s'avère également inférieure en agriculture biologique en France, en particulier pour les grandes cultures et la filière laitière, mais supérieure pour l'horticulture (Bellon et Penvern, 2014).

Du point de vue de la productivité énergétique, Gomiero et al. (2008) estiment que l'agriculture biologique, comme d'autres pratiques agricoles à faible niveau d'intrants, entraîne une moindre

demande énergétique par rapport à l'agriculture intensive, et pourrait représenter un moyen d'améliorer les économies d'énergie et la réduction du CO₂ si elle était adoptée sur une échelle suffisamment large. Gomiero et al. (2011) décrit les utilisations de l'énergie dans différents contextes agricoles et conclut que l'agriculture biologique présente des niveaux d'efficacité énergétique (intrans/extrans) plus élevés mais, en moyenne, des rendements plus bas, donc une productivité inférieure.

Pimentel (2006) indique que, sur plusieurs plans, la consommation énergétique n'est pas sensiblement différente entre les exploitations biologiques et conventionnelles. Par exemple, les coûts énergétiques des camions qui acheminent les céréales vers les marchés aux États-Unis sont les mêmes au kilomètre ; la même quantité d'énergie est nécessaire pour produire et utiliser un tracteur ; les coûts énergétiques du pompage de l'eau d'irrigation sont identiques à l'hectare pour les deux types d'exploitations ; et l'énergie immobilisée dans les semences ou le bétail diffère peu entre exploitations biologiques et conventionnelles. En revanche, il existe des écarts importants dans la consommation énergétique des exploitations biologiques et conventionnelles, en particulier en ce qui concerne l'énergie nécessaire pour fabriquer, transporter et épandre les pesticides et les engrais azotés.

Schader (2009) a examiné les différences de consommation énergétique à l'hectare entre les exploitations biologiques et conventionnelles en Suisse, d'après un échantillon d'exploitations représentatif. Les fermes porcines et avicoles ainsi que les exploitations mixtes conventionnelles affichent la plus forte consommation énergétique (60 GJ/ha), alors que la consommation d'énergie moyenne, exprimée comme étant la somme de toutes les composantes de consommation énergétique des exploitations des catégories « élevage de vaches laitières », « élevage de vaches allaitantes », « autres cultures herbacées », « grandes cultures » et « cultures spécialisées », va de 20 à 30 GJ/ha. La consommation énergétique des exploitations biologiques est environ inférieure d'un tiers (10 à 20 GJ/ha), à l'exception des exploitations mixtes, où la consommation d'énergie moyenne est inférieure d'environ 50% à celle des exploitations conventionnelles. Schader (2009) attribue les moindres quantités d'achats d'aliments (en particulier d'aliments concentrés) aux taux de charge inférieurs, à l'interdiction des engrais azotés minéraux et à l'absence d'exploitations spécialisées dans l'élevage très intensif de porcins et de volailles.

Sur le plan de la productivité environnementale et des effets de l'agriculture biologique sur le changement climatique, les données observées – malgré des différences de méthodologie – semblent produire des résultats similaires. La FAO (2011) a réalisé une vaste étude de la littérature intégrant 45 publications scientifiques et 280 ensembles de données dans un seul et unique tableau de données. L'évaluation quantitative de cet ensemble de données apporte des preuves scientifiques claires sur les teneurs supérieures en COS rencontrées dans les sols en agriculture biologique. Ce résultat concorde avec ceux de Leifeld et Fuhrer (2010) et de Gattinger (2012).

Lynch, MacRae et Martin (2011) ont analysé environ 130 études afin d'établir une comparaison de la consommation énergétique des exploitations agricoles et du potentiel de réchauffement global des secteurs de production biologique et conventionnel. Ils concluent que :

« les données sont clairement en faveur de l'agriculture biologique pour ce qui est de la consommation énergétique et de l'efficacité énergétique des exploitations, tant à l'hectare que par unité produite, peut-être à l'exception des secteurs avicole et fruitier. Concernant le potentiel de réchauffement global, les données sont insuffisantes, en dehors de quelques secteurs, avec des résultats à l'hectare plus systématiquement favorables à l'agriculture biologique que les résultats par unité produite. La contribution du travail du sol à la consommation énergétique des exploitations s'est invariablement révélée négligeable, et les interventions supplémentaires de préparation du sol réalisées dans les exploitations biologiques ne semblent pas entraîner de diminution sensible du carbone du sol. Les compensations énergétiques, le biogaz, les cultures énergétiques et les résidus jouent un rôle plus limité dans les exploitations biologiques que dans les exploitations conventionnelles, parce que la matière organique du sol est utilisée comme source

d'éléments nutritifs et comme élément structurant du sol, et que la demande de produits biologiques est forte sur les marchés de l'alimentation humaine »

(Lynch, MacRae et Martin, 2011).

La FAO (2011) fait référence à des études n'ayant pas montré de nette différence entre les émissions de GES des systèmes biologiques et conventionnels, mais ces études ne prenaient pas en compte les modifications du carbone du sol, lesquelles peuvent avoir impact important, en particulier sur les produits végétaux. Au contraire, dans une méta-analyse de 19 études contenant 101 comparaisons, Gattinger (2012) constate que les émissions de N₂O sont sensiblement moindres en agriculture biologique, et qu'elles sont plus intenses pour les terres labourables. Par ailleurs, la méta-analyse de Gattinger (2012) sur sept études comprenant 27 comparaisons, dans lesquelles sont évaluées les émissions par unité de poids de production végétale, constate que les émissions d'hémioxyde d'azote par kilo de récolte sont supérieures en agriculture biologique qu'en agriculture conventionnelle, en raison de rendements inférieurs en moyenne de 26 % en agriculture biologique.

Scialabba et Lindenlauf (2010) examinent également le potentiel d'atténuation et d'adaptation des systèmes agricoles biologiques d'après trois grandes caractéristiques : l'organisation du système de production, la conduite des terres cultivées et la conduite des pâturages et du bétail. Ils concluent que les systèmes biologiques recèlent un important potentiel de contribution à l'atténuation du changement climatique grâce à la gestion réfléchie des éléments nutritifs et à la réduction des émissions de N₂O du sol.

La séquestration du carbone dans les sols pourrait représenter pour l'agriculture biologique un autre potentiel important d'atténuation. Selon une première estimation, la réduction potentielle d'émissions due à l'absence d'utilisation d'engrais minéraux serait d'environ 20 %, et la compensation potentielle par la séquestration du carbone d'environ 40 à 72 % des actuelles émissions mondiales de GES imputables à l'agriculture ; toutefois, comme l'indiquent les auteurs, des études complémentaires sont nécessaires pour confirmer ces chiffres.

La préservation de la biodiversité est un avantage environnemental essentiel de l'agriculture biologique

Concernant la contribution à la biodiversité et la fourniture de biens publics, de très nombreuses études montrent un bilan plus positif pour les exploitations biologiques, que les conventionnelles, même si la littérature met aussi en évidence des résultats très variés en fonction des indicateurs de biodiversité, des groupes d'arthropodes et des agro-écosystèmes étudiés (Bellon et Penvern, 2014). On trouve une plus grande abondance d'arthropodes (insectes tels que mites, araignées, mille-pattes, diplopodes) dans les systèmes de production biologique. Cette situation est liée à l'absence de pesticides chimiques, à la plus faible densité culturale et à la quantité plus importante d'adventices, qui constituent une source de nourriture. Le degré plus élevé d'activité microbiologique et la plus grande abondance d'arthropodes et d'adventices attirent d'autres faunes sauvages situées plus haut dans la chaîne alimentaire, comme les oiseaux, bien que le désherbage mécanique plus fréquent dans les exploitations biologiques puisse être préjudiciable aux oiseaux nichant à terre, aux vers de terre et aux invertébrés. Les données existantes semblent montrer aussi que les systèmes biologiques sont plus propices à la biodiversité florale et faunique. Par le jeu de la rotation des cultures, l'agriculture biologique peut favoriser la diversité des paysages, qui génère à son tour une diversité d'habitats profitant aux populations sauvages locales. Cependant, l'impact réel des systèmes biologiques sur le paysage est très difficile à quantifier.

Schader et al. (2012) concluent que l'impact de l'agriculture biologique sur la biodiversité fait partie des effets les plus étudiés et qu'il constitue l'un des avantages incontestables de l'agriculture biologique du point de vue de l'environnement. Ils s'appuient sur différentes méta-analyses qui montrent des différences claires entre les systèmes de production biologiques et conventionnels (Bengtsson et al., 2005 ; Fuller et al., 2005 ; Hole et al., 2005). Bien que ces différences varient d'un groupe taxonomique à l'autre, elles se révèlent importantes pour chaque groupe d'espèces, avec en moyenne une diversité d'espèces environ 50 % plus grande dans les exploitations biologiques.

Crowder et al. (2010) indiquent que la fonction écosystémique se dégrade lorsque l'on diminue le nombre d'espèces (ce que les auteurs appellent la « richesse ») et que l'on fausse l'abondance relative des espèces (« équitabilité »). Les effets écologiques d'une perturbation de l'équitabilité n'ont pas fait l'objet d'une grande attention, tandis que les mesures de conservation portent souvent sur le rétablissement ou le maintien du nombre d'espèces, les effets de la richesse sur de nombreux processus écologiques étant bien connus. Les auteurs considèrent que les méthodes de l'agriculture biologique atténuent ces dommages écologiques en favorisant l'« équitabilité ».

De plus, les effets de l'équitabilité entre groupes ennemis naturels sont jugés indépendants et complémentaires. Leurs résultats « renforcent l'argument selon lequel le rétablissement de la fonction écosystémique nécessite de restaurer l'équitabilité des espèces, et non pas uniquement la richesse. L'agriculture biologique pourrait permettre aux écosystèmes de retrouver une équitabilité fonctionnelle ». Même sur le plan de la diversité des paysages et des habitats, l'agriculture biologique peut donner de meilleurs résultats du fait d'une rotation des cultures plus variée et de l'implantation plus fréquente d'éléments structurels tels que des haies et des arbres fruitiers. Néanmoins, les effets sur le paysage dépendent de chaque exploitation et de chaque site (Norton et al., 2009).

Gomiero et al. (2011) constatent aussi que les systèmes de production biologiques favorisent en général une plus grande biodiversité florale et faunique que les systèmes conventionnels, bien que ces derniers puissent aussi améliorer la biodiversité lorsqu'ils sont bien conduits. Mais surtout, ils estiment que les paysages entourant les terres en agriculture conventionnelle s'avèrent capables aussi d'améliorer la biodiversité dans les zones agricoles. Pour Sandhu et al. (2010), l'agriculture biologique joue un rôle vital dans la fourniture de services écosystémiques comme la lutte biologique, la pollinisation, la formation des sols et le cycle des éléments nutritifs dans l'agriculture – qui sont importants pour pouvoir continuer à produire de la nourriture et des fibres.

L'agriculture biologique est-elle une source d'innovation ?

En ce qui concerne la capacité de l'agriculture biologique à stimuler l'innovation – un élément qui compte beaucoup dans les processus de croissance verte, certains observateurs estiment que l'agriculture biologique est une innovation en soi (Padel, 2001). Selon des études récentes pourtant, la technologie est peu présente dans les exploitations biologiques sous la forme de produits, et les principales innovations pouvant apporter un avantage comparatif ou accroître la productivité du travail touchent aux processus, à l'organisation et à la commercialisation (Tereso et al., 2012).

De plus, l'agriculture biologique peut stimuler l'innovation dans de nombreux domaines de la science et de la technique et innover pour surmonter les problèmes qu'elle rencontre. Par exemple, la sélection végétale doit produire des variétés offrant une bonne efficacité d'assimilation et d'utilisation des éléments nutritifs (Wolfe, et al. 2008). Des innovations pourraient aussi être suscitées dans l'industrie chimique pour répondre au besoin de moyens biologiques de lutte contre les ravageurs et de biopesticides et d'autres substances autorisées en agriculture biologique.

Dans la filière biologique, il est habituel que les agriculteurs et les autres praticiens participent aux processus d'innovation, c'est pourquoi les innovations sont souvent mieux adaptées aux conditions locales et peuvent être introduites plus facilement par les praticiens.

D'un autre côté, conformément au principe de « précaution » énoncé par l'IFOAM pour l'agriculture biologique, plusieurs nouvelles technologies sont exclues, notamment les innovations et techniques modernes de sélection et de multiplication dans le domaine des sciences moléculaires. Ces interdictions sont justifiées par la prudence qui s'impose dès lors qu'il existe des risques potentiels graves pour la santé humaine, l'environnement et la société. Le fait d'exclure ce type de techniques a toutefois comme effet positif d'encourager la filière biologique à élaborer des solutions de remplacement novatrices (ETP, 2015).

L'agriculture biologique crée des emplois

L'agriculture biologique est plus consommatrice de main-d'œuvre que les pratiques de production conventionnelles

S'il existe très peu d'études évaluant l'impact des pratiques de conservation des sols et de l'eau sur l'emploi, le sujet est davantage traité dans le cas de l'agriculture biologique. Deux faits peuvent expliquer cette situation. Tout d'abord, les systèmes de production à faible consommation d'intrants, dont l'agriculture biologique, visent à utiliser de manière durable les éléments nutritifs, à conserver les sols et à optimiser la consommation d'eau. Deuxièmement, l'agriculture biologique, en particulier dans le monde développé, a toujours été perçue comme une solution compétitive de diversification des activités agricoles et non agricoles (ces dernières par le biais des liens avec le reste de l'économie) et comme une réponse à la demande des consommateurs pour des produits alimentaires sans danger et de bonne qualité.

De nombreuses études ont montré que les besoins de main-d'œuvre à l'hectare étaient plus élevés dans les exploitations en agriculture biologique que dans leurs homologues conventionnelles (notamment Hird, 1997 ; Jansen, 2000 ; Lataccz-Lohmann et Renwick, 2002) dans la mesure où les premières ont davantage d'activités de production à forte intensité de main-d'œuvre (systèmes de rotation complexes, agriculture mixte...), présentent un pourcentage plus élevé de cultures à forte intensité de main-d'œuvre (fruits et légumes par exemple), sont moins mécanisées, englobent plus d'activités de transformation et de vente à la ferme, et ont des besoins d'information plus importants (Morison et al., 2005).

Il a été dit toutefois que les besoins de main-d'œuvre en agriculture biologique variaient selon les secteurs et les pays. Par exemple, ils sont infiniment plus grands dans les exploitations horticoles biologiques, tandis que les exploitations céréales/élevage et les fermes laitières n'ont pas forcément besoin de plus de main-d'œuvre en agriculture biologique qu'en agriculture conventionnelle.

Offerman et Nieberg (2000) ont passé en revue plus d'une quarantaine d'études européennes publiées entre 1990 et 1997, pour constater que la consommation de main-d'œuvre à l'hectare était en moyenne 10 à 20 % supérieure dans les exploitations biologiques, même s'il existait des variations considérables d'un pays à l'autre. Häring et al. (2001) estiment que, malgré le fait que l'agriculture biologique nécessite davantage de main-d'œuvre que l'agriculture conventionnelle, cela n'avait pas eu d'effets sensibles sur l'emploi rural en Europe en raison de sa dimension relativement faible. Greer et al. (2008) montrent qu'en Nouvelle-Zélande, les producteurs de kiwi en agriculture biologique ont des besoins de main-d'œuvre plus élevés qu'en agriculture conventionnelle, tandis que Clavin et Moran (2011) constatent que les besoins de main-d'œuvre des exploitations bovines biologiques en Irlande sont supérieurs de 15 % à ceux des fermes bovines conventionnelles.

Les effets positifs sur l'emploi associés à l'agriculture biologique sont également décrits par Jacobsen (2003), qui utilise un modèle d'équilibre général calculable pour évaluer l'impact de deux scénarios alternatifs (une subvention aux exploitants en agriculture biologique et l'utilisation de taxes prélevées sur les engrais et les pesticides) au Danemark. D'après ses estimations, le développement de la production biologique est corrélé à d'importants effets positifs en matière d'emploi, tant dans le secteur primaire que dans celui de l'agro-alimentaire. Toutefois, seul le scénario des taxes entraîne une augmentation nette de l'emploi du total du secteur agroalimentaire (conventionnel et biologique).

Une enquête menée auprès de 1 144 exploitations biologiques au Royaume-Uni et en Irlande a fait ressortir des intensités de main-d'œuvre supérieures par exploitation biologique (à savoir de 97 % et 27 %, respectivement) par rapport à des exploitations conventionnelles, malgré le fait que les comparaisons aient été compliquées par un ensemble de facteurs, dont la taille différente des exploitations, les différences de plantes cultivées, l'horticulture et l'élevage, et l'inclusion d'activités de vente à la ferme dans le cas des exploitations biologiques (Morison et al., 2005). L'étude conclut que si

20 % du total des exploitations passaient en agriculture biologique, le nombre d'emplois dans l'agriculture progresserait de 19 % au Royaume-Uni, et de 6 % en Irlande.

Comme l'indique l'étude de Herren et al. (2012), les mêmes données ont été analysées par la UK Soil Association (2006), qui a conclu qu'après pondération, les besoins de main-d'œuvre dans les exploitations biologiques étaient en moyenne supérieurs de 32 % à ceux des exploitations non biologiques comparables (Green et Maynard, 2006). Une autre étude (Lobley et al., 2005) portant sur 302 exploitations biologiques et 353 exploitations non biologiques dans trois régions de l'Angleterre a confirmé que les premières procuraient plus d'emplois que les secondes (64 % d'emplois en plus par exploitation ; 39 % d'emplois en plus à l'hectare). Cette même étude a révélé que les exploitations biologiques avaient davantage recours à de la main-d'œuvre non familiale (avec une moyenne de quatre employés par exploitation, contre 2.3 dans le secteur conventionnel) et que les exploitations biologiques étaient plus susceptibles de diversifier leurs activités (commerce et transformation principalement) par rapport à leurs homologues non biologiques.

Mon et Holland (2005) se sont intéressés aux répercussions de la production biologique de pommes sur l'ensemble de l'économie de l'État de Washington (États-Unis) au moyen d'une analyse entrées-sorties. Les auteurs ont comparé l'impact économique de la production de pommes biologique et conventionnelle, et ont conclu que la composante de main-d'œuvre était plus importante en production de pommes biologique qu'en production conventionnelle, et que la rentabilité du travail et du capital était plus élevée dans les exploitations biologiques.

Lobley et al. (2009) indiquent que, malgré la contribution relativement modeste du secteur à la production alimentaire, les exploitations biologiques du Royaume-Uni étaient plus susceptibles de diversifier leurs activités et d'adopter des modes de commercialisation novateurs, générant davantage d'emplois locaux, tant sur l'exploitation qu'à l'extérieur. La même étude a mis en évidence des petits producteurs en agriculture biologique ciblant les marchés locaux qui ont recours à un plus large éventail de circuits de commercialisation par rapport à ceux privilégiant les marchés national et/ou régionaux. Leur analyse entrées-sorties a cependant révélé que, malgré la capacité des petites exploitations biologiques à produire des effets importants en matière d'emploi dans l'ensemble de l'économie locale, ce sont les grandes exploitations qui constituent la principale source d'emplois et de revenus dans la filière biologique.

Dans le même type de contexte, l'Organic Farming Research Foundation (2012) constate que la production et la fabrication de produits biologiques aux États-Unis créent 21 % d'emplois de plus que les activités équivalentes non biologiques, en raison des besoins de main-d'œuvre plus importants, de la plus petite taille des exploitations biologiques, et du recours à des organismes de certification biologique. De façon similaire, une étude réalisée dans l'État du Maine a conclu que l'agriculture biologique (en particulier la production de fruits et de légumes) créait davantage d'emplois (8 %) par exploitation et vendait plus localement que l'agriculture conventionnelle (Maine Organic Farmers and Gardeners Association, 2010). Ces emplois avaient en moyenne plus de probabilités d'être occupés par des personnes plus jeunes et par des femmes que dans les exploitations conventionnelles.

Selon certains auteurs, les besoins de main-d'œuvre en agriculture biologique dépendent des caractéristiques des pays et des secteurs. En Australie, Wynen (1994) a constaté que, tant dans les exploitations céréales/élevage que dans les exploitations laitières, ces besoins différaient peu entre celles qui utilisaient les méthodes de l'agriculture biologique et les autres. Offermann et Nieberg (2000) et Lobley et al. (2009) ont montré que les exploitations horticoles biologiques avaient besoin de beaucoup plus de main-d'œuvre, mais Wynen (2002 ; 2001) a conclu qu'en Australie, les exploitations céréales/élevage et les exploitations laitières fonctionnant en agriculture biologique ne nécessitaient pas plus de main-d'œuvre que leurs homologues conventionnelles, tandis que Tzouvelekas et al. (2001) ont montré que les oliveraies biologiques en Grèce demandaient moins de main-d'œuvre que les oliveraies conventionnelles.

Toutefois, si une demande de main-d'œuvre plus importante peut être perçue de façon positive dans les régions à fort taux de chômage, ailleurs, le manque d'ouvriers agricoles peut constituer un frein

au développement de l'agriculture biologique. L'importance des caractéristiques du pays et du secteur sont confirmées par Tyburski (2003), pour qui le fait que les exploitations biologiques en Pologne soient en moyenne trois fois plus grandes que les exploitations conventionnelles soulève des doutes quant à la capacité de l'agriculture biologique à générer des emplois dans ce pays.

Notes

1. Par exemple, aux États-Unis, l'utilisation d'antibiotiques n'est pas autorisée pour le bétail dont les produits sont commercialisés en tant que produits biologiques certifiés.
2. Ces principes prévoient notamment « de prendre en compte l'ensemble de l'impact social et écologique... ; de transformer les produits biologiques en utilisant des ressources renouvelables ; d'aller vers une chaîne de production, de transformation et de distribution qui soit socialement juste et écologiquement responsable ». (www.ifoam.org/partners/advocacy/Cop15/IFOAM-CC-Guide-Web-1.pdf)
3. Pour avoir un aperçu des objectifs quantitatifs énoncés dans les plans d'action des pays membres de l'UE, voir www.orgap.org/org-library.html
4. Les normes stipulent qu'aucune substance interdite ne doit être épandue sur les terres pendant au moins trois ans avant la récolte d'une culture biologique ; l'utilisation du génie génétique, des radiations ionisantes et des boues d'épuration n'est pas autorisée ; et la fertilité des sols et les éléments nutritifs doivent être gérés par des pratiques culturales et de travail du sol, des rotations des cultures et des cultures de couverture, complétées par l'épandage de déjections animales et de déchets végétaux ainsi que de matières synthétiques figurant dans la liste nationale des substances autorisées. L'emploi de semences et d'autres matériels de reproduction biologiques est privilégié. La lutte contre les ravageurs, les adventices et les maladies doit se faire essentiellement par des pratiques de conduite, comprenant des moyens physiques, mécaniques et biologiques. Lorsque ces pratiques ne suffisent pas, une substance biologique, botanique ou synthétique figurant sur la liste nationale de substances autorisées peut être utilisée (voir www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/Guide%20for%20Organic%20Crop%20Producers_0.pdf; blogs.usda.gov/2012/03/22/organic-101-what-the-usda-organic-label-means/; www.ams.usda.gov/grades-standards/organic-standards).
5. Berry et al. (2002) fournissent des éléments qui confortent cet argument.
6. Uematsu et Mishra (2012) ont analysé les données de l'enquête 2008 sur la gestion des ressources agricoles élaborée par l'Economic Research Service et le National Agricultural Statistical Service, qui couvre environ 2 600 exploitations. Ils ont constaté que, bien que le revenu monétaire brut moyen des exploitations biologiques certifiées soit approximativement supérieur de 1 million USD à celui des exploitations conventionnelles, les exploitations biologiques supportent des coûts de production sensiblement plus élevés. En moyenne, les exploitations biologiques dépensent entre 310 000 USD et 361 000 USD de plus en main-d'œuvre, dont entre 230 000 USD et 300 000 USD pour rémunérer des ouvriers agricoles.

Bibliographie

- Bellon, S. et S. Penvern (dir. pub.) (2014), *Organic Farming, Prototype for Sustainable Agricultures*, Springer.
- Bengtsson, J., J. Ahnström et A.C. Weibull (2005), « The effects of organic agriculture on biodiversity and abundance: A meta-analysis », *Journal of Applied Ecology*, vol. 42.
- Berry, P., R. Sylvester-Bradley, L. Philipps, D.J. Hatch, S.P. Cuttle, F.W. Rayns et P. Gosling (2002), « Is the productivity of organic farms restricted by the supply of available nitrogen? », *Soil Use and Management*, vol. 18, supplément 1.
- Cavigelli, M., S. Mirsky, J. Teasdale, J. Spargo et J. Doran (2013), « Organic grain cropping systems to enhance ecosystem services », *Renewable Agriculture and Food Systems*, vol. 28.
- Chavas, J.-P., J.L. Posner et J.L. Hedtcke (2009), « Organic and conventional production systems in the Wisconsin integrated cropping systems, Trial: II. Economic and risk analysis 1993-2006 », *Agronomy Journal*, vol. 101, n° 2.
- Cisilino, F. et F. Madau (2007), « Organic and conventional farming: A comparison analysis through the Italian FADN », in the proceedings of the Mediterranean Conference of Agro-Food Social Scientists, 103rd EAAE Seminar, « Adding Value to the Agro-Food Supply Chain in the Future Euro-Mediterranean Space », Barcelone, 23-25 avril.
- Clark, S. (2009), « The profitability of transitioning to organic grain crops in Indiana », *American Journal of Agricultural Economics*, vol. 91, n° 5.
- Clavin, D. et B. Moran (2011), « Financial performance of organic cattle farming », Teagasc National Organic Conference, Limerick Junction, Co. Tipperary, Irlande, 14 septembre 2011.
- Commission européenne (CE) (2013), « Organic versus conventional farming, which performs better financially? », *Farm Economics Brief*, n° 4, novembre, Bruxelles.
- Crowder, D.W., T.D. Northfield, M.R. Strand et W.E. Snyder (2010), « Organic agriculture promotes evenness and natural pest control », *Nature*, vol. 466.
- De Ponti, T., B. Rijk et M. Van Ittersum (2012), « The crop yield gap between organic and conventional agriculture », *Agricultural Systems*, vol. 108.
- Delbridge, T.A., C. Fernholz, R. King et W. Lazarus (2013), « A whole-farm profitability analysis of organic and conventional cropping systems », *Agricultural Systems*, vol. 122.
- Department for Environment, Food and Rural Affairs (Defra) (2002), *Economic Evaluation of the Organic Farming Scheme*, rapport établi par le Centre for Rural Economics Research, Department of Land Economy, University of Cambridge.
- Dimitri, C. et L. Oberholzter (2005), *Market-led versus Government-facilitated Growth: Development of the U.S. and E.U. Organic Agricultural Sectors*, U.S. Department of Agriculture (USDA), Washington, D.C., WRS 05-05, www.ers.usda.gov.
- Escalante, C. (2006), « Good growing: Why organic farming works », *American Journal of Agricultural Economics*, Book Reviews section, vol. 88, n° 3.
- European Technology Platform (ETP) Organics (2015), Strategic Research and Innovation Agenda, www.tporganics.eu/index.php/home.html.

- Fuller, R.J., L.R. Norton, R.E. Feber, P.J. Johnson, D.E. Chamberlain, A.C. Joys, F. Mathews, R.C. Stuart, M.C. Townsend, W.J. Manley, M.S. Wolfe, D.W. Macdonald et L.G. Firbank (2005), « Benefits of organic farming to biodiversity vary among taxa », *Biology Letters*, vol. 1.
- Gattinger, A. (2012), « The potential of organic farming practices for meeting the climate challenge in different regions of Europe – Mitigation and adaptation », communication présentée à la conférence de la Fédération internationale des mouvements d'agriculture biologique (IFOAM), « Organic Days in Cyprus », Larnaka, 26 septembre, <http://organicdays.eu/material/proceedings/>.
- Gomiero, T., D. Pimentel et M.G. Paoletti (2011), « Environmental impact of different agricultural management practices: Conventional vs. organic agriculture », *Critical Reviews in Plant Sciences*, vol. 30, n° 1-2.
- Gomiero, T., M.G. Paoletti et D. Pimental (2008), « Energy and Environmental Issues in Organic and Conventional Agriculture », *Critical Reviews in Plant Sciences*, vol. 27, n° 4, pp. 239-54.
- Green, M. and R. Maynard (2006), « Organic works: Providing more jobs through organic farming and local food supply », Soil Association, Bristol, www.soilassociation.org/LinkClick.aspx?fileticket=60CVIT1Nw0U%3D&tabid=387.
- Greene, C. et R. Ebel (2012), « Organic Farming Systems », in C. Osteen, J. Gottlieb and U. Vasavada (dir. pub.), « Agricultural resources and environmental indicators, 2012 edition », USDA, ERS, *Economic Information Bulletin*, n° 98.
- Greene, C., C. Dimitri, B.W. Lin, W. McBride, L. Oberholtzer et T. Smith (2009), « Emerging issues in the U.S. organic industry », USDA, Economic Research Service (ERS), *Economic Information Bulletin*, n°55, www.ers.usda.gov/publications/eib-economic-information-bulletin/eib55.aspx#.UkFnj89XEM.
- Greer, G., W. Kaye-Blake, E. Zellman et C. Parsonson-Ensor (2008), « Comparison of the financial performance of organic and conventional farms », *Journal of Organic Systems*, vol. 3.
- Guyomard, H. (2014), « Conclusion générale: Synthèse et recommandations », dans S. Bellon et S. Penvern (dir. pub.), *Organic Farming, Prototype for Sustainable Agricultures*, Springer.
- Halpin, D., C. Daugbjerg et Y. Schvartzman (2011), « Interest-group capacities and infant industry development: State-sponsored growth in organic farming », *International Political Science Review*, vol. 32, <http://doi:10.1177/0192512110372435>.
- Hanson, J., E. Lichtenberg et S. Peters (1997), « Organic versus conventional grain production in the mid-atlantic: an economic and farming system overview », *American Journal of Alternative Agriculture*, vol. 12, n° 1.
- Häring, A., S. Dabbert, F. Offermann et H. Nieberg (2001), « Benefits of organic farming for society », paper presented to the European Conference, « Organic Food and Farming », 10-11 mai, Copenhague.
- Herren, H.R., A.M. Bassi, Z. Tan et W.P. Binns (2012), *Green Jobs for a Revitalized Food and Agriculture Sector*, Département de la gestion des ressources naturelles et de l'environnement, FAO, Rome, www.fao.org/fileadmin/user_upload/sustainability/pdf/FAO_green_jobs_paper_March_31.pdf.
- Hird, V. (1997), *Double Yield: Jobs and Sustainable Food Production*, Safe Alliance, Londres.
- Hole, D.G., A.J. Perkins, J.D. Wilson, I.H. Alexander, P.V. Grice et A.D. Evans (2005), « Does organic farming benefit biodiversity? », *Biological Conservation*, vol. 122.
- Jacobsen, L.B. (2003), « Do support payments for organic farming achieve environmental goals efficiently? », in *Organic Agriculture: Sustainability, Markets and Policy*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264101517-en>.
- Jaeck, M., R. Lifran et H. Stahn (2013), « Emergence of organic farming under imperfect competition: economic conditions and incentives », *Working Paper*, n° 39, Aix-Marseille School of Economics, http://halshs.archives-ouvertes.fr/docs/00/79/36/71/PDF/WP_2012_-_Nr_39.pdf.

- Jansen, K. (2000), « Labour, livelihoods and the quality of life in organic agriculture in Europe », *Biological Agriculture and Horticulture*, vol. 17.
- Kirchhof, G. et I. Daniels (2009), « Changing tillage management practices and their impact on soil structural properties in north-western New South Wales, Australia », *ACIAR Technical Reports Series*, n° 71.
- Klepper, R., W. Lockeretz, B. Commoner, M. Gertler, S. Fast, D. O’Leary et R. Blobaum (1977), « Economic performance and energy intensiveness on organic and conventional farms in the Corn Belt: A preliminary comparison », *American Journal of Agricultural Economics*, vol. 59, n° 1.
- Kuminoff, N. et A. Wossink (2010), « Why isn’t more U.S. farmland organic? », *Journal of Agricultural Economics*, vol. 61.
- Lampkin, N.H. (2007), « Organic farming’s contribution to climate change and agricultural sustainability », communication présentée à la Welsh Organic Producers’ Conference, 18 octobre.
- Lampkin, N., C. Gerrard et S. Moakes (2014), *Long Term Trends in the Financial Performance of Organic Farms, England & Wales, 2006/07–2011/12*, Report 1/2014, rapport commandé par la Soil Association, Organic Research Centre, Newbury, Royaume-Uni.
- Lampkin, N. et S. Padel (1994), *The Economics of Organic Agriculture – An International Perspective*, Wallingford, CAB International.
- Latacz-Lohmann, U. et A. Renwick (2002), « An economic evaluation of the organic farming scheme », dans J. Powell (dir. pub.), *UK Organic Research 2002: Proceedings COR Conference*, 26-28 mars, Aberystwyth.
- Leifeld, J. et J. Fuhrer (2010), « Organic farming and soil carbon sequestration: What do we really know about the benefits? », *Ambio*, vol. 39, n° 8.
- Lobley, M., A. Butler, P. Courtney, B. Ilbery, J. Kirwan, J. Maye, C. Potter et M. Winter (2009), « Analysis of socio-economic aspects of local and national organic farming markets », Centre for Rural Policy Research (CRPR) *Research Report*, n°29, Rapport final au Department for Environment, Food and Rural Affairs, University of Exeter.
- Lobley, M., M. Reed et A. Butler (2005), « The impact of organic farming on the rural economy in England », Rapport final au Defra, University of Exeter.
- Lynch, D., R. MacRae and R. Martin (2011), « The carbon and global warming potential impacts of organic farming: Does it have a significant role in an energy constrained world? », *Sustainability*, vol. 3, <http://doi:10.3390/su3020322>.
- Madau, F. (2007), « Technical efficiency in organic and conventional farming: Evidence from Italian cereal farms », *Agricultural Economics Review*, vol. 8, n° 1.
- Madignier, M., B. Parent et P. Quevremont (2012), *Sur le bilan du plan de développement de l’agriculture biologique 2008-2012*, Ministère de l’agriculture, de l’agro-alimentaire et de la forêt, http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/2012-M084-01_Agriculture_bio_cle8f3f53.pdf.
- Maine Organic Farmers’ and Gardeners’ Association (2010), *Maine’s Organic Farms – An Impact Report*, Unity, Maine.
- Martini, E., J. Buyer, D. Bryant, T. Hartz et D. Ford (2004), « Yield increases during the organic transition: Improving soil quality or increasing experience? », *Field Crops Research*, vol. 86, n° 2.
- Mayen C., J. Balagtas et C. Alexander (2010), « Technology adoption and technical efficiency: Organic and conventional dairy farms in the United States », *American Journal of Agricultural Economics*, vol. 92, n° 1.
- McBride W., C. Greene, L. Foreman et M. Ali (2015), *The Profit Potential of Certified Organic Field Crop Production*, ERR-188, USDA, ERS, www.ers.usda.gov/media/1875181/err188.pdf.

- McBride, W. et C. Greene (2009), « The profitability of organic soybean production », *Renewable Agriculture and Food Systems*, vol. 24.
- Mon, P.N. et D.W. Holland (2005), « Organic apple production in Washington State: An input-output analysis », *Working Paper*, Series 2005-3, School of Economic Sciences, Washington State University.
- Morison, J., R. Hine et J. Pretty (2005), « Survey and analysis of labour on organic farms in the UK and Republic of Ireland », *International Journal of Agricultural Sustainability*, vol. 3, n° 1.
- New Scientist (2002), « 20-year study backs organic farming », 30 May
www.newscientist.com/article/dn2351-20-year-study-backs-organic-farming/
- Norton, L., P. Johnson, A. Joys, R. Stuart, D. Chamberlain, R. Feber, L. Firbank, W. Manley, M. Wolfe et B. Hart (2009), « Consequences of organic and non-organic farming practices for field, farm and landscape complexity », *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 129, n° 1-3.
- OCDE (2015), « Synergies between private standards and public regulations », TAD/TC/CA/WP(2014)3/FINAL.
- OCDE (2003), *Organic Agriculture: Sustainability, Markets and Policies*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264101517-en>
- Oehl, F., A. Oberson, H.U. Tagmann, J.M. Besson, D. Dubois, P. Mäder, H.-R. Roth et E. Frossard (2002), « Phosphorus budget and phosphorus availability in soils under organic and conventional farming », *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, vol. 62, n° 1.
- Offermann, F. et H. Nieberg (2000), « Economic performance of organic farms in Europe » in *Organic Farming in Europe: Economics and Policy*, vol. 5, University of Hohenheim, Stuttgart.
- Organic Farming Research Foundation (2012), *Organic Farming for Health and Prosperity*, August.
- Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) (2011), « Organic agriculture and climate change mitigation: A report of the Round Table on Organic Agriculture and Climate Change », Département de la gestion des ressources naturelles et de l'environnement, FAO, Rome, www.fao.org/docrep/015/i2537e/i2537e00.pdf.
- Oude, L., A. Pietola et S. Bäckman (2002), « Efficiency and productivity of conventional and organic farms in Finland 1994-1997 », *European Review of Agricultural Economics*, vol. 29, n° 1.
- Padel, S. (2001), « Conversion to organic farming: A typical example of the diffusion of an innovation? », *Sociologia Ruralis*, vol. 41.
- Pimentel, D. (2006), *Impacts of Organic Farming on the Efficiency of Energy Use in Agriculture*, The Organic Center, www.organicvalley.coop/fileadmin/pdf/ENERGY_SSR.pdf.
- Pimentel, D., P. Hepperly, J. Hanson, D. Doubs et R. Seidel (2005), « Environmental, energetic, and economic comparisons of organic and conventional farming systems », *BioScience*, vol. 55.
- Ponisio, L., L. M'Gonigle, K. Mace, J. Palomino, P. de Valpine et C. Kremen (2015), « Diversification practices reduce organic to conventional yield gap », *Proceedings of the Royal Society*, vol. 282, n° 1799, <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2014.1396>.
- Research Institute of Organic Agriculture (FiBL) and the International Federation of Organic Agriculture Movements (IFOAM) (FiBL/IFOAM) (2015), *The World of Organic Agriculture 2015*, www.organic-world.net/yearbook-2015.html.
- Sanders, J., M. Stolze et S. Padel (2011), *Use and Efficiency of Public Support Measures addressing Organic Farming*, Institute of Farm Economics, Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI), Braunschweig, Allemagne, http://ec.europa.eu/agriculture/external-studies/2012/organic-farming-support/full_text_en.pdf.
- Sandhu, H.S., S.D. Wratten et R. Cullen (2010), « Organic agriculture and ecosystem services », *Environmental Science & Policy*, vol. 13, n° 1.

- Schader, C. (2009), *Cost-effectiveness of organic farming for achieving environmental policy targets in Switzerland*, FiBL, Frick, and Aberystwyth University, www.fibl.org/fileadmin/documents/shop/1539-cost-effectiveness-of-organic-farming.pdf.
- Schader, C., M. Stolze et A. Gattinger (2012), « Environmental performance of organic farming », in J.I. Boye and Y. Arcand (dir. pub.), *Green Technologies in Food Production and Processing*, pp. 183-210, Food Engineering Series, Springer, New York.
- Scialabba, N. et M. Lindenlauf (2010), « Organic agriculture and climate change », *Renewable Agriculture and Food Systems*, vol. 25, n° 2.
- Seufert, V., N. Ramankutty et J. Foley (2012), « Comparing the yields of organic and conventional agriculture », *Nature*, vol. 485.
- Tereso, M.J.A., R.F. Abrahão, S.F.B. Gemma, U.B. Montedo, N.L. Menegon, J.E. Guarneti et I.A.V. Ribeiro (2012), « Work and technological innovation in organic agriculture », *Work*, vol. 41, <http://doi:10.3233/WOR-2012-0041-4975>.
- Tyburski, J. (2003), « Organic farming in Poland: Past, present and future perspectives », in *Organic Agriculture: Sustainability, Markets and Policy*, Éditions OCDE, Paris.
- Tzouvelekas, V., C.J. Pantzios et C. Fotopoulos (2001), « Technical efficiency of alternative farming systems: The case of Greek organic and conventional olive growing farms », *Food Policy*, vol. 26, n°6.
- Uematsu, H. et A.K. Mishra (2012), « Organic farmers or conventional farmers: Where's the money? », *Ecological Economics*, vol. 78.
- Wheeler, S. (2008), « What influences agricultural professionals' view towards organic agriculture? », *Ecological Economics*, vol. 65.
- Willer, H. et J. Lernoud (2013), « Organic agriculture worldwide: Key results from the FiBL-IFOAM survey on organic agriculture worldwide 2013 », FiBL, Frick, et IFOAM, Bonn, <http://orgprints.org/22349/28/fibl-ifoam-2013-global-data-2011.pdf>.
- Wolfe, M.S., J.P. Baresel, D. Desclaux, I. Goldringer, S. Hoad, G. Kovacs, F. Löschenberger, T. Miedaner, H. Østergård et E.T. Lammerts van Bueren (2008), « Developments in breeding cereals for organic agriculture », *Euphytica*, vol. 163.
- Wynen, E. (2002), « Bio-dynamic and conventional irrigated dairy farming in Australia: An economic analysis », *Australasian Agribusiness Perspectives*, Paper 50, University of Melbourne, Carlton.
- Wynen, E. (2003), « What are the key issues faced by organic producers? », dans *Organic Agriculture: Sustainability, Markets and Policy*, pp. 207-20, Éditions OCDE, Paris.
- Wynen, E. (2001), « The economics of organic cereal-livestock farming in Australia revisited », proceedings of the RIRDC Inaugural Conference on Organic Agriculture, Sydney, Australie, 27-28 août, www.elspl.com.au/Abstracts/abstract-a17.htm.
- Wynen, E. (1994), « Bio-dynamic and conventional dairy farming in Victoria: A financial comparison », dans D. Small, J. McDonald et B. Wales (dir. pub.), *Alternative Farming Practices Applicable to the Dairy Industry*, Victorian Department of Agriculture (Kyabram) and The Dairy Research and Development Corporation, Melbourne.
- Yiridoe, E., S. Bonti-Ankomah et R. Martin (2005), « Comparison of consumer perceptions and preference toward organic versus conventionally produced foods: A review and update of the literature », *Renewable Agriculture and Food Systems*, vol. 20.

Annexe 3A

Part de l'agriculture biologique sur le territoire agricole

Tableau 3A.1. Superficies des terres en agriculture biologique et pourcentage du total des terres agricoles, par pays, 2005 et 2013

Pays	2005		2013		Évolution (%) (2013/2005)
	Superficie (‘000 ha)	% du total	Superficie (‘000 ha)	% du total (%)	
OCDE					
Allemagne	807	4.7	1061	6.4	31
Australie	11767	2.6	17150	4.2	46
Autriche	480	16.7	527	19.5	10
Belgique	23	1.7	63	4.6	174
Canada	579	0.9	869	1.3	50
Chili	23	0.2	24	0.1	3
Corée	6	0.3	21	1.1	245
Danemark	134	5.2	169	6.4	26
Espagne	623	2.5	1610	6.5	159
Estonie	60	7.2	151	16.0	153
États-Unis	1641	0.5	2179	0.6	33
Finlande	148	6.7	206	9.0	40
France	550	2.0	1061	3.9	93
Grèce	289	3.5	384	4.6	33
Hongrie	129	3.0	140	3.3	9
Islande	5	0.2	10	0.4	94
Irlande	35	0.8	53	1.3	50
Israël	5	0.9	8	1.4	65
Italie	1069	8.4	1317	10.3	23
Japon	8	0.2	11	0.3	36
Luxembourg	3	2.5	5	3.0	39
Mexique	308	1.8	501	2.3	63
Pays-Bas	49	2.5	49	2.6	0
Nouvelle-Zélande	47	0.4	107	0.9	128
Norvège	43	4.2	52	4.8	21
Pologne	160	1.1	662	4.3	315
Portugal	212	5.7	272	8.1	29
République slovaque	90	4.8	167	8.8	85
République tchèque	255	6.0	474	11.2	86
Royaume-Uni	613	3.8	568	3.3	-7
Slovénie	23	4.8	39	8.4	66
Suède	223	7.0	501	16.3	125
Suisse	117	11.0	128	12.2	9
Turquie	93	0.2	461	1.9	395

Tableau 3A.1. Superficies des terres en agriculture biologique et pourcentage du total des terres agricoles, par pays, 2005 et 2013 (suite)

Pays	2005		2013		Évolution (%) (2013/2005)
	Superficie (‘000 ha)	% du total	Superficie (‘000 ha)	% du total (%)	
Non-OCDE					
Argentine	2682	2.0	3191	2.7	19
Brésil	842	0.3	705	0.3	-16
Colombie	46	0.1	32	0.1	-31
Costa Rica	10	0.3	7	0.5	-24
Monde	29021	0.7	43091	1.0	48

Note : Les données comprennent les terres en cours de conversion.

Source : Institut de recherche de l'agriculture biologique (FiBL) et Fédération internationale des mouvements d'agriculture biologique (IFOAM) (FiBL/IFOAM) (2015), The World of Organic Agriculture 2015, www.organic-world.net/yearbook-2015.html.

Chapitre 4

Libérer le potentiel de la lutte intégrée contre les ennemis des cultures pour une croissance verte

Ce chapitre examine les principes, concepts et pratiques de lutte intégrée contre les ravageurs et leurs incidences sur l'efficacité d'utilisation et la productivité des ressources. Il fait valoir que la lutte intégrée contre les ennemis des cultures peut avoir des retombées positives en termes de rentabilité, d'environnement et de santé humaine. Dans la plupart des pays de l'OCDE, l'adoption de la lutte intégrée répond avant tout aux attentes des consommateurs et des producteurs, qui souhaitent améliorer la sécurité des aliments et réduire les risques sanitaires

Principaux messages

- Si la lutte intégrée contre les ennemis des cultures a été adoptée dans la plupart des pays de l'OCDE, c'est avant tout pour répondre aux pressions exercées par les consommateurs et les producteurs afin que la sécurité des aliments soit améliorée et les risques sanitaires amoindris.
- Elle a, dans l'ensemble, des effets positifs sur les plans économique, environnemental et social, mais l'absence de définition commune rend son évaluation difficile.
- Son impact sur les rendements, les bénéfices et les revenus agricoles semble uniforme et positif. L'adoption des techniques intégrées et à faible consommation d'intrants, permet de réduire le recours aux pesticides sans compromettre les rendements ni affecter les revenus des agriculteurs, les économies réalisées dépassant les pertes de production.

Un accord sur une définition commune de la lutte intégrée est indispensable pour que l'on puisse en évaluer les effets

Il existe de nombreuses définitions de la lutte intégrée du fait de la longue genèse et de la lente évolution que ce concept a connues (encadré 4.1). L'absence de définition unique constitue un obstacle réel non seulement à une interprétation commune de ce que celui-ci implique, mais aussi à son utilisation dans l'action publique et à l'évaluation des résultats.

La multiplicité des définitions a des implications considérables pour la façon dont la lutte intégrée est mise en œuvre sur le terrain et dont les actions engagées sont mesurées. Par exemple, les définitions varient considérablement dans le traitement réservé aux pesticides (OCDE, 1999). Certaines ne prennent pas position à l'égard de l'emploi des pesticides chimiques alors que d'autres plaident en faveur d'une utilisation réduite et d'autres encore insistent sur le fait que les pesticides ne devraient être utilisés qu'en dernier recours, quand toutes les autres options ont échoué. L'approche holistique implique la gestion simultanée de plusieurs ravageurs et l'utilisation intégrée de plusieurs tactiques d'élimination.

Dans l'optique de l'action publique, les principales définitions de la lutte intégrée sont celles données par la FAO et l'Union européenne (qui sont très voisines) et celles du ministère de l'Agriculture des États-Unis (USDA), de l'Agence américaine pour la protection de l'environnement (US EPA) et de l'Organisation internationale de lutte biologique (OILB). L'OCDE n'a pas adopté sa propre définition et elle utilise celles d'organisations comme la FAO ou l'OILB.

Des pratiques de nature très diverse sont mises en œuvre dans le cadre des stratégies de lutte intégrée du fait que celles-ci sont modulées en fonction de la situation géographique et des besoins des cultures qui varient énormément d'une région à l'autre, même au sein d'un seul pays. La lutte intégrée est généralement mise en œuvre en plusieurs étapes dont chacune implique diverses pratiques. Le processus suivi est le plus souvent le suivant : i) élimination préventive des organismes potentiellement nuisibles ; ii) identification et surveillance de ces organismes ; iii) prise de décision reposant sur des seuils d'intervention préalablement définis ; iv) analyse des données de surveillance, et v) si besoin est, actions d'élimination.

C'est pourquoi il n'est jamais prescrit de solutions prêtes à l'emploi ou de méthodes de gestion « universelles » dans le cadre de la lutte intégrée. Un ensemble unique de mesures est proposé pour chaque cas avec une stratégie spécialement adaptée aux conditions locales. Il a cependant été constaté, au fil des ans, que certaines pratiques étaient plus opérantes que d'autres et ce, dans des contextes plus variés.

Vu la multiplicité des pratiques que recouvre la lutte intégrée et la diversité des environnements dans lesquels celles-ci sont mises en œuvre, il ne semble ni possible, ni souhaitable qu'elle fasse l'objet d'une définition précise et restrictive. Il est toutefois sans doute envisageable de mettre au point une définition harmonisée de ses principes et du processus de décision sur lequel elle repose. Une définition harmonisée pourrait permettre que les pesticides chimiques ne soient utilisés qu'en dernier recours dans

les exploitations agricoles et qu'ils le soient dans ce cas d'une façon qui limite au maximum les risques potentiels pour l'homme et l'environnement, en respectant des niveaux très inférieurs à ceux fixés pour l'agriculture conventionnelle. Pour la prise de décision, une définition harmonisée pourrait garantir que la lutte intégrée soit mise en œuvre en suivant des étapes bien précises dans le cadre d'une approche globale et agroécologique de la gestion des exploitations agricoles s'accompagnant de règles de décision et d'objectifs clairement définis.

Encadré 4.1. Qu'entend-on par « lutte intégrée contre les ennemis des cultures » ?

Selon plusieurs études, il existerait plus de 65 définitions de la lutte intégrée contre les ennemis des cultures (Ehler, 2006 ; Prokopy et Kogan, 2003 ; Bajwa et Kogan, 2002). Les premières définitions scientifiques laissent apparaître une forte tendance écologique en soulignant la nécessité de combiner plusieurs tactiques d'élimination et de gérer en même temps plusieurs ravageurs sans oublier de respecter des seuils économiques ou des seuils de traitement lors de l'utilisation de pesticides. Les racines historiques de la lutte intégrée se trouvent dans la convergence des concepts voisins de « contrôle intégré » et de « contrôle intégré des ennemis des cultures », qui ont fait leur apparition au début des années 60 aux États-Unis, et de la notion de « gestion des ennemis des cultures » développée à la même époque en Australie (Kogan, 1998), où elle a été utilisée par les écologistes et les entomologistes. Un exemple type de l'approche scientifique de la définition de la lutte intégrée nous est offert par Prokopy (2003) qui la décrit comme un processus de décision impliquant l'emploi coordonné de plusieurs tactiques en vue d'optimiser le contrôle de toutes les catégories d'ennemis des cultures (insectes, agents pathogènes, mauvaises herbes, vertébrés) d'une manière écologiquement saine et économiquement viable.

La FAO, définit la lutte intégrée dans les termes suivants : « examen attentif de toutes les techniques disponibles pour lutter contre les ravageurs et intégration ultérieure de mesures appropriées pour prévenir l'apparition de populations nuisibles et maintenir l'utilisation des pesticides et d'autres types d'intervention à des niveaux économiquement justifiés, tout en réduisant le plus possible les risques pour la santé humaine et l'environnement. La lutte intégrée met l'accent sur la croissance d'une culture saine, avec un impact négatif minimal sur les agro-écosystèmes, et privilégie les mécanismes naturels de lutte contre les nuisibles. » D'après la FAO (2014), la lutte intégrée implique généralement les six principales étapes suivantes : prévention de la présence d'organismes nuisibles et/ou leur élimination ; surveillance de ces organismes ; sur la base de l'information ainsi réunie, prise de la décision concernant une intervention éventuelle, son moment et le choix des moyens utilisés en privilégiant les procédés non chimiques, écologiquement viables ; utilisation de pesticides uniquement en l'absence d'une autre solution non chimique appropriée et lorsqu'elle se justifie sur le plan économique ; choix des pesticides les mieux adaptés à la cible visée et ayant le moins de retombées négatives sur la santé humaine, les organismes non ciblés et l'environnement, et observation du succès des mesures appliquées.

Pour l'UE, « la lutte intégrée contre les ennemis des cultures », signifie « la prise en considération attentive de toutes les méthodes de protection des plantes disponibles et, par conséquent, l'intégration des mesures appropriées qui découragent le développement des populations d'organismes nuisibles et maintiennent le recours aux produits phytopharmaceutiques et à d'autres types d'interventions à des niveaux justifiés des points de vue économique et environnemental, et réduisent ou limitent au maximum les risques pour la santé humaine et l'environnement. La lutte intégrée contre les ennemis des cultures privilégie la croissance de cultures saines en veillant à perturber le moins possible les agro-écosystèmes et encourage les mécanismes naturels de lutte contre les ennemis des cultures » (article 3 de la directive 2009/128/CE).

Pour le ministère de l'Agriculture des États-Unis (USDA), la lutte intégrée contre les ennemis des cultures est une approche écologiquement viable de la gestion des ravageurs qui associe des moyens biologiques, culturels, physiques et chimiques d'une façon qui réduit au minimum les risques économiques, sanitaires et environnementaux. La lutte intégrée est une approche efficace de la gestion des ravageurs qui respecte l'environnement et repose sur des pratiques faisant appel au bon sens. Les programmes de lutte intégrée s'appuient sur des informations récentes et détaillées sur le cycle de vie des ravageurs et son interaction avec l'environnement. Ces informations, jointes aux méthodes disponibles pour lutter contre les ennemis des cultures, permettent de gérer les dommages causés par ces derniers de la façon la plus économique et en faisant courir le moins de risques possible à la population, au patrimoine et à l'environnement. Les programmes de lutte intégrée exploitent toutes les options existant pour gérer les ennemis des cultures, y compris, mais pas exclusivement, une utilisation judicieuse des pesticides (US EPA, Agence pour la protection de l'environnement des États-Unis). L'US EPA (2014) propose une procédure en quatre temps : prévention, évitement, surveillance et élimination.

D'autres organisations, comme l'Organisation internationale de lutte biologique (OILB), inscrivent la lutte intégrée contre les ennemis des cultures dans le cadre de la production intégrée et la définissent comme un concept d'agriculture durable reposant sur l'utilisation des ressources naturelles et de mécanismes régulateurs pour remplacer les intrants potentiellement polluants. Les mesures agronomiques préventives et les méthodes biologiques, physiques et chimiques sont soigneusement sélectionnées et équilibrées en veillant à protéger la santé des agriculteurs et des consommateurs ainsi que l'environnement. L'accent est mis sur une approche holistique faisant de l'ensemble de l'exploitation l'unité de base et sur le rôle essentiel joué par les écosystèmes agricoles ainsi que sur l'équilibre des cycles des nutriments et le bien-être de tous les animaux d'élevage.

Il est reproché à la conception actuelle de la lutte intégrée d'être très éloignée de ce qu'envisageaient ses promoteurs au départ et d'en avoir fait une lutte intégrée contre les pesticides plutôt que contre les ennemis des cultures (Ehler, 2006). Ceux qui formulent cette critique estiment qu'en cherchant à offrir une solution miracle, on a perdu de vue l'approche globale et intégrée de la lutte contre les ennemis des cultures. L'approche globale implique une lutte menée simultanément sur plusieurs fronts en combinant plusieurs tactiques d'élimination.

La complexité du concept freine son adoption

Malgré quelques exceptions notables, la lutte intégrée a fait peu d'adeptes en raison de sa complexité. Le bref exposé consacré à son adoption dans les principaux pays agricoles de l'OCDE, qui est présenté en annexe 4A, suggère qu'en Amérique du Nord et dans la plupart des pays d'Europe, celle-ci a principalement résulté des pressions exercées par les consommateurs et les producteurs pour une amélioration de la sécurité des aliments et de la santé publique. Dans l'Union européenne, aux États-Unis et au Canada, où des enquêtes ont été menées auprès des consommateurs, l'harmonisation des principes et des stratégies de lutte intégrée entre les États membres et les Provinces et la coordination des initiatives au niveau fédéral (États-Unis et Canada) ou au niveau de l'UE restent un problème important.

Il ressort des exemples présentés que ces pays ont établi quelles étaient les étapes les plus critiques de l'adoption de la lutte intégrée et essayé de surmonter au meilleur coût les difficultés constatées. Ce qui leur pose surtout problème (et leur coûte le plus cher) étant la surveillance et la détection rapide du dépassement des seuils d'intervention par les populations de ravageurs, ils s'efforcent de développer des systèmes de surveillance et d'information. La formation faisant aussi problème, ils ont mis au point et distribué des cours et du matériel de formation par divers moyens innovants (encadré 4.2).

Encadré 4.2. Pays-Bas : le projet « Farming with Future »

Aux Pays-Bas, une approche axée sur la gestion des parties prenantes a été adoptée dans le cadre du projet de réseau national « Farming with Future » en vue de s'assurer l'appui et la contribution des acteurs concernés à l'élaboration et la mise en œuvre de la lutte intégrée (Wijnands et al., 2014). L'approche suivie pour développer et diffuser les connaissances semble avoir été efficace. Elle a permis de transférer les connaissances sur les méthodes de protection durable des cultures et de venir en aide aux parties prenantes désireuses de concrétiser leurs ambitions. Les auteurs estiment qu'on pourrait aussi parler de « circulation du savoir » ou de « co-création » pour évoquer ce processus interactif de partage, application et développement des connaissances au sein de groupes hétérogènes. L'échange de connaissances scientifiques et tacites observé entre les différentes parties concernées constitue un aspect important de la circulation du savoir.

Dans l'Union européenne, les plans d'action nationaux des États membres font apparaître une très grande variabilité de la conception de la lutte intégrée, des efforts entrepris, des objectifs visés et des évaluations qui trouve son origine dans la diversité des parcours antérieurement suivis par chacun des pays. Il ressort de l'analyse de ces plans d'action que ce n'est pas tant la lutte intégrée qui a été adoptée en 2014 sous l'impulsion de la directive relative à une utilisation des pesticides compatible avec le développement rural et du règlement applicable aux produits phytopharmaceutiques (directive 128/2009 et règlement n° 1107/2009) que des mesures de lutte contre les pesticides.

Le manque d'harmonisation empêche la mise au point de systèmes nationaux ou européens de certification des produits agricoles attestant l'utilisation, pour leur production, des techniques de la lutte intégrée, ce qui peut nuire aux efforts d'information des consommateurs sur ces techniques. Le manque d'harmonisation et de coordination complique en outre l'observation des taux d'adoption de la lutte intégrée et l'évaluation des efforts déployés dans ce domaine. La diffusion de l'information et le transfert des connaissances sont aussi des points critiques dans tous les pays.

Des effets économiques positifs très diversifiés à l'intérieur comme à l'extérieur de l'exploitation, mais peu de données concrètes

Dans une perspective économique, la lutte intégrée doit être considérée comme un moyen de réduire les dommages subis par les exploitants. Ses effets économiques se font principalement sentir au niveau de l'exploitation en termes de rendements, de coûts de production et de prix des produits et, en dehors d'elle, sous la forme des bienfaits sociaux qui résultent de l'amélioration de l'environnement et de la santé de la population. Ces effets économiques peuvent, à leur tour, avoir des répercussions non négligeables sur le niveau de participation à la lutte intégrée à l'avenir et la conception de l'action publique. S'ils sont positifs, ils peuvent convaincre les exploitants d'opter pour la lutte intégrée alors que s'ils sont négatifs, ils risquent de les en dissuader. Mais si l'on tient compte des effets sur le bien-être observés à l'extérieur de l'exploitation, il peut être dans l'intérêt des populations d'encourager l'adoption de la lutte intégrée par diverses mesures incitatives.

L'impact économique de la lutte intégrée est étroitement lié à l'utilisation des pesticides ainsi qu'à leurs effets et leur rôle dans la production. Les pesticides étaient autrefois considérés par les économistes de la même façon que les autres facteurs de production agricole du fait de l'effet positif qu'ils avaient sur les rendements tout comme le travail, le capital et les engrais.

Les pratiques agricoles qui réduisent l'emploi de pesticides dangereux peuvent avoir des effets positifs pour la rentabilité, l'environnement et la santé humaine dans les systèmes d'exploitation intensifs. La lutte intégrée s'appuie notamment sur une amélioration de l'information concernant les populations de ravageurs et les prédateurs pour estimer les pertes dues aux ravageurs et adapter en conséquence le dosage des pesticides.

Sous sa forme la plus simple, la lutte intégrée doit être considérée comme une activité réactive qui peut impliquer le recours à des pesticides chimiques ou d'autres méthodes d'élimination suivant le niveau d'infestation. La surveillance est, à cet égard, un facteur déterminant dans la décision de recourir aux pesticides à titre préventif ou curatif. Si elle est moins coûteuse que les pesticides, la préférence ira aux interventions curatives plutôt qu'aux interventions préventives. Si elle ne coûte rien, l'application de pesticides à titre préventif ne sera jamais optimale.

Si la différence entre les niveaux optimaux d'application de pesticides pour différents niveaux d'infestation est importante et le coût de la surveillance relativement faible, l'application de pesticides à titre curatif produira un niveau de bénéfices escomptés plus élevé que l'application à titre préventif. Cependant, même si la variance de la quantité de pesticides requise est importante, les exploitants pourront continuer d'appliquer des pesticides à titre préventif s'ils sont relativement peu coûteux ou si le coût de la lutte intégrée est relativement élevé. La technologie peut permettre de réduire les coûts de la surveillance et favoriser ainsi davantage les applications à titre curatif.

Pourquoi les agriculteurs adoptent-ils la lutte intégrée ?

Au niveau de l'exploitation, les effets économiques de l'adoption de la lutte intégrée sont liés aux coûts et aux recettes associés à la technique de lutte choisie. Des économies peuvent être réalisées si le surcroît de dépenses entraîné par la lutte intégrée est plus que compensé par le moindre recours aux pesticides. Les données contradictoires observées sur l'emploi de pesticides dans le cadre de la lutte intégrée soulignent la nécessité d'adopter une définition commune de celle-ci pour permettre aux experts d'établir un cadre d'évaluation cohérent. Les recettes sont entourées de moins d'incertitude du fait que la lutte intégrée n'affecte pas notablement les rendements et que les prix sont au moins égaux à ceux pratiqués pour les produits de l'agriculture conventionnelle.

Les pratiques agricoles, et donc l'utilisation des pesticides, n'ont pas radicalement changé malgré le fort soutien politique apporté à la réduction du recours aux pesticides et les progrès scientifiques considérables réalisés dans les tactiques de lutte contre les ravageurs (lutte biologique, résistance des plantes, par exemple) (Lefebvre et al., 2013). Les observations empiriques sur l'effet de la lutte intégrée sur l'utilisation des pesticides varient même pour une même culture : dans certains cas, elle permet de

réduire le recours aux pesticides et les coûts sans compromettre le rendement alors que dans d'autres, elle n'a pas d'effet notable sur l'emploi des pesticides ; quelques études ont même constaté un accroissement de leur utilisation (encadré 4.3).

Encadré 4.3. De quelles observations empiriques dispose-t-on sur les avantages de la lutte intégrée ?

Hillocks (2012) estime que la perte des triazoles au Royaume-Uni pourrait permettre à la septoriose (*Septoria tritici*) de réduire les rendements du blé de 10 à 20 % et à *Leptosphaeria maculans* et *Pyrenopeziza brassicae* de faire baisser ceux de l'huile de colza. Le retrait du *mancozèbe* pourrait avoir un effet préjudiciable sur les stratégies mises en œuvre pour prévenir la résistance aux fongicides dans le cas de la pomme de terre et d'autres cultures secondaires. Ce serait une excellente occasion d'adopter la lutte intégrée, au moins pour certaines cultures. Certains font valoir, bien sûr, que le processus de réglementation des pesticides affecte directement l'utilisation de produits particuliers et influe sur les types de pesticides créés en agréant de nouvelles substances et en retirant d'autres du marché, mais qu'il n'a qu'un effet indirect sur les quantités globales de pesticides utilisées (Osteen et Fernandez-Cornejo, 2013).

Velivelli *et al.* (2014) examinent les problèmes et les défis que pose l'utilisation de l'acide *bicinchoninique* (BCA) dans le cadre d'un système de lutte intégrée. Ils concluent qu'en dehors de la question des ressources, les problèmes et les défis inhérents à l'identification, l'évaluation de l'efficacité et l'agrément des BCA rendent nécessaire une active participation des organismes publics, des milieux universitaires et de l'industrie au développement d'une agriculture durable.

Norton et Mullen (1994) ont conclu de l'évaluation économique de 61 programmes de lutte intégrée que l'adoption des méthodes de lutte intégrée se traduisait par une réduction de l'utilisation des pesticides. Pretty *et al.* (2006) ont constaté une diminution de l'emploi de pesticides pour les trois quarts des 62 programmes internationaux qu'ils ont considérés, mais cette conclusion a été contestée par Phalan *et al.* (2007) en raison de la présence d'un biais de sélection dans l'étude. Plus récemment, Lechenet *et al.* (2014) ont évalué la durabilité de 48 systèmes de culture mis en œuvre dans deux grandes régions agricoles françaises et incluant des systèmes de culture conventionnels, intégrés et biologiques avec un large éventail d'intensités d'utilisation de pesticides et de méthodes de gestion (rotation des cultures, préparation du sol, utilisation de cultivars, fertilisation, etc.). Ils ont conclu que, par rapport, aux systèmes conventionnels, les stratégies intégrées se traduisaient par une moindre utilisation de pesticides et d'engrais azotés, qu'elles consommaient moins d'énergie et qu'elles avaient souvent une plus grande efficacité énergétique. D'autres études n'ont pas observé d'effets notables de l'adoption de la lutte intégrée sur l'emploi de pesticides (Fernandez-Cornejo et Jans, 1996 ; Wetzstein *et al.*) tandis que certaines ont constaté une augmentation de celui-ci (Yee et Ferguson, 1996).

Une étude effectuée par l'INRA dans le cadre du programme français *EcoPhyto* a conclu que dans l'hypothèse d'une diminution de l'usage des pesticides de 50 % en grandes cultures, 21 % en arboriculture et 37 % en viticulture, les baisses de production pourraient atteindre, respectivement, 12 %, 19 % et 24 % (INRA, 2010). Jacquet *et al.* (2011) ont cependant démontré comment on pourrait réduire, en France, l'utilisation de pesticides en grandes cultures sans nécessairement provoquer de très importantes pertes de revenus pour les producteurs. Ils montrent qu'en adoptant des techniques intégrées à faibles niveaux d'intrants, on peut réduire l'usage des pesticides d'environ 10 % sans entraîner une perte notable de production. Une plus large adoption des techniques agricoles intégrées pourrait en outre permettre de réduire de 30 % l'emploi de pesticides sans affecter les revenus des agricultures puisque la baisse de production serait compensée par les économies réalisées.

Pimentel (2009) donne un aperçu des coûts sanitaires et environnementaux de l'usage de pesticides dans l'agriculture aux États-Unis. Il constate que les intoxications et les maladies humaines dues aux pesticides sont évidemment un prix très élevé à payer pour l'utilisation de ces produits. Au total, 300 000 intoxications lui seraient imputables chaque année aux États-Unis. Au niveau mondial, l'application de 3 millions de tonnes métriques de pesticides est à l'origine de plus de 26 millions de cas d'intoxications non mortelles. Sur l'ensemble des intoxications dues aux pesticides chaque année, environ 3 millions donnent lieu à une hospitalisation, 220 000 sont mortelles et 750 000 sont à l'origine d'une maladie chronique ». Le coût annuel des intoxications humaines par les pesticides et des maladies qui leur sont liées est estimé à environ un milliard de dollars aux États-Unis (Pimentel et Greiner, 1997).

De nombreuses raisons expliquent pourquoi tous les programmes de lutte intégrée ne se traduisent pas par une réduction de l'utilisation des pesticides. Premièrement, les études utilisent des définitions différentes de la lutte intégrée suivant les contextes, ce qui fait que leurs résultats ne sont pas directement comparables. Comme on l'a vu plus haut, le traitement réservé à l'utilisation des pesticides varie considérablement entre les définitions. Deuxièmement, il n'est pas toujours tenu compte des effets secondaires. Par exemple, l'adoption de la lutte intégrée peut aboutir à un accroissement des surfaces cultivées se traduisant par une augmentation de l'utilisation totale de pesticides, mais une diminution de leur utilisation moyenne (par hectare d'ingrédient actif). De plus, de nombreux aspects des pratiques agricoles courantes peuvent être considérés comme s'inscrivant dans un programme de lutte intégrée

alors qu'ils ne satisfont en fait pas aux critères de la lutte intégrée (Epstein, 2014). Il convient enfin de préciser que les experts sont encore loin de comprendre parfaitement tous les effets à plus long terme et à l'échelle des régions de l'utilisation des pesticides même les plus biodégradables (Bahlai, et al. 2010).

Le coût des intrants (conventionnels et liés à la lutte intégrée) et les prix à la production sont deux aspects cruciaux qui affectent les effets économiques de la lutte intégrée au niveau de l'exploitation. Les dispositions institutionnelles et législatives interdisant la présence de nombreuses substances actives dans les pesticides risquent d'en affecter le coût. Le régime fiscal et d'autres règlements économiques, comme les quotas, peuvent aussi faire monter le prix des pesticides à très court terme. En revanche, la R-D et les infrastructures qui permettent de réduire le coût de la surveillance et de détecter rapidement la présence de ravageurs font baisser le coût de l'adoption de la lutte intégrée et, surtout, réduisent les risques que les agriculteurs associent à celle-ci.

Les produits cultivés selon les principes de la lutte intégrée peuvent être vendus plus cher

Les produits cultivés selon ces principes peuvent être vendus plus cher sur le marché du fait que les consommateurs sont davantage conscients des risques sanitaires liés à la présence de résidus de pesticides dans les aliments. Des études montrent qu'ils seraient disposés à payer plus pour des produits vendus sous un label certifiant qu'ils ont été cultivés selon les principes de la lutte intégrée. Il ressort de nombreuses analyses d'enquêtes que ces produits sont étroitement liés à ceux issus de l'agriculture biologique dans la mesure où les ménages qui sont prêts à payer plus pour ces derniers sont aussi disposés à considérer d'autres systèmes de production, comme les systèmes intégrés. Il semble que la différence de prix avec les produits biologiques entre pour beaucoup dans l'intérêt manifesté par les consommateurs pour les produits obtenus selon les principes de la lutte intégrée (Marrone, 2009 ; Anderson et al., 1996 ; Magnusson et Cranfield 2005 ; Cranfield et Magnusson, 2003 ; Biguzzi et al., 2014).

Effets positifs sur l'environnement

Les programmes de lutte intégrée ont, dans l'ensemble, des effets positifs sur l'environnement qui résultent principalement du moindre recours aux pesticides (et lorsqu'il s'avère nécessaire, de l'emploi exclusif aux plus faibles doses possibles de pesticides rigoureusement sélectionnés) et de la mise en œuvre des bonnes pratiques préventives qui sont généralement associées à l'IPM. Tous les effets négatifs observés de l'utilisation des pesticides sur l'environnement biotique et abiotique sont donc réduits par les pratiques de la lutte intégrée.

Comme on l'a vu plus haut, la plupart des évaluations de la lutte intégrée confirment que celle-ci se traduit par une réduction notable du recours aux pesticides, ce qui implique qu'elle a des effets positifs sur l'environnement, mais ces effets découlent aussi de l'adoption de bonnes pratiques agricoles pour prévenir les maladies, comme la rotation des cultures et la préparation minimale du sol qui renforcent la biodiversité, protègent les sols et préservent l'eau (les façons culturales anti-érosives et la rotation des cultures sont au cœur de nombreux programmes de lutte intégrée). Les pratiques de travail du sol influent sur la disponibilité des nutriments, la structure du sol et sa stabilité globale, sa robustesse, sa température, les relations eau-sol et, enfin, la couverture de résidus de récolte qui, avec la présence de microorganismes dans le sol profond et les effets écologiques, peuvent réduire la dépendance à l'égard des pesticides et leur utilisation. La rotation des cultures a les mêmes effets bénéfiques.

Les effets positifs ne se limitent pas à l'exploitation, mais l'impact sur le capital humain et social est difficile à évaluer

Les avantages économiques de la lutte intégrée pour la société (son bien-être) résident dans la réduction de l'emploi des pesticides et la prévention qui en résulte de certains problèmes de santé humaine ainsi que dans la préservation de l'environnement, mais ce sont des aspects qui ne sont pas

bien étudiés. Il est difficile de trouver des études consacrées aux effets de la lutte intégrée sur la santé qui soient évaluées en supposant que ses pratiques réduisent le recours aux pesticides à haut risque et permettent ou tolèrent l'emploi de substances destructrices sélectives à faible risque qui se dégradent rapidement.

L'effet des pesticides sur l'environnement et la santé humaine a un coût social qui dépasse le coût privé que l'agriculteur doit assumer. Si ce coût est considérable, il peut justifier l'engagement de dépenses publiques pour favoriser l'adoption de la lutte intégrée sous la forme d'une réduction de son coût et du risque qu'elle implique (systèmes de surveillance et d'information) ou d'une aide compensant le manque à gagner.

Encadré 4.4. Lutte intégrée et changement climatique

Certains estiment que le changement climatique pourrait réduire l'efficacité des mesures actuellement prises dans le cadre de la lutte intégrée. Le réchauffement planétaire pourrait avoir de graves conséquences pour la diversité et l'abondance des arthropodes et l'ampleur des pertes dues aux insectes ravageurs (Sharma et Prabhakar, 2014). L'efficacité de certains aspects de la lutte intégrée, comme la résistance des plantes-hôtes, les biopesticides, les ennemis naturels et les produits chimiques de synthèse, pourrait s'en trouver affectée. Cela appelle donc un examen concerté des effets probables du changement climatique sur la protection des cultures et l'élaboration de mesures appropriées pour atténuer son impact sur la sécurité alimentaire. Sharma et Prabhakar (2014) suggèrent les actions suivantes pour faciliter l'adaptation de la lutte intégrée aux effets possibles du changement climatique :

- Cartographier et prédire la répartition géographique des insectes ravageurs et de leurs ennemis naturels, et comprendre les modifications métaboliques provoquées chez les insectes par le changement climatique
- Déterminer comment les modifications du climat affecteront le développement, l'incidence et la dynamique démographique des insectes ravageurs
- Revoir les seuils économiques actuellement fixés pour chaque interaction entre les plantes cultivées et les ravageurs du fait que l'évolution des habitudes alimentaires ou l'accroissement des besoins alimentaires provoqué par l'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère modifiera le seuil économique pour chaque ravageur
- Examiner l'évolution des niveaux de résistance aux insectes ravageurs et repérer les sources stables de résistance pour les exploiter en vue d'améliorer les cultures
- Comprendre l'effet du réchauffement planétaire sur l'efficacité des cultures transgéniques dans la lutte contre les ennemis des cultures
- En tenant compte de ce qui précède, évaluer l'efficacité de diverses technologies utilisées pour lutter contre les ravageurs dans différents contextes environnementaux
- Concevoir des stratégies appropriées de lutte contre les ravageurs pour atténuer les effets du changement climatique.

Si la liste des études portant sur les effets des pesticides sur la santé humaine, considérés surtout du point de vue toxicologique¹ est longue, il n'existe pas vraiment de corpus consacré à l'évaluation des bienfaits économiques de l'adoption de la lutte intégrée pour la santé humaine et l'environnement. Les conclusions concernent l'utilisation des pesticides en général et elles ne peuvent, de ce fait, être utilisées qu'indirectement dans le cadre de la lutte intégrée.

Les effets sociaux de la lutte intégrée correspondent principalement à ses effets sur le capital humain et social, mais toute évaluation se heurte à d'importants problèmes d'attribution. Les effets sur le capital humain correspondent essentiellement à l'évolution des connaissances et des compétences des agriculteurs pour la prise des décisions relatives à la lutte contre les ennemis des cultures tandis que les effets sur le capital social renvoient aux changements observés dans l'organisation, les réseaux sociaux, l'accès à l'information et les efforts collectifs de lutte contre les ravageurs.

La lutte intégrée consiste à informer et à renforcer les connaissances sur les nouvelles méthodes de lutte contre les ravageurs. Ses pratiques impliquent des changements au niveau du capital social et humain qui sont indispensables au succès de sa mise en œuvre. Les programmes de formation à la lutte

intégrée permettant aux agriculteurs d'acquérir des connaissances et des compétences, ils améliorent le capital humain. Les projets de lutte intégrée conduisent à une responsabilisation sociale et engagent un processus de création et de partage des connaissances ainsi que de renforcement des relations sociales entre les participants. Par exemple, la formation et l'amélioration du capital humain qui en résulte sont une condition essentielle de la mise en œuvre de la lutte intégrée. Ses effets sur le capital social et humain sont, de ce fait, difficiles à distinguer de l'ensemble de ses effets. Il est cependant malaisé d'attribuer indubitablement à la mise en œuvre de la lutte intégrée en soi ou à l'amélioration du capital humain et social les différences observées au niveau notamment de la productivité entre les agriculteurs qui pratiquent la lutte intégrée et des groupes témoins. Ce type d'évaluation exige des études et des systèmes d'observation plus élaborés.

L'amélioration du capital social et humain qui résulte de l'application de programmes de lutte intégrée est cependant un effet positif qui ne lui est pas intrinsèquement lié. Par exemple, le réseau de communication plus intense qui peut découler de la mise en œuvre d'une activité de surveillance dans le cadre d'un programme de lutte intégrée peut avoir un effet d'entraînement et permettre la diffusion d'informations et de connaissances sans rapport avec la lutte intégrée. L'agriculteur initié à des techniques visant à prévenir la présence de ravageurs dans une culture donnée peut être incité à chercher des techniques comparables pour d'autres cultures.

Les programmes de formation à la lutte intégrée permettent aux agriculteurs d'acquérir, dans un grand nombre de domaines, des connaissances notamment sur :

- l'origine, la biologie et le comportement des ravageurs
- leurs voies de dissémination (les façons dont ils arrivent dans les champs ou les lieux de stockage)
- les méthodes de lutte
- les principes sur lesquels repose le choix des méthodes, c'est-à-dire que les agriculteurs apprennent pourquoi une méthode particulière doit être appliquée à un moment et en un lieu donnés.

Et les compétences nécessaires pour :

- diagnostiquer et détecter la présence d'un insecte ou d'une maladie qui attaque une culture, et sa gravité, et savoir observer l'évolution du ravageur
- appliquer une méthode donnée comme lorsque les agriculteurs améliorent leur aptitude à observer la présence de ravageurs à l'aide de pièges à phéromones qu'il faut savoir installer et exploiter.

Facteurs expliquant l'émergence et la diffusion de la lutte intégrée

On peut faire une distinction dans les facteurs qui expliquent l'émergence et la diffusion de la lutte intégrée entre ceux qui poussent les agriculteurs à renoncer à l'agriculture conventionnelle et ceux qui les incitent à utiliser de nouvelles techniques comme la lutte intégrée. Nous incluons dans les premiers toutes les évolutions liées à la lutte intégrée qui rendent plus difficile le recours à l'agriculture conventionnelle. Par exemple, l'interdiction de certains pesticides rend attrayantes les méthodes de la lutte intégrée et favorise leur diffusion.

De nombreux facteurs attirent toutefois les agriculteurs vers les techniques de lutte intégrée. Ils incluent plusieurs évolutions des marchés induites par les consommateurs, les fabricants ou les détaillants ainsi que les progrès scientifiques et technologiques qui permettent à la lutte intégrée d'apporter des solutions rentables à des problèmes usuels ou de réduire le coût de certains aspects de la lutte intégrée, comme la surveillance et l'information. Le changement climatique constitue aussi l'un des facteurs incitatifs et dissuasifs de l'adoption de la lutte intégrée. Enfin, certains instruments de

politique agricole peuvent favoriser – mais aussi freiner – l'émergence et la diffusion de la lutte intégrée ; c'est pourquoi nous leur consacrons une section spéciale.

Les mesures nationales et les initiatives internationales prises pour réduire les risques liés à l'utilisation de pesticides poussent à adopter la lutte intégrée

Les évolutions liées à la lutte intégrée qui rendent plus difficile la mise en œuvre de l'agriculture conventionnelle pourraient jouer un rôle important dans l'émergence et la diffusion de la lutte intégrée. C'est le cas, par exemple, de l'interdiction de certains pesticides qui rend attirantes les méthodes de la lutte intégrée.

Parmi les facteurs qui ont joué dans ce sens, on peut notamment citer : les conventions internationales restreignant l'utilisation de pesticides dangereux et les législations nationales (surtout en Amérique du Nord, en Europe et au Japon) qui ont interdit plusieurs pesticides dangereux ; la taxe perçue sur les pesticides qui en augmente le prix du marché et la résistance croissante des ravageurs aux pesticides traditionnellement utilisés. Deux accords internationaux, les Conventions de Rotterdam et de Stockholm, ont en partie limité l'utilisation des pesticides les plus dangereux (encadré 4.5).

Encadré 4.5. Initiatives internationales visant à limiter l'emploi des pesticides dangereux

La convention de Rotterdam sur la procédure de consentement préalable en connaissance de cause applicable à certains produits chimiques et pesticides dangereux qui font l'objet d'un commerce international, signée en 1998, est entrée en vigueur en 2004. Elle a été signée par 153 États-nations et l'Union européenne, mais non par les États-Unis. Parmi les substances interdites figurent une trentaine de pesticides anciens, surtout des composés organochlorés, des polluants organiques et des carbamates, des fongicides comme le captafol et certaines formulations de bénomyle et de thirame. Les pays qui ont signé la convention peuvent interdire l'importation des composés énumérés et recevoir des informations sur les risques chimiques que ceux-ci présentent et la façon de les manipuler en toute sécurité.

La convention de Stockholm poursuit de plus vastes objectifs en éliminant ou limitant la production et l'utilisation des polluants organiques persistants qui incluent certains pesticides figurant dans la convention de Rotterdam. En ce qui concerne les pesticides, les 152 États-nations et l'Union européenne, mais non les États-Unis, qui ont signé la Convention, se sont engagés à s'efforcer d'éliminer la production et l'utilisation de 14 pesticides, avec quelques dérogations pour l'utilisation dans les activités agricoles, et à limiter l'utilisation du DDT à la lutte contre le paludisme.

La Convention internationale pour la protection des végétaux (CIPV) s'attaque au problème des ravageurs envahissants, qui peut aussi revêtir une importance non négligeable en raison de l'impact du changement climatique sur la biogéographie des ravageurs. En vertu de la recommandation CIMP-3/2001 relative aux organismes vivants modifiés (OVM), à la biosécurité et aux espèces exotiques envahissantes adoptée dans le cadre de la CIPV, les pays peuvent considérer des organismes nuisibles comme des organismes de quarantaine ou des organismes réglementés et définir des conditions d'importation visant à empêcher l'introduction d'organismes nuisibles sur leur territoire qui peuvent inclure la mise en œuvre de pratiques phytosanitaires dans les pays exportateurs.

Si dans plusieurs pays, les pesticides à faible toxicité ne sont pas soumis à des procédures d'autorisation aussi complexes que les pesticides conventionnels utilisés, dans d'autres ils ne bénéficient pas d'un traitement spécial à cet égard. Aux États-Unis, l'EPA a adopté un programme pour les pesticides conventionnels moins dangereux (*Conventional Reduced Risk Pesticide Program*) qui accélère la procédure d'examen et le processus de décision réglementaire pour les pesticides conventionnels qui présentent moins de risques pour la santé humaine et l'environnement que d'autres pesticides conventionnels existants. Ce programme vise à constituer rapidement un registre de pesticides conventionnels, commercialement viables, moins dangereux que ceux présents sur le marché (comme ceux qui sont neurotoxiques, carcinogènes ou toxiques pour la reproduction et le développement ou qui contaminent les eaux souterraines). Il repose sur la participation des entreprises chimiques et des organismes fédéraux ou des États qui soumettent à l'EPA les demandes d'agrément initiales et amendées pour les pesticides (US EPA, 2015). De son côté, l'Union européenne a publié, en 2008, une liste de substances présentant un faible risque pour lesquelles il n'est pas nécessaire d'établir des limites maximales de résidus bien qu'elle ait aussi publié une liste de pesticides conventionnels à faible toxicité.

L'Union européenne a adopté des règles fondées sur des principes de précaution pour une utilisation des pesticides compatible avec le développement durable afin de réduire les risques et les effets de l'emploi de pesticides sur la santé humaine et l'environnement. Pour que les pesticides soient acceptables, il doit être scientifiquement prouvé qu'ils ne portent pas atteinte à la santé humaine et ils ne doivent pas avoir d'effets inacceptables sur l'environnement, mais être efficaces pour lutter contre le ravageur visé (Epstein, 2014).

La Suède, le Danemark et la Norvège ont instauré des taxes sur les pesticides. La Suède a commencé à taxer les pesticides en 1986 et depuis 2004, la taxe qui les frappe a été portée à 4.7 USD par kilo de pesticide utilisé. Le recours aux pesticides a diminué de 67 % pendant les années 1990 (Peshin et al., 2009).

La taxation des pesticides a été introduite au Danemark, en 1992, en même temps que des mesures d'incitation visant à favoriser des systèmes de production agricole à faible consommation de pesticides. Dans le cas des insecticides, la taxe atteignait 54 % du prix de détail et dans celui des herbicides, des fongicides et des régulateurs de croissance, elle s'élevait à 33 % (PAN, Europe, 2004). L'intensité de fréquence de traitement est passée, de ce fait, de 3.1 (1990-93) à 2.1 applications (2001-03) et devait tomber à 1.4 en 2009, d'après des projections, tandis que l'utilisation des pesticides a diminué de 25 % en 1992 et de 50 % en 1997 (Cannell, 2007). En 2013, le Danemark a introduit une nouvelle taxe fondée sur l'impact des pesticides sur l'environnement et la santé humaine. La taxe de base de 50 DKK par kilo ou litre de pesticide utilisé est ainsi complétée par une taxe de 107 DKK, multipliée par la note calculée pour l'effet du pesticide sur l'environnement et la santé humaine et son « devenir » dans l'environnement.

L'impact de chaque produit sur l'environnement et la santé humaine se décompose en 16 facteurs qui se répartissent eux-mêmes entre trois groupes. Les effets sur l'environnement sont les effets du produit sur les organismes non ciblés (oiseaux, poissons, daphnies, algues et vers de terre, par exemple). Le « devenir dans l'environnement et le comportement du produit » correspondent à la dégradation et à l'accumulation du produit dans l'environnement. La base d'imposition est déterminée par la persistance des substances, la bioaccumulation et le risque d'infiltration dans les eaux souterraines. Les effets sur la santé humaine se rapportent aux risques que le produit présente pour les utilisateurs, tels que des effets néfastes possibles sur le fœtus, une toxicité aiguë ou des irritations oculaires.

La Norvège a lancé en 1998 un programme de réduction du recours aux pesticides qui reposait sur un système de taxation par tranches frappant les produits pour leur toxicité au taux de 3.8 USD par hectare. La Norvège utilise aujourd'hui un nouveau système qui applique aux pesticides des taux de taxation modulés en fonction de leur effet nocif constaté sur l'environnement plutôt que sur les quantités vendues. Il n'est pas aussi difficile à mettre en œuvre qu'on pourrait le penser du fait que la Norvège n'a autorisé l'utilisation que de 188 pesticides (OCDE, 2010).

L'objection que l'on peut formuler à l'encontre du recours à la taxation est que la demande de pesticides n'étant pas élastique par rapport aux prix, elle est relativement insensible au niveau que ceux-ci atteignent. Skevas et al. (2013) ont analysé 27 études réalisées aux États-Unis et dans l'Union européenne et conclu que les taxes suggérées n'auraient probablement pas d'effet notable sur l'utilisation des pesticides du fait que leur demande n'est relativement pas élastique en termes économiques (c'est-à-dire que l'emploi des pesticides est relativement insensible aux prix). Par exemple, les systèmes de taxation appliqués aux pesticides au Danemark, en 1996 et 1998, n'y ont pas provoqué une réduction de leur utilisation ou de l'indice de fréquence de traitement (Pedersen et Nielsen, 2012). Comme l'estiment les auteurs de l'étude, il est impossible de conclure que le système de taxation de cette période a été un succès ou un échec car beaucoup d'autres facteurs influaient aussi sur l'emploi des pesticides.

Dans le cas de la Norvège, Withana et al. (2014) jugent difficile d'estimer exactement l'impact de la taxation des pesticides sur l'environnement du fait de la multiplicité des variables qui peuvent influencer sur les ventes de pesticides et du stockage de pesticides que les statistiques font apparaître pendant les années qui précèdent l'introduction ou le relèvement d'une taxe. Il semble cependant que le système de

taxation par tranches appliqué en Norvège a favorisé une utilisation plus modérée des pesticides et incité à employer des produits moins nocifs. Skevas et al. (2012) estiment que l'application de quotas à l'utilisation de pesticides peut être plus efficace pour la réduire et diminuer ses effets préjudiciables sur l'environnement que les taxes (même lorsqu'elles font une distinction entre les pesticides fortement et faiblement toxiques), les majorations de prix sanctionnant les effets des pesticides sur l'environnement ou les subventions favorisant l'emploi de produits faiblement toxiques.

Les interventions se concentrent sur les pesticides parce qu'ils sont relativement peu coûteux tout en étant assez efficaces et parce que les chaînes d'approvisionnement sont en place et les agriculteurs disposent du matériel et des connaissances nécessaires à leur utilisation (Epstein, 2014). Le marché mondial des pesticides s'élève à environ 33 milliards USD et se répartit à peu près à parts égales entre les herbicides, d'une part, et les fongicides et les insecticides, d'autre part. Les États membres de l'UE représentent plus ou moins un tiers de ce marché. Les pesticides constituent une part relativement réduite des coûts de production agricole et moins de 5 % de la consommation intermédiaire dans l'Union européenne et aux États-Unis (USDA ERS, 2014). En même temps, le secteur des pesticides chimiques donne des signes de stagnation. Par exemple, en 2009, l'US EPA n'a agréé qu'un seul nouveau composant chimiquement actif du fait en grande partie que la mise au point et la mise à l'essai de pesticides par l'industrie phytosanitaire, et leur agrément par l'US EPA, prennent neuf ans en moyenne et coûtent aux fabricants entre 152 et 256 millions USD par nouveau produit phytopharmaceutique mis sur le marché (CropLife, 2014).

En dehors des changements législatifs et de l'abandon progressif de nombreuses substances actives et des restrictions concernant les résidus, la résistance des ravageurs est une évolution préoccupante qui pèse sur l'utilisation des pesticides et favorise le recours à d'autres technologies. L'utilisation excessive des pesticides et leur emploi malavisé à titre préventif ont favorisé la résurgence de ravageurs, l'apparition de problèmes secondaires et le développement d'une résistance héréditaire chez ces ennemis des cultures (Van Emden et Service, 2004). Au niveau mondial, près de 500 espèces d'arthropodes nuisibles et 200 espèces de mauvaises herbes ont été signalées comme résistantes à au moins un insecticide ou herbicide (Hajek, 2004 ; Heap, 2010). Les mauvaises herbes ont développé une résistance à 21 des 25 sites d'action connus des herbicides et à 156 herbicides différents (Heap, 2014).

Les restrictions environnementales, surtout celles touchant à la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine, aux cadres naturels ou à la protection de la nature, ont aussi été à l'origine de diverses mesures restrictives concernant non seulement l'utilisation des pesticides mais aussi leurs rejets dans le sol, l'eau et l'atmosphère. Aux Pays-Bas, par exemple, l'abandon de l'utilisation des pesticides conventionnels a été notablement favorisée par l'adoption du plan pluriannuel de protection des cultures visant à réduire de 50 à 90 % les rejets de pesticides dans le sol, les eaux de surface et les eaux souterraines, et l'atmosphère (Wijnands et al., 2014).

De plus, compte tenu des objectifs fixés par la directive-cadre de l'UE sur l'eau, nombre des plans d'action nationaux adoptés en Europe pour favoriser une utilisation des pesticides compatible avec le développement durable, mentionnent expressément les rejets de pesticides dans l'eau. Par exemple, le plan d'action du Royaume-Uni indique, parmi ses priorités, que les résidus de certains pesticides, notamment ceux provenant des granulés anti-limaces appliqués aux céréales d'automne et aux cultures de colza oléagineux sont détectés dans l'eau dans certaines parties du Royaume-Uni avec une fréquence et à un niveau de concentration qui risquent de compromettre l'aptitude du pays à respecter ses obligations au regard des prescriptions de la directive-cadre sur l'eau. En outre, sous l'angle de la protection de la nature, les plans de gestion de nombreuses zones protégées du réseau européen Natura 2000 ont essayé de s'attaquer aux risques que les pesticides posent pour la diversité biologique à l'aide de restrictions ou de mesures d'incitation.

Les progrès scientifiques et technologiques ont un rôle essentiel à jouer pour dissiper l'idée que la lutte intégrée s'accompagne d'une baisse des rendements

La crainte de faibles rendements est peut-être le principal obstacle à l'adoption de la lutte intégrée par les agriculteurs. Tout développement dans le domaine scientifique, technologique et politique qui réduira cette crainte rendra donc la lutte intégrée plus attirante à leurs yeux. Il faut toutefois préciser que les risques de production perçus par les exploitants n'ont pas toujours été considérés comme un obstacle important à l'adoption des pratiques de lutte intégrée. De Buck *et al.* (2001) ont estimé que les risques de production, tels que les problèmes posés par les mauvaises herbes, les ravageurs et les maladies qui sont liés aux conditions météorologiques, font partie des risques professionnels que les systèmes de production conventionnels et intégrés doivent permettre de surmonter et qu'ils ne constituent donc pas une raison de résister à une technique culturale donnée. Pour ces auteurs, en revanche, les incertitudes liées à la situation des marchés et aux politiques de l'environnement sont des facteurs plus importants que les risques de production perçus.

De nombreuses innovations scientifiques et technologiques ont essayé de venir en aide aux agriculteurs et de réduire pour eux le coût de la lutte intégrée à des moments cruciaux de sa mise en œuvre. Celle-ci est fortement tributaire non seulement des informations réunies dans le cadre de la surveillance, mais aussi de celles concernant les *seuils économiques et les seuils d'intervention*. Ces informations sont utilisées pour décider s'il convient ou non de prendre des mesures d'élimination, choisir la méthode appropriée et déterminer quel est le meilleur moment d'intervenir. Pour la surveillance et les prévisions à grande échelle, les pays se sont efforcés d'améliorer les données et les prévisions météorologiques ainsi que la mise en garde des agriculteurs contre d'éventuelles attaques de ravageurs (encadré 4.6).

La lutte intégrée contre les ennemis des cultures n'est pas une technologie simple. Le processus de décision qui régit son adoption est complexe en comparaison des technologies prêtes à l'emploi. Cette complexité fait qu'elle nécessite un effort éducatif bien planifié pour faciliter la conversion des utilisateurs potentiels. C'est la raison pour laquelle elle est considérée comme une technologie du savoir. Il a été établi que son adoption est considérablement freinée par le fait que les agriculteurs ignorent les modalités de sa mise en œuvre (Olson *et al.*, 2003). Les efforts de vulgarisation revêtent, de ce fait, une importance capitale. Les nouvelles techniques de communication et d'information ont été adjointes aux méthodes de vulgarisation traditionnellement utilisées dans les pays développés (visites des exploitations, démonstrations sur place, ateliers de formation, distribution de documents, appels téléphoniques et recours aux moyens audiovisuels, par exemple) (OCDE, 2015).

La lutte biologique, en général, et les biopesticides, en particulier sont la principale innovation scientifique observée au stade de l'élimination des ennemis des cultures. Bien qu'il n'existe pas de définition communément acceptée des biopesticides (OCDE, 2013), celle qui les décrit comme des agents produits en masse à partir de microorganismes vivants ou de produits naturels et vendus pour lutter contre les ennemis des cultures recouvre la plupart des entités considérées comme des biopesticides au sein de l'OCDE. Les opinions divergent cependant sur le point de savoir si les biopesticides incluent les organismes génétiquement modifiés (OGM), les régulateurs de croissance et les produits d'origine naturelle.

Les sémiocimiques les plus connus sont les phéromones sexuelles des insectes utilisées pour surveiller les ravageurs ou lutter contre eux en les piégeant en masse, les leurrant pour les tuer et créant chez eux une confusion sexuelle. Le marché mondial des biopesticides s'élevait à environ 1.3 milliard USD en 2011 et était dominé par l'Amérique du Nord qui représentait 40 % environ de la demande mondiale. Le marché européen devrait d'ici peu connaître la plus forte expansion, une fois résolus certains problèmes organisationnels.

Encadré 4.6. Seuils d'intervention en Allemagne et initiative « eXtension » aux États-Unis

En Allemagne, un nouveau système de prévision et des modèles de simulation sont soutenus par les 560 stations météorologiques et le réseau de radars du Service météorologique national (Hommel et al., 2014). Des modèles pronostiques sont exposés sur des cartes de risque couvrant l'ensemble du pays et faisant appel aux techniques d'interpolation spatiale du système d'information géographique (SIG). Ces cartes, qui reposent sur les éléments précédemment mentionnés, indiquent quotidiennement les risques d'infestation que les différents ravageurs présentent pour les céréales, les pommes de terre, la betterave sucrière et les cultures horticoles. Les seuils d'intervention — c'est-à-dire le nombre de ravageurs au-delà duquel des mesures d'élimination doivent être prises pour empêcher que la population de ravageurs n'atteigne le seuil économique et cause un préjudice économique — sont calculés sur la base des données épidémiologiques relatives aux ravageurs et du profil des dégâts qu'ils causent. Ces seuils ne sont pas disponibles pour toutes les régions et toutes les cultures et lorsqu'ils le sont, ils varient entre les régions et en fonction des microclimats et des pratiques agronomiques. Les informations fournies sur les seuils d'intervention par les services de protection des plantes et le portail de l'ISIP constituent aujourd'hui une source importante d'information indépendante (Hommel et al., 2014). L'ISIP est le système allemand d'information pour la production végétale intégrée (*das Informations System Integrierte Pflanzenproduktion*).

L'initiative *Xtension* est une initiative de développement agricole financée par le ministère américain de l'Agriculture et destinée à réunir tout le savoir-faire existant aux États-Unis en utilisant l'Internet comme plateforme de collaboration et de diffusion de l'information. Le site qui lui est consacré fournit des informations utiles sur la lutte intégrée aux vulgarisateurs et aux agriculteurs, entre autres. De plus, devant la généralisation de l'utilisation des téléphones intelligents, le Service coopératif de vulgarisation (Co-operative Extension Service) a commencé à diffuser des informations sur la lutte intégrée par le biais d'applications de téléphonie mobile pour faciliter l'accès à ces informations.

En Europe, les efforts se sont focalisés sur la définition de ce qui ne constitue pas une substance à faible risque. L'Europe n'a pas encore établi une liste des substances à faible risque qui pourrait être approuvée et elle est probablement encore loin de pouvoir y parvenir. Certains biopesticides sont, de ce fait, actuellement traités comme des insecticides chimiques ordinaires. C'est notamment le cas des sémiochimiques qui sont des substances chimiques qui interviennent dans les interactions entre les organismes. Ils se divisent en deux groupes : les allélochimiques et les phéromones, les premiers intervenant dans la communication interspécifique et les seconds dans la communication intraspécifique (Flint et Doane, 2014). Le règlement de l'UE n°1107/2009 concernant les produits phytopharmaceutiques oblige à soumettre les sémiochimiques aux mêmes exigences réglementaires que les insecticides chimiques – cette restriction constitue un obstacle réglementaire important pour les produits qui contiennent des substances sémiochimiques et a dissuadé plusieurs entreprises actives dans le domaine de la lutte biologique de s'intéresser au marché européen tandis que les entreprises européennes du secteur axent plutôt leurs efforts sur l'Amérique du Nord et des pays émergents dotés de législations plus favorables (Tasin, 2013).

Pamela Marrone recense, dans son étude de 2009, les principaux obstacles à l'adoption et à une plus large utilisation des biopesticides. Elle estime tout d'abord que c'est un marché très concurrentiel à forte intensité de capital. Parmi les nombreuses entreprises qui s'y intéressent figurent de grandes entreprises (comme Monsanto, Dupont, Syngenta, Bayern, BASF et Dow), des entreprises de taille moyenne (comme Arysta, Advan, Makhteshim, FMC, Cerexagri, Gowan Valent, entre autres) et beaucoup de petites entreprises. La multiplicité des entreprises et des produits rend difficile, pour les petits établissements, de sortir du lot et elle implique de gros investissements pour entrer sur le marché, effectuer les essais sur le terrain, organiser les démonstrations dans les exploitations et élaborer les programmes de commercialisation.

La complexité du circuit de vente qui inclut notamment des distributeurs, des vulgarisateurs et des chercheurs rattachés à des institutions universitaires ou des organismes publics est le deuxième obstacle signalé dans cette étude (Marrone, 2009). Il est suivi par l'aversion pour le risque que manifestent les agriculteurs, les distributeurs et les conseillers techniques. Sauf en cas de problème épineux (pesticide dangereux, résistance des ravageurs, mesures d'interdiction, par exemple), les producteurs et ceux qui les conseillent et les influencent (distributeurs et vulgarisateurs spécialisés dans la lutte contre les ravageurs) ont l'habitude d'utiliser des produits chimiques de prix raisonnables qui répondent dans l'ensemble à leurs attentes. Ce n'est qu'au prix de gros efforts et de nombreux essais en champs qu'on

pourra les faire renoncer à cette habitude en les persuadant qu'ils n'encourent qu'un faible risque de perte en optant pour les biopesticides.

Des problèmes sont aussi constatés au niveau de l'accès aux agents de lutte biologique (ALB) à l'échelon mondial en raison de la rigueur des réglementations qui imposent que leurs effets soient évalués. En Nouvelle-Zélande, par exemple, l'autorité chargée de la protection de l'environnement (EPA) n'a approuvé que 19 ALB depuis l'année 2000. À la question de la disponibilité des ALB viennent s'ajouter les problèmes et les défis inhérents à leur identification, l'évaluation de leurs performances et leur agrément qui exigent un degré élevé de coopération de la part des parties concernées (pouvoirs publics, secteur privé et milieux universitaires) pour favoriser le développement d'une agriculture durable (Velivelli et al., 2014). La commercialisation d'un ALB est en outre tributaire de l'aptitude de son fournisseur à montrer que celui-ci ne présente pas de danger et qu'il est rentable. Les effets économiques des ALB n'ont pas encore fait l'objet de recherches approfondies (surtout dans le domaine de la rentabilité). Ce manque d'évaluation économique est attribuable aux trois raisons suivantes : (a) la longueur du processus entre son lancement et l'obtention des résultats de toutes les études de terrain ; (b) la difficulté d'assigner des valeurs monétaires à la biodiversité et aux impacts sociaux, et (c) la difficulté d'évaluer les effets de la lutte biologique (McFadyen, 2008).

Un dernier facteur qui joue en faveur de l'adoption de la lutte intégrée est lié aux évolutions venues du marché, notamment aux inquiétudes suscitées chez les consommateurs par la sécurité des aliments, les détaillants et les fabricants ainsi que les institutions qui réglementent les marchés. Comme on l'a déjà dit, les consommateurs prennent progressivement conscience des technologies de lutte intégrée, mais leur sensibilisation à ces techniques n'est pas aussi poussée qu'on pouvait l'espérer, ou du moins, pas aussi élevée que pour la production biologique. À cet égard, l'absence de définition claire et le manque d'harmonisation des politiques de lutte intégrée ont joué un rôle dans le fait que les produits cultivés selon les principes de la lutte intégrée sont relativement moins reconnus sur le marché.

Aux États-Unis, l'USDA met actuellement au point un système national de certification pour les producteurs qui pratiquent l'agriculture biologique, mais rien de comparable n'est prévu pour la lutte intégrée. Celle-ci impliquant un processus complexe pour lutter contre les ennemis des cultures et pas simplement une série de pratiques, il est impossible de trouver une définition couvrant la totalité des denrées alimentaires et l'ensemble du pays. Beaucoup de cultivateurs de produits végétaux comme les pommes de terre et les fraises, par exemple, cherchent à définir ce qu'implique la lutte intégrée pour ces produits et leur région et il existe des labels spéciaux dans des zones de superficie limitée. Il en va de même dans l'Union européenne. Aux États-Unis, un système d'étiquetage spécial a été lancé par une entreprise privée, Wegmans Food Markets, détaillant de Rochester qui, en 1994, a sollicité l'aide de l'Université Cornell pour pouvoir proposer à ses clients du maïs doux produit selon les principes de la lutte intégrée. Il existe beaucoup d'autres labels privés parmi lesquels on peut citer le label « Green Shield », programme de certification indépendant à but non lucratif qui assure la promotion des producteurs mettant en œuvre des mesures préventives efficaces de lutte contre les ravageurs avec un recours minimal aux pesticides, et le « Northeast Eco Apple Project », financé pour la culture des pommes dans le nord-est du pays par l'EPA et la « Region 1 Strategic Agricultural Initiative ».

AvoGreen® est un programme de surveillance des ravageurs mis au point, en Nouvelle-Zélande, par l'association des producteurs d'avocats et le conseil du secteur, et axé sur un système de production contrôlé reposant sur les principes de la lutte intégrée. Ce programme, qui vise à maintenir les niveaux d'infestation en deçà des seuils auxquels des pertes économiques peuvent être à déplorer, offre aux consommateurs une assurance de qualité et de sécurité grâce à un système rigoureux de surveillance et de traçabilité. Les labels « lutte intégrée » peuvent non seulement garantir la sécurité sanitaire des aliments, mais aussi servir de labels écologiques et donner l'assurance aux consommateurs que l'espace rural a été respecté et que les méthodes de production utilisées n'ont pas nui à l'environnement.

Nécessité d'un cadre d'action favorable à l'adoption de la lutte intégrée

Les politiques agricoles et les mesures concernant la protection de l'environnement, la sécurité des aliments et la santé des consommateurs ou même l'énergie peuvent empêcher ou freiner l'adoption de la lutte intégrée. Les politiques de soutien des prix agricoles ou les politiques énergétiques favorisant les biocarburants peuvent favoriser la production végétale continue sans rotation des cultures parce qu'elles ont pour effet de gonfler les prix à la production. Cela n'incite pas à pratiquer l'assolement qui est un aspect essentiel des programmes de lutte intégrée. Sur le plan législatif, certains règlements interdisent l'emploi de pesticides à haut risque et favorisent la lutte biologique contre les ennemis des cultures alors qu'en même temps beaucoup de biopesticides (sémiochimiques, par exemple) sont soumis aux mêmes procédures d'autorisation que les pesticides chimiques à haut risque.

D'autres mesures ont été prises pour soutenir le développement de la lutte intégrée. Aux États-Unis, les producteurs ne peuvent percevoir les indemnités de l'assurance récolte des États que s'ils respectent les « pratiques de bonne gestion » qui incluent l'application de pesticides : d'après Horowitz et Lichtenberg (1993), les dépenses consacrées aux pesticides par les producteurs de maïs du Midwest ayant contracté une assurance récolte étaient supérieures de 21 % à celles des producteurs non assurés et les superficies traitées aux insecticides par les premiers dépassaient de 63% celles des seconds. Même les mesures énergétiques favorisant la production de biocarburants ont empêché l'adoption de la lutte intégrée pour la culture du maïs.

Dans le cadre de la politique de développement rural de l'Union européenne, la lutte intégrée contre les ennemis des cultures est généralement couverte par le dispositif agro-environnemental qui récompense financièrement les exploitants qui décident librement d'adopter les pratiques de lutte intégrée telles que le recours minimal aux pesticides et l'optimisation de l'utilisation des intrants (engrais, eau d'irrigation, etc.). Ce type de soutien a toutefois été critiqué parce qu'il n'est pas ciblé et qu'il ne récompense pas les meilleures pratiques. L'expansion de la lutte intégrée dans l'Union européenne a été appuyée par la directive en faveur d'une utilisation des pesticides compatible avec le développement durable et la directive applicable aux produits phytosanitaires. Les normes de sécurité des aliments et surtout l'adoption des limites maximales de résidus ont en outre aidé l'adoption de la lutte intégrée au niveau mondial (voir l'annexe 4A).

Une aide plus ciblée pourrait être apportée à l'achat des intrants (cultivars reconnus et biopesticides autorisés, par exemple) pour récompenser certaines pratiques agricoles préventives coûteuses, permettre d'embaucher des personnes chargées de surveiller les cultures ou acheter des dispositifs de surveillance (pièges lumineux, par exemple) et, plus généralement, réduire le coût élevé de l'adoption des pratiques de lutte intégrée. Il pourrait aussi être envisagé de financer des systèmes d'assurance « à la carte » pour les participants à la lutte intégrée dans le cadre des programmes qui lui sont consacrés.

L'action publique peut permettre d'apporter une amélioration sur deux points cruciaux qui ont une incidence sur les effets économiques de la lutte intégrée et les chances de son adoption au niveau des exploitations, à savoir le coût des intrants (intrants conventionnels et intrants liés à la lutte intégrée) et les prix à la production. On peut rendre les pesticides conventionnels à haut risque moins facilement accessibles et plus coûteux par des dispositions institutionnelles et législatives supprimant l'offre de nombreuses substances actives et des mesures de dissuasion financière de nature fiscale notamment.

On peut aussi soutenir en même temps les pratiques de lutte intégrée en mettant en place les infrastructures nécessaires à la surveillance, la détection rapide des ravageurs et la prise de décision et en appuyant le recours à d'autres méthodes d'élimination par la production de pesticides à très faible risque, par exemple. Ce type de mesures peut permettre de réduire la différence de coût éventuelle entre l'agriculture conventionnelle et celle reposant sur la lutte intégrée et d'atténuer le risque que les utilisateurs potentiels des méthodes de lutte intégrée associent à leur adoption. Les taux d'adoption devraient augmenter si à cela s'ajoute une différenciation des produits obtenus selon ces méthodes qui se traduit par un surprix.

Parmi les politiques exemplaires adoptées figurent à la fois des mesures gouvernementales prises dans le cadre d'une approche « descendante » en vue de surmonter des obstacles bien identifiés à l'adoption de solutions reposant sur la lutte intégrée, et des mesures prises par le secteur lui-même dans le cadre d'une approche « ascendante » pour répondre à de graves problèmes de marché ou à l'évolution des exigences du marché.

Enseignements à tirer des meilleures pratiques

Exemples de programmes de lutte intégrée ayant donné satisfaction

Les principaux enseignements que l'on peut tirer de l'application d'un certain nombre de programmes et de pratiques mis en œuvre avec succès sont exposés dans les paragraphes qui suivent. Il est difficile d'examiner et de comparer les meilleures politiques adoptées pour encourager et promouvoir la lutte intégrée contre les ennemis des cultures du fait que chacune d'elles a inclus plusieurs mesures différentes. Certaines des mesures qui sont appliquées dans le cadre d'une politique de lutte intégrée peuvent donner de meilleurs résultats que d'autres. C'est à ce type de mesures que nous nous intéressons plus particulièrement ici en recensant les facteurs qui ont contribué à leur succès. Ces mesures ont été prises par les pouvoirs publics dans le cadre d'une approche « descendante » en vue de surmonter des obstacles bien identifiés à l'adoption de solutions reposant sur la lutte intégrée ou par le secteur lui-même dans le cadre d'une approche « ascendante » pour répondre à de graves problèmes de marché ou à l'évolution des exigences du marché.

Lutte intégrée contre les ennemis des cultures et production de blé au Canada

Principaux enseignements : les programmes réussis de lutte intégrée sont le fruit d'une longue gestation, reposent sur l'accumulation de connaissances et incluent plusieurs mesures complémentaires visant à réduire les coûts (prévisions et mises en garde contre les risques). Ils offrent en outre d'autres solutions de prévention, de surveillance et d'élimination, ainsi que d'aide à la prise de décision (seuils d'intervention et systèmes d'aide à la décision).

Au Canada, les producteurs de blé ont accès à un vaste programme de lutte intégrée destiné à réduire le plus possible l'impact économique et écologique de la cécidomyie orange du blé (*Sitodiplosis mosellana*). Cet ensemble de mesures, qui a été mis au point sur une période de 15 à 20 ans, a été adopté avec succès par les producteurs grâce en grande partie aux transferts de technologie effectués par les chercheurs et les entomologistes (Dixon *et al.*, 2014). Les producteurs ont ainsi accès, entre autres, aux moyens suivants : prévisions et systèmes de mise en garde contre les risques, dispositifs de surveillance (instruments de dépistage des ravageurs, cartes collantes et pièges à phéromones, par exemple), lutte culturelle et pratiques agronomiques particulières (sélection de variétés de blé de printemps moins vulnérables et semis précoce), lutte biologique et renforcement de la résistance des plantes hôtes, seuils d'intervention (l'emploi des insecticides n'est autorisé qu'une fois atteint un niveau donné d'infestation) et systèmes d'aide à la décision (utilisation de modèles « degrés-jours » pour prédire l'apparition de ravageurs adultes dans les zones infestées et aider les producteurs à surveiller leurs champs).

Soutien aux entreprises de biocontrôle au Danemark

Principal enseignement : il est possible de recourir à des aides publiques pour éliminer les obstacles à l'entrée dans le secteur des biopesticides, diversifier le choix de pesticides à faible risque ou de biopesticides offerts aux agriculteurs, éventuellement réduire leur coût, et soutenir ou attirer des entreprises innovantes de haute technologie, créatrices d'emplois.

Un système de subventions est en place au Danemark pour favoriser l'utilisation de nouveaux pesticides. Il vise à élargir l'offre de pesticides à faible risque (c'est-à-dire ceux présentant un meilleur

profil sanitaire et environnemental que les pesticides synthétiques conventionnels) en aidant les petites entreprises du secteur de la lutte biologique à faire homologuer leurs produits, le coût élevé des essais pouvant constituer un obstacle à l'entrée pour elles. Cette initiative s'inscrit dans le cadre d'une approche intégrée adoptée au Danemark pour inciter les agriculteurs à renoncer aux méthodes traditionnelles de lutte contre les ravageurs (par des mesures fiscales, une réglementation rigoureuse, etc.) et à recourir à des moyens de lutte à faible risque. Il est encore trop tôt pour rendre compte des résultats de cette intervention.

Lutte intégrée et contributions scientifiques - le quotient d'impact environnemental

Principal enseignement : les contributions scientifiques apportées dans le cadre d'une approche de la lutte intégrée reposant sur la collaboration peuvent donner des résultats largement applicables et transférables.

Une méthode d'évaluation de l'impact des pesticides sur l'environnement a été établie dans le cadre du programme de lutte intégrée de l'État de New York (Chandran, 2014). Le modèle connu sous le nom de « quotient d'impact environnemental » tient compte de plusieurs facteurs, comme la toxicité et les attributs environnementaux des pesticides, pour calculer le facteur de risque lié à leur utilisation dans un contexte donné (Kovach et al., 1992). Il est le fruit d'une collaboration scientifique entre l'Université Cornell et le centre d'expérimentation agricole de l'État de New York (New York State Agricultural Experiment Station). Reconnu aux États-Unis et dans le monde comme un instrument de mesure crédible de l'impact et du succès des programmes de lutte intégrée, il est à la base de modèles augmentés et de l'introduction de systèmes plus complexes de taxation des pesticides.

Les secteurs des kiwis et des pommes en Nouvelle-Zélande

Principal enseignement : plusieurs facteurs de réussite peuvent être mentionnés : i) partenariat entre les chercheurs, les spécialistes du transfert de technologie et les secteurs concernés, qui travaillent en étroite collaboration aux fins d'un objectif commun ; ii) solide base de connaissances fondamentales acquises dans le cadre de programmes de recherche s'inscrivant dans la durée et le cas échéant partagées avec les secteurs concernés ; iii) collaboration entre les chercheurs et les employés des secteurs concernés aux fins du transfert de technologie, et iv) secteurs capables de coordonner leurs activités et de travailler sur des engagements communs.

En Nouvelle-Zélande, les producteurs de kiwis avaient l'habitude de traiter par pulvérisation les plantes infestées par des tordeuses et des cochenilles à certains moments de l'année. Pour pouvoir exporter, il fallait que leurs vergers soient inspectés et déclarés exempts de ravageurs et de maladies, et avant 1992, ils effectuaient jusqu'à huit applications d'insecticides à chaque saison (contre une seulement dans des régions plus chaudes comme le Chili et la Californie).

L'application des méthodes de lutte intégrée aux vergers a fait l'objet d'essais à grande échelle, en 1991 et 1992, dans le cadre d'une collaboration entre les producteurs de kiwis et les chercheurs de l'institut néo-zélandais de la recherche horticole et alimentaire (Horticulture and Food Research Institute of New Zealand Limited ou HortResearch). Ces essais ont permis d'obtenir 262 000 cageots de fruits en 1992, 4.7 millions de cageots en 1993 et 6.8 millions de cageots en 1994. Les kiwis exportés par la Nouvelle-Zélande depuis 1997 (63 millions de cageots) sont tous cultivés par des producteurs utilisant le système de production respectueux de l'environnement, « KiwiGreen ». Le label KiwiGreen indique que le recours aux méthodes de lutte biologique a été privilégié et que des produits chimiques n'ont été pulvérisés qu'en cas de forte infestation. Le programme KiwiGreen prend aussi en considération les facteurs environnementaux, la viabilité écologique, l'application de pratiques commerciales éthiques et le respect des normes d'hygiène.

Dans le cas des pommes, qui sont un important produit d'exportation de l'agriculture néo-zélandaise, des pesticides et des fongicides étaient utilisés pour assurer un niveau élevé de qualité et réduire les pertes dues au carpocapse et à cinq espèces de tordeuses ainsi qu'à l'important problème de tavelure favorisé par le climat humide qui sévit en Nouvelle-Zélande. Des pesticides étaient également appliqués pour satisfaire aux exigences phytosanitaires des marchés étrangers, notamment la tolérance zéro pour la présence de carpocapses vivants dans les pommes exportées par la Nouvelle-Zélande vers le Taipei chinois, la République populaire de Chine, le Japon, la Thaïlande et l'Inde (Gianessi, 2013). Le programme de production fruitière intégrée (IFP) a été lancé en 1996 à l'instigation des producteurs de pommes en vue de modifier profondément les méthodes de lutte contre les insectes et les maladies (Stevens, 2011). Il a été rapidement adopté et fin 2010, il couvrait 91 % de la superficie consacrée à la culture des pommes. La charge en fongicides a été réduite de 45 % et ramenée à 16.9 kg d'ingrédient actif par hectare (Walker et al., 2009) tandis que l'utilisation des insecticides diminuait de 80 % et le recours aux pulvérisations d'insecticides reculait de 40 à 50 %.

Partenariats agro-environnementaux dans le secteur du raisin de cuve en Californie

Principal enseignement : la préexistence d'un réseau dense de relations économiques et sociales entre les organisations locales favorise grandement le développement d'activités de soutien scientifique collaboratif.

Les partenariats agro-environnementaux établis en Californie pour développer l'agriculture durable reposent sur un accord conclu pour plus d'une saison entre des producteurs, leurs organisations et des agronomes en vue d'appliquer les principes agro-écologiques aux pratiques agricoles et de mieux préserver les ressources de l'environnement. Dans le secteur du raisin de cuve, ils ont aussi inclus des responsables de la réglementation et de la protection de l'environnement et des notables locaux ainsi que leurs organisations.

Au niveau de l'État, le programme californien de viticulture durable (Californian Sustainable Winegrowing Program) a encouragé la mise en œuvre de pratiques écologiquement viables « du sol à la bouteille », à partir de 2001. Les pratiques à suivre dans des domaines aussi divers que la lutte contre les ravageurs, l'utilisation de l'eau et de l'énergie, le travail agricole, la qualité du vin et les conditions de travail sont exposées dans un code intitulé « Code of Sustainable Winegrowing Practices : Self-Assessment Workbook ». Warner (2007) estime que les viticulteurs californiens ont établi davantage de partenariats que les cultivateurs d'autres produits parce qu'ils disposaient d'organisations locales et qu'ils ont modulé la qualité de leur production suivant les variétés cultivées en fonction des conditions environnementales locales, ajouté une valeur économique appréciable aux vins en introduisant des indications géographiques et reconnu l'importance d'informer leurs voisins soucieux de l'environnement. Ces facteurs ont incité le secteur à développer ce qui est sans doute l'initiative en faveur de la viabilité écologique d'une production la plus poussée prise aux États-Unis.

La Californie compte plus d'une quarantaine d'associations régionales de viticulteurs et de négociants en vin qui constituent l'ensemble préexistant de relations économiques et sociales sur lequel les partenariats ont été édifiés. Nombre des pratiques prescrites s'appuient en fait sur les résultats d'années de recherches menées par l'Université de Californie comme l'effeuillage et la gestion du couvert végétal, le recours aux cultures de couvertures, la lutte intégrée contre les ravageurs, les seuils de dommage économique, l'utilisation de données météorologiques et de modèles pour prévoir les risques de maladie, et l'amélioration des ressources génétiques (Broome et Warner, 2008).

Meilleures pratiques pour éliminer les obstacles et favoriser l'adoption de la lutte intégrée

Les meilleures pratiques s'attaquent aux facteurs qui découragent l'adoption de la lutte intégrée et renforcent ceux qui la favorisent. Le dernier atelier consacré à la lutte intégrée par l'OCDE (OCDE, 2011) a formulé de nombreuses recommandations à l'intention des gouvernements et des parties

concernées. Il faut bien sûr préciser qu'il n'existe pas de formule toute faite pour un concept aussi complexe que celui de lutte intégrée. Les mesures prises doivent être spécialement adaptées aux problèmes propres à chaque système de production et contexte environnemental. La principale question qui se pose, de ce fait, est celle des limites de l'harmonisation et de la normalisation de la lutte intégrée.

Nous avons montré tout au long de ce chapitre que les efforts d'harmonisation des définitions et des procédures de la lutte intégrée doivent maintenir un équilibre délicat entre les bienfaits attendus de l'harmonisation et les problèmes qui risquent d'en résulter. Une harmonisation et une normalisation poussées auront des effets positifs liés aux économies d'échelle qui découleront de l'unification des marchés des produits issus de la lutte intégrée et des intrants nécessaires à leur production. Cela facilitera la certification et l'étiquetage de ces produits et l'agrément des intrants sur les marchés internationaux et permettra d'améliorer la surveillance et l'évaluation des pratiques de lutte intégrée au niveau mondial et de concevoir des moyens d'action publique plus efficaces.

L'adoption d'une définition stricte de la lutte intégrée présente toutefois deux risques. Premièrement, elle limitera le nombre de pratiques de lutte intégrée utilisables et mettra en question l'essence même de la lutte intégrée qui repose sur l'aptitude des agriculteurs à réagir et innover dans le cadre de systèmes de production et de conditions environnementales variés. Autrement dit, la diversité des réactions et des solutions novatrices diminuera à mesure que le degré d'harmonisation et de normalisation de la lutte intégrée augmentera et celle-ci perdra son caractère « intégré » et « écologique » au profit de l'efficacité économique et administrative. Deuxièmement, une définition stricte de la lutte intégrée aura pour effet d'ajouter un niveau de réglementation aux exigences sanitaires et phytosanitaires applicables aux échanges internationaux et à la commercialisation des produits agricoles. Cela risque d'alourdir encore la bureaucratie et de se traduire par l'émergence d'une nouvelle mesure non tarifaire dans les échanges internationaux.

Plusieurs recommandations pour l'adoption des meilleures pratiques sont énoncées ci-après.

Élaborer un cadre pour le programme de certification de la lutte intégrée

Par exemple, en s'appuyant sur la définition de la FAO, les consommateurs qui achètent un produit issu de la lutte intégrée doivent avoir la certitude que trois principes de base ont été respectés pour sa production : (a) les ravageurs ont été gérés de façon intégrée en recourant simultanément à différentes pratiques agricoles variant selon les produits et les endroits, (b) un processus de décision a été établi et une règle à suivre propre à chaque produit et chaque endroit a été fixée pour l'utilisation des pesticides en dernier recours, et (c) ces pesticides ont été choisis et utilisés de manière à réduire au minimum les risques pour la santé humaine, au-delà des limites maximales de résidus (LMR), et à limiter les dommages causés à l'environnement, y compris la biodiversité.

Fixer des objectifs pluridimensionnels, clairement définis et quantifiables

Ces objectifs pourraient, par exemple, aller au-delà de ceux axés sur les superficies cultivées selon les principes de la lutte intégrée ou la quantité de pesticides autorisée et tenir compte de la quantité d'ingrédients actifs ou d'un indicateur composite des risques. La fixation de ces objectifs pourrait être facilitée par une analyse des cycles biologiques ou d'autres types d'analyses évaluant la viabilité des pratiques phytosanitaires proposées compte tenu de l'évolution du climat.

Établir des indicateurs de référence pour l'adoption de la lutte intégrée suivant les objectifs fixés

Les indicateurs de référence sont un élément essentiel des activités de surveillance et d'évaluation d'une politique ainsi que de l'efficacité des mesures et des moyens d'action mis en œuvre par rapport à leur coût. Ils ne devraient pas être limités aux objectifs visés, mais inclure des indicateurs liés à l'évaluation économique, environnementale et sociale.

L'intégration des solides connaissances scientifiques accumulées dans une base de données sur les pratiques existantes, les seuils d'intervention et les tactiques d'élimination est une condition préalable indispensable à la mise en œuvre d'un programme de lutte intégrée

De solides et vastes connaissances scientifiques ont été accumulées sur les pratiques de lutte intégrée, y compris sur les seuils d'intervention et les tactiques d'élimination. Ces connaissances devraient être réunies dans une base de données mondiale, librement accessible qui serait régulièrement mise à jour en y intégrant les résultats de nouvelles recherches et d'observations empiriques.

Apporter son appui à une formation novatrice des agriculteurs à la lutte intégrée et évaluer les effets de ces programmes de formation à l'aide de méthodes éprouvées. Associer des actions de vulgarisation et des démonstrations à la formation

Les programmes de formation ont un effet positif sur la constitution du capital humain et social nécessaire à la mise en œuvre de la lutte intégrée dans les exploitations. Ils devraient être renforcés par des initiatives complémentaires en faveur de la création de réseaux, des activités de recyclage, des projets de démonstration, des visites et des réunions.

Réduire le risque que les agriculteurs associent à l'adoption de la lutte intégrée en leur apportant une aide ponctuelle pendant une période préétablie

Du fait des courbes d'apprentissage, ce n'est qu'au bout d'un certain temps que tous les effets positifs de l'adoption de nouvelles pratiques ou techniques de lutte intégrée se font sentir². Le risque d'abandon est élevé pendant cette période, surtout pour ceux qui ont opté très tôt pour ces méthodes. Une aide discrétionnaire peut donc leur être apportée (par exemple, pour acheter des intrants, tels que des cultivars agréés et des biopesticides autorisés ; les indemniser pour l'utilisation de certaines pratiques agricoles préventives coûteuses et financer l'embauche de personnes chargées de dépister les ravageurs ou l'achat de dispositifs de surveillance, comme les pièges lumineux, et toute autre assistance jugée nécessaire pour réduire le coût initial élevé de l'adoption de la lutte intégrée).

Revoir les subventions à l'assurance qui ont un effet négatif sur l'adoption de la lutte intégrée

Certains programmes d'assurance freinent l'adoption de la lutte intégrée. Ils peuvent être liés à des mesures qui réduisent le risque de baisse des rendements et impliquent l'utilisation de pesticides conventionnels à titre préventif. Pour y remédier, les programmes de lutte intégrée peuvent envisager de soutenir des dispositifs d'assurance adaptés aux besoins de ceux qui optent pour la lutte intégrée.

Notes

1. Des études scientifiques contestent toutefois l'utilité des processus d'agrément des pesticides du fait que ceux-ci reposent le plus souvent sur la dose journalière du pesticide, calculée uniquement à partir de la toxicité du principe actif (Mesnage et al., 2014).
2. L'adoption et la mise en œuvre à grande échelle de nouveaux outils et tactiques par la communauté agricole peut nécessiter jusqu'à 5 ans de soutien intensif (Epstein et al., 2002).

Bibliographie

- Anderson, M.D., C.S. Hollingsworth, V. Van Zee, W.M. Coli et M. Rhodes (1996), « Consumer response to integrated pest management and certification », *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 60, pp. 97-106.
- Bahlai, C., Y. Xue, C.M. McCreary, A.W. Schaafsma et R.H. Hallett (2010), « Choosing organic pesticides over synthetic pesticides may not effectively mitigate environmental risk in soybeans », *PLoS ONE* 5:e11250, consulté le 21 septembre 2014 : www.plosone.org/article/info%3Adoi%2F10.1371%2Fjournal.pone.0011250.
- Bajwa, W. I. et M. Kogan (2002), *Compendium of IPM Definitions (CID). What is IPM and How is it Defined in the Worldwide Literature?*, IPPC Publication, n° 998, Integrated Plant Protection Center (IPPC), Oregon State University, Corvallis, États-Unis.
- Bazoche, P., F. Bunte, P. Combris, E. Giraud-Héraud, A. Seabra-Pinto et E. Tsakiridou (2012), « Willingness to pay for pesticides' reduction in E.U: Nothing but organic? », *Working Paper ALISS 2012-01*, Institut national de la recherche agronomique (INRA), Paris, consulté le 21 septembre 2014 : <http://dev.finxchange.prodinternet.com/sites/default/files/pdf/Willingness%20to%20pay%20for%20pesticides%E2%80%99%20reduction%20in%20E.U%20nothing%20but%20organic.pdf>.
- Beckmann, V. et J. Wessler (2003), « How labour organisation may affect technology adoption: An analytical framework analysing the case of integrated pest management », *Environment and Development Economics*, vol. 8, n° 3, pp. 437-450.
- Biguzzi, C., E. Ginon, S. Gomez-y-Paloma, S. Langrell, M. Lefebvre, S. Marette, G. Mateu et A. Sutan (2014), « Consumers' preferences for Integrated Pest Management: Experimental insights », article présenté au Congrès de l'EAAE, « Agri-Food and Rural Innovations for Healthier Societies », 26-29 août 2014, Ljubljana, Slovénie, consulté le 21 septembre 2014 : http://ageconsearch.umn.edu/bitstream/183081/2/Biguzzi-Consumers_preferences_for_integrated_pest_management-343_a.pdf.
- Broome, J. et K.D. Warner (2008), « Agro-environmental partnerships facilitate sustainable wine-grape production and assessment », *California Agriculture*, vol. 62, pp. 133-41.
- Campbell, H.F. (1976), « Estimating the marginal productivity of agricultural pesticides: The case of tree-fruit farms in the Okanagan Valley », *Canadian Journal of Agricultural Economics*, vol. 24, pp. 23-30.
- Cannell, E. (1997), « European farmers plough ahead », *Pesticides News*, vol. 3-5.
- Carlberg, E., G. Kostandini et A. Dankyi (2012), « The effects of Integrated Pest Management Techniques (IPM) farmer field schools on groundnut productivity: Evidence from Ghana », article présenté à la réunion annuelle de l'Agricultural and Applied Economics Association (AAEA), Seattle, Washington, 12-14 août 2012, consulté le 21 septembre 2014 : <http://ageconsearch.umn.edu/bitstream/124876/2/CarlbergRev.pdf>.
- Carlson, G.A. (1977), « Long-run productivity of pesticides », *American Journal of Agricultural Economics*, vol. 59, pp. 543-48.
- Chandran, R. (2014), « Experiences with implementation and adoption of Integrated Pest Management in Northeastern USA », in R. Peshin et D. Pimentel (dir. pub.), « Integrated Pest Management: Experiences with implementation », *Global Overview*, vol. 4, pp. 37-64, Springer, Dordrecht.

- Christensen, H. (2013), « Review of national action plans », présentation lors de la huitième édition d'ABIM (Annual Biocontrol Industry Meeting), Bâle, Suisse, 22 octobre 2013, consulté le 21 septembre 2014 : www.abim.ch/fileadmin/documents-abim/Presentations_2013/ABIM_2013_1_2_Christensen.pdf.
- Ciampitti, M. (2013), « Integrated Pest Management in Italy », article présenté au International Congress on Pesticide Use and Risk Reduction for Future IPM in Europe, 19-21 mars 2013, Pala Congressi, Riva del Garda.
- Coble, H. et E. Ortman (2009), « The USA national IPM road map », in *Integrated Pest Management*, dans Radcliffe, E.B., W.D. Hutchison et R.E. Cancelado (dir. pub.), chapitre 37, pp. 471-78, Cambridge University Press.
- Cranfield, J.A.L. et E. Magnusson (2003), « Canadian consumers' willingness-to-pay for pesticide-free food products: An ordered probit analysis », *International Food and Agribusiness Management Review*, vol. 6.
- CropLife America (2014), « Pesticide Regulation », consulté le 21 septembre 2014 : www.croplifeamerica.org/crop-protection/pesticide-regulation.
- Cuyno, L.C.M., G.W. Norton et A. Rola (2001), « Economic analysis of environmental benefits of integrated pest management: A Philippines case study », *Agricultural Economics*, vol. 25, pp. 227-234.
- Dachbrodt-Saaydeh, S. et M. Barzman (2013), « Goals in national action plans and IPM implementation – Core elements of the Sustainable Use Directive », article présenté au International Congress on Pesticide Use and Risk Reduction for Future IPM in Europe, 19-21 mars 2013, Pala Congressi, Riva del Garda.
- David, S. et C. Asamoah (2011), « Farmer knowledge as an early indicator of IPM adoption: A case study from cocoa farmer field schools in Ghana », *Journal of Sustainable Development in Africa*, vol. 13, pp. 213-224.
- de Buck, A., I. van Rijn, N. Roling et G. Wossink (2001), « Reasons for changing or not changing to more sustainable practices: An exploratory study of arable farming in the Netherlands », *Journal of Agricultural Education and Extension*, vol. 7, numéro 3.
- Dixon, P., L. Cass, C. Vincent et O. Olfert (2014), « Implementation and adoption of Integrated Pest Management in Canada: Insects », dans Peshin, R. et D. Pimentel (dir. pub.), « Integrated Pest Management: Experiences with implementation », *Global Overview*, vol. 4, pp. 222-52.
- Ehler, E.L. (2006), « Integrated Pest Management (IPM): Definition, historical development and implementation, and the other IPM », *Pest Management Science*, vol. 62, pp. 787-89.
- Epstein, L. (2014), « Fifty years since silent spring », *Annual Review in Phytopathology*, vol. 52, pp. 377-402.
- FAO (2014), « AGP - Integrated Pest Management », Food and Agriculture Organization of the United Nations, consulté le 21 septembre 2014 : www.fao.org/agriculture/crops/thematic-sitemap/theme/pests/ipm/en/
- Faraglia, B., A. Frattarelli, P. Falzarano et T. Galassi (2013), « Implementation of Directive 128/09/EC in Italy », article présenté au International Congress on Pesticide Use and Risk Reduction for Future IPM in Europe, 19-21 mars 2013, Pala Congressi, Riva del Garda.
- Fernandez-Cornejo, J. (1998), « Environmental and economic consequences of technology adoption: IPM in viticulture », *Agricultural Economics*, vol. 18, pp. 145-55.
- Fernandez-Cornejo, J. (1996), « The microeconomic impact of IPM adoption: Theory and application », *Agricultural and Resource Economics Review*, vol. 25.
- Fernandez-Cornejo, J. et S. Jans (1996), « The economic impact of IPM adoption for orange producers in California and Florida », *Acta Horticulture*, vol. 429.

- Flint, H.M. et C. Doane (2014), « Understanding semiochemicals with emphasis on insect sex pheromones in Integrated Pest Management programs », in *Radcliffe's IPM World Textbook*, dans Radcliffe, E.B. et W.D. Hutchison (dir. pub.), University of Minnesota, St. Paul, Minnesota, consulté le 25 septembre 2014 : <http://ipmworld.umn.edu/chapters/flint.htm>.
- Gianessi, L. (2013), « IPM proves most effective in controlling insect pests of cowpea in Africa », International Pesticide Benefits Case Study No. 99, *CropLife*, <https://croplife.org/case-study/ipm-proves-most-effective-in-controlling-insect-pests-of-cowpea-in-africa/>.
- Govindasamy, R. et J. Italia (1997), « Consumer response to Integrated Pest Management and organic agriculture: An econometric study », *document de travail*, Department of Agricultural, Food and Resource Economics, Rutgers University, consulté le 21 septembre 2014 : <http://ageconsearch.umn.edu/bitstream/36727/2/pa970297.pdf>.
- Govindasamy, R., J. Italia et A. Adelaja (2001), « Predicting willingness-to-pay a premium for Integrated Pest Management produce: A logistic approach », *Agricultural and Resource Economics Review*, vol. 30.
- Hajek, A. (2004), *Natural Enemies: An Introduction to Biological Control*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Headley, J.C. (1968), « Estimating the productivity of agricultural pesticides », *American Journal of Agricultural Economics*, vol. 55.
- Heap, I. (2010), « The international survey of herbicide resistant weeds », consulté le 25 septembre 2014 : www.weedscience.org/summary/home.aspx.
- Heap, I. (2014), « Herbicide resistant weeds », dans D. Pimentel et R. Peshin (dir. pub.), *Pesticide Problems*, vol. 3, pp. 282-301.
- Hillocks, R. (2013), « IPM – Can it deliver? Balancing environmental and economic sustainability », article présenté au International Congress on Pesticide Use and Risk Reduction for Future IPM in Europe, 19-21 mars 2013, Pala Congressi, Riva del Garda.
- Hillocks, R.J. (2012), « Farming with fewer pesticides: EU pesticide review and resulting challenges for UK agriculture », *Crop Protection*, vol. 31, pp. 85-93.
- Hommel, B., S. Dachbrodt-Saaydeh et B. Freier (2014), « Experiences with implementation and adoption of Integrated Plant Protection (IPP) in Germany », dans R. Peshin et D. Pimentel (dir. pub.), « Integrated Pest Management: Experiences with implementation », *Global Overview*, vol. 4, pp. 429-65.
- Horowitz, J.K. et E. Lichtenberg (1993), « Insurance, moral hazard and chemical use in agriculture », *American Journal of Agricultural Economics*, vol. 75, pp. 926-37.
- Hristovska, T. (2009), « Economic impacts of Integrated Pest Management in developing countries: Evidence from the IPM CRSP », thèse soumise à la faculté de l'Institut polytechnique et de l'Université d'État de Virginie en réponse partielle aux conditions requises pour le diplôme de Master of Science in Agricultural and Applied Economics, consulté le 25 septembre 2014 : http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-05252009-231519/unrestricted/Hristovska_Masters_Thesis.pdf
- INRA (2010), « Ecophyto R&D : réduire l'usage de pesticides », Institut national de la recherche agronomique, Paris, consulté le 25 septembre 2014 : <http://institut.inra.fr/Missions/Eclairer-les-decisions/Etudes/Toutes-les-actualites/Ecophyto-R-D>.
- Jacobsen, B.J. (1996), « USDA Integrated Pest Management initiative », in *Radcliffe's IPM World Textbook*, Radcliffe, E.B. and W.D. Hutchison (dir. pub.), University of Minnesota, St. Paul, consulté le 25 septembre 2014 : <http://ipmworld.umn.edu/chapters/jacobsen.htm>.
- Jacquet, F., J.-P. Butault and L. Guichard (2011), « An economic analysis of the possibility of reducing pesticides in French field crops », *Ecological Economics*, vol. 70, pp. 1 638-48.

- Kogan, M. (1998), « Integrated Pest Management: Historical perspectives and contemporary developments », *Annual Review of Entomology*, vol. 43, pp. 243-70.
- Kovach, J., C. Petzoldt, J. Degni et J. Tette (1992), « A method to measure the environmental impact of pesticides », *New York Food and Life Sciences*, Bulletin Number 139, consulté le 25 septembre 2014 : www.nysipm.cornell.edu/publications/eiq/
- Lechenet, M., V. Bretagnolle, C. Bockstaller, F. Boissinot, M.-F. Petit, S. Petit et N. Munier-Jolain (2014), « Reconciling pesticide reduction with economic and environmental sustainability in arable farming », *PlosOne*, vol. 9, n° 6.
- Lefebvre, M., S. Langrell and S. Gomez-y-Paloma (2013), « Adoption of Integrated Pest Management: What role for economics? », communication présentée à l'International Congress on Pesticide Use and Risk Reduction for Future IPM in Europe, 19-21 mars 2013, Pala Congressi, Riva del Garda.
- Lichtenberg, E. et D. Zilberman (1986), « The econometrics of damage control: Why specification matters », *American Journal of Agricultural Economics*, vol. 68, pp. 261-73.
- Lund, T., I. Nyborg, M.H. Rahman et M.G. Sæthre (2013), « Social impacts of IPM-FFS on urban and peri-urban vegetable producers in Cotonou, Benin », *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*, vol. 13.
- Magnusson, E. et J.A.L. Cranfield (2005), « Consumer demand for pesticide free food products in Canada: A probit analysis », *Revue canadienne d'agroéconomie*, vol. 53, pp. 67-81.
- Mancini, F. (2006), « Impact of Integrated Pest Management farmer field schools on health, farming systems, the environment, and livelihoods of cotton growers in Southern India », thèse de doctorat, Wageningen University.
- Marrone, P. (2009), « Barriers to adoption of biological control agents and biological pesticides », dans E.B. Radcliffe, W.D. Hutchison et R.E. Cancelado (dir. pub.), *Integrated Pest Management*, chapitre 13, pp. 163-178, Cambridge University Press, Cambridge.
- McFadyen, R. (2008), « Return on investment: Determining the economic impact of biological control programmes », dans M. Julien, R. Sforza, M. Bonn, H. Evans, P. Hatcher, H. Hinz et B. Rector (dir. pub.) *Proceedings of the XIIth International Symposium on Biological Control of Weeds*, CAB International, Wallingford.
- Mullen, J.D., J.M. Alston, D.A. Sumner, M.T. Kreith et N.V. Kuminoff (2003), « Returns to University of California pest management research and extension. Overview and case studies emphasizing IPM », University of California, Agriculture and Natural Resources, *ANR Publication*, n° 3482.
- Norton, G. et J. Mullen (1994), *Economic Evaluation of Integrated Pest Management Programs: A Literature Review*, Virginia Coop. Ext. Pub. 448-120, Virginia Tech, Blacksburg, VI.
- OECD. (2015), *Promouvoir la croissance verte en agriculture: Rôle de la formation, du conseil et de la vulgarisation*, Études de l'OCDE sur la croissance verte, Éditions OCDE, Paris. <http://dx.doi.org/10.1787/9789264235168-fr>.
- OCDE (2013), « Report of workshop on the regulation of biopesticides: Registration and communication issues », *Series on Pesticides*, n° 448, Éditions OCDE, Paris, consulté le 25 septembre 2014 : [www.oecd.org/env/ehs/pesticides-biocides/ENV-JM-MONO\(2009\)19-ENG.pdf](http://www.oecd.org/env/ehs/pesticides-biocides/ENV-JM-MONO(2009)19-ENG.pdf).
- OCDE (2011), « Report of the OECD workshop on Integrated Pest Management (IPM) strategies for the adoption and implementation of IPM in agriculture contributing to the sustainable use of pesticides and to pesticide risk reduction », Berlin, Allemagne, 16-19 octobre 2011, *Series on Pesticides*, n° 70, Éditions OCDE, Paris, consulté le 25 septembre 2014 : www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=env/jm/mono%282012%2932&docLanguage=en.
- OCDE (2010), OECD. (2010), *La fiscalité, l'innovation et l'environnement*, Éditions OCDE, Paris. <http://dx.doi.org/10.1787/9789264087651-fr>

- OCDE (1999), « Report of the OECD/FAO workshop on Integrated Pest Management and pesticide risk reduction », Neuchâtel, Suisse, 28 juin-2 juillet 1998, *Series on Pesticides*, n° 8, Éditions OCDE, Paris, consulté le 25 septembre 2014 : [www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV/JM/MONO\(99\)7&doclanguage=en](http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV/JM/MONO(99)7&doclanguage=en).
- Olson, L., F. Zalom et P. Adkisson (2003), « Integrated Pest Management in the USA », dans K.M. Mareida, D. Dakouo et D. Mota-Sanchez (dir. pub.), *Integrated Pest Management in the Global Arena*, pp. 249-72, CABI Publishing, Cambridge, MA.
- Osteen, C. et J. Fernandez-Cornejo (2013), « Economic and policy issues of U.S. agricultural pesticide use trends », *Pest Management Science*, vol. 69.
- Pedersen A. et H. Nielsen (2012), « Case study presentation: The Danish pesticide tax on agriculture », *Ecologic*, Berlin, 26-27 janvier 2012, recherche ayant bénéficié de financements provenant du Septième programme-cadre (2007-2013) de l'Union européenne, Projet EPI-WATER « Evaluating economic policy instrument for sustainable water management in Europe ».
- Pedigo, K.P., S.H. Hutchins et L.G. Higley (1986), « Economic injury levels in theory and practice », *Annual Review of Entomology*, vol. 31.
- Peshin, R., K. Jayaratne et R. Sharma (2014a), « IPM extension: A global overview », dans D.P. Abrol, (dir. pub.), *Integrated Pest Management*, pp. 493-529, Elsevier, Amsterdam.
- Peshin, R., K.R. Kranthi et R. Sharma (2014b), « Pesticide use and experiences with Integrated Pest Management Programs and Bt cotton in India », dans R. Peshin et D. Pimentel (dir. pub.), « Integrated Pest Management: Experiences with implementation », *Global Overview*, vol. 4, pp. 269-306.
- Peshin, R., R. Bandral, W. Zhang, L. Wilson et A. Dhawan (2009), « Integrated Pest Management: A global overview of history, programs and adoption », dans R. Peshin et A. Dhawan (dir. pub.), *Integrated Pest Management: Innovation-Development Process*, vol. 1, pp. 1-50, Springer, Dordrecht.
- Phalan, B., A.S.L. Rodrigues, A. Balmford, R.E. Green et R. Ewers (2007), commentaire sur « Resource-conserving agriculture increases yields in developing countries », *Environmental Science and Technology*, vol. 41.
- Pimentel, D. (2009), « Environmental and economic costs of the application of pesticides primarily in the United States », in R. Peshin and A.K. Dhawan (dir. pub.), *Integrated Pest Management: Innovation-Development Process*, chapitre 4, Springer.
- Pimentel, D. et A. Greiner (1997), « Environmental and socio-economic costs of pesticide use », dans D. Pimentel (dir. pub.), *Techniques for Reducing Pesticide Use: Environmental and Economic Benefits*, pp. 51-78, John Wiley & Sons, Chichester.
- Pretty, J.N., A.D. Noble, D. Bossio, J. Dixon, R.E. Hine, F.W.T. Penning de Vries et J.I.L. Morison (2006), « Resource-conserving agriculture increases yields in developing countries », *Environmental Science and Technology*, vol. 40.
- Prokopy R. et M. Kogan (2003), « Integrated Pest Management », in *Encyclopedia of Insects*, dans V.J. Resh et R.T. Carde (dir. pub.), pp. 589-95, Academic Press, San Diego.
- Prokopy, R.J. (2003), « Two decades of bottom-up, ecologically based pest management in a small commercial apple orchard in Massachusetts », *Agriculture Ecosystems and Environment*, vol. 94, pp. 299-309.
- Ricci, P. (2013), « The promotion of IPM and pesticide-related research in the frame of the French Ecophyto Plan », communication présentée à l'International Congress on Pesticide Use and Risk Reduction for Future IPM in Europe, 19-21 mars 2013, Pala Congressi, Riva del Garda.
- Sexton, S.E., Z. Lei et D. Zilberman (2007), « The economics of pesticides and pest control », *International Review of Environmental and Resource Economics*, vol. 1, pp. 271-326.

- Sharma, H. et C. Prabhakar (2014), « Impact of climate change on pest management and food security », dans D.P. Abrol (dir. pub.), *Integrated Pest Management*, chapitre 2, pp. 23-36, Elsevier, Amsterdam.
- Skevas, T., A.G.J.M. Oude-Lansink et S.E. Stefanou (2013), « Designing the emerging EU pesticide policy: A literature review », *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*, vol. 64-65, pp. 95-103.
- Skevas, T., S.E. Stefanou et A. Oude-Lansink (2012), « Can economic incentives encourage actual reductions in pesticide use and environmental spillovers? », *Agricultural Economics*, vol. 43.
- Stern, V.M., R.F. Smith, R. Van Den Bosch et K.S. Hagen (1959), « The integrated control concept », *Hilgardia*, vol. 29.
- Stevens, P. (2011), « Innovation and research for IPM programmes: Some case studies from New Zealand », The New Zealand Institute for Plant & Food Research Limited, www.oecd.org/chemicalsafety/pesticides-biocides/49992166.pdf.
- Swezey, S.L., P. Goldman, J. Bryer et D. Neto (2007), « Six-year comparison between organic IPM and conventional cotton production systems in the northern San Joaquin Valley, California », *Renewable Agriculture and Food Systems*, vol. 22.
- Swinton, S. et G. Norton (2009), « Economic impacts of IPM », in *Integrated Pest Management*, dans E.B. Radcliffe, W.D. Hutchison et R.E. Cancelado (dir. pub.), chapitre 2, pp. 14-24, Cambridge University Press.
- Tasin, M. (2013), « Semiochemicals in European IPM: Time to move beyond a regulatory bottleneck? », article présenté à l'International Congress on Pesticide Use and Risk Reduction for Future IPM in Europe, 19-21 mars 2013, Pala Congressi, Riva del Garda.
- Thomson, L.J., S. Macfadyen et A.A. Hoffmann (2010), « Predicting the effects of climate change on natural enemies of agricultural pests », *Biological Control*, vol. 52, pp. 296-306.
- Tommasini M.G. (2013), « Application of IPM - The Point of View of Producers », article présenté à l'International Congress on Pesticide Use and Risk Reduction for Future IPM in Europe, 19-21 mars 2013, Pala Congressi, Riva del Garda.
- Tuomisto, H.L., I.D. Hodge, P. Riordan et D.W. Macdonald (2012), « Does organic farming reduce environmental impacts? – A meta-analysis of European research », *Journal of Environmental Management*, vol. 112, pp. 309-20.
- US EPA (2014), *Integrated Pest Management (IPM) Principles*, United States Environmental Protection Agency, consulté le 21 septembre 2014 : www.epa.gov/pesticides/factsheets/ipm.htm.
- US EPA (2015), « Conventional reduced risk pesticide program », United States Environmental Protection Agency, consulté le 21 août 2015 : www2.epa.gov/pesticide-registration/conventional-reduced-risk-pesticide-program.
- USDA/ERS (2014), « Annual production expenses by category, 2010-2014, nominal (current dollars) », U.S. Department of Agriculture/Economic Research Service, consulté le 30 septembre 2014 : www.ers.usda.gov/data-products/farm-income-and-wealth-statistics/production-expenses.aspx#.VC-uwfl_uCk
- Van Emden, H.F. et M.W. Service (2004), *Pest and Vector Control*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Velivelli, S., P. Vos, P. Kromann, S. Declerck et B. Prestwich (2014), « Biological control agents: From field to market, problems and challenges », *Trends in Biotechnology*, vol. 32, n° 10.
- Walker J., N. Park, B. Clothier, D. Manktelow, C. van Den Dijssel, A. Hodson, M. Barley et L. Hodson-Kersey (2009), « Progress in pesticide risk reduction in New Zealand horticulture », *New Zealand Plant Protection*, vol. 62.
- Warner, K.D. (2007), « The quality of sustainability: Agroecological partnerships and the geographic branding of California winegrapes », *Journal of Rural Studies*, vol. 23.

- Wetzstein, M.E., W.N. Musser, D.K. Linder et G.K. Douce (1985), « An evaluation of integrated pest management with heterogeneous participation », *Western Journal of Agricultural Economics*, vol. 10.
- Wijnands, F. et H. Brinks (2013), « Farming with future - Stakeholder involvement in development and implementation of IPM in the Netherlands », article présenté à l'International Congress on Pesticide Use and Risk Reduction for Future IPM in Europe, 19-21 mars 2013, Pala Congressi, Riva del Garda.
- Wijnands, F.G., H. Brinks, H. Schoorlemmer et J. de Bie (2014), « Integrated Pest Management adoption in the Netherlands: Experiences with pilot farm networks and stakeholder participation », dans R. Peshin et D. Pimentel (dir. pub.), « Integrated Pest Management: Experiences with implementation », *Global Overview*, vol. 4, pp. 513-54, Springer, Dordrecht.
- Withana, S., P. ten Brink, A. Illes, S. Nanni et E. Watkins (2014), *Environmental Tax Reform in Europe: Opportunities for the Future*, rapport de l'Institut pour une politique européenne de l'environnement (IPEE) pour le ministère néerlandais des Infrastructures et de l'Environnement, rapport final, Bruxelles.
- Yang, P.-Y., Z.-H. Zhao et Z.R. Shen (2014), « Experiences with implementation and adoption of Integrated Pest Management in China », dans R. Peshin et D. Pimentel (dir. pub.), « Integrated Pest Management: Experiences with implementation », *Global Overview*, vol. 4, Springer, Dordrecht.
- Yee, J. et W. Ferguson (1996), « Sample selection model assessing professional scouting programs and pesticide use in cotton production », *Agribusiness*, vol. 12.

Annexe 4A

Lutte intégrée contre les ennemis des cultures

Principes, concepts et pratiques

La lutte intégrée est généralement mise en œuvre en plusieurs étapes dont chacune implique diverses pratiques. La FAO (2014) estime caractéristiques les six grandes étapes suivantes :

- Prévention et/ou élimination d'organismes nuisibles ;
- Surveillance des organismes nuisibles ;
- Prise de décision sur la base de la surveillance en tenant compte des cas particuliers dans lesquels il peut être nécessaire de lutter contre les ravageurs en privilégiant les méthodes non chimiques écologiquement viables ;
- Application de pesticides uniquement en dernier recours quand il n'existe aucune solution non chimique appropriée et quand elle se justifie économiquement ;
- Choix de pesticides jugés particulièrement adaptés au problème et ayant les plus faibles effets secondaires sur la santé humaine, les organismes non ciblés et l'environnement ;
- Observation du succès des mesures de lutte appliquées contre les ravageurs.

L'US EPA (2014) propose la même stratégie, mais dans le cadre d'une procédure en quatre temps. L'USDA a suggéré le concept de PAMS, acronyme anglais pour prévention, évitement, surveillance et élimination. Les procédures types incluent, en général, l'élimination préventive des organismes potentiellement nuisibles, l'identification et la surveillance de ces organismes, un processus décisionnel reposant sur des seuils d'intervention prédéfinis et les informations fournies par les activités de surveillance et, si besoin est, des actions d'élimination.

Des pratiques de nature très diverse sont mises en œuvre dans le cadre des stratégies de lutte intégrée du fait que celles-ci sont modulées en fonction de la situation géographique et des besoins des cultures qui varient énormément d'une région à l'autre, même au sein d'un seul pays. C'est pourquoi il n'est jamais prescrit de solutions prêtes à l'emploi ou de méthodes de gestion « universelles » dans le cadre de la lutte intégrée. Un ensemble unique de mesures est proposé pour chaque cas avec une stratégie spécialement adaptée aux conditions locales. Il a cependant été constaté, au cours de l'élaboration et de la mise en œuvre de la lutte intégrée, que certaines pratiques étaient nettement plus opérantes que d'autres et ce, dans des contextes plus variés.

Pour prévenir la présence de ravageurs, on obtient très souvent des résultats encourageants en combinant les pratiques suivantes :

- Utilisation de cultivars et de variétés résistants ou tolérants aux ravageurs et emploi de semences et matériel végétal certifiés ;
- Rotation des cultures, culture intercalaire, successions et associations des cultures qui réduisent au minimum la pression d'infection et optimisent la prévention biologique des ravageurs et des maladies, et

- Recours à des façons culturales comme l'assainissement des lits de semences, le choix de dates et de densités de semis appropriées, l'ensemencement sous couverture, l'application de méthodes de travail du sol antiérosives, l'élagage et l'ensemencement direct.

Il est important de noter que la plupart des pratiques préventives mises en œuvre dans le cadre de la lutte intégrée sont aussi de bonnes pratiques agricoles qui tombent sous le sens pour préserver les ressources (sol et eau), bien gérer les nutriments et renforcer la capacité d'adaptation à l'évolution du climat.

Les techniques de surveillance sont de trois types : méthodes absolues, méthodes relatives et indices de populations. Dans le cas des méthodes de surveillance absolues, les estimations de la densité des populations de ravageurs sont exprimées en termes de niveau par unité de superficie cultivée ou de pourcentage d'unités d'échantillonnage affectées. Dans le cas des méthodes relatives, les mêmes estimations sont exprimées en termes d'unités d'effort tandis que dans celui des indices de populations, les estimations sont exprimées en termes de dommages causés aux cultures ou de fréquence des infestations de ravageurs.

Le dépistage est la toute première méthode utilisée pour surveiller les organismes nuisibles. C'est le principal moyen d'obtenir les informations nécessaires à la prise de décision. Les schémas de dépistage varient suivant que les infestations de ravageurs sont uniformément réparties sur le terrain, qu'elles sont concentrées en certains endroits ou qu'elles apparaissent tout d'abord à la lisière des champs. Le dépistage et les comptages ou évaluations visuels s'appuient souvent sur l'utilisation de pièges comme les pièges à phéromones ou les pièges lumineux.

Le processus décisionnel exploite les informations obtenues par la surveillance pour répondre à deux questions fondamentales. Premièrement, les contrôles naturels présents dans l'exploitation sont-ils en mesure de maintenir la population des ravageurs en deçà des seuils économiques ? Deuxièmement, le coût des dégâts provoqués par le ravageur est-il plus élevé que celui de la lutte menée contre lui ? Le processus décisionnel est facilité par l'estimation des niveaux de préjudice économique (EIL pour « Economic Injury Level », en anglais) et des seuils économiques (ou seuils d'intervention). Le préjudice est défini comme le dommage physique causé à un produit agricole apprécié, ou la destruction de celui-ci, par la présence ou les activités d'un ravageur. Le dommage est la perte de valeur monétaire du produit résultant du préjudice causé par le ravageur. Le concept d'EIL a été défini dès 1959 par Stern et ses collaborateurs (1959) comme la plus faible densité de population d'un ravageur qui cause un dommage économique ou le montant du préjudice causé par un ravageur qui justifie le coût de l'intervention. L'EIL peut être exprimé mathématiquement comme suit :

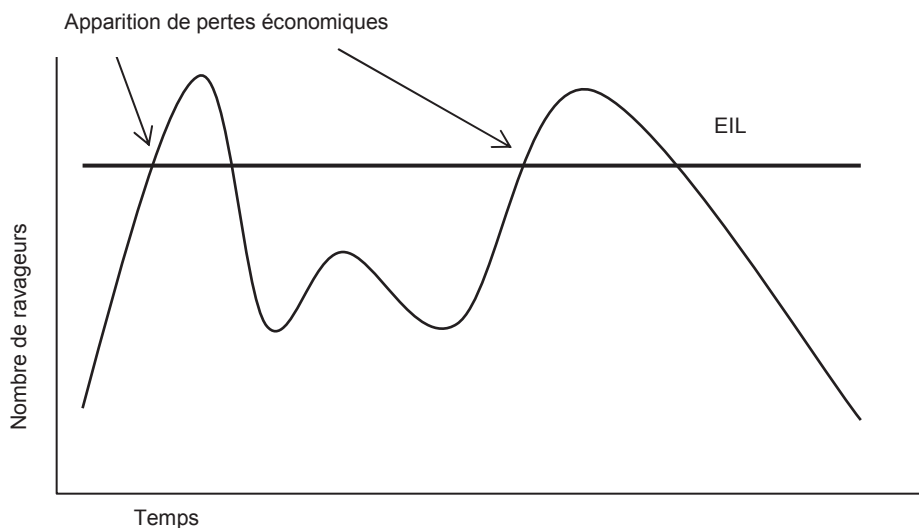
$$EIL = \frac{C * N}{V * I} = \frac{C}{V} * \frac{1}{L}$$

où C est le coût unitaire de la lutte contre le ravageur, N est le nombre de ravageurs qui portent préjudice à chaque unité de produit, V est la valeur unitaire du produit et I est le pourcentage d'unités de produit affectées. EIL représente le nombre de ravageurs par unité de surface ou par unité d'échantillonnage et L est la perte causée par ravageur (Pedigo et al., 1986). L'EIL est fonction du coût de la lutte contre le ravageur (C) et de la valeur du produit (V). Bien qu'il soit exprimé en quantités de ravageurs, l'EIL est un point d'équilibre ou un ratio coût/avantage qui détermine les décisions d'intervention curative et les actions qui en découlent. Les responsables de la lutte contre les ravageurs tiennent cependant compte du décalage temporel entre la mise en œuvre d'une stratégie de lutte et son effet sur la population de ravageurs et ils fixent ce qu'on appelle les seuils économiques ou les seuils d'intervention qui établit la densité de ravageurs à laquelle des mesures de lutte doivent être appliquées pour empêcher la population de ravageurs d'atteindre l'EIL.

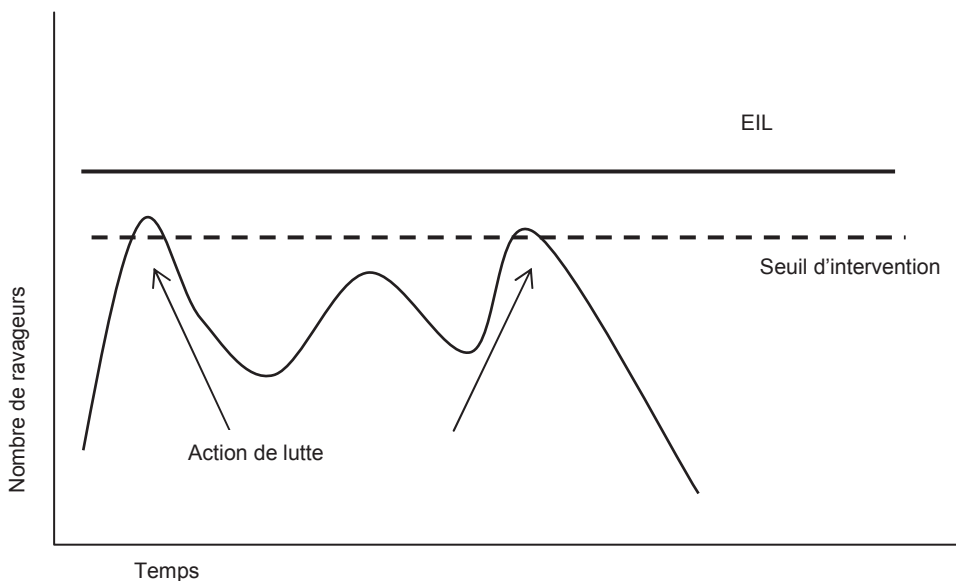
Autrement dit, le seuil d'intervention indique la densité de ravageurs à laquelle il faut déclencher les mesures de lutte pour empêcher que le nombre de ravageurs atteigne le niveau auquel il provoquera un dommage économique. Les graphiques 4A.1 et 4A.2 ci-dessous décrivent comment s'établit

graphiquement la relation entre l'EIL et le seuil d'intervention. Le graphique 4A.1 montre comment la dynamique d'une population de ravageurs peut atteindre l'EIL et provoquer des pertes économiques. Le graphique 4A.2 fixe les seuils d'intervention et montre le moment auquel les activités de lutte doivent être entreprises pour empêcher la dynamique de la population de ravageurs d'atteindre l'EIL. Les concepts de seuil d'intervention et d'EIL ont été critiqués. Nous allons les examiner de plus près.

Graphique A4.1. Le concept de niveau de préjudice économique



Graphique A4.2. Niveau de préjudice économique et seuil d'intervention (seuil économique)



On peut recourir à des moyens physiques, biologiques et chimiques pour éliminer les ravageurs. Le manuel de l'USDA sur la lutte intégrée répertorie toute une série de moyens physiques utilisables à cette fin, parmi lesquels figurent des pratiques culturales comme la réduction de l'espacement entre les plantes ou l'optimisation des peuplements ; un changement d'approche pour la préparation du sol incluant le labour en bandes ou l'absence de tout travail du sol; le recours à des cultures de couverture ou au paillage, ou l'utilisation dans la rotation des cultures de plantes à potentiel allélopathique ; le recours à la mise en culture ou au fauchage pour lutter contre les mauvaises herbes ; l'optimisation de la circulation d'air dans les canopées ou les couches d'arbrisseaux grâce à l'élagage ; l'utilisation de pièges alimentaires ou de pièges à phéromones pour certains insectes, et l'emploi de traitements thermiques ou de dispositifs d'exclusion pour lutter contre les insectes et les maladies. Presque toutes les méthodes culturales d'élimination sont aussi des méthodes préventives.

Les moyens physiques utilisés pour lutter contre les insectes incluent le pincement des tordeuses, le lavage des feuilles pour éliminer les pucerons, l'élagage des feuillages attaqués par des chenilles et l'emploi de divers dispositifs pour supprimer les limaces et les charançons. Pour lutter contre les mauvaises herbes, on peut les arracher à la main, pratiquer un sarclage superficiel ou recourir au paillage. Les moyens physiques et mécaniques de lutte contre les ravageurs sont plus efficaces quand le niveau d'infestation est faible. Les moyens biologiques visent à préserver (protéger et renforcer) les agents de lutte biologique qui sont déjà présents et à développer ou rétablir une base de peuplement bénéfique qui a été décimée.

L'utilisation sélective de pesticides et le lâcher d'agents prédateurs sont les principales méthodes de lutte biologique utilisées. La confusion sexuelle est un autre moyen de lutte biologique auquel on peut envisager de recourir pour éliminer les insectes au lieu d'employer des pesticides conventionnels, surtout quand il peut permettre de se débarrasser durablement d'une espèce gênante. L'emploi de moyens chimiques d'élimination ne devrait être considéré qu'en dernier recours, quand toutes les autres solutions ont été tentées. Toute la philosophie de la lutte intégrée repose sur le principe de l'utilisation en priorité de produits sélectifs et non toxiques comme les huiles horticoles, les savons insecticides et les pesticides d'origine botanique (extraits de graines de margousier, pyrèthrine et roténone, par exemple). En appliquant efficacement les pesticides (c'est-à-dire en les appliquant au bon moment sur une cible bien déterminée), on peut réduire de jusqu'à 90 % la quantité de pesticides utilisée.

Adoption des pratiques de lutte intégrée dans les pays de l'OCDE

Canada

Le Canada est à la pointe de la recherche sur les façons de diminuer le recours aux produits chimiques sans compromettre les rendements ou la qualité de la production, depuis les années 1940. Des chercheurs canadiens se sont penchés, dès 1968, sur la manière dont l'utilisation des pesticides pourrait être réduite dans les vergers de pommiers sans que les fruits en pâtissent. La mise au point, en 1974, d'un système informatisé de prévision et d'alerte avancée a permis aux producteurs de pommes de l'Ontario de disposer de données sur les ravageurs et les conditions météorologiques. La mise en œuvre des premières mesures et les essais effectués sur le terrain ont permis de donner confiance aux producteurs dans le programme de lutte intégrée.

Les cultures auxquelles ce programme peut être appliqué sont choisies sur la base de trois principaux critères : les quantités de pesticides qui leur sont appliquées, leur valeur globale dans une région ou l'importance de la superficie qu'elles occupent et l'existence d'informations scientifiques sur la biologie des ravageurs ; les techniques de surveillance applicables, et les seuils d'intervention et les stratégies de lutte envisageables. Aujourd'hui, les pouvoirs publics soutiennent la lutte intégrée à l'aide de deux programmes dont l'un est appliqué par Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) et par les autorités provinciales. Le Programme de réduction des risques liés aux pesticides (PRRP), une initiative conjointe de l'AAC et de l'Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire (ARLA) de Santé Canada, vise à réduire les risques liés aux pesticides utilisés dans l'agriculture et l'industrie

agroalimentaire. Ces risques incluent les risques pour la santé humaine, les risques pour la diversité biologique résultant des effets sur les organismes non ciblés et les risques pour l'air, l'eau et les sols.

Le PRRP établit un cadre dans lequel les producteurs élaborent et mettent en œuvre des stratégies de réduction des risques liés aux pesticides en ciblant les aspects prioritaires de la lutte contre les ravageurs qui sont déterminés en concertation avec les acteurs concernés, au niveau national. Des projets sont financés dans le cadre de ce programme qui apporte un appui réglementaire à la mise en œuvre des stratégies élaborées. Le second programme canadien dans ce domaine est le Programme des pesticides à usage limité (PPUL) qui vise à mener des essais en champ afin d'obtenir les données nécessaires sur de nouveaux produits antiparasitaires et de les soumettre à l'ARLA de manière à ce que les producteurs canadiens qui se livrent à des cultures spécialisées (c'est-à-dire « secondaires ») sur de petites superficies puissent disposer de nouveaux produits phytosanitaires et donc de davantage d'options (Dixon *et al.*, 2014).

Union européenne

Dans l'Union européenne (UE), la longue histoire de la promotion et de l'adoption de la lutte intégrée est étroitement liée à la lutte contre les pesticides. C'est l'introduction de la directive 2009/128/CE, dite directive sur l'utilisation durable des pesticides, qui a favorisé l'adoption de la lutte intégrée. Cette directive a pour objectif d'instaurer « un cadre pour parvenir à une utilisation des pesticides compatible avec un développement durable en réduisant les risques et les effets des pesticides sur la santé humaine et sur l'environnement et en encourageant le recours à la lutte intégrée contre les ennemis des cultures et à des méthodes ou techniques de substitution, telles que les moyens non chimiques alternatifs aux pesticides. »

L'article 4 de cette directive invitait les États membres à adopter des plans d'action nationaux pour fixer leurs objectifs quantitatifs, leurs cibles, leurs mesures et leurs calendriers en vue de réduire les risques et les effets de l'utilisation des pesticides sur la santé humaine et l'environnement, et à encourager l'élaboration et l'introduction de la lutte intégrée contre les ennemis des cultures et de méthodes ou de techniques de substitution en vue de réduire la dépendance à l'égard de l'utilisation des pesticides. Les États membres devaient en outre décrire, dans leurs plans d'action nationaux, la manière dont ils s'assureraient que tous les utilisateurs professionnels appliqueraient les principes généraux de la lutte intégrée au plus tard le 1er janvier 2014. La mise en œuvre de la lutte intégrée sous une forme ou sous une autre est, de ce fait, obligatoire sur l'ensemble du territoire de l'UE. Les 28 États membres ont maintenant soumis leurs plans d'action. Il ressort de leur examen que le niveau d'adoption de la lutte intégrée varie sensiblement entre les États membres.

Il a été avancé que c'est parce que plusieurs pays appliquaient depuis longtemps des plans et des programmes nationaux pour réduire l'utilisation des pesticides et les risques qui lui sont liés, que la façon dont la lutte intégrée est mise en œuvre varie entre les pays de l'UE en ce qui concerne les principaux acteurs et parties prenantes impliqués et va d'une adhésion générale aux principes de la lutte intégrée, de programmes gouvernementaux axés sur des fermes-modèles et de projets nationaux à l'élaboration de principes directeurs pour les différentes cultures et de systèmes de notation permettant d'évaluer les performances nationales en matière de lutte intégrée (Dachbrodt-Saaydeh et Barzman, 2013). L'absence de lignes directrices établies au niveau européen et harmonisant celles élaborées aux niveaux régional, territorial et national est l'une des plus lourdes critiques formulées. Ce manque d'harmonisation se traduit par une certaine confusion sur les marchés et une concurrence déséquilibrée entre les fournisseurs des différents États membres de l'UE (Tommasini, 2013).

D'autres observateurs estiment que depuis l'élaboration et la mise en œuvre de la directive sur l'utilisation durable des pesticides par la direction générale Environnement et la direction générale Santé et sécurité alimentaire, les objectifs et les indicateurs concernent la protection de l'environnement et la sécurité des aliments et accordent peu d'attention à la productivité agricole ou aux moyens de subsistance des agriculteurs (Hillocks, 2013). Il est aussi fait valoir que certaines substances qui sont jugées appropriées pour les stratégies de lutte intégrée sont répertoriées comme des substances actives

par certaines autorités, ce qui a des conséquences négatives pour leur utilisation dans les programmes de lutte intégrée.

Lutte intégrée et paiements agro-environnementaux dans les États membres de l'UE

L'adoption des pratiques de lutte intégrée est soutenue (totalement ou partiellement) dans l'Union européenne par des paiements destinés aux agriculteurs. Ces versements visent à couvrir le coût des vulgarisateurs et de l'adaptation aux nouvelles pratiques (achat de machines et d'instruments) et à réduire le risque de manque à gagner lié à l'adoption de la lutte intégrée. Ils sont effectués au profit des agriculteurs dans le cadre de l'organisation commune des marchés agricoles (OCM) ou des programmes de développement rural mis en œuvre à l'échelon régional ou national (c'est-à-dire des États membres). Ces programmes visant des produits particuliers ou des points sensibles du point de vue de l'environnement ont été répertoriés comme suit par Christensen (2013) :

- Programme de développement rural régional pour la Flandre (Belgique) mis en œuvre dans le cadre des mesures de l'axe 2 de la politique de développement rural (amélioration de l'environnement et de l'espace rural) : application de la méthode dite de la confusion sexuelle contre le carpocapse des fruits à pépins pendant au moins cinq ans et sur au moins un hectare, avec une subvention de 250 EUR l'hectare ;
- Organisation commune du marché agricole des fruits et légumes en Émilie/Romagne, Italie : utilisation de certains pesticides jointe à un système intégré de production pour les fruits et légumes assorti d'une subvention de 100 EUR l'hectare de territoire cultivable, de 300 EUR l'hectare pour les légumes et de 550 EUR l'hectare pour les fruits ;
- Programme national de développement rural en Autriche (axe 2) : rotation obligatoire des cultures pour les plantes annuelles, restrictions à l'utilisation d'engrais et de pesticides et tenue d'un registre pour les pesticides avec le versement d'une subvention de 150 EUR l'hectare pour les pommes de terre et les navets, de 250 EUR l'hectare pour les fraises, de 300 EUR l'hectare pour les fruits et le houblon et de jusqu'à 400 EUR l'hectare pour la vigne, et
- Mesures agro-environnementales en France : recours aux agents de lutte biologique, introduction d'organismes utiles, emploi de la méthode de confusion sexuelle avec une subvention de 105 EUR l'hectare pour les légumes, de 70 EUR l'hectare pour les arbres fruitiers et de 79 EUR l'hectare pour les raisins.

Il n'existe malheureusement (à notre connaissance) aucune publication évaluant les taux d'adoption de la lutte intégrée après le retrait progressif des subventions. Il n'existe pas non plus d'évaluations du pourcentage d'agriculteurs qui maintiennent au moins certaines des pratiques de lutte intégrée ou qui passent à l'agriculture biologique ou reviennent à l'agriculture conventionnelle une fois que les subventions agro-environnementales ont pris fin.

La lutte intégrée a une très longue histoire en Italie puisqu'elle y a été appliquée dès le milieu des années 1970 (Ciampitti, 2013). Elle a vraiment décollé en 1987 avec les stratégies nationales de « lutte intégrée contre les ravageurs et les maladies » et le premier financement des plans d'action régionaux (Faraglia et al., 2013). Le plan d'action national prévoit des mesures obligatoires et des mesures facultatives. Les mesures obligatoires incluent l'application de techniques de prévention et de surveillance des ravageurs, des maladies et des mauvaises herbes, l'utilisation de méthodes de lutte biologique contre les ravageurs, le recours à des pratiques agricoles appropriées et l'emploi, en priorité, des produits phytosanitaires qui impliquent le moins de risques pour la santé humaine et l'environnement.

Les mesures de lutte intégrée facultatives reposent sur des normes techniques spécifiques à chaque culture et des instructions phytosanitaires contraignantes (spécifications pour la production) qui incluent des pratiques agricoles et phytosanitaires et des restrictions sur le choix des produits phytosanitaires et le nombre de leurs applications. Le plan d'action national énonce les dispositions qui devraient être

prises par le ministère des Politiques agricoles, alimentaires et forestières ainsi que par les régions et les provinces autonomes pour faire en sorte que la formation à la lutte intégrée et les services de prévision, surveillance et information soient opérationnels, harmonisés et accessibles aux utilisateurs professionnels. Il considère aussi les mesures à prendre pour détecter la présence de pesticides dans les milieux aquatiques et les produits alimentaires.

En Allemagne, la lutte intégrée s'inscrit dans la « protection intégrée des plantes » et elle est enchâssée dans la loi sur la protection des végétaux (PflSchG) qui dispose que les actions phytosanitaires doivent impérativement être menées en respectant les bonnes pratiques professionnelles ainsi que les dispositions de la directive européenne sur l'utilisation durable des pesticides. Le plan d'action allemand inclut également toute une série d'objectifs chiffrés pour l'adoption de pratiques faisant peu appel aux pesticides (comme l'objectif visant à ramener le pourcentage de produits alimentaires d'origine nationale et étrangère dépassant la limite maximale de résidus à moins de 1 % dans chaque groupe de produits d'ici à 2021). D'autres objectifs figurant dans d'autres stratégies font aussi partie du plan d'action allemand comme celui fixé dans la stratégie nationale pour le développement durable qui vise à ce que 20 % des superficies agricoles utilisées soient consacrées à l'agriculture biologique.

En France, le plan d'action national repose sur le plan Ecophyto résultant d'une initiative nationale antérieure (Ricci, 2013). Ce plan a été adopté en 2008 à l'issue d'un vaste processus de consultation mené auprès de très nombreux acteurs concernés. Il visait à concilier les objectifs économiques et environnementaux de l'agriculture et à diminuer le recours aux produits phytosanitaires tout en maintenant un niveau de production élevé tant en quantité qu'en qualité. Il a été ultérieurement intégré dans l'objectif plus vaste de faire évoluer les modes de production en s'appuyant de plus en plus sur les principes de l'agro-écologie. Il comporte neuf axes qui incluent la lutte intégrée et prévoit le financement de nombreuses activités de recherche et de démonstration. Il a, par exemple, permis d'établir un réseau de surveillance des ravageurs qui repose sur l'observation de 12 000 champs et l'émission de bulletins hebdomadaires de santé du végétal au niveau régional. En même temps, près de 2 000 fermes pilotes ont été sélectionnées pour tester des stratégies de réduction de l'emploi des pesticides dans le cadre de nouveaux systèmes de culture.

Au Royaume-Uni, le plan d'action national décrit un certain nombre d'initiatives de lutte intégrée, mais celle-ci ne fait toutefois pas l'objet d'un cadre d'action complet. Parmi les initiatives et les mesures d'incitation non réglementaires existantes on peut citer le dispositif garantissant le respect des normes alimentaires qui oblige les producteurs à adopter des pratiques conformes aux principes généraux de la lutte intégrée. Des normes spécifiques ont été établies pour différentes cultures et un instrument d'auto-évaluation destiné aux agriculteurs (plan de lutte intégrée) est en cours d'élaboration en vue d'encourager le recours à des moyens et des techniques de lutte intégrée, tels que des systèmes d'aide à la décision et de surveillance des prédateurs et des maladies. L'aide apportée aux agriculteurs désireux de convertir leur exploitation à l'agriculture biologique dans le cadre du dispositif OELS (« Organic Entry Level Stewardship ») est aussi considérée comme une initiative de lutte intégrée.

La Belgique est l'un des États membres les plus avancés dans l'adoption de la lutte intégrée. Les autorités belges ont adopté un programme fédéral de réduction des pesticides (2013-2017) et trois programmes régionaux, les programmes wallon, flamand et bruxellois de réduction des pesticides. Plusieurs initiatives ont été prises en Wallonie, par exemple, comme le système d'avertissements « mildiou » pour les pommes de terre qui a été adopté en 2011 par 431 agriculteurs représentant environ 10 000 hectares, soit un tiers de la superficie consacrée aux pommes de terre. On peut citer l'exemple des incitations financières pour l'adoption de la lutte intégrée telles que les subsides accordés aux agriculteurs se conformant au cahier des charges officiel « production intégrée en fruits à pépins » que 49 exploitations, représentant près de 70 % des superficies de fruits à pépins cultivées en région wallonne, se sont engagées à respecter en 2011. En Wallonie, l'histoire de la lutte intégrée remonte à 1988, quand des arboriculteurs ont fondé le GAWI (Groupement d'arboriculteurs pratiquant en Wallonie les techniques intégrées) qui a développé et promu les techniques de production intégrée et créé le label FRUITNET qui garantit un impact minimal de la production sur l'environnement.

La politique néerlandaise de protection des cultures est axée sur la mise en œuvre de la lutte intégrée depuis 1990. Selon certains, les Pays-Bas enregistraient le niveau d'utilisation de pesticides, mesuré par la quantité d'ingrédients actifs, le plus élevé du monde, dans les années 1980 (Wijnands et al., 2014). Il en résultait de sérieux problèmes pour les ressources en eau potable. Les Pays-Bas ont réagi à l'aide de deux programmes à long terme. D'une part, le programme pluriannuel de protection des cultures (MJP-G), couvrant la période 1991-2000 et, d'autre part, le programme de protection durable des cultures, couvrant la période 2001-10. À la fin de cette deuxième période, c'est-à-dire entre 2008 et 2010, l'initiative « Farming with Future » a permis de soutenir et promouvoir la lutte intégrée au niveau national. Les Pays-Bas disposaient alors d'une expérience d'au moins 25 ans dans la régulation de l'utilisation de pesticides. Le MJP-G a permis de réduire de 49 % le volume d'ingrédients actifs et de 54 à 79 % les émissions de pesticides dans le sol, les eaux de surface, les eaux souterraines et l'air. Le programme de protection durable des cultures a permis, quant à lui, de réduire de 86 % les effets mesurés sur l'environnement (Wijnands et al., 2014). Dans le cadre de l'initiative « Farming with Future », une centaine de nouvelles méthodes de lutte intégrée a été testée, 80 sont devenues des stratégies utiles, efficaces et exécutoires qui ont été par la suite exposées, décrites et démontrées dans des centaines d'activités touchant des milliers d'agriculteurs (Wijnands et Brinks, 2013). Le plan d'action des Pays-Bas vise à ce que tous les utilisateurs professionnels appliquent les principes de la lutte intégrée. Il affirme aussi que le secteur et les pouvoirs publics veilleront à ce que les méthodes intégrées soient largement utilisées en mettant en place, par exemple, des mesures d'incitation financière et fiscales, un système de certification, un lien avec la politique agricole commune ou des mesures légales.

États-Unis

La lutte intégrée remonte à loin aux États-Unis puisqu'elle découle en fait d'initiatives développées dans les années 1960 en Californie pour lutter contre les ravageurs. En 1994, l'USDA et l'US EPA ont annoncé une initiative conjointe visant à ce que ses principes soient appliqués sur 75 % des surfaces cultivées aux États-Unis d'ici la fin de l'année 2000 (Jacobsen, 1996). Ce taux de mise en œuvre devait permettre de réduire le recours aux pesticides dans les exploitations agricoles du pays. L'USDA a proposé de mesurer le niveau d'adoption de la lutte intégrée à l'aide du concept « PAMS », acronyme anglais pour prévention, évitement, surveillance et élimination (mentionné plus haut). Pour être reconnu pratiquer la lutte intégrée, un exploitant devait mettre en œuvre au moins trois de ces quatre éléments. En 2001, une enquête menée par le NASS (Service national de statistiques agricoles) de l'USDA a conclu qu'un certain niveau de lutte intégrée était pratiqué par 71 % des exploitations, contre 51 % au moment du lancement de l'initiative.

La réduction anticipée du recours aux pesticides n'a toutefois pas eu lieu. D'après le NASS, sur la base de la quantité d'ingrédients actifs appliqués, celui-ci a augmenté d'environ 4 % entre 1994 et 2000 (c'est-à-dire pendant la période d'application de l'initiative en faveur de la lutte intégrée). En 2000-01, l'Office général de comptabilité américain (General Accounting Office - GAO) a consacré une étude (« l'étude GAO ») au programme de lutte intégrée pour faire le point de l'adoption de ses pratiques par les agriculteurs américains. Il a conclu que le taux d'application était un indicateur trompeur des progrès réalisés dans la voie de l'atteinte de l'objectif initial de la lutte intégrée qui était de réduire le recours aux pesticides chimiques. Il a estimé que quatre conditions indispensables au succès de la mise en œuvre de l'initiative n'étaient pas réunies :

- Personne n'était en fait responsable des efforts fédéraux dans le domaine de la lutte intégrée ;
- Ces efforts étaient insuffisamment coordonnés entre les organismes fédéraux et avec le secteur privé ;
- Les résultats visés n'étaient pas clairement énoncés ou hiérarchisés, et
- Aucune méthode n'avait été élaborée pour mesurer les résultats environnementaux et économiques de la lutte intégrée.

En mai 2004, le comité fédéral pour la coordination de la lutte intégrée a adopté une feuille de route pour le programme national de lutte intégrée contre les ennemis des cultures (« IPM Program ») à l'issue de vastes consultations menées, sur une longue période, avec les acteurs concernés. Cette feuille de route définit les orientations stratégiques de la lutte intégrée sur les plans de la recherche, de la mise en œuvre et de l'évaluation pour tous les ravageurs et dans tous les environnements du territoire national (Coble et Ortman, 2009). Cela inclut les espaces cultivés, structurels, ornementaux, engazonnés, muséaux, les ravageurs qui présentent un risque pour la santé de la population et de la faune et de la flore sauvages ainsi que les espèces invasives terrestres et aquatiques. Coble et Ortman (2009) estiment que l'objectif général de la feuille de route est d'améliorer les bienfaits économiques de l'adoption des pratiques de lutte intégrée et de réduire les risques potentiels que les ravageurs eux-mêmes ou les pratiques phytosanitaires présentent pour la santé humaine et l'environnement.

L'avantage économique de l'adoption des stratégies de lutte intégrée est un aspect qui est rarement mentionné dans les programmes de l'UE et dans les plans d'action des États membres concernant la lutte intégrée. Il ressort de l'expérience de l'agriculture américaine que la part des pesticides dans l'ensemble des dépenses consacrées aux intrants agricoles a augmenté puisqu'elle est passée de 3-4 % dans les années 50 à 7-8 % dans les années 90 (Mullen et al., 2003). Coble et Ortman (2009) estiment qu'il ne faudrait pas axer l'analyse coût – avantages des stratégies de lutte intégrée proposées uniquement sur les coûts monétaires, mais sur les quatre principaux paramètres suivants : coûts monétaires, santé et rôle environnementaux/écologiques, bienfaits esthétiques et santé humaine.

Le programme fédéral de lutte intégrée est actuellement géré par le comité fédéral pour la coordination de la lutte intégrée (FIPMCC) établi en 2003, qui regroupe des représentants de tous les organismes fédéraux consacrant des programmes à la lutte intégrée, que ce soit sous l'angle de la recherche, de la mise en œuvre ou de la vulgarisation. Pour répondre à la critique formulée dans l'étude GAO, le FIPMCC fournit à l'ensemble des organismes des conseils sur les politiques, les programmes et les budgets relatifs à la lutte intégrée et il constitue un centre de communication entre les organismes fédéraux dotés de programmes de lutte intégrée pour garantir l'efficacité des activités menées. Il s'est efforcé de définir, hiérarchiser et énoncer les objectifs poursuivis par les autorités fédérales à l'aide de la feuille de route en veillant à ce que les efforts et les ressources soient focalisés sur les objectifs et que les progrès accomplis dans la réalisation de ces objectifs puissent être mesurés comme il convient.

Chapitre 5

Dans quelle mesure la biotechnologie agricole moderne est-elle déterminante pour une productivité plus durable ?

Le présent chapitre propose une brève synthèse des effets possibles des biotechnologies agricoles sur la productivité et le rendement d'efficacité des ressources dans les pays de l'OCDE, comparés à ceux de l'agriculture conventionnelle, et met en lumière certains des grands enjeux stratégiques qui y sont associés. Bien qu'il aborde la gamme complète des outils et applications de la biotechnologie en agriculture, ce chapitre porte plus particulièrement sur les cultures résistantes aux maladies, aux insectes et aux pesticides, et sur les cultures tolérantes à la sécheresse.

Principaux messages

- La biotechnologie moderne peut trouver plusieurs applications dans le domaine de l'agriculture, mais, dans certains pays, des éléments ont suscité de nombreuses polémiques et la commercialisation des plantes issues des biotechnologies s'est pour l'instant limitée à quelques produits, principalement des aliments pour animaux, et à un nombre restreint de caractères.
- La biotechnologie moderne peut offrir les avantages suivants : i) accélérer les programmes classiques d'amélioration génétique et fournir aux agriculteurs des semis et plantations indemnes de maladies ; ii) créer des plantes résistantes aux ravageurs et maladies, qui se substituent aux produits chimiques toxiques ; iii) apporter des instruments de diagnostic et des vaccins afin d'aider à la lutte contre les maladies du bétail et leurs effets dévastateurs ; iv) pour les produits de deuxième et troisième générations issus des technologies modernes, répondre à de nouveaux enjeux plus complexes, tels que la tolérance à la sécheresse et le rendement de la consommation d'azote. L'expérience montre que, selon les caractères, les cultures de plantes génétiquement modifiées de première génération ont en général des retombées économiques positives, alors que les répercussions sur la biodiversité sont ambiguës et dépendent du contexte.
- Les préoccupations liées aux risques possibles pour l'environnement, à l'avis des consommateurs et aux conditions établies par les institutions continuent d'exercer une influence décisive sur l'adoption des biotechnologies agricoles modernes et les conséquences qui en découlent.

Qu'est-ce que la biotechnologie et quelle est son utilisation dans l'agriculture ?

L'innovation à travers les sciences et les techniques

Le présent chapitre a pour principal objectif de présenter une brève synthèse des retombées possibles des biotechnologies agricoles sur la productivité et l'efficacité des ressources dans les pays de l'OCDE par rapport aux pratiques de l'agriculture conventionnelle, et de mettre en lumière certains des grands enjeux stratégiques qui y sont associés. Il n'est pas ici question de fournir un aperçu exhaustif de l'ensemble de la gamme des outils et applications de la biotechnologie dans l'agriculture. Le génie génétique dans le secteur des plantes de cultures, en particulier, est le domaine où la biotechnologie a les retombées les plus directes sur l'agriculture dans de nombreux pays et soulève des enjeux pressants dans l'opinion publique et du point de vue de l'action des pouvoirs publics. Par conséquent, bien que le présent chapitre aborde la gamme complète des outils et applications de la biotechnologie dans l'agriculture, il est axé principalement sur les plantes de culture résistantes aux maladies, aux insectes et aux pesticides, et celles tolérantes à la sécheresse.¹

La biotechnologie comprend plusieurs technologies interdépendantes dont les applications présentes et futures dans de nombreux domaines sont très variées. Elle présente un intérêt crucial pour les responsables politiques. La biotechnologie sert actuellement à résoudre des problèmes dans tous les domaines de la production et la transformation agricoles, et offre la possibilité d'aider à relever les défis de la croissance verte. Elle contribue à l'essor de nouvelles variétés végétales et animales, de nouveaux instruments de diagnostic, de l'amélioration génétique et de médicaments et vaccins vétérinaires. Elle peut éliminer des contraintes de production qui sont plus complexes ou plus tenaces lorsqu'elles sont traitées par des méthodes classiques de sélection. Elle peut accélérer les programmes classiques de sélection et fournir aux agriculteurs des semis et plantations indemnes de maladies. Elle peut également créer des produits végétaux résistants aux ravageurs et maladies, qui se substituent aux produits chimiques toxiques pour l'environnement et la santé humaine, et elle peut apporter des instruments de diagnostic et des vaccins afin d'aider à la lutte contre les maladies du bétail et leurs effets dévastateurs.

Le regain d'intérêt pour les biotechnologies a vu le jour parallèlement à l'émergence de la notion de bioéconomie – qui désigne les secteurs économiques fondés sur l'innovation bioscientifique et biotechnologique (OCDE, 2009). Ainsi, le recours aux ressources renouvelables, qui devrait s'accroître

sensiblement au fil des années, peut faire appel à des propriétés particulières des plantes qui peuvent être mises au point à l'aide des techniques du génie génétique.

La plupart des stratégies ou des orientations de la bioéconomie qu'ont adoptées les pays de l'OCDE font référence à la biotechnologie. Selon le rapport *National Bioeconomy Blueprint*, par exemple, publié par les États-Unis en 2012 – et qui reconnaît que la bioéconomie est une priorité politique, en raison du potentiel de croissance économique et des avantages qu'elle offre à la société –, la biotechnologie, y compris la biotechnologie agricole, peut apporter une contribution importante à la bioéconomie à travers la mise au point de produits et procédés innovants, la création d'emplois et la croissance – le « verdissement » – du secteur agricole.

L'étude de l'OCDE sur la bioéconomie en 2030 préconise l'adoption rapide de biotechnologies afin d'améliorer les diagnostics et les variétés végétales et animales issues de l'agriculture. Or, la mise en pratique de l'intégralité du potentiel de la bioéconomie à l'horizon 2030 nécessite l'instauration d'un cadre de l'action publique capable de répondre aux enjeux technologiques, économiques et institutionnels (OCDE, 2009).

Les biotechnologies agricoles modernes comprennent un ensemble d'outils que les scientifiques emploient afin de comprendre et modifier le patrimoine génétique des organismes qui entrent en jeu dans la production ou la transformation des produits agricoles : plantes génétiquement modifiées, notamment résistantes aux insectes et aux herbicides, ou animaux transgéniques, tels que les porcs capables de digérer de la cellulose ou les poissons transgéniques, notamment le saumon à croissance accélérée. La biotechnologie moderne en général désigne la combinaison des sciences de la vie et de techniques qui comprennent la recombinaison de l'ADN (Tramper et Zhu, 2011). Loin de se limiter aux plantes cultivées et aux animaux d'élevage, ses applications concernent également les produits alimentaires tels que les fromages, les produits de boulangerie, le vin et la bière, mais aussi un large éventail de produits pharmaceutiques et d'autres secteurs de la bioéconomie.

La définition de la biotechnologie par l'OCDE est délibérément large et couvre toute la biotechnologie moderne, mais aussi beaucoup d'activités classiques ou mal définies. Cette définition est la suivante : l'application de la science et de la technologie à des organismes vivants, de même qu'à ses composantes, produits et modélisations, pour modifier des matériaux vivants ou non-vivants aux fins de la production de connaissances, de biens et de services (encadré 5.1)^{2,3}.

Selon ce sens large, la définition de la biotechnologie recoupe de nombreux outils et techniques courants dans l'agriculture et la production alimentaire, notamment la fermentation et le brassage⁴. La méthode de la sélection végétale classique, par exemple, est utilisée depuis des centaines d'années pour mettre au point de nouvelles variétés de produits végétaux. La biotechnologie améliorée la plus sujette à controverse est celle des plantes transgéniques, également appelées organismes obtenus par génie génétique ou génétiquement modifiés, plus couramment désignées comme OGM⁵. Le génie génétique est ou outil de « sélection de précision », qui permet l'insertion de gènes porteurs de caractères intéressants provenant d'autres espèces. La diversité génétique des plantes cultivées est un facteur crucial pour la capacité de l'agriculture à s'adapter au changement climatique, renforcer la résistance des cultures aux ravageurs et maladies et répondre à l'évolution des préférences des consommateurs. Actuellement, l'amélioration génétique des cultures suscite des inquiétudes du fait qu'elle n'utiliserait pas suffisamment la diversité génétique (van Heerwaarden et al., 2013).

Il convient toutefois de souligner que la biotechnologie agricole moderne ne se limite pas au génie génétique. Les avancées les plus significatives de la biotechnologie agricole proviennent, par exemple, de la recherche sur les structures des génomes et les mécanismes génétiques expliquant des caractères importants d'un point de vue économique. Les progrès rapides de la génomique, qui révolutionnent la compréhension du fonctionnement des gènes, des cellules, des organismes et des écosystèmes, ouvrent de nouvelles perspectives à la sélection assistée par marqueurs et à la gestion des ressources génétiques : ils fournissent des informations sur l'identité, l'emplacement, l'impact et la fonction des gènes responsables de ces caractères - informations consolidant un savoir qui peut inciter de plus en plus à appliquer la biotechnologie dans tous les secteurs de l'agriculture (encadrés 5.2 et 5.3).

Encadré 5.1. Définition de la biotechnologie par l'OCDE

Définir la biotechnologie

La définition unitaire

La définition unitaire provisoire de la biotechnologie est délibérément large. Elle couvre toute la biotechnologie moderne, mais aussi beaucoup d'activités classiques ou mal définies. Pour cette raison, la définition unitaire devrait **toujours** être accompagnée de la définition par liste, qui facilite les opérations dans la pratique statistique. Cette définition unitaire est la suivante :

L'application de la science et de la technologie à des organismes vivants, de même qu'à ses composantes, produits et modélisations, pour modifier des matériaux vivants ou non-vivants aux fins de la production de connaissances, de biens et de services.

La définition par liste-

La liste suivante de techniques de biotechnologie s'emploie comme un guide d'interprétation de la définition unitaire. Cette liste est indicative et non exhaustive et il est à prévoir qu'elle changera au cours du temps avec l'évolution des activités de biotechnologie et de la collecte de données.

La définition par liste- des techniques de biotechnologie est la suivante :

ADN/ARN : Génomique, pharmacogénomique, sondes géniques, génie génétique, détermination de séquences/synthèse/amplification de l'ADN/ARN, profil de l'expression génique et utilisation de la technologie antisense.

Protéines et autres molécules : Détermination de séquences/synthèse/ingénierie des protéines et peptides (y compris les hormones à grosse molécule) ; amélioration des méthodes d'administration des médicaments à grosse molécule ; protéomique, isolation et purification des protéines, signalisation, identification des récepteurs cellulaires.

Culture et ingénierie des cellules et des tissus : Culture de cellules/tissus, génie tissulaire (y compris les structures d'échafaudage tissulaires et le génie biomédical), fusion cellulaire, vaccins/stimulants immunitaires, manipulation embryonnaire.

Techniques biotechnologiques des procédés : Fermentation au moyen de bioréacteurs, procédés biotechnologiques, lixiviation biologique, pulpation biologique, blanchiment biologique, désulfuration biologique, biorestauration, biofiltration et phytorestauration.

Vecteurs de gènes et d'ARN : Thérapie génique, vecteurs viraux.

Bioinformatique : Construction de bases de données sur les génomes, les séquences de protéines ; modélisation de procédés biologiques complexes, y compris les systèmes biologiques.

Nanobiotechnologie : Applique les outils et procédés de nano/microfabrication afin de construire des dispositifs permettant d'étudier les biosystèmes, avec des applications dans l'administration des médicaments, des diagnostics, etc.

Source : www.oecd.org/fr/sti/biotech/definitionstatistiqueedelabiotechnologiemiseajouren2005.htm

Encadré 5.2. Génomique : la nouvelle révolution

La génomique, ou étude de l'ensemble du matériel génétique d'un organisme, donne lieu à des avancées remarquables en biotechnologie. Non seulement elle crée de nouveaux outils et techniques, mais elle produit aussi des quantités considérables de données biologiques que les scientifiques peuvent analyser. Grâce à la génomique, il est possible d'identifier rapidement les gènes responsables de caractères intéressants et de les utiliser pour créer de nouveaux produits issus des biotechnologies.

La génomique n'implique pas nécessairement de modification génétique ou de biologie de synthèse. À l'inverse, il est possible d'appliquer les technologies génomiques à la sélection végétale et animale afin d'améliorer considérablement l'efficacité de la sélection des caractères. Cet avantage est particulièrement important dans le cas de la sélection arboricole, compte tenu du laps de temps nécessaire à la croissance et à l'expression des caractères dans ce domaine. La génomique peut remédier à plusieurs problèmes de l'agriculture durable. Par exemple, l'association de caractères de tolérance à la sécheresse et à la chaleur avec la capacité d'une plante à produire ses propres engrais résout plusieurs difficultés d'importance vitale, notamment liées à la sécurité hydrique, à la sécurité alimentaire, à l'épuisement des ressources et au changement climatique.

Encadré 5.3. Bioenrichissement : la création du *riz doré*

Le bioenrichissement – création de plantes produisant ou accumulant des micronutriments – vise à améliorer la qualité nutritionnelle des produits végétaux de base par l'amélioration génétique et sert à la production d'aliments fonctionnels. L'amélioration génétique peut se faire soit par des moyens classiques ou traditionnels, soit par des méthodes de génie génétique. Les plantes produites par bioenrichissement sont souvent riches en nutriments tels que le fer, le zinc et la vitamine A. Le bioenrichissement se différencie de l'enrichissement ordinaire en ce qu'il privilégie l'enrichissement nutritif de l'apport des plantes pendant leur croissance, au lieu d'ajouter des nutriments aux aliments au cours de leur transformation. Le *riz doré* est un bon exemple de plante bioenrichie. Dans ce cas précis, le bioenrichissement a été obtenu par modification génétique du riz afin qu'il produise et accumule de la pro-vitamine A dans ses grains, alors que ce phénomène n'a pas lieu naturellement. D'abord mis au point en Suisse et en Allemagne à la fin des années 1990, le *riz doré* se cultive maintenant ailleurs – bien que ses détracteurs dénoncent que le meilleur moyen de combler les carences en vitamine A n'est peut-être pas la création d'un cultivar de riz (Scoones, 2002).

Source : Hall and Dorai (2010), "What have been the farm-level economic impacts of the global cultivation of GM crops? Systematic review", www.environmentalevidence.org/wp-content/uploads/2014/07/CEE11-002.pdf.

Le génie génétique dans l'agriculture n'en est qu'à ses balbutiements.

Les aliments génétiquement modifiés ont été classés en trois générations. La première génération concerne les caractères axés sur les intrants, comme la résistance aux ravageurs et la tolérance aux herbicides, qui ont pour but d'accroître les rendements ou de réduire les coûts de production. La deuxième génération privilégie les aspects permettant d'ajouter de la valeur ou axés sur le rendement, notamment les caractères nutritionnels et ceux propres à la transformation (par exemple, vitamines complémentaires pouvant renforcer l'attrait de l'aliment vis-à-vis des consommateurs, ou semences enrichies en éléments nutritifs pour les aliments du bétail). Les caractères des produits végétaux de troisième génération permettent de les utiliser pour produire des produits pharmaceutiques, améliorer la transformation des combustibles d'origine biologique ou fabriquer des produits autres qu'alimentaires ou textiles (Fernandez-Cornejo et al., 2014). À l'heure actuelle, les plantes transgéniques disponibles sur le marché se limitent au type de première génération, bien que les trois générations aient atteint différentes étapes de recherche et développement.

Dans le cas des plantes, la biotechnologie agricole comprend un large éventail de techniques modernes de sélection végétale. La plus connue est la modification génétique, même si le terme désigne également des techniques telles que la sélection assistée par marqueurs, qui améliore l'efficacité de la sélection classique sans impliquer la transformation de matériel génétique isolé dans le génome des plantes. La biotechnologie vise principalement les aspects suivants : i) les caractères agronomiques permettant d'améliorer les rendements et la résistance aux agressions, notamment la chaleur, le froid, la sécheresse ou la salinité ; ii) la tolérance aux herbicides, afin que les plantes résistent à l'action d'herbicides spécifiques ; iii) la résistance aux ravageurs, afin d'améliorer la capacité de la plante à résister aux insectes ravageurs, virus, bactéries, champignons ou nématodes ; iv) les caractéristiques qualitatives des produits, comme la modification de la couleur ou du goût, l'adaptation de la teneur en amidon ou de la composition en acides gras pour améliorer la valeur nutritionnelle ou les caractéristiques de la transformation, et la production de composés médicaux et industriels.

Dans le cas du bétail, la biotechnologie trouve son application dans trois grandes composantes : la sélection, la multiplication et la santé. Les diagnostics peuvent servir à repérer des maladies héréditaires graves, afin de retirer les animaux atteints de la population reproductrice. L'application commerciale la plus répandue de la biotechnologie dans le domaine de la sélection animale est l'utilisation de la sélection assistée par marqueurs afin d'améliorer la précision et la rapidité des programmes classiques de sélection, par l'emploi de marqueurs biologiques permettant d'identifier certains caractères. La sélection assistée par marqueurs est couramment utilisée dans les pays membres de l'OCDE et dans les autres.

Cependant, l'intérêt des caractères sélectionnés par la biotechnologie pour un programme de croissance verte dépend en très grande partie des objectifs des initiatives d'amélioration des cultures. Si les méthodes de sélection visant à mettre au point des variétés tolérantes à la sécheresse et résistantes

aux ravageurs peuvent avoir des retombées anodines sur la croissance verte, ces mêmes techniques pourraient être utilisées afin d'obtenir des caractères qui ne seraient pas intrinsèquement durables, comme la sensibilité aux engrais chimiques.

Une adoption rapide mais restreinte des cultures génétiquement modifiées

L'utilisation de plantes issues des biotechnologies (transgéniques) est en constante augmentation depuis leur première culture commerciale, en Amérique du Nord en 1996. Entre 1996 et 2014, la superficie des cultures génétiquement modifiées dans le monde a plus que centuplé – passant de 1.7 à 181.5 millions d'hectares. Cette superficie représente légèrement plus de 12 % des terres labourables de la planète et est consacrée principalement au soja, au maïs, au coton et au colza oléagineux (canola) (James, 2015).

L'année 2014 a été marquée par la multiplication par cinq, en un an, de la superficie consacrée à la première variété de maïs transgénique tolérant à la sécheresse (dont les besoins en eau par hectare sont moins importants) aux États-Unis (de 50 000 ha en 2013 à 275 000 ha en 2014).

Les 28 États ayant adopté la culture de plantes génétiquement modifiées l'ont fait de manière inégale et la commercialisation ne concerne que quelques espèces et quelques caractères. Cinq pays (les États-Unis, le Brésil, l'Argentine, le Canada et l'Inde) étaient responsables de près de 90 % de la surface mondiale des cultures de plantes génétiquement modifiées en 2014, et deux plantes (le soja et le maïs) ainsi que deux caractères (la résistance aux insectes et la tolérance aux herbicides) représentaient plus de 70 % de la surface mondiale des cultures de plantes génétiquement modifiées (graphique A5.1, tableau A5.1).

Dans le monde, la tolérance aux herbicides, propre à près de la moitié de la surface de culture de plantes génétiquement modifiées, est le principal caractère introduit, suivie par la résistance aux insectes. L'empilement des caractères est un aspect de plus en plus important des cultures génétiquement modifiées (28 % des 181 millions d'hectares dans le monde), 13 pays ayant semé des cultures issues des biotechnologies et comportant au moins deux caractères transgéniques en 2014. Le soja tolérant aux herbicides est la culture transgénique commerciale la plus répandue (48 % du total de la surface mondiale des cultures transgéniques, principalement au Brésil, aux États-Unis et en Argentine), suivi par le maïs Bt (33 %, principalement aux États-Unis), le coton Bt (14 %, principalement en Inde, en Chine, aux États-Unis et au Pakistan) et le canola tolérant aux herbicides (principalement au Canada et aux États-Unis) (James, 2015).

Les données relatives aux tendances de l'adoption révèlent les constats suivants : 1) le taux et la vitesse d'adoption des plantes tolérantes aux herbicides sont supérieurs à ceux des plantes résistantes aux insectes ; ii) le soja tolérant aux herbicides est la plante dont le taux d'adoption est le plus élevé au monde ; iii) aux États-Unis, la betterave sucrière tolérante aux herbicides est la plante dont la vitesse d'adoption est la plus rapide ; iv) l'adoption du maïs transgénique associant plusieurs caractères a connu une nette progression.

Les différences entre les tendances de l'adoption peuvent s'expliquer par celles entre les problèmes à résoudre dans les diverses cultures. Par exemple, la prédominance des variétés résistantes aux herbicides est liée à l'utilisation de glyphosate et de la vaste superficie où son application est possible. Le glyphosate et autres herbicides totaux permettent de lutter contre presque toutes les plantes et peuvent être appliqués dans différentes conditions agro-climatiques ; leur application est facile. En outre, le recours à ces herbicides peut encourager la suppression du travail du sol, du fait qu'il élimine la nécessité du désherbage mécanique (dans le cas du soja et du canola, par exemple).

Encadré 5.4. Les cultures issues des biotechnologies aux États-Unis

Fournisseurs de semences génétiquement modifiées et prestataires de services technologiques

Le nombre d'introductions en champ pour l'essai de variétés génétiquement modifiées approuvées par le service d'inspection de la santé animale et végétale du ministère de l'Agriculture des États-Unis (APHIS), qui constitue un bon indicateur des activités de recherche-développement de la biotechnologie agricole, a progressé de 4 en 1995 à 1 194 en 2002, avant de s'établir à environ 800 par an en moyenne par la suite. De même, la mise sur le marché de variétés génétiquement modifiées possédant des propriétés agronomiques (notamment la résistance à la sécheresse) est montée en flèche entre 2005 et 2013, passant de 1 043 à 5 190. En septembre 2013, environ 7 800 mises sur le marché avaient été approuvées pour du maïs transgénique, 2 200 pour du soja transgénique, plus de 1 100 pour du coton transgénique et environ 900 pour des pommes de terre transgéniques. Les variétés concernées sont tolérantes aux herbicides (6 772 mises sur le marché), sont résistantes aux insectes (4 809), apportent des améliorations qualitatives au produit, gustatives ou nutritionnelles (4 896), ou possèdent des propriétés agronomiques telles que la résistance à la sécheresse (5 190) et la résistance aux virus ou aux champignons (2 616). Les institutions ayant reçu le plus grand nombre d'autorisations de mise sur le marché sont Monsanto (6 782), Pioneer/DuPont (1 405), Syngenta (565) et le service de recherche agricole du ministère de l'Agriculture des États-Unis (370). En septembre 2013, l'APHIS avait reçu 145 demandes de dérogation (permettant la vente de semences transgéniques) et en avait approuvé 96 : 30 pour du maïs ; 15 pour du coton ; 11 pour des tomates ; 12 pour du soja ; 8 pour du colza/canola ; 5 pour des pommes de terre ; 3 pour des betteraves sucrières ; 2 pour des papayes ; 2 pour du riz ; 2 pour des courges ; 1 pour de la luzerne ; 1 pour des prunes ; 1 pour des roses ; 1 pour du tabac ; 1 pour du lin ; 1 pour de la chicorée.

Agriculteurs

Trois plantes (maïs, coton et soja) occupent l'essentiel de la surface consacrée aux cultures issues des biotechnologies. Environ 68 millions d'hectares de ces cultures génétiquement modifiées ont été ensemencées en 2013, ce qui équivaut à environ la moitié de la surface totale des terres cultivées. La même année, les variétés tolérantes aux herbicides occupaient 93 % de la superficie des cultures de soja, 85 % de la superficie des cultures de maïs et 82 % de la superficie des cultures de coton. Les agriculteurs avaient ensemencé 75 % de la superficie emblavée en coton et 76 % de la superficie emblavée en maïs de variétés résistantes aux insectes (Bt), afin de lutter contre les ravageurs.

L'adoption de variétés Bt améliore les rendements en diminuant les pertes dues aux insectes. À l'inverse, les données issues de l'observation de l'incidence des plantes tolérantes aux herbicides sur les rendements sont hétérogènes. En général, les semences issues des biotechnologies et emplant au moins deux caractères donnent un meilleur rendement que les semences conventionnelles ou que les semences n'ayant qu'un caractère transgénique. La superficie ensemencée de maïs de ce type est passée de 1 % de la superficie totale consacrée à la culture du maïs en 2000 à 71 % en 2013. De même, les variétés de coton emplant plusieurs caractères transgéniques représentaient 67 % de la superficie des cultures de coton en 2013.

La culture de coton Bt et de maïs Bt s'associe à de meilleurs rendements nets lorsque la pression des ravageurs est forte. L'influence de l'adoption de variétés tolérantes aux herbicides sur les rendements nets est variable et dépend principalement de l'ampleur de la baisse des coûts de la lutte contre les adventices et de la hausse des coûts des semences. L'adoption du soja tolérant aux herbicides va de pair avec une hausse du revenu total des ménages agricoles, car le soja tolérant aux herbicides demande moins d'intervention et permet aux agriculteurs d'enranger des recettes en exerçant des activités extra-agricoles ou en élargissant leurs opérations.

L'utilisation d'insecticides a reculé avec l'adoption de plantes résistantes aux insectes. En règle générale, les producteurs emploient moins d'insecticides lorsqu'ils cultivent du maïs Bt et du coton Bt. Dans les cultures de maïs, l'utilisation d'insecticides par les exploitants a diminué, qu'ils aient adopté ou non des semences génétiquement modifiées – en 2010, seuls 9 % de l'ensemble des cultivateurs de maïs aux États-Unis employaient des insecticides. L'utilisation d'insecticides dans les exploitations de maïs est passée de 235,39 g par hectare cultivée en 1995 à 22,41 g en 2010. L'obligation de mettre en place une superficie refuge minimale (ensemencement d'une surface suffisante de maïs non Bt à proximité de toute culture Bt) a aidé à retarder l'évolution de la résistance des insectes au gène Bt. Or, des éléments montrent que dans plusieurs zones, les insectes développent une résistance à certains caractères Bt.

L'adoption de plantes tolérantes aux herbicides a permis aux agriculteurs de remplacer par le glyphosate des herbicides plus toxiques et plus persistants. Aux États-Unis, néanmoins, le recours abusif des cultivateurs au glyphosate et l'appauvrissement de la diversité des pratiques de lutte contre les mauvaises herbes ont contribué à la progression d'une résistance au glyphosate dans 14 espèces et biotypes adventices. Bien que le glyphosate soit moins dangereux pour l'environnement que les herbicides qu'il remplace, la résistance des mauvaises herbes peut engendrer une hausse du coût de leur élimination, une baisse des rendements et des bénéfices et une intensification de l'utilisation d'herbicides moins respectueux de l'environnement. L'application des pratiques optimales de lutte contre les mauvaises herbes pourrait retarder la progression de cette résistance et préserver l'efficacité des cultures tolérantes aux herbicides. Ces pratiques comprennent les actions suivantes : le traitement par plusieurs herbicides suivant différents modes d'action ; la rotation des cultures ; l'utilisation de lots de semences sans graines d'adventices ; l'inspection routinière des champs ; le nettoyage du matériel afin de limiter la propagation des mauvaises herbes d'un champ à l'autre ; l'entretien des bordures des champs.

Encadré 5.4. Les cultures issues des biotechnologies aux États-Unis (suite)

Le prix des semences de soja et de maïs transgéniques a augmenté d'environ 50 % en termes réels (corrige de l'inflation) entre 2001 et 2010. Le prix des semences de coton génétiquement modifié a progressé plus vite encore. En termes de rendement, l'avantage du maïs Bt et du coton Bt sur les semences classiques s'est accru ces dernières années étant donné que de nouveaux caractères Bt ont été introduits et que l'empilement des caractères est devenu possible. La culture de coton Bt et de maïs Bt reste plus rentable que celle de variétés conventionnelles, en termes de rendement net.

Source : Fernandez-Cornejo, J., S. Wechsler, M. Livingston et L. Mitchell (2014), *Genetically Engineered Crops in the United States*, ministère de l'Agriculture des États-Unis, Economic Research Service, Economic Research Report Number 162, <http://www.ers.usda.gov/media/1282246/err162.pdf>.

L'étendue géographique restreinte des cultures issues des biotechnologies s'explique également par les politiques publiques. Bien que depuis 1996, plusieurs pays de l'OCDE aient autorisé officiellement l'introduction de plantes génétiquement modifiées dans l'environnement ou leur utilisation alimentaire, leur culture reste limitée à neuf pays de l'OCDE – les États-Unis, le Canada, le Mexique, l'Australie, l'Espagne, le Portugal, la République tchèque, la Slovaquie et le Chili pour les semences (tableau A5.1). Les pays de l'OCDE ayant délivré le plus grand nombre d'autorisations de l'utilisation alimentaire de plantes génétiquement modifiées sont, par ordre décroissant, le Japon, les États-Unis, le Canada et le Mexique (James, 2015)⁶⁷. Les informations présentées au tableau A5.1 montrent clairement que les deux pays de l'OCDE où les plantes issues des biotechnologies ont le plus d'importance sont les États-Unis (qui y consacrent 70.1 millions d'hectares, avec un taux d'adoption d'environ 90 % en moyenne dans toutes les cultures) et le Canada.

Dans l'Union européenne, une seule culture de plantes génétiquement modifiées est actuellement autorisée, celle du maïs Bt résistant aux insectes (MON810)⁶⁸. Son exploitation commerciale se fait sur des surfaces relativement faibles. Le maïs Bt (MON810) vise à protéger la culture contre un ravageur, la pyrale du maïs. En 2014, il était cultivé dans cinq États membres de l'UE (l'Espagne, le Portugal, la République tchèque, la Slovaquie et la Roumanie), sur une superficie totale de 143 016 hectares (dont 131 538 hectares en Espagne). Il représente 1.6 % des 9.6 millions d'hectares consacrés à la culture du maïs dans l'Union européenne (et 30 % de la culture du maïs en Espagne). Les nouveaux caractères, gènes et cultures issus des biotechnologies mais dont l'exploitation commerciale n'est pas autorisée comprennent des variétés culturales apportant différentes qualités nutritionnelles ou industrielles (comme une conversion plus facile en biocarburant) ou une meilleure tolérance aux agressions de l'environnement telles que le gel, la sécheresse ou la salinité.

L'Union européenne connaît des différences considérables dans l'attitude de ses États membres vis-à-vis de l'utilisation des plantes génétiquement modifiées, qui se traduisent notamment par des avis très divers sur les répercussions de ces cultures sur la biodiversité (CE, 2011). Plusieurs pays de l'UE ont choisi d'adopter le principe de précaution et neuf d'entre eux ont mis en œuvre une interdiction nationale des cultures de plantes génétiquement modifiées (l'Allemagne, l'Autriche, la Bulgarie, la France, la Grèce, la Hongrie, l'Italie, le Luxembourg et la Pologne). Une autorisation officielle doit obligatoirement être obtenue avant l'introduction de tout organisme génétiquement modifié ou la commercialisation de tout produit obtenu à partir d'OGM. Les demandes d'autorisation de mise sur le marché d'un produit (à savoir, semences de culture ou aliments) sont traitées au niveau européen, alors que les demandes d'introduction d'organismes génétiquement modifiés à des fins de recherche-développement sont examinées à l'échelle nationale (encadré 5.5).

Encadré 5.5. Cadre législatif de l'UE relatif aux OGM

L'autorisation d'importation, de culture et de transformation d'OGM au sein de l'UE requiert l'obtention préalable d'une autorisation à l'échelle européenne, fondée sur une évaluation scientifique des risques et de la sécurité pour la santé et l'environnement menée par l'Autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA). L'évaluation des risques des plantes génétiquement modifiées à usage non alimentaire comprend, entre autres, l'évaluation de leur pérennité, leur caractère envahissant et leur avantage ou désavantage sélectif. Alors qu'il est reconnu que la culture des OGM est un sujet aux fortes composantes nationales ou locales, la législation européenne offrait des possibilités limitées aux États membres pour qu'ils adoptent la culture d'OGM sur leur territoire. Les États membres pouvaient seulement restreindre ou interdire la culture d'OGM en invoquant des clauses de sauvegarde lorsque des risques graves pour la santé humaine, la santé animale et l'environnement avaient été identifiés après la mise en culture de l'OGM en question. En 2009, 13 États membres ont demandé à la Commission européenne d'accorder plus de flexibilité dans ce domaine.

En mars 2015, une modification de la législation a été adoptée afin d'accroître la flexibilité dont disposent les États membres de l'UE, à travers l'élargissement des critères de refus opposables aux demandes d'autorisation de culture d'OGM sur leur territoire. Les États membres peuvent, en particulier, exiger lors de la procédure d'autorisation d'un OGM que l'étendue géographique concernée par l'autorisation soit corrigée afin d'en exclure une partie ou l'intégralité de leur territoire. Par ailleurs, la modification législative permet aux États membres de choisir de ne pas appliquer l'autorisation de l'UE à leur territoire (c'est-à-dire, de limiter ou interdire la culture des OGM autorisés à l'échelle européenne pour des « raisons impérieuses », liées, entre autres, aux objectifs de leur politique environnementale, à la planification urbaine et rurale, à l'affectation des terres, aux retombées socioéconomiques, aux objectifs de la politique agricole et à la politique générale). Cependant, la modification législative ne permet pas aux États membres d'interdire un OGM en invoquant des risques pour la santé ou l'environnement : cette décision reste du ressort de l'organe européen de sécurité des aliments, l'EFSA, et des clauses de sauvegarde.

Source : http://ec.europa.eu/food/plant/gmo/legislation/future_rules_en.htm

Les attentes en matière de rentabilité reposent principalement sur les rendements et les coûts relatifs

Des retombées économiques positives mais variées à l'échelle des exploitations

Comme toute pratique de gestion des exploitations agricoles, la biotechnologie a des retombées économiques sur le bien-être des agriculteurs. Les gains de productivité englobent des rendements supérieurs de tous les facteurs de production ou des besoins inférieurs d'intrants par unité de production. La biotechnologie pourrait permettre d'améliorer les rendements des cultures (en raison de la présence de moins d'insectes ou de ravageurs), de diminuer l'épandage d'engrais et l'application de pesticides, d'adopter des techniques de production moins exigeantes, de renforcer la qualité des produits, d'améliorer le stockage et de faciliter la transformation. Il convient d'évaluer ces gains en comparaison avec ceux des cultures conventionnelles appartenant au même système de production. Enfin, une hausse de la productivité peut se traduire par une baisse des prix à la production et la consommation.

L'amélioration du bénéfice économique est l'une des principales motivations poussant les exploitants à cultiver une plante issue des biotechnologies. Les retombées possibles sur leurs revenus concernent la modification de l'utilisation d'intrants, les coûts connexes, la production (modifications quantitative et qualitative) et le revenu brut. Les répercussions économiques globales de la biotechnologie dépendent d'un large éventail de facteurs, notamment (entre autres) son impact sur les pratiques et les rendements agricoles, la disposition des consommateurs à acquérir des produits issus des biotechnologies ainsi que les obligations réglementaires et coûts associés. À plus long terme, d'autres facteurs, tels que la concentration de l'industrie sur la production et la commercialisation des cultures issues des biotechnologies, peuvent également modifier le niveau et la répartition des avantages économiques.

Les agriculteurs qui adoptent la nouvelle technologie, en particulier ceux qui le font à un stade précoce, peuvent profiter d'une baisse des coûts de la production ou d'une hausse de la production⁹. Les autres pourraient être placés en situation défavorable face à la concurrence, selon l'évolution des préférences des consommateurs et des régimes réglementaires. Si les consommateurs acceptent bien, dans l'ensemble, les cultures génétiquement modifiées et si les obligations réglementaires ne sont pas trop coûteuses, les agriculteurs adoptants retirent des avantages alors que les autres en perdent (ce qui est généralement le cas avec le coton transgénique). À l'inverse, si l'opinion des consommateurs est négative, les agriculteurs non adoptants peuvent en profiter pour gagner un avantage concurrentiel et

générer un surprix pour les produits non transgéniques¹⁰. Un autre élément à prendre en compte est le fait que la biotechnologie est contrôlée principalement par une poignée de grandes entreprises, ce qui peut soulever des interrogations quant aux termes de la concurrence.

Les agriculteurs adoptant des biotechnologies peuvent également modifier directement les bénéfices économiques des producteurs conventionnels. Les non-adoptants de cultures tolérantes aux herbicides, par exemple, peuvent bénéficier d'un effet induit sur la réduction des coûts. En revanche, en cas de flux génique fortuit depuis les champs de l'adoptant d'une biotechnologie vers ceux d'un non-adoptant, ce dernier peut rencontrer des problèmes s'il souhaite commercialiser ses produits sur des marchés spécifiques (marchés certifiés biologiques, notamment).

Par conséquent, l'impact économique des biotechnologies sur les exploitations est un concept qui peut être complexe, dynamique et difficile à mesurer. Bien qu'en premier lieu, l'ensemble des agriculteurs n'adopte une biotechnologie qu'à condition qu'elle leur apporte des avantages économiques, différents facteurs économiques et institutionnels affectent la rentabilité des cultures génétiquement modifiées à l'échelle des exploitations, au-delà de leurs caractéristiques purement agronomiques¹¹.

Dans l'ensemble, la rentabilité des cultures issues des biotechnologies à l'échelle des exploitations est susceptible de subir l'influence de variables fondamentales telles que les différences de rendement, la réduction du coût des insecticides ou de la lutte contre les mauvaises herbes, les écarts des prix des semences et les différences entre les prix imposés aux agriculteurs pour les plantes génétiquement modifiées et leur variété classique équivalente. Qui plus est, un ensemble de facteurs de fond, notamment socioéconomiques et culturels, jouent également un rôle moteur.

Les travaux publiés sur les retombées économiques possibles des cultures issues des biotechnologies, déjà nombreux, ne cessent de se multiplier. Leurs conclusions attestent de conséquences économiques positives, bien qu'elles varient d'un pays à l'autre et au sein d'un même pays, d'une année à l'autre et entre les différentes cultures ou associations de caractères (voir Annexe A5). Il semble que plus les conditions de culture, la pression exercée par les ravageurs, les pratiques agricoles et le contexte social soient hétérogènes, plus les bénéfices possibles risquent d'être variables, de même que, par voie de conséquence, l'ampleur des avantages économiques associés aux différentes combinaisons de caractères transgéniques.

Ainsi, une étude de Klumper et Qaim (2014) basée sur la méthode de la méta-analyse – réalisée à partir de 147 études de cultures génétiquement modifiées menées entre 1995 et 2014 dans le monde entier – a abouti à la conclusion selon laquelle la biotechnologie a réduit l'utilisation de pesticides chimiques de 37 %, a amélioré les rendements des cultures de 22 % et a accru les bénéfices des agriculteurs de 68 %, en moyenne. À l'issue d'une *revue systématique des travaux publiés*¹², l'étude de Hall *et al.* (2013) a révélé notamment que, par rapport à leur équivalent non génétiquement modifié, les cultures génétiquement modifiées exerçaient un impact économique positif à l'échelle des exploitations.

Étant donné qu'il convient de ne pas sous-estimer les difficultés méthodologiques de la mesure des retombées des cultures génétiquement modifiées, un certain degré de précaution est nécessaire pour procéder à l'analyse et l'utilisation des résultats. Par exemple, plusieurs études se limitent à comparer la rentabilité à court terme à l'échelle des exploitations ; leurs résultats sont donc très sensibles aux variations des prix des semences, des intrants agrochimiques et des matières premières. En outre, dans plusieurs études de la rentabilité, il est postulé que les prix des plantes génétiquement modifiées et de leurs équivalents non transgéniques sont identiques. Les études, en particulier les premières, comprennent d'autres imperfections conceptuelles, notamment l'utilisation des marges brutes (qui ne tiennent pas compte du coût du foncier et de la main-d'œuvre) au lieu des marges nettes et la taille très réduite des échantillons de données, ou le manque d'impartialité lié à la sélection sur la base du volontariat des cultivateurs de plantes issues des biotechnologies (Smale, 2012).

Hausse des coûts des semences mais baisse des coûts des produits agrochimiques

En règle générale, les études ont démontré qu'après l'adoption de cultures génétiquement modifiées, les coûts ont baissé dans certaines catégories (notamment des produits agrochimiques), alors que d'autres ont augmenté systématiquement (en particulier les coûts des semences). Les catégories de coûts particulièrement élevés pour les cultures génétiquement modifiées par rapport aux cultures non transgéniques sont celles des coûts des semences et des redevances dues pour l'utilisation de la technologie (valeur de la biotechnologie, qui représente un coût totalement inexistant pour les cultures conventionnelles), alors que les coûts des produits agrochimiques sont généralement inférieurs.

Il a été démontré que l'évolution des coûts pour les exploitations varie au fil des années, mais aucun résultat n'a permis de comprendre pourquoi. Il semble que les bénéfices les plus importants aient été constatés dans les premières études (les bénéfices étaient les plus élevés et les hausses des coûts les plus faibles) et que les avantages de la culture de plantes génétiquement modifiées aient régressé depuis lors.

Amélioration des rendements pour les cultures génétiquement modifiées tolérantes aux insectes et baisse des coûts pour celles tolérantes aux herbicides

Dans leur ensemble, les données empiriques laissent penser que les agriculteurs ayant adopté des cultures issues des biotechnologies ont obtenu de meilleurs rendements dans de nombreux cas en raison du meilleur rapport coût-efficacité de leur lutte contre les adventices et de la réduction des pertes provoquées par les insectes ravageurs, malgré des variations indéniables entre les cultures, les caractères, les sites et les années. Alors que les conséquences sur le rendement des cultures résistantes aux herbicides sont généralement mineures, étant donné que les bénéfices à l'échelle des exploitations dépendent avant tout de la diminution des coûts, les améliorations du rendement des cultures Bt peuvent être importantes. Les plus fortes améliorations du rendement ont été observées sur les cultures de coton Bt et, en second lieu, de maïs Bt. En moyenne, les conséquences sur le rendement des cultures tolérantes aux herbicides sont modérées, du fait qu'elles permettent principalement de simplifier la gestion des cultures, en particulier en facilitant la lutte contre les adventices et en encourageant la suppression du travail du sol.

Sans grande surprise, on constate que l'accroissement du rendement constaté pour le soja est inférieur à celui du coton et du maïs, les variétés de soja génétiquement modifiées étant surtout résistantes aux herbicides, ce qui entraîne peu de répercussions sur le rendement. Comme il l'a déjà été souligné, les principaux avantages de la résistance transgénique aux herbicides sont davantage la diminution des coûts et la simplification de la lutte contre les adventices que l'amélioration du rendement. Les études témoignent également de conséquences très diverses sur ce rendement, qui peuvent s'expliquer par les différences entre les conditions environnementales (pressions exercées par les ravageurs, variations saisonnières, notamment), économiques et politiques en général des différents pays. L'introduction d'une variété résistante aux insectes aboutit à des gains de rentabilité supérieurs dans les pays où les agriculteurs n'utilisent pas d'insecticides pour lutter contre les ravageurs (notamment de nombreux pays en développement) par rapport aux pays où la protection des cultures est une pratique courante (Bennett et al., 2013).

Les retombées positives sur la main-d'œuvre et sa productivité se manifestent avant tout dans les pays non membres de l'OCDE

Les cultures résistantes aux insectes et tolérantes aux herbicides peuvent aboutir à une réduction de la demande de main-d'œuvre dans les exploitations, du fait qu'elles requièrent moins d'applications de pesticides, qu'elles permettent une plus grande flexibilité et qu'elles simplifient la gestion des cultures. D'après Marra et Piggott (2006), les agriculteurs des États-Unis accordent une grande importance au fait que les cultures résistantes aux herbicides simplifient la lutte contre les adventices. Les avantages non financiers ont été estimés à environ 10 USD à 25 USD par hectare. Dans les pays où la lutte contre les ravageurs se fait à grands renforts d'insecticides, les cultures résistantes aux insectes ne réduisent pas

seulement la demande de main-d'œuvre, elles apportent aussi des avantages aux travailleurs en diminuant les dépenses de santé.

Si les conséquences sur la productivité de la main-d'œuvre sont plus marquées dans les pays non membres de l'OCDE, comme la Chine et l'Inde, des répercussions de plus grande envergure sur l'emploi sont à attendre dans les pays membres de l'OCDE, dans les secteurs en amont et en aval de la production agricole. La biotechnologie moderne étant une technologie fondamentale pour la bioéconomie naissante, de nouvelles possibilités d'emploi sont à prévoir dans ce secteur de la bioéconomie (OCDE, 2009).

La lutte antiparasitaire écologiquement viable renforce les perspectives d'optimisation des avantages pour l'environnement et de réduction des risques

L'adoption de cultures résistantes aux herbicides pourrait contribuer à améliorer la qualité du sol et de l'eau

La biotechnologie peut favoriser la croissance verte en améliorant les performances environnementales de la production primaire et de la transformation industrielle et en contribuant à remédier à la dégradation du sol et de l'eau, notamment par les moyens suivants : 1) la biorestauration – utilisation de micro-organismes afin de réduire, d'éliminer, de contenir ou de transformer en produits sans danger les contaminants présents dans le sol, les sédiments, l'eau ou l'air ; ii) l'utilisation de variétés culturales améliorées demandant moins de travail du sol (et limitant donc l'érosion et le tassement du sol) ou de pesticides et d'engrais (réduisant ainsi la pollution de l'eau) ; iii) les applications industrielles de la biotechnologie permettant de diminuer les émissions de gaz à effet de serre libérées par la fabrication de produits chimiques (procédés biotechnologiques de la manufacture de produits chimiques et plastiques) (OCDE, 2009).

Les cultures issues des biotechnologies peuvent également entraîner d'autres types de conséquences positives pour l'environnement. Elles modifient les pratiques agricoles et favorisent des économies d'énergie et une baisse des rejets atmosphériques ou une diminution de l'érosion du sol par rapport aux cultures conventionnelles équivalentes, du fait de la baisse de fréquence des opérations dans les champs. Les cultures résistantes aux herbicides peuvent avoir des effets bénéfiques sur l'environnement, car elles permettent aux agriculteurs d'employer des herbicides qu'il n'est pas nécessaire d'incorporer au sol, ce qui favorise une évolution vers la suppression du travail du sol et des façons culturales anti-érosives tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre connexes¹³.

Contrairement aux cultures nécessitant des applications de produits agrochimiques classiques, les cultures résistantes aux herbicides peuvent atténuer les dégâts causés aux sédiments accumulés par l'eau et le vent en permettant d'espacer les labours. Ces techniques facilitent également l'utilisation de cultures de couverture hivernales, limitant ainsi le lessivage des éléments nutritifs (nitrates, notamment). Certaines plantes transgéniques à l'étude pourraient aussi permettre d'intensifier l'élimination des métaux lourds toxiques contenus dans le sol, par leur incorporation dans les cellules ou leur transformation en substances moins toxiques. Les preuves scientifiques de ces répercussions sur l'environnement des cultures génétiquement modifiées sont encore en train d'être recueillies.

Grâce à l'amélioration des rendements, les cultures issues des biotechnologies ont la faculté d'alléger la pression sur les ressources foncières et d'atténuer la nécessité de défricher ou de préserver des terres, réduisant ainsi la pression des terres agricoles sur les habitats naturels. Des cultures génétiquement modifiées résistantes à la sécheresse ont été introduites (permettant de réaliser des économies d'eau). La résistance du sol à la salinité pourrait contribuer au maintien de l'agriculture dans des régions touchées par la salinisation, liée avant tout à l'irrigation.

La mise au point de plantes génétiquement modifiées cultivables dans des conditions défavorables (de forte salinité, de risque de sécheresse, etc.) et faisant une utilisation plus efficace de l'eau et des éléments nutritifs diminue la dépendance vis-à-vis de l'agriculture intensive à forte consommation

d'intrants, non viable écologiquement. Ce constat est particulièrement important lorsque de telles conditions défavorables sont réunies et que l'eau fait défaut.

Différentes études ont tenté d'évaluer les retombées des cultures génétiquement modifiées de première génération sur l'environnement. Or, la complexité des systèmes écologiques présente des difficultés considérables pour que les expériences permettent d'analyser rigoureusement les avantages et les risques de ces technologies. Dans l'ensemble, la conclusion de ces publications est qu'il n'existe pas de preuve valide associant ces cultures à des risques supérieurs pour l'environnement par rapport aux variétés conventionnelles équivalentes (CE, 2010). Les études soulignent également le fait que la nature et l'ampleur des retombées peut varier dans l'espace, dans le temps et en fonction du caractère et du cultivar modifié (FAO, 2003 ; Wolfenbarger et Phifer, 2000).

La diminution de l'utilisation de produits agrochimiques sera bénéfique pour l'environnement

Comme il l'a été remarqué ci-avant, les systèmes de cultures issues des biotechnologies consomment moins d'énergie que leurs équivalents conventionnels. Il a été considéré que la réduction de l'application de pesticides associée à la production de plantes génétiquement modifiées comporte des avantages possibles pour la santé humaine et l'environnement¹⁴. Par rapport aux pratiques de l'agriculture conventionnelle, la culture de plantes génétiquement modifiées pourrait se solder par un recul de l'utilisation de produits chimiques nocifs pour l'environnement destinés à la lutte contre les adventices et les ravageurs, car certains pesticides ne sont alors plus nécessaires, la fréquence des traitements diminue ou la zone traitée est réduite. Des études ont également démontré que, en conséquence de l'adoption rapide de cultures tolérantes aux herbicides, l'utilisation de ces produits a évolué vers des formes moins toxiques (Brookes et Barfoot, 2013). Par ailleurs, les variétés résistantes aux insectes peuvent atténuer la pression exercée par les ravageurs, ce qui pourrait avoir des retombées positives pour les non-adoptants de la région.

Les scientifiques semblent tomber d'accord sur le fait que l'utilisation de plantes transgéniques Bt résistantes aux insectes réduit le volume et la fréquence de l'application d'insecticides sur les cultures de maïs, de coton et de soja (Annexe 5A). Ces résultats sont particulièrement vrais pour le coton en Afrique du Sud, en Australie, en Chine, aux États-Unis et au Mexique.

L'environnement tire profit d'une diminution de la pollution des ressources en eau et des nuisances aux insectes non visés. La baisse de l'utilisation des pesticides laisse penser que les plantes Bt pourraient avoir des effets positifs pour la biodiversité au sein des cultures, par rapport aux cultures conventionnelles qui reçoivent des applications régulières de pesticides à large spectre. Or, comme il l'a été souligné précédemment, dans certaines régions où la culture de plantes génétiquement modifiées résistantes aux herbicides s'est généralisée, les agriculteurs s'en sont trop remis à l'utilisation d'un seul herbicide, comme le glyphosate, pour lutter contre les mauvaises herbes, ce qui a contribué à l'apparition d'une résistance des plantes adventices (voir encadré 5.4).

Alors qu'a priori, on pourrait s'attendre à une baisse considérable de la quantité globale de pesticides utilisés, une enquête réalisée aux États-Unis démontre que l'introduction de cultures de soja, maïs et coton génétiquement modifiés tolérants aux herbicides provoque une diminution de la quantité d'herbicides employés sur l'exploitation pendant les trois premières années, mais que cette quantité repart à la hausse à l'issue de ces trois ans (Benbrook, 2004). Cette évolution s'explique par une recrudescence des espèces adventices résistantes et une baisse du prix des herbicides concurrents. Néanmoins, la quantité d'insecticides utilisés a reculé sur l'ensemble de la période de neuf ans à laquelle l'enquête s'est consacrée. Les modifications de l'utilisation des pesticides dépendent de plusieurs facteurs, notamment le taux d'utilisation sur les cultures conventionnelles existantes, la relativité des prix des pesticides, la valeur de la culture en question, les conditions climatiques de chaque année, la toxicité relative des pesticides et la prolifération des espèces adventices résistantes.

Incertitude de l'efficacité de l'utilisation des engrais

Les cultures transgéniques de première génération contribuent de manière indirecte à l'amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'azote, à travers leurs caractères permettant d'accroître les rendements (résistance aux ravageurs ou aux pesticides) (par exemple, la diminution des nuisances au système racinaire du maïs génétiquement modifié résistant à la chrysomèle du maïs peut se traduire par une amélioration de l'absorption de l'azote). En revanche, l'adoption de cultures de soja tolérant aux herbicides provoque une hausse de l'utilisation de glyphosate, toxique pour le symbiote *Bradyrhizobium japonicum*, qui fixe l'azote – et joue un rôle important pour l'apport en azote reçu par le soja. Par ailleurs, les répercussions des cultures issues des biotechnologies sur les micro-organismes présents dans le sol et, par conséquent, le cycle des éléments nutritifs, suscitent des inquiétudes, qui ne reposent toutefois sur aucune donnée concrètes.

Les effets nets des cultures issues des biotechnologies sur l'efficacité d'utilisation de l'azote sont encore mal connus et demandent à être étudiés plus en profondeur. Selon Rosegrant et al. (2104), l'efficacité d'utilisation de l'azote dans les nouvelles variétés culturales a des répercussions importantes sur le rendement et atténue les conséquences négatives de la fertilisation sur l'environnement. Des études menées sur l'incidence des cultures génétiquement modifiées concluent que l'influence de la biotechnologie sur l'utilisation d'engrais est neutre (voir, par exemple, Qaim et Texler, 2005).

Les retombées sur la biodiversité peuvent varier dans l'espace, dans le temps et en fonction du caractère et du cultivar modifié

Les innovations ne sont pas foncièrement plus écologiquement viables ou respectueuses de la biodiversité que les pratiques conventionnelles. Les modifications associées aux pratiques des productions végétales issues des biotechnologies peuvent avoir des conséquences positives ou négatives sur la biodiversité. Leur impact global peut varier en fonction des pratiques de gestion précises, de l'environnement et du contexte propre au paysage, et peuvent n'apparaître qu'après plusieurs années (encadré 5.6).

Comme dans le cas des systèmes de production conventionnels, les principales retombées des cultures actuelles de plantes génétiquement modifiées sont liées pour la plupart à la modification des pratiques de gestion culturale qu'elles entraînent, en particulier en ce qui concerne l'utilisation d'herbicides ou d'insecticides, l'allègement ou la suppression du travail du sol et l'évolution des pratiques de rotation des cultures. L'ampleur et l'orientation de ces retombées dépendent en très grande partie de la conduite des cultures génétiquement modifiées par les agriculteurs, des restrictions réglementaires imposées à cette conduite et de la comparaison entre les pratiques du système des cultures issues des biotechnologies et celles de la gestion des cultures conventionnelles.

L'évolution de l'utilisation d'insecticides et de fongicides sur les cultures génétiquement modifiées résistantes aux insectes peut avoir des effets positifs sur la biodiversité si elle revient à un allègement de la fréquence et de la toxicité, en particulier si les cultures issues des biotechnologies entrent dans le cadre d'une lutte intégrée contre les ennemis des cultures. L'évolution de la gestion des cultures génétiquement modifiées tolérantes aux herbicides peut avoir une influence sur la biodiversité par l'intermédiaire des phénomènes suivants : i) la modification du traitement herbicide et de son calendrier ; ii) le changement du type d'herbicides appliqués ; iii) les évolutions connexes des pratiques agricoles, notamment la diminution ou la suppression du travail du sol et la modification des rotations des cultures ou de la monoculture.

Les scientifiques admettent ne pas disposer de suffisamment d'éléments pour prévoir quelles seront les répercussions à long terme des cultures transgéniques tolérantes aux herbicides sur les populations d'adventices et la biodiversité associée au sein de chaque culture. Les plantes génétiquement modifiées tolérantes aux herbicides permettent de modifier le type d'herbicide employé (généralement du glyphosate adjoint à un herbicide de pré-levée). Associé aux cultures génétiquement modifiées résistantes aux herbicides, le nouvel emploi des herbicides a la faculté de limiter les populations d'adventices, ce qui entraîne la raréfaction des espèces sauvages qui leur sont liées, comme les oiseaux

granivores. Néanmoins, les modifications de l'utilisation des herbicides peuvent aussi être avantageuses pour la biodiversité si sa fréquence et sa toxicité diminuent et si les populations d'adventices continuent de procurer un habitat et des ressources alimentaires aux espèces sauvages.

Encadré 5.6. Répercussions possibles des cultures issues des biotechnologies sur la biodiversité : que démontrent les preuves scientifiques ?

Risques ou avantages ayant un impact mesurable selon les critères d'une évaluation de la biodiversité

- Conséquences de la modification de la gestion des cultures génétiquement modifiées tolérantes aux herbicides
- Faible impact direct des cultures transgéniques Bt sur la lutte biologique naturelle
- Le maïs transgénique Bt modifie les processus pédologiques par rapport au maïs conventionnel, sans toutefois que cette différence dépasse celle existant entre les types de cultures, les façons culturales et les systèmes d'utilisation des pesticides.
- Les variétés transgéniques Bt ont peut-être une incidence sur les insectes lépidoptères, mais aucune conséquence n'a été constatée sur les abeilles ou sur d'autres organismes non visés.

Risques ou avantages susceptibles d'apparaître, mais n'ayant pas été associés à un impact négatif clair selon les critères d'une évaluation de la biodiversité

- Conséquences de la modification de la gestion des cultures génétiquement modifiées Bt, résistantes aux insectes
- La formulation précise de la gestion des risques est obligatoire pour les cultures issues des biotechnologies résistantes aux insectes, mais pas pour celles tolérantes aux herbicides.
- Des flux de gènes ont lieu, mais il est souvent difficile de préciser les effets nocifs réels pour la biodiversité ou de parvenir à un consensus sur ce point.
- Les cultures génétiquement modifiées Bt connaissent des problèmes secondaires liés aux ravageurs, dont les conséquences sur la biodiversité ne sont toutefois pas claires.
- La culture de plantes génétiquement modifiées est associée à des changements indirects d'affectation des terres, mais ses retombées sur la biodiversité sont contestées.

Risques pour la biodiversité extrapolés à partir de résultats d'essais de faible envergure

- Des essais de faible envergure prouvent que les gènes inhibiteurs de protéase ont des répercussions sur des espèces non visées.

Risques mis en évidence par des expériences mais très difficiles à prouver sur le terrain

- Un transfert horizontal de gènes a été démontré par des expériences mais est très difficile à déceler sur le terrain.

Source : Underwood, E. (2013), « The kinds of possible impacts of GM crops on biodiversity and current evidence on impacts », annexe au chapitre 6(b) in Underwood et al. (2013), *Technology options for feeding 10 billion people. Climate change and agriculture; biodiversity and agriculture*. Rapport préparé pour le panel STOA du Parlement européen. Contrat IP/A/STOA/FWC/2008096/LOT3/C1/SC5. Institut pour une politique européenne de l'environnement, BIO Intelligence Service, Ecologic Institute, IVM, Bruxelles/Londres.

Les plantes génétiquement modifiées tolérantes aux herbicides permettent une plus grande flexibilité d'utilisation des herbicides, dont la mise en œuvre peut soit accroître la biodiversité au sein des cultures, soit la réduire considérablement, en fonction de l'époque et de la fréquence des applications. Des éléments montrent qu'aux États-Unis, l'essor des plantes génétiquement modifiées résistantes aux herbicides ne s'est pas soldé par une baisse de la quantité d'herbicides appliqués sur les cultures mais a abouti à l'adoption à grande échelle d'herbicides jugés moins toxiques pour l'environnement que les traitements employés auparavant, car le glyphosate est un herbicide d'action relativement rapide et facilement dégradable¹⁵. L'intensification de l'emploi d'herbicides - même s'ils

sont moins toxiques - suscite néanmoins des inquiétudes du fait qu'elle risque d'accroître l'érosion de l'habitat des oiseaux nichant sur les terres agricoles, entre autres espèces.

Comme il l'a été mentionné ci-avant, les cultures génétiquement modifiées tolérantes aux herbicides facilitent le recours plus fréquent à des systèmes de production où le travail du sol est réduit ou supprimé, ce qui est favorable à la biodiversité. Toutefois, une gestion déficiente de la résistance des mauvaises herbes pourrait provoquer la prolifération d'adventices tolérantes aux herbicides¹⁶.

Les systèmes de cultures génétiquement modifiées tolérantes aux herbicides ont provoqué la généralisation des monocultures et, par conséquent, la raréfaction des rotations des cultures, qui se solde par des retombées néfastes sur la biodiversité des terres agricoles. L'expansion des cultures génétiquement modifiées tolérantes aux herbicides a donc suscité des inquiétudes au sujet de l'effacement de la biodiversité, en particulier en Amérique latine. Cependant, s'il est possible que l'essor de l'agriculture ait diminué la biodiversité, le lien entre cet essor et la biotechnologie est contestable, étant donné qu'il aurait pu se produire avec ou sans elle et que la croissance de la productivité permise par les cultures issues des biotechnologies a restreint la superficie nécessaire à la production d'une même quantité de produit. L'expansion de la production de soja, par exemple, a été motivée en grande partie par la hausse de la demande d'aliments riches en protéines. Les négociants de soja, avec d'autres parties intéressées, ont mis en place un moratoire sur le soja, en vigueur depuis 2006, selon lequel il s'engage à ne pas acheter de soja produit sur des terres ayant été déforestées dans le biome amazonien après cette date (Cargill, 2014).

Autres préoccupations environnementales et économiques

Malgré l'adoption rapide des cultures génétiquement modifiées par les agriculteurs de nombreux pays, cette technologie fait toujours l'objet de polémiques. Les inquiétudes liées aux répercussions de ces cultures sur l'économie et l'environnement sont l'une des raisons de la méfiance du public.

Préoccupations liées à l'économie

La production de plantes génétiquement modifiées peut certes amener certains bénéfices économiques directs sous la forme d'une hausse du rendement, d'une amélioration de la qualité grâce à la lutte contre les ravageurs ou de la baisse des coûts des intrants, mais des inquiétudes ont été soulevées quant à la possibilité que ces avantages économiques soient plus que neutralisés par la perte de valeur du produit de ces cultures sur le marché. Par ailleurs, la possibilité que la culture de plantes génétiquement modifiées dans une région nuise à la valeur et la compétitivité des cultures conventionnelles et biologiques de cette même région inquiète également. Pour les cultivateurs n'ayant pas adopté les produits des biotechnologies mais se trouvant dans une région de production de plantes génétiquement modifiées, les perspectives de commercialisation peuvent également diminuer en raison de la raréfaction des points de vente disponibles pour eux. En outre, des répercussions sur les suivants culturels des rotations ne peuvent être écartées. La perte économique peut être encore plus importante pour les cultures à plus forte valeur ajoutée, comme la production biologique, et se répercuter sur les suivants culturels pendant un certain temps. De tels enjeux économiques appellent à fixer des impératifs pour déterminer les responsabilités, évaluer les taux de pertes engagées et créer des mesures possibles pour y remédier.

La possibilité de la contamination d'exploitations n'ayant pas adopté la culture de plantes génétiquement modifiées par un flux génique involontaire et fortuit depuis des unités de production de plantes issues des biotechnologies représente une difficulté pour la coexistence de ces deux types d'agriculture, y compris dans les systèmes agricoles particuliers certifiés biologiques. Les producteurs en agriculture biologique n'ont pas le droit d'utiliser de semences ou de plantes contenant des éléments transgéniques, quels qu'ils soient. Par exemple, le Règlement européen concernant le mode de production biologique de produits agricoles (Règlement (CEE) n° 2092/91 du Conseil) interdit l'utilisation d'organismes vivants modifiés (OVM).

Les producteurs en agriculture biologique ne sont pas autorisés à utiliser de semences ou de plantes contenant des éléments transgéniques. En juillet 2003, la Commission européenne a publié des lignes directrices pour l'élaboration de stratégies nationales et de meilleures pratiques visant à assurer la coexistence des cultures génétiquement modifiées, conventionnelles et biologiques, dans le but d'aider les États membres de l'UE à mettre en place des mesures viables en faveur de la coexistence, qui soient conformes à la législation européenne. Les lignes directrices établissent les principes généraux et les aspects techniques et de procédure à prendre en compte : les approches sur la coexistence devraient être élaborées de manière transparente, à partir d'éléments scientifiques et en coopération avec toutes les parties concernées ; les mesures devraient être spécifiques aux différents types de cultures et les aspects régionaux et locaux devraient être pris en compte à part entière.

La manière dont les contrats d'utilisation des plantes issues des biotechnologies ont été rédigés a également suscité des polémiques, car certains les jugent trop contraignants pour les agriculteurs. La biotechnologie a donné lieu à une concentration accrue du secteur semencier et les cultivateurs sont de plus en plus dépendants d'un nombre restreint de fournisseurs. Qui plus est, les agriculteurs adoptant des biotechnologies se heurtent à différentes contraintes : la commercialisation des semences génétiquement modifiées est souvent assortie de contrats qui interdisent aux cultivateurs de conserver les graines ; les entreprises biotechnologiques ont mis au point des techniques qui rendent les plantes génétiquement modifiées stériles, afin de protéger la valeur des semences génétiquement modifiées sur le plan de la recherche et de limiter le déversement de flux géniques dans l'environnement ; les entreprises biotechnologiques perçoivent souvent une « redevance technologique », qu'il convient de comptabiliser en plus des droits de propriété et de brevet. La redevance technologique et la limitation de la conservation des semences entraînent une hausse de leurs coûts et obligent les agriculteurs à se soumettre aux conditions imposées par les entreprises biotechnologiques.

Une autre source de préoccupation est le fait que la « première génération » de produits génétiquement modifiés se soit concentrée sur des caractères agronomiques qui n'ont pas été perçus comme réellement bénéfiques pour le consommateur, par rapport aux variétés conventionnelles. Cependant, la modification des caractères agronomiques n'est que le début de la contribution du génie génétique à la modification de la chaîne alimentaire. Les bénéfices escomptés des plantes aux caractères transgéniques axés sur le rendement pourraient fournir d'importants avantages aux consommateurs des pays développés et en développement. Le choix des innovations à faire aller de l'avant sera probablement déterminé par la rentabilité attendue par le secteur privé, ainsi que par le cadre juridique, qui permet aux États d'affecter les bénéfices à leur secteur de la recherche. Les droits de propriété intellectuelle ou droits de brevets permettent au titulaire d'un brevet d'exclure tout autre acteur de la fabrication, l'utilisation, la commercialisation, la vente ou l'importation de l'invention certifiée pour une période limitée (de 20 ans).

Préoccupations liées à l'environnement

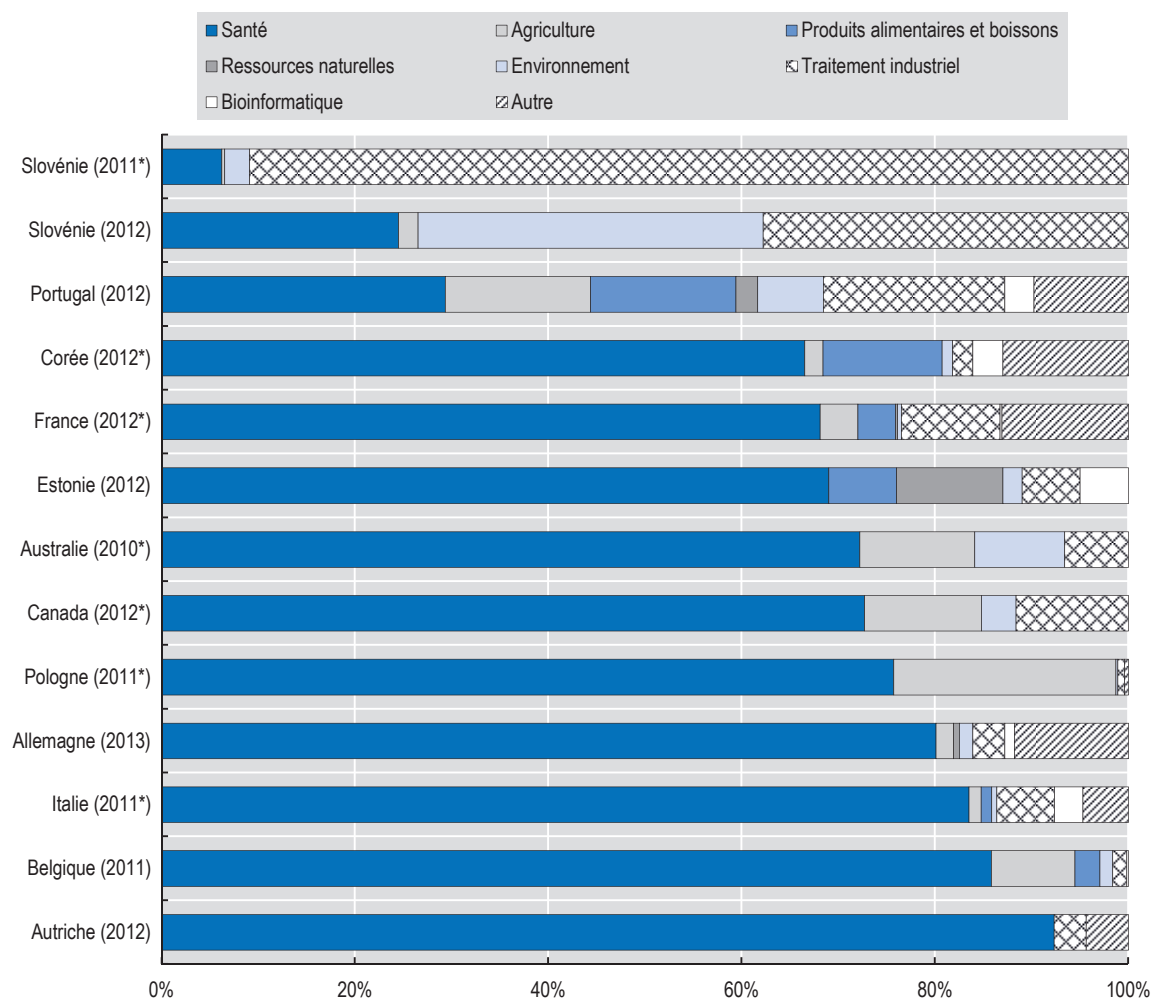
Les préoccupations liées à l'environnement tournent autour des effets possibles – directs ou indirects – des plantes issues des biotechnologies sur des organismes non visés et sur le transfert de caractères génétiquement modifiés aux populations de plantes sauvages (FAO, 2003). La possibilité d'un transfert des caractères de résistance aux herbicides et de résistance aux insectes vers des espèces adventices et la persistance dans les cultures de plantes sauvages porteuses de ces caractères suscitent des inquiétudes quant aux retombées possibles sur l'environnement. D'autres craintes sont liées à l'éventualité d'une évolution de la résistance des ravageurs et des maladies sous l'influence des plantes génétiquement modifiées, qui serait ensuite difficile à combattre à l'aide des méthodes conventionnelles. La question s'est également posée de savoir si les plantes issues des biotechnologies sont toxiques pour les espèces non visées, notamment les herbivores, les insectes pollinisateurs, les organismes terricoles et les prédateurs biologiques. Enfin, il faut savoir que la sélection végétale moderne est désormais capable d'obtenir des produits végétaux et des systèmes culturels porteurs de caractères nouveaux sans avoir recours à la transgénèse.

Perspectives d'avenir : priorités de fond pour dynamiser les retombées favorables de la biotechnologie agricole moderne

L'investissement public dans la R-D : un facteur important pour renforcer l'offre et l'accessibilité des nouvelles biotechnologies

Si la biotechnologie agricole moderne doit être perçue et employée comme une solution possible pour favoriser la croissance verte dans l'agriculture, l'action publique aura un rôle important à jouer, notamment par l'investissement dans la recherche, la mise en place des cadres réglementaires nécessaires pour garantir que les applications de la biotechnologie respectent des normes acceptables en matière de biosécurité et de respect de l'environnement, et la sensibilisation du public aux avantages (et aux risques) potentiels (OCDE, 2009).

Graphique 5.1. Part des investissements en R-D biotechnologique par application, dernière année consultable



Notes : Les résultats se limitent aux entreprises spécialisées en biotechnologie, sauf pour l'Australie, l'Estonie, l'Italie et la Slovénie, où les données concernent les entreprises de R-D biotechnologique, et pour la République de Corée, où les données concernent les entreprises actives en biotechnologie. Australie : les résultats relevés concernent les biotechnologies appliquées à l'agriculture, l'environnement, l'industrie et la santé. Canada : les résultats relevés concernent les biotechnologies appliquées à l'agriculture, l'environnement, l'industrie et la santé. France : les données, qui sont provisoires, correspondent à l'activité des entreprises liée à la recherche et non à leur activité principale. Italie : les résultats tiennent compte de l'application principale. République de Corée : le secteur « agriculture » comprend celui des ressources naturelles. Pologne : les résultats tiennent compte de l'application principale. Le secteur « transformation industrielle » comprend celui des aliments et boissons. Slovénie : « biotechnologie industrielle » au lieu de « transformation industrielle ».

Source : OCDE, Indicateurs de biotechnologie de l'OCDE, <http://oe.cd/kbi>, octobre 2014.

Malgré une prise de conscience de l'importance de l'innovation dans le renforcement de la durabilité de la productivité agricole, et bien que le financement de la R-D par les gouvernements soit prévu par des accords commerciaux internationaux, les dépenses publiques de R-D dans l'agriculture représentent seulement une faible part du soutien total accordé à ce secteur – environ 2 % dans la zone de l'OCDE.

Les données de l'OCDE sur les dépenses intérieures brutes de R-D du secteur des entreprises (DIRDE) affectées à la biotechnologie fournissent une mesure directe de l'effort de recherche. Selon ces données de l'OCDE, les États-Unis consacrent presque 10 % du total de leurs DIRDE à la biotechnologie, ce qui représente environ 66 % du total des DIRDE consacrées à la biotechnologie dans les 28 pays sur lesquels des données ont été réunies. En moyenne, la biotechnologie représentait 5.9 % du total des DIRDE dans les pays ayant fourni des données en 2011. Cependant, la part des DIRDE affectées aux biotechnologies axées sur l'agriculture est relativement faible pour tous ces pays (graphique 5.1).

Les investissements de R-D du secteur public ont renforcé les sciences fondamentales qui soutiennent la biotechnologie agricole. Néanmoins, contrairement à la révolution verte – qui a été amenée par le secteur public –, la majorité de la recherche appliquée en biotechnologie agricole et presque toutes les évolutions commerciales sont exécutées par le secteur privé. Un petit groupe d'entreprises multinationales a la mainmise sur la plupart des biotechnologies et le coût de l'obtention des accords et licences de transfert de matériel pourrait ralentir la R-D publique. Par conséquent, la création et le maintien d'une capacité nationale de recherche agricole sont un facteur déterminant pour l'existence et l'accessibilité de nouvelles biotechnologies qui conviennent à chaque environnement agro-écologique.

La biotechnologie agricole moderne est intersectorielle et interdisciplinaire. Le génie génétique des cultures, par exemple, a besoin des connaissances de la génomique et a peu d'intérêt pratique en l'absence d'un programme d'amélioration végétale performant. En somme, la biotechnologie agricole devrait s'intégrer dans une stratégie plus vaste de savoir et d'innovation agricoles qui entraîne des interactions entre les multiples parties prenantes.

Assurer la sécurité à un coût raisonnable est indispensable à l'évolution progressive de la biotechnologie agricole moderne

Tous les États membres de l'OCDE, ainsi que de nombreux États non membres, disposent d'un mécanisme afin de réaliser des évaluations des risques pour l'environnement des plantes génétiquement modifiées entrant dans la production alimentaire. Dans la majorité des pays, ces mécanismes sont en vigueur depuis plusieurs années. Les approches nationales de la biosécurité ont été renforcées par des activités multilatérales concluantes visant à élaborer une approche commune des principes et de la pratique de l'évaluation des risques et de la sécurité. Une grande partie de cette compréhension commune a vu le jour à travers les travaux de l'OCDE, où sont en cours des projets sur la biosécurité, ayant trait, entre autres, aux cultures transgéniques.

Les principaux objectifs des travaux de l'OCDE sur la biosécurité, qui datent de 1986, sont les suivants : favoriser l'harmonisation du partage d'informations et les pratiques d'évaluation des risques ; aider les États à assurer un niveau de sécurité élevé ; aider à la compréhension mutuelle des systèmes réglementaires entre les pays ; éviter les obstacles non tarifaires au commerce. Les travaux de l'OCDE sur la biosécurité comportent deux volets. En premier lieu, le Sous-groupe sur l'harmonisation de la surveillance réglementaire en biotechnologie est en charge essentiellement de l'évaluation des risques et de la sécurité des organismes transgéniques pour l'environnement. En second lieu, le Groupe d'étude sur la sécurité des nouveaux aliments destinés à la consommation humaine et animale est spécialisé principalement dans l'évaluation de la sécurité des aliments dérivés d'organismes transgéniques.

Encadré 5.7. Le *Gene Technology Act* australien

L'élaboration et l'utilisation des OGM en Australie sont réglementées par un cadre législatif unifié comprenant l'autorité de régulation des techniques de génie génétique et un certain nombre d'autres autorités réglementaires, dotées de responsabilités et de compétences complémentaires. Cette disposition renforce la coordination des prises de décisions et évite les redondances.

Le *Gene Technology Act* (loi sur les techniques de génie génétique) de 2000 et le *Gene Technology Regulator* (autorité de régulation des techniques de génie génétique) de 2001, qui veille à l'application de la loi en liaison avec la législation nationale et territoriale correspondante, soutiennent ce cadre. Celui-ci est également supervisé par le *Gene Technology Ministerial Council* (Conseil ministériel des techniques de génie génétique), qui comporte des représentations de tous les territoires australiens. Ce Conseil a pour objectif de protéger la santé et la sécurité humaines ainsi que l'environnement, en identifiant les risques que représentent les techniques de génie génétique ou qui en résultent et en y apportant une réponse.

La transparence est intégrée dans le système réglementaire au moyen des dispositions de la législation sur les techniques de génie génétique, qui obligent l'autorité de régulation à appliquer les mesures suivantes : tenir à jour un registre des opérations mettant en jeu des OGM et des produits qui en contiennent, qui soit consultable par le public ; présenter des rapports trimestriels et annuels au Parlement australien ; mener de vastes consultations auprès du public et d'une large gamme de spécialistes, d'organismes et d'autorités sur les applications des OGM pour les opérations impliquant l'introduction volontaire d'OGM dans l'environnement.

L'Accord intergouvernemental sur les techniques de génie génétique de 2001 (*Gene Technology Agreement*, GTA) décrit l'arrangement entre le Commonwealth, l'État et les administrations territoriales sur la création d'un système réglementaire consacré aux techniques de génie génétique qui soit homogène à l'échelle nationale. Le GTA prévoit un examen indépendant du *Gene Technology Act* tous les cinq ans. Le premier s'est achevé en 2006. Il a conclu à un bon fonctionnement de l'Act et du dispositif réglementaire national au cours des cinq années précédentes (2000-05), et n'a pas jugé nécessaire d'y apporter de modifications importantes. Le groupe d'experts chargé de l'examen a recommandé plusieurs modifications afin d'améliorer le fonctionnement de l'Act. En particulier, l'examen de 2006 a abouti à la recommandation de réévaluer l'Act au bout de cinq ans (en 2011) afin de garantir qu'il continue de répondre aux tendances nouvelles. L'examen de 2011 s'est limité aux thèmes entrant dans le champ d'application énoncé dans l'Act (la santé et la sécurité des personnes et l'environnement). Il a également passé en revue les conclusions de l'examen de 2006.

Source : Office of the Gene Technology Regulator, www.oqtr.gov.au/internet/oqtr/publishing.nsf/Content/home-1; Gouvernement australien, ministère de la Santé, www.health.gov.au/internet/main/publishing.nsf/Content/gene-techact-review

Les principaux résultats de l'évaluation des risques et de la sécurité pour l'environnement sont les documents de la série « *biosafety consensus documents* », qui reprennent, par pays, les informations considérées comme pertinentes pour l'évaluation des risques et de la sécurité (par exemple, l'emploi d'une variété culturale ou d'un caractère génétique dans la pratique agricole ; sa taxonomie ; les caractéristiques de son appareil reproducteur ; la connaissance d'espèces sauvages apparentées, y compris celles qui peuvent s'hybrider ; son centre d'origine et sa diversité ; son caractère nuisible).

Une série distincte mais complémentaire de documents a également été publiée, qui entre dans l'évaluation de la sécurité des aliments nouveaux, en particulier ceux issus de variétés transgéniques. Là encore, ces documents sont destinés à faire partie de l'évaluation réglementaire de la sécurité.

Une autre initiative multilatérale mérite d'être mentionnée, le Protocole de Cartagena sur la prévention des risques biotechnologiques, qui constitue un instrument international fondamental dans le cadre des opérations mettant en jeu des « organismes vivants modifiés » (OVM) lors des mouvements transfrontières. L'objectif de ce Protocole est de contribuer à assurer un degré adéquat de protection pour le transfert, la manipulation et l'utilisation sans danger des OVM résultant de la biotechnologie moderne qui peuvent avoir des effets défavorables sur la conservation et l'utilisation durable de la diversité biologique. Le Protocole a instauré une procédure d'accord préalable en connaissance de cause afin de garantir que les États disposent des informations nécessaires pour prendre des décisions éclairées avant d'autoriser l'importation d'organismes de ce type sur leur territoire. Le Protocole a également créé un Centre d'échange pour la prévention des risques biotechnologiques afin de faciliter l'échange d'informations sur les OVM employés comme aliments ou entrant dans la transformation alimentaire, notamment. Ce Centre aide également les États dans la mise en œuvre du Protocole.

Les gouvernements doivent tenir compte des appréhensions des citoyens et les informer des risques

La confiance des citoyens dans les décisions que le Gouvernement prend en leur nom est une condition préalable à l'acceptation et l'adoption des produits issus des biotechnologies agricoles. Un appareil réglementaire de biosécurité bien défini est une condition indispensable à la concrétisation des bénéfices que la biotechnologie agricole moderne peut apporter à la croissance verte. En effet, en cas de déficiences, il pourrait alimenter la méfiance de la population et susciter une opposition à ces techniques.

Pour assurer une bonne acceptation, la perception des risques par le public est aussi importante que les évaluations fondées sur des éléments scientifiques. L'acceptabilité de la biotechnologie agricole moderne connaît de nettes différences nationales et régionales. Les inquiétudes persistantes liées aux risques possibles pour la sécurité des aliments et l'environnement ont ralenti, voire bloqué, la commercialisation dans de nombreux pays. L'attitude du public vis-à-vis de la biotechnologie, y compris la perception par les consommateurs du « caractère naturel » des aliments issus des biotechnologies, joue un rôle important pour déterminer dans quelle mesure les techniques du génie génétique seront adoptées dans l'alimentation et l'agriculture (Van Haperen, 2012 ; Van den Heuvel et al., 2008).

Comme il l'a été mentionné ci-avant, les techniques du génie génétique ont été appliquées principalement à quatre plantes : le soja, le coton, le maïs et le colza oléagineux. La betterave sucrière, la luzerne et la pomme de terre génétiquement modifiées prennent peu à peu de l'importance. Des innovations portant sur le blé, l'orge, le riz et de nombreuses autres espèces sont également escomptées (Stein et Rodriguez-Cerezo, 2009). Les produits végétaux issus des biotechnologies trouvent leur principale application dans les aliments pour animaux et la transformation alimentaire, mais ne sont jamais destinés directement à la consommation humaine.

Les nouveaux caractères visant à optimiser la valeur (deuxième génération de plantes génétiquement modifiées) sont susceptibles d'être introduits dans les cultures de plein champ. Pour ce faire, ces produits devraient offrir non seulement une meilleure qualité, mais aussi de bonnes performances agronomiques. Contrairement aux plantes issues des biotechnologies de première génération, desquelles les agriculteurs attendaient des bénéfices directs à travers la baisse des coûts de leurs intrants (pesticides ou herbicides), le taux d'adoption de la nouvelle génération risque de progresser plus lentement. En outre, certaines cultures génétiquement modifiées à valeur optimisée se limiteront sans doute à des marchés de niche (CE, 2001).

L'un des obstacles à la commercialisation des cultures génétiquement modifiées est la réticence du secteur en aval de la production, constitué notamment des minoteries, des brasseries, des fabriques de boissons sans alcool et des chaînes de restauration rapide, à utiliser des OGM (Gruère et Sengupta, 2009 ; Venus et al., 2012). Cette situation a évolué récemment aux États-Unis et au Canada pour la pomme de terre (Johnson, 2014), la betterave sucrière (Dillen et al., 2012) et le blé (Arnason, 2013). Dans l'ensemble, cette difficulté d'adoption s'explique par l'appréhension du consommateur face à l'utilisation de produits alimentaires issus de plantes génétiquement modifiées.

Dans l'ensemble, les produits issus de plantes génétiquement modifiées ont été fructueux dans les régions du monde où ces techniques sont bien acceptées. Des dispositifs réglementaires restrictifs ont vu le jour, également en conséquence des perceptions négatives du public, qui ont peu de liens avec les preuves scientifiques et les évaluations objectives des risques (Miller, 2007). Ces techniques doivent recueillir une plus grande adhésion des consommateurs avant qu'une réforme de la réglementation puisse avoir lieu.

L'acceptation par les consommateurs des aliments contenant des ingrédients issus des biotechnologies varie en fonction des caractéristiques du produit, des caractéristiques géographiques et des informations que le public reçoit. Dans les pays de l'OCDE, la plupart des études concluent que les consommateurs sont enclins à payer une majoration pour avoir des aliments qui ne contiennent pas d'ingrédients génétiquement modifiés : la disposition à payer pour obtenir des aliments non

génétiqumment modifiés est la plus forte dans l'Union européenne, où certains détaillants ont mis en place des directives limitant l'utilisation d'ingrédients issus des biotechnologies. Des aliments garantis sans OGM sont commercialisés aux États-Unis, mais ils représentent une petite fraction du marché alimentaire de détail.

Les facteurs sociaux jouent un rôle fondamental dans le débat sur les cultures génétiquement modifiées. Certains agriculteurs peuvent refuser de cultiver des plantes issues des biotechnologies pour des raisons éthiques, culturelles ou autres (mais les études empiriques disponibles sur l'adoption ou le rejet de ces cultures ne signalent pas que les raisons éthiques soient un facteur important pour les agriculteurs). Un facteur important dans l'Union européenne est l'opinion des voisins, amis et communautés locales. Certains agriculteurs qui envisageaient la possibilité de cultiver des plantes génétiquement modifiées ont observé que leur famille avait reçu des menaces (Venus et al., 2012), alors que d'autres ont déclaré que des producteurs en agriculture biologique leur avaient fait subir des pressions sociales.

Notes

1. Pour de plus amples informations sur les travaux de l'OCDE relatifs à la biotechnologie, veuillez consulter le site suivant : www.oecd.org/sti/biotech/.
2. Pour cette raison, l'OCDE recommande que cette définition soit toujours accompagnée d'une définition par liste qui comprend sept catégories et s'emploie comme un guide d'interprétation. Ces catégories sont les suivantes : ADN/ARN ; protéines et autres molécules ; culture et ingénierie des cellules et des tissus ; techniques biotechnologiques des procédés ; vecteurs de gènes et d'ARN ; bioinformatique ; nanobiotechnologie. En outre, les enquêtés ont généralement la possibilité de proposer une catégorie « Autres » pour les biotechnologies ne correspondant à aucune des catégories de la liste. Une entreprise déclarant exercer une activité dans au moins l'une des catégories est définie comme une entreprise biotechnologique.
3. La Convention sur la diversité biologique (CBD) donne la définition suivante de la biotechnologie : « Toute application technologique qui utilise des systèmes biologiques, des organismes vivants, ou des dérivés de ceux-ci, pour réaliser ou modifier des produits ou des procédés à usage spécifique » (Secrétariat de la Convention sur la Diversité Biologique, 1992). Cette définition inclut les applications médicales et industrielles ainsi que de nombreux outils et techniques courants dans l'agriculture et la production alimentaire. Le Protocole de Cartagena sur la prévention des risques biotechnologiques définit la « biotechnologie moderne » dans un sens plus restreint, comme étant : a) l'application de techniques *in vitro* aux acides nucléiques, y compris la recombinaison de l'acide désoxyribonucléique (ADN) et l'introduction directe d'acides nucléiques dans des cellules ou organites ; b) la fusion cellulaire d'organismes n'appartenant pas à une même famille taxonomique, qui surmontent les barrières naturelles de la physiologie de la reproduction ou de la recombinaison et qui ne sont pas des techniques utilisées pour la reproduction et la sélection de type classique (Secrétariat de la Convention sur la Diversité Biologique).
4. Par exemple, des micro-organismes sont utilisés depuis des dizaines d'années comme fabriques vivantes d'antibiotiques capables de sauver des vies, notamment de la pénicilline, à partir du champignon *Penicillium*, et de la streptomycine, à partir de la bactérie *Streptomyces*. Les détergents modernes utilisent des enzymes produites par procédé biotechnologique, la production de fromage à pâte dure se fait en grande partie au moyen de présure obtenue par levure issue de la biotechnologie et l'insuline humaine pour le traitement du diabète est désormais obtenue par biotechnologie également.

5. Les termes retenus pour décrire les produits issus de la biotechnologie moderne varient en fonction des pays. Le présent document utilise les termes « plantes transgéniques » ou « organismes transgéniques ». Dans le cadre du présent texte, le terme « organismes transgéniques » est équivalent aux termes « organismes génétiquement modifiés » (OGM), « organismes issus des biotechnologies » ou « organismes vivants modifiés » (OVM). À des fins pratiques, l'application de ces termes aux produits végétaux est désignée par le terme « plantes génétiquement modifiées ».
6. Les modifications génétiques sont également recensées dans la base de données Biotrack Product Database de l'OCDE, mise à jour régulièrement et librement par les autorités nationales : www2.oecd.org/biotech/.
7. Parmi les modifications génétiques, l'événement GTS-40-3-2 du soja tolérant aux herbicides a reçu le plus grand nombre d'autorisations, suivi des événements NK603 du maïs tolérant aux herbicides, MON810 du maïs résistant aux insectes et Bt11 du maïs résistant aux insectes (James, 2015).
8. La culture de la pomme de terre Amflora, autorisées en 2010 en même temps que sa transformation industrielle, a cessé en 2011.
9. Les premiers adoptants de toute technologie agricole ont tendance à en retirer davantage de bénéfices que les adoptants plus tardifs car ils obtiennent un avantage de coût sur les autres agriculteurs, du fait qu'ils gagnent la possibilité d'imposer une majoration pour leur innovation. À mesure que le nombre d'agriculteurs adoptant la technologie grandit, la réduction des coûts finit par se répercuter sur le prix du produit, ce qui signifie que les bénéfices pour les agriculteurs diminuent alors que les consommateurs continuent de profiter du produit.
10. C'est le cas de certains produits d'origine animale garantis sans OGM en Europe, et d'un grand nombre de produits sans OGM des États-Unis. Or, de nombreux pays fabriquent à la fois des produits avec et sans OGM, ce qui leur permet d'équilibrer les avantages économiques. En Amérique du Nord, de grandes exploitations cultivent les deux types de produits, qu'elles commercialisent en fonction de l'anticipation des fluctuations des prix.
11. Les petits exploitants, notamment, peuvent avoir l'esprit d'entreprise mais ne pas bénéficier de la sécurité suffisante pour prendre des risques. Afin de mettre en place et préserver un climat favorable à cet esprit d'entreprise, il convient de supprimer divers obstacles sur lesquels les agriculteurs n'ont aucune emprise : des infrastructures insuffisantes ou inexistantes, une législation et une réglementation désavantageuses, une pénurie de capital d'investissement, des obstacles sociaux, un manque de dispositifs de formation pour les agriculteurs, de services de soutien et de personnel de vulgarisation, et un accès restreint aux marchés (communications déficientes, services de commercialisation rudimentaires, manque d'informations fiables en temps voulu) (Kahan, 2012).
12. Une revue systématique (ou revue systématique des travaux publiés, ou encore revue structurée des travaux publiés) est une analyse des écrits axée sur une question de recherche qui tente d'identifier, d'évaluer, de sélectionner et de synthétiser tous les éléments de recherche de bonne qualité relatifs à cette question. Cette méthode dresse une synthèse et une évaluation critique des observations recueillies.
13. Les deux herbicides les plus répandus sont le Roundup Ready, qui contient du glyphosphate, et le BASTA, qui contient du glufosinate (Wolfenbarger et Phifer, 2000).
14. Voir par exemple, Royal Society, 1998 ; Ervin et al., 2000 ; Fernandez-Cornejo et McBride, 2002 ; Wolfenbarger et Phifer, 2000 ; Kleter et Kuiper, 2005.
15. Des éléments récents tendent toutefois à démontrer que la toxicité du glyphosphate est peut-être supérieure à ce que les estimations laissaient penser jusqu'à présent et que le risque qu'il représente pour l'environnement devrait être réévalué (FOEE, 2013 ; Helander *et al.*, 2012).

16. La formulation précise de la gestion des risques est obligatoire pour les cultures issues des biotechnologies résistantes aux insectes, mais pas pour celles tolérantes aux herbicides. En conséquence, des mesures et un suivi rigoureux de la gestion de la résistance des mauvaises herbes ont été imposées pour les cultures issues des biotechnologies résistantes aux insectes (en particulier le maïs Bt et le coton Bt) depuis la délivrance des premières autorisations. À l'inverse, l'évolution des mauvaises herbes résistantes aux herbicides pose désormais problème dans les cultures génétiquement modifiées résistantes aux herbicides aux États-Unis, en Argentine, au Paraguay et au Brésil. Les conséquences pour la biodiversité sont le résultat de l'intensification de l'utilisation d'herbicides employés dans la lutte contre les adventices résistantes qui sont plus toxiques et/ou plus persistants dans l'environnement que le glyphosphate, notamment le 2-4-D ou dicamba, et/ou de la multiplication des traitements au glyphosphate (Brookes et Barfoot, 2013).

Bibliographie

- Al-Deeb, M.A., G.E. Wilde, J.M. Blair et T.C. Todd (2003), « Effect of Bt Corn for corn rootworm control on non-target soil micro arthropods and nematodes », *Environmental Entomology*, vol. 32, n° 4, pp. 85-65.
- Álvarez-Alfageme, F., F. Bigler et J. Romeis (2011), « Laboratory toxicity studies demonstrate no adverse effects of Cry1Ab and Cry3Bb1 to larvae of *Adalia bipunctata* (Coleoptera: Coccinellidae): The importance of study design », *Transgenic Research*, vol. 20.
- Arnason, R. (2013), « Canadian grain industry still not clear on GM wheat », *The Western Producer*, www.producer.com/daily/canadian-grain-industry-still-not-clear-on-gm-wheat/.
- Backus, G., P. Berkhout, D. Eaton, T. de Kleijn, E. van Mil, P. Roza, W. Uffelman, L. Franke et B. Lotz (2009), *EU Policy on GMOs: A Quick Scan of the Economic Consequences*, LEI Wageningen UR, La Haye.
- Baker, D.B. (1990), « Herbicide concentrations in Ohio's drinking water supplies: A quantitative assessment », in D.L. Weigmann (dir. pub.), *Pesticides in the Next Decade: The Challenges Ahead*, Virginia Water Resources Center et VPI, Blacksburg, Virginie.
- Barrows, J., S. Sexton et D. Zilberman (2014), « Agricultural biotechnology: The promise and prospects of genetically modified crops », *Journal of Economic Perspectives*, vol. 28, n° 1.
- Barrows, J., S. Sexton et D. Zilberman (2015), « The impact of agricultural biotechnology on supply and land-use », *Environment and Development Economics*, vol. 19, n° 6.
- Beckert, M., Y. Dessaux, C. Charlier, H. Darmency, C. Richard, I. Savini et A. Tibi (dir. pub.) (2011), *Les variétés végétales tolérantes aux herbicides. Effets agronomiques, environnementaux, socio-économiques. Expertise scientifique collective*, CNRS-INRA (France), www6.paris.inra.fr/depe/Projets/Varietes-Vegeales-Tolerantes-aux-Herbicides
- Beckert, M., Y. Dessaux, C. Charlier, H. Darmency, C. Richard, I. Savini et A. Tibi (dir. pub.) (2011), *Les variétés végétales tolérantes aux herbicides. Effets agronomiques, environnementaux, socio-économiques. Expertise scientifique collective*, CNRS-INRA (France), www6.paris.inra.fr/depe/Projets/Varietes-Vegeales-Tolerantes-aux-Herbicides.
- Beckie, H.J., K.N. Harker, L.M. Hall, S.I. Warwick, A. Légère, P.H. Sikkema, G.W. Clayton, A.G. Thomas, J.Y. Leeson, G. Séguin-Schwarz et M.-J. Simard (2006), « A decade of herbicide-resistant crops in Canada », *Canadian Journal of Plant Science*, vol. 86, n° 4.
- Beckmann, V., C. Soregaroli et J. Wesseler (2006), « Co-existence rules and regulations in the European Union », *American Journal of Agricultural Economics*, vol. 88, n° 5.
- Beckmann, V., C. Soregaroli et J. Wesseler (2010), « Ex-ante regulation and ex-post liability under uncertainty and irreversibility: Governing the coexistence of GM crops », *Economics: The Open-Access, Open-Assessment E-Journal*, vol. 4.
- Beckmann, V., C. Soregaroli et J. Wesseler (2011), « Coexistence of genetically modified (GM) and non-modified (non GM) crops: Are the two main property rights regimes equivalent with respect to the coexistence value? », dans C. Carter, G. Moschini et I. Sheldon (dir. pub.), « Genetically modified food and global welfare », *Frontiers of Economics and Globalization Series*, vol. 10, Emerald Group Publishing, Bingley.

- Benbrook, C. (2012), « Impacts of genetically engineered crops on pesticide use in the U.S. - The first sixteen years », *Environmental Sciences Europe*, vol. 24, n° 24.
- Bennett, A.B., C. Chi-Ham, G. Barrows, S. Sexton et D. Zilberman (2013), « Agricultural biotechnology: Economics, environment, ethics, and the future », *Annual Review of Environment and Resources*, vol. 3, n° 8.
- Binimelis, R. (2008), « Co-existence of plants and coexistence of farmers: Is an individual choice possible? », *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, vol. 21.
- Bonny, S. (2008), « Genetically modified glyphosate-tolerant soybean in the USA: Adoption factors, impacts and prospects. A review », *Agronomy for Sustainable Development*, vol. 28, n° 1.
- Brookes, G. (2003), « The farm level impact of using Bt maize in Spain », communication présentée au 7^e International Consortium on Agricultural Biotechnology Research – International Conference on Public Goods and Public Policy for Agricultural Biotechnology, 29 juin-3 juillet, Ravello.
- Brookes, G. et P. Barfoot (2008), « Global impact of biotech crops: Socio-economic and environmental effects, 1996-2006 », *AgBioForum*, vol. 11, n° 1.
- Brookes, G. et P. Barfoot (2013), *GM Crops: Global Socio-economic and Environmental Impacts 1996-2011*, PG Economics Ltd, UK.
- Bullock, D.S. et J. Lowenberg-DeBoer (2007), « Using spatial analysis to study the values of variable rate technology and information », *Journal of Agricultural Economics*, vol. 58, n° 3.
- Cargill (2014), « Responsible soy production », www.cargill.com/corporate-responsibility/pov/soy-production/responsible-soy-production-amazon/index.jsp, consulté le 14 mars 2014.
- Carpenter, J. (2010), « Peer-reviewed surveys indicate positive impact of commercialized GM crops », *Nature Biotechnology*, vol. 28, pp. 319-321.
- Carrière, Y., C. Eilers-Kirk, M. Sisterson, L. Antilla, M. Whitlow, T.J. Dennehy et B.E. Tabashnik (2003), « Long-term regional suppression of pink bollworm by *Bacillus thuringiensis* cotton », *Proceedings of the National Association of Sciences* (PNAS), vol. 100, n° 4.
- Carter, C.A. et A. Smith (2007), « Estimating the market effect of a food scare: The case of genetically modified Starlink Corn », *Review of Economics and Statistics*, vol. 89, n° 2.
- CE (2001), « Economic impacts of genetically modified crops on the agri-food sector – A first review », Document de travail rev. 2, Direction générale de l'Agriculture et du Développement Rural, Commission européenne, Bruxelles.
- CE (2010), *Dix ans de recherche financée par l'UE sur les OGM*, UE 24473 FR, Direction générale de la recherche, Commission européenne, Bruxelles.
- Commission européenne (CE) (2011), « Rapport de la Commission au Parlement européen et au Conseil sur les répercussions socioéconomiques de la culture d'OGM établi sur la base des contributions des États membres, conformément à la demande formulée dans les conclusions du Conseil « Environnement » de décembre 2008 », *rapport de la Commission au Parlement européen et au Conseil*, COM(2011) 0214 final, Commission européenne, Bruxelles.
- Defra (2013), « Farm practices survey autumn 2012 – England », Department for Environment, Food and Rural Affairs, www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/181719/defra-stats-foodfarm-environ-fps-statsrelease-autumn2012edition-130328.pdf (consulté le 4 février 2014).
- Demont, M., J. Wesseler et E. Tollens (2004), « Biodiversity versus transgenic sugar beets – The one euro question », *European Review of Agricultural Economics*, vol. 31, n° 1.
- Dillen, K., M. Demont, P. Tillie et E. Rodriguez-Cerezo (2012), « Bred for Europe but grown in America: The case of GM sugar beet », *New Biotechnology*, vol. 30, n° 2.
- Dunwell, J.M. et C.S. Ford (2005), « Technologies for Biological Containment of GM and Non-GM Crops », Defra Contract CPEC 47, Londres.

- EFSA Panel on Genetically Modified Organisms (2010), « Guidance on the environmental risk assessment of genetically modified plants », *EFSA Journal*, vol. 8, n° 11.
- Ellstrand, N.C. (2001), « When transgenes wander, should we worry? », *Plant Physiology*, vol. 125.
- Environmental Biosafety Research (2006), « Special issue on OECD workshop on beyond the Blue Book. Framework for risk/safety assessment of transgenic plants », *Environmental Biosafety Research*, vol. 5, n° 4.
- Ervin, D. et al. (2000), « Transgenic crops: An environmental assessment », Henry A. Wallace Center for Agricultural and Environmental Policy, Winrock, Arlington, novembre.
- Ervin, D. et R. Welsh (2005), « Environmental effects of genetically modified crops: A differentiated risk assessment model », in J. Wesseler (dir. pub.), *Environmental Costs and Benefits of Transgenic Crops in Europe: Implications for Research, Production, and Consumption*, Springer, Dordrecht.
- EUROSTAT (2013), « Biotechnology patent applications to the EPO by priority year at the national level », http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_SDDS/EN/pat_esms.htm.
- FAO (2003), *Report of the FAO Expert Consultation on the Environmental Effects of Genetically Modified Crops 16-18 June 2003*, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome.
- FAO (2014), *Résultats de l'enquête de la FAO sur les faibles proportions de végétaux cultivés génétiquement modifiés dans le commerce international des produits destinés à l'alimentation humaine ou animale*, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome.
- Fawcett, R. et D. Towery (2003), *Conservation Tillage and Plant Biotechnology: How New Technologies can Improve the Environment by Reducing the Need to Plow*, Purdue University, Conservation Technology Information Center (CTIC).
- Fedorof, N.V., D.S. Battisti, R.N. Beachy, P.J.M. Cooper, D.A. Fischhoff, C.N. Hodges, V.C. Knauf, D. Lobell, B.J. Mazur, D. Molden, M.P. Reynolds, P.R. Ronald, M.W. Rosegrant, P.A. Sanchez, A. Vonshak et J.-K. Zhu (2010), « Radically rethinking agriculture for the 21st century », *Science*, vol. 327.
- Fernandez-Cornejo, J. et W. McBride (2002), « Adoption of bioengineered crops », *Agricultural Economic Report*, n° 810, Economic Research Service/U.S. Department of RS/USDA, Washington, D.C.
- Fernandez-Cornejo, J., S. Wechsler, M. Livingston et L. Mitchell (2014), « Genetically engineered crops in the United States », U.S. Department of Agriculture, *Economic Research Report*, n° 162, Washington, D.C.
- Finger, R., N. El Benni, T. Kaphengst, C. Evans, S. Herbert, B. Lehmann, S. Morse et N. Stupak (2011), « A meta analysis on farm-level costs and benefits of GM crops », *Sustainability*, vol. 3.
- Finger, R., N. El Benni, T. Kaphengst, C. Evans, S. Herbert, B. Lehmann, S. Morse et N. Stupak (2011), « A Meta Analysis on Farm-Level Costs and Benefits of GM Crops », *Sustainability*, vol. 3, pp. 743-762.
- Firbank, L., P. Rothery, M. May, S. Clark, R. Scott, R. Stuart, C. Boffey, D. Brooks, G. Champion, A. Houghton, C. Hawes, M. Heard, A. Dewar, J. Perry et G. Squire (2006), « Effects of genetically modified herbicide-tolerant cropping systems on weed seedbanks in two years of following crops », *Biology Letters*, vol. 2, pp. 140-43.
- Foster, M. (2003), « GM canola: What are the economics under Australian conditions? », *Australian Grains Industry*, ABARE, Canberra.
- Frisvold, G.B. et J.M. Reeves (2010), « Resistance management and sustainable use of agricultural biotechnology », *AgBioForum*, vol. 13, n° 4.
- Frisvold, G.B., A. Boor et J.M. Reeves (2009), « Simultaneous diffusion of herbicide resistant cotton and conservation tillage », *AgBioForum*, vol. 12, n° 3 et 4.

- Gaines, T.A., W. Zhang, D. Wang, B. Bukun, S.T. Chisholm, D.L. Shaner, S.J. Nissen, W.L. Patzoldt, P.J. Tranel, A.S. Culpepper, T.L. Grey, T.M. Webster, W.K. Vencill, R.D. Sammons, J. Jiang, C. Preston, J.E. Leach et P. Westra (2010), « Gene amplification confers glyphosate resistance in *Amaranthus palmeri* », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 107, n° 3.
- Gianessi, L., S. Sankula et N. Reigner (2003), *Plant Biotechnology: Potential Impact for Improving Pest Management in European Agriculture: A Summary of Nine Case Studies*, National Center for Food and Agricultural Policy [NCFAP], Washington, D.C., décembre (le rapport complet est consultable à l'adresse www.ncfap.org).
- GMO Compass (2014), « Short description of the GM plant », www.gmo-compass.org/eng/gmo/db/, consulté le 14 mars 2014.
- Gruère, G. et D. Sengupta (2009), « GM-free private standards and their effects on biosafety decision-making in developing countries », *Food Policy*, vol. 34, pp. 399-406.
- Gueritain, G., M. Sester, F. Eber, A.M. Chevre et H. Darmency (2002), « Fitness of backcross six hybrids of hybrids between transgenic oilseed rape (*Brassica napus*) and wild radish (*Raphanus raphanistrum*) », *Molecular Ecology*, vol. 11.
- Gulden, R.H., P.H. Sikkema, A.S. Hamill, F.J. Tardif et C.J. Swanton (2010) « Glyphosate-resistant cropping systems in Ontario: Multivariate and nominal trait-based weed community structure », *Weed Science*, vol. 3, n° 58, pp. 278-88.
- Gulden, R.H., P.H. Sikkema, A.S. Hamill, F.J. Tardif et C.J. Swanton (2009) « Conventional vs. glyphosate-resistant cropping systems in Ontario: Weed control, diversity, and yield », *Weed Science*, vol. 57, n° 6, pp. 665-672.
- Gusta, M., S.J. Smyth, K. Belcher, P.W.B. Phillips et D. Caste (2011), « Economic benefits of genetically modified herbicide tolerant canola for producers », *AgBioForum*, vol. 14, n° 1.
- Hall, A. et K. Dorai (2010), « The greening of agriculture: Agricultural innovation and sustainable growth », document préparé pour l'OCDE, www.oecd.org/tad/sustainable-agriculture/48268377.pdf.
- Hall, C., B. Knight et S. Ringrose (2013), « What have been the farm-level economic impacts of the global cultivation of GM crops? Systematic review », *Environmental Evidence*, CEE Review 11-002, www.environmentalevidence.org/wp-content/uploads/2014/07/CEE11-002.pdf.
- Haughton, A. J., G.T. Champion, C. Hawes, M.S. Heard, D.R. Brooks, D.A. Bohan, S.J. Clark, A.M. Dewar, L.G. Firbank, J.L. Osborne, J.N. Perry, P. Rothery, D.B. Roy, R.J. Scott, I.P. Woiwod, C. Birchall, M.P. Skellern, J.H. Walker, P. Baker, E.L. Browne, A.J.G. Dewar, B.H. Garner, L.A. Haylock, S.L. Horne, N.S. Mason, R.J.N. Sands et M.J. Walker (2003), *Invertebrate responses to the Management of Genetically Modified Herbicide-tolerant and Conventional Spring Crops. II. Within-field Epigeal and Aerial Arthropods*, Philosophical Transactions of The Royal Society of London, série B, vol. 358, n° 1439, pp. 1863-1877.
- Hawes, C., A.J. Haughton, J.L. Osborne, D.B. Roy, S.J. Clark, J.N. Perry, P. Rothery, D.A. Bohan, D.R. Brooks, G.T. Champion, A.M. Dewar, M.S. Heard, I.P. Woiwod, R.E. Daniels, M.W. Young, A.M. Parish, R.J. Scott, L.G. Firbank et G.R. Squire (2003), *Responses of Plants and Invertebrate Trophic Groups to Contrasting Herbicide Regimes in the Farm Scale Evaluations of Genetically Modified Herbicide-tolerant Crops*, Philosophical Transactions of The Royal Society of London, série B, vol. 358, n° 1439, pp. 1899-1913.
- Heard, M.S., C. Hawes, G.T. Champion, S.J. Clark, L.G. Firbank, A.J. Haughton, A.M. Parish, J.N. Perry, P. Rothery, D.B. Roy, R.J. Scott, M.P. Skellern, G.R. Squire et M.O. Hill (2003), *Weeds in fields with contrasting conventional and genetically modified herbicide-tolerant crops. II. Effects on individual species*, Philosophical Transactions of The Royal Society of London, série B, vol. 358, n° 1439, pp. 1833-1846.
- Helander, M., I. Saloniemi et K. Saikkonen (2012), « Trends Glyphosate in northern ecosystems », *Plant Science*, vol. 17, n° 10.

- Henkel, J. et S.M. Maurer (2009), « Parts, property and sharing », *Nature Biotechnology*, vol. 27, n° 12.
- Herring, R. (2008), « Opposition to transgenic technologies: Ideology, interests and collective action frames », *Nature Genetics*, vol. 9, pp. 458-463.
- Herring, R. (2009), « Persistent narratives: Why is the “failure of Bt cotton in India” story still with us? », *AgBioForum*, vol. 12, n° 1.
- Hoenen, S., C. Kolympiris, W. Schoenmakers et N. Kalaitzandonakes (2015), « The diminishing signaling value of patents between early rounds of venture capital financing », *Research Policy*, à paraître.
- Hossain, F., C.E. Pray, Y. Lu, J. Huang, C. Fan et R. Hu (2004), « Genetically modified cotton and farmers’ health in China », *International Journal of Occupational Environmental Health*, vol. 10.
- Huang, J., R. Hu, S. Rozelle et C. Pray (2005), « Insect-resistant GM rice in farmers’ fields: Assessing productivity and health effects in China », *Science*, vol. 308.
- James, C. (2015), *The Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2014*, ISAAA Brief No. 49, Ithaca, New York.
- Jenczewski, E., J. Ronfort et A.M. Chevre (2003), « Crop-to-wild gene flow, introgression and possible fitness effects of transgenes », *Environmental Biosafety Research*, vol. 2.
- Johnson, L. (2014), *McDonald's poised to embrace new GMO potato farming in 2014 and beyond*, www.naturalnews.com/043419_mcdonalds_gmo_potatoes_french_fries.html.
- Jones, J.D.G., K. Wittek, W. Verwij, F. Jupe, D. Cooke, S. Dorling, L. Tomlinson, M. Smoker, S. Perkins et S. Foster (2014), « Elevating crop disease resistance with cloned genes », *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 369, 20130087, <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2013.0087>.
- Jongsma, M.A., F. Gould, M. Legros, L. Yang, J.J.A. van Loon et M. Dicke (2010), « Insect oviposition behavior affects the evolution of adaptation to Bt crops: Consequences for refuge policies », *Evolutionary Ecology*, vol. 24, n° 5.
- Kahan (2012), « Entrepreneurship in farming », dans FAO (2012), *Farm management extension guide*, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome, www.fao.org/docrep/018/i3231e/i3231e.pdf.
- Kleter, G. et H. Kuiper (2005), « Assessing the environmental impact of changes in pesticide use on transgenic crops », in J. Wesseler (dir. pub.), « Environmental costs and benefits of transgenic crops », *Wageningen UR Frontis Series*, vol. 7, Springer, Dordrecht.
- Kleter, G.A., R. Bhula, K. Bodnaruk, E. Carazo, A.S. Felso, C.A. Harris, A. Katayama, H.A. Kuiper, K.D. Racke, B. Rubin, Y. Shevah, G.R. Stephenson, K. Tanaka, J. Unsworth, R.D. Wauchope et S. Wong (2007), « Altered pesticide use on transgenic crops and the associated general impact from an environmental perspective », *Pest Management Science*, vol. 63.
- Klumper, W. et M. Qaim (2014), « A meta-analysis of the impacts of genetically modified crops », *PLoS One* 9.
- Knox, O., A. McVittie, R. Walker, C. Hall, E. Booth et B. Knight (2012), « What are the environmental impacts of the global cultivation of GM crops? », document préparé pour le Department for Environment, Food and Rural Affairs, Royaume Uni.
- Kuiper, H.A., E.J. Kok et H.V. Davies (2013), « New EU legislation for risk assessment of GM food: No scientific justification for mandatory animal feeding trials », *Plant Biotechnology Journal*, vol. 11, n° 7.
- Lu, Y., K. Wu, Y. Jiang, B. Xis, P. Li, H. Feng, K.A.G. Wyckhuys et Y. Guo (2010), « Mirid bug outbreaks in multiple crops correlated with wide-scale adoption of Bt cotton in China », *Science*, vol. 328.
- Marra, M.C. et N.E. Piggott (2006), « The value of non-pecuniary characteristics of crop biotechnologies: A new look at the evidence » in R.E. Just, J.D. Alston et D. Zilberman (dir. pub.), *Regulating Agricultural Biotechnology: Economics and Policy*, Springer, New York.

- Meyer-Aurich, A., Miller, H. (2007), « Biotech's defining moments », *Trends Biotechnol.*, vol. 25, n° 2.
- Motavalli, P.P., R.J. Kremer, M. Fang et N.E. Means (2004), « Impact of genetically modified crops and their management on soil microbially mediated plant nutrient transformations », *Journal of Environmental Quality*, vol. 33, n° 3.
- National Research Council (NRC) (2010), *The Impact of Genetically Engineered Crops on Farm Sustainability in the United States*, National Academy Press, Washington, D.C.
- Nickson, T.E. (2005), « Crop biotechnology – The state of play », in G.M. Poppy et M.J. Wilkinson (dir. pub.), *Gene Flow from GM Plants*, Blackwell, Oxford.
- OCDE (2013), « Biotechnology for the environment in the future », *OECD Science, Technology and Policy Papers*, n° 3, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/5k4840hqhp7j-en>.
- OCDE (2009), *La Bioéconomie à l'horizon 2030 : quel programme d'action ?*, Éditions OCDE, Paris, <http://www.oecd.org/fr/prospective/defistechnologiquesetsocialesalong-terme/labioeconomiealhorizon2030quelprogrammedaction.htm>.
- OCDE (2008), *Compendium of Patent Statistics*, Éditions OCDE, Paris.
- OCDE (1993), *Safety Considerations for Biotechnology: Scale-up of Crop Plants*, Éditions OCDE, Paris, www.oecd.org/env/ehs/biotrack/Safety-considerations-scale-up-of-micro-organisms-as-biofertilizers.pdf.
- Pehu, E. et C. Ragasa (2007), « Agricultural biotechnology transgenics in agriculture and their implications for developing countries », document de référence pour le Rapport 2008 sur le développement dans le monde, 19 septembre 2007, www-wds.worldbank.org/external/default/WDSContentServer/WDSP/IB/2007/11/12/000020953_20071112100023/Rendered/PDF/413720AgricultureTechnology01PUBLIC1.pdf.
- Pems, D., A. Gutierrez et H. Waibe (2008), « The economics of biotechnology under ecosystem disruption », *Ecological Economics*, vol. 66, pp. 177-183.
- Perry J., Y. Devos, S. Arpaia, D. Bartsch, A. Gathmann, R. Hails, J. Kiss, K. Lheureux, B. Manachini, S. Mestdagh, G. Neemann, F. Ortego, J. Schiemann et J. Sweet (2010), « A mathematical model of exposure of non-target Lepidoptera to Bt-maize pollen expressing Cry1Ab within Europe », *Proceedings, The Royal Society, Biological Sciences*, vol. 277, pp. 1417-1425.
- Pilson, D. et H.R. Prendeville (2004), « Ecological effects of transgenic crops and the escape of transgenes into wild populations », *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, vol. 35.
- Protrykus, I. (2010), « Lessons from the 'Humanitarian Golden Rice' project: Regulation prevents development of public good genetically engineered crop products », *New Biotechnology*, vol. 27, n° 5.
- Puricelli, E. et D. Tiesca (2005), « Effect of tillage system on the weed community in wheat and fallows in sequences with glyphosate resistant crops », *Agriscientia*, vol. XXII, n° 2.
- Qaim, M. (2009), « The economics of genetically modified crops », *Annual Review of Resource Economics*, vol. 1, n° 3.
- Qaim, M. et G. Traxler (2005), « Roundup ready soybeans in Argentina: Farm level and aggregate welfare effects », *Agricultural Economics*, vol. 32, pp. 73-86.
- Qaim, M., A.J. Stein et J.V. Meenakshi (2007), « Economics of biofortification », *Agricultural Economics*, vol. 37(S1).
- Rosegrant, M.W., J. Koo, N. Cenacchi, C. Ringler, R. Robertson, M. Fisher, C. Cox, K. Garrett, N.D. Perez et P. Sabbagh (2014), *Food Security in a World of Growing Natural Resource Scarcity: The Role of Agricultural Technologies for Maize, Rice and Wheat*, Institut international de recherche sur les politiques alimentaires (IFPRI), Washington, D.C.

- Saxena, D. et G. Stotzky (2001), « *Bacillus thuringiensis* (Bt) toxin released from root exudates and biomass of Bt corn has no apparent effect on earthworms, nematodes, protozoa, bacteria and fungi in soil », *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 33, pp. 1225-1230.
- Scatasta, S. (2005), « Comment on Van de Wiel, Groot and Den Nijs: gene flow from crop to wild plants and its population-ecological consequences in the context of GM-crop biosafety, including some recent experiences from lettuce » in J. Wesseler (dir. pub.), « Environmental costs and benefits of transgenic crops », *Wageningen UR Frontis Series*, vol. 7, pp. 143-162, Springer, Dordrecht.
- Scatasta, S., J. Wesseler et M. Demont (2006), « A critical assessment of methods for analysis of social welfare impacts of genetically modified crops: A literature survey », *Working Paper*, Mansholt Graduate School MWP-27, Wageningen University.
- Scoones, I. (2002), « Agricultural biotechnology and food security: Exploring the debate », *IDS Working Paper*, n° 145, Institute of Development Studies, Sussex.
- Scursoni, J., F. Forcella, J. Gunsolus, M. Owen, R. Oliver, R. Smeda et R. Vidrine (2006), « Weed diversity and soybean yield with glyphosate management along a north-south transect in the United States », *Weed Science*, vol. 54, pp. 713-719.
- Secchi, S., T.M. Hurley, B.A. Babcock et R.L. Hellmich (2006), « Managing European corn borer resistance to Bt corn with dynamic refuges », in R.D. Just, J.M. Alston et D. Zilberman (dir. pub.), *Regulating Biotechnology: Economics and Policy*, pp. 559-578, Springer, New York.
- Serecon Management Consulting and Koch Paul Associates (2001), *An Agronomic and Economic Assessment of Transgenic Canola*, rapport du Conseil canadien du canola, janvier.
- Serecon Management Consulting Inc. (2005), *Herbicide Tolerant Volunteer Canola Management in Subsequent Crops*, Conseil canadien du canola (CCC), Winnipeg, Manitoba.
- Service, R.F. (2007), « A growing threat down on the farm », *Science*, vol. 316, pp. 114-117.
- Sexton, S. et D. Zilberman (2011) « How agricultural biotechnology boosts food supply and accommodates biofuels », *Technical Report*, National Bureau of Economic Research, Washington, D.C.
- Smal, M., P. Zambrano, G. Gruère, J. Falck-Zepeda, I. Matuschke, D. Horna, L. Nagarajan, I. Yerramareddy et H. Jones (2009), « Measuring the economic impact of transgenic crops in developing countries agriculture during the first decade », *Food Policy Review*, vol. 10, IFPRI, Washington, D.C.
- Smale, M. (2012), « Challenges in measuring the economic impacts of biotech crops in developing agriculture », in M. Lusser, T. Raney, P. Tillie, K. Dillen et E. Rodriguez-Cerezo, International Workshop on Socio-economic Impacts of Genetically Modified Crops, co-organisé par l'IPTS-CCR et la FAO, *JRC Report*, EUR 25265 EN, pp. 61-64.
- Smart, R., S. Leimgruber et J. Wesseler (2012), « Approval processes: Comparing Canada, the EU, South Africa and the US », communication présentée à la Conférence internationale de l'ICABR 2012, Ravello, Italie.
- Smyth, S.J., M. Gusta, K. Belcher, P.W.B. Phillips et D. Caste (2011a), « Environmental impacts from herbicide tolerant canola production in western Canada », *Agricultural Systems*, vol. 104.
- Smyth, S.J., M. Gusta, K. Belcher, P.W.B. Phillips et D. Caste (2011b), « Changes in herbicide use following the adoption of herbicide tolerant canola in western Canada », *Weed Technology*, vol. 25.
- Speiser et al. (2012), « Sustainability assessment of GM crops in a Swiss agricultural context », *Agronomy for Sustainable Development*, vol. 33, numéro 1.
- Stein, A.J. et E. Rodriguez-Cerezo (2009), *The Global Pipeline of New GM Crops*, JRC Scientific and Technical Reports, Office des publications officielles des Communautés européennes, Luxembourg.
- The Royal Society (1998), *Genetically Modified Plants for Food Use*, Carlton House Terrace, Londres.
- Tilman, D., K.G. Cassman, P.A. Matson, R. Naylor et S. Polasky (2002), « Agricultural sustainability and intensive production practices », *Nature*, vol. 418, pp. 671-677.

- Tramper, J. et Y. Zhu (2011), *Modern Biotechnology*, Wageningen Academic Publishers, Pays-Bas.
- Traxler, G. (2004), « The economic impacts of biotechnology-based technological innovations », *ESA Working Paper*, n° 04-08, FAO, Rome.
- U.S. EPA (1986), *Pesticide Fact Sheet: Glyphosate*, n° 173, EPA 540/FS-88-124, Bureau des programmes sur les pesticides, l'Agence de protection de l'environnement des États-Unis, Washington, D.C.
- UK ACRE (2004a), *Advice on the Implications of the Farm-scale Evaluations of Genetically Modified Herbicide Tolerant Crops*, UK Advisory Committee on Releases to the Environment, Defra, UK.
- UK ACRE (2004b), *Advice on the Implications of the Farm-scale Evaluations of Genetically Modified Herbicide Tolerant Winter Oilseed Rape*, UK Advisory Committee on Releases to the Environment, Defra, UK.
- UK ACRE (2005), *Advice on the Implications of the Farm-scale Evaluations of Genetically Modified Herbicide Tolerant Winter Oilseed Rape*, UK Advisory Committee on Releases to the Environment, Defra, UK.
- USDA (1999a), *Genetically Engineered Crops for Pest Management*, Economic Research Service / ministère de l'Agriculture des États-Unis, Washington, D.C., www.econ.ag.gov/whatsnew/issues/biotech.
- USDA (1999b), *Impacts of Adopting Genetically Engineered Crops in the U.S. – Preliminary Results*, Economic Research Service / ministère de l'Agriculture des États-Unis, Washington, D.C., www.ers.usda.gov/emphases/harmony/issues/genengcrops/genengcrops.htm.
- Van den Heuvel, T., R. Renes, B. Gremmen, C. Van Woerkum et H. Van Trijp (2008), « Consumers' images regarding genomics as a tomato breeding technology: Maybe it can provide a more tasty tomato », *Euphytica*, vol. 159, pp. 207-216.
- Van Haperen, P. (2012), « Reconstruction of the ethical debate on naturalness in discussions about plant-biotechnology », *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, vol. 25, pp. 797-812.
- van Heerwaarden, J., M.B. Hufford et J. Ross-Ibarra (2013), « Historical genomics of North American maize », *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, vol. 31, n° 109.
- Venus, T., N. Kalaitzandonakes et J. Wesseler (2012), « Ist das Angebot von Nahrungsmitteln 'Ohne Gentechnik' wirtschaftlich Nachhaltig? », *Quarterly Journal of Economic Research*, vol. 81, n° 4.
- Venus, T., R. Casadamon, C. Soregaroli et J. Wesseler (2011), *Comparison of Bt and Non-Bt Maize Cultivation Gross Margin: A Case Study of Maize Producers from Italy, Spain and Germany*, FuturAgra, Rome.
- Wesseler, J. et D. Zilberman (2004), « The economic power of the Golden Rice opposition », *Environment and Development Economics*, vol. 19, n° 6.
- Wesseler, J. et N. Kalaitzandonakes (2011), *Present and Future EU GMO policy*, in A. Oskam, G. Meesters et H. Silvis (dir. pub.), *EU Policy for Agriculture, Food and Rural Areas, Second Edition*, Wageningen Academic Publishers, Pays-Bas.
- Wesseler, J., S. Scatista et E. Nillesen (2007), « The maximum incremental social tolerable irreversible costs (MISTICs) and other benefits and costs of introducing transgenic maize in the EU-15 », *Pedobiologia*, vol. 51, n° 3.
- Wolfenbarger L., S. Naranjo, J. Lundgren R. Bitzer et L. Watrud (2008), « Bt crop effects on functional guilds of non-target arthropods: a meta-analysis », *PLoS ONE*, vol. 3, n° 5.
- Wolfenbarger, L. et P. Phifer (2000), « The ecological risks and benefits of genetically engineered plants », *Science*, vol. 290, pp. 2088-2093.
- Wu, F. (2006), « Mycotoxin reduction in Bt corn: Potential economic, health, and regulatory impacts », *Transgenic Research*, vol. 15.

- Wu, K., Y. Lu, H. Feng, Y. Jiang et J. Zhao (2008), « Suppressing of cotton bollworm in multiple crops in China in areas with Bt toxin-containing cotton », *Science*, vol. 321.
- Young, B.G, D.J. Gibson, K.L. Gage, J.L. Matthews, D.L. Jordan, M.D.K. Owen, D.R. Shaw, S.C. Weller et R.G. Wilson (2013), « Agricultural weeds in glyphosate-resistant cropping systems in the United States », *Weed Science*, vol. 1, n° 61, pp. 85-97.
- Zablotowicz, R.M. et K.N. Reddy (2007), « Nitrogenase activity, nitrogen content, and yield responses to glyphosate in glyphosate-resistant soybean », *Crop Protection*, vol. 26, n° 3.
- Zilberman, D., S. Kaplan, E. Kim et G. Waterfield (2013), « Lessons from the California GM labeling proposition on the state of crop biotechnology », communication présentée au Congrès annuel conjoint SCAE-AAEA 2013, Washington, D.C.

Annexe 5A

Types de caractères transgéniques dans les cultures commerciales

À l'heure actuelle, trois types de caractères sont utilisés dans les cultures commerciales : la tolérance aux herbicides ; la résistance aux insectes ; la résistance aux virus. Les cultures transgéniques résistantes aux insectes sont un moyen de lutte contre des ravageurs spécifiques. Elles ont été mises au point en intégrant des gènes dérivés de différentes souches de la bactérie *Bacillus thuringiensis* (Bt), qui produit des toxines tuant certains insectes ravageurs, notamment la pyrale européenne et la pyrale du sud-ouest. Des gènes de résistance aux insectes ont été introduits dans du maïs et du coton.

L'insertion d'un gène de tolérance aux herbicides dans une plante permet aux producteurs d'épandre des herbicides à large spectre sur leurs champs afin de lutter contre les mauvaises herbes sans nuire à la culture. Les cultures tolérantes aux herbicides sont le soja, le maïs, le colza, le coton, la betterave sucrière et la luzerne. Des gènes de résistance aux virus ont été introduits dans le tabac, la pomme de terre, la papaye et la courge. Des cultures transgéniques à deux caractères ou plus (à événements empilés) ont également été mises au point. Actuellement, les empilements les plus courants sont l'association de la tolérance aux herbicides et de la résistance aux insectes (variétés Bt, notamment).

Outre ce nombre relativement faible de plantes génétiquement modifiées déjà commercialisées, il convient de savoir que la R-D étudie une vaste gamme de plantes et de caractères, dont beaucoup ont déjà subi des essais au champ. Bon nombre d'entre eux sont susceptibles d'être mis sur le marché dans un futur proche. Il faut environ dix ans pour qu'une nouvelle variété de plante transgénique passe du stade des essais au champ à la commercialisation (qui dépend du délai et de l'issue de la procédure d'autorisation réglementaire de biosécurité). Les nouveaux caractères transgéniques comprennent : une meilleure utilisation des éléments nutritifs par la plante ; une modification du métabolisme des plantes destinées à la production industrielle ; la tolérance au stress abiotique, notamment au gel et à la salinité ; la résistance à certaines maladies ; l'efficacité d'utilisation de l'azote ; la capacité de biorestauration. En particulier, les cultures en cours de mise au point comprennent : du soja aux qualités nutritionnelles améliorées pour les animaux, grâce à une hausse de la teneur en protéines et en acides aminés ; des plantes dont les matières grasses, l'amidon ou la fécule ont été modifiés afin de faciliter leur transformation et leur digestibilité, notamment le colza canola à forte teneur en stéarate et le maïs à faible teneur en phytate ou en acide phytique. La base de données Biotrack Product Database de l'OCDE (www2.oecd.org/biotech/) contient des informations sur la plupart des cultures transgéniques dont la commercialisation a été approuvée (à des fins de plantation ou d'utilisation alimentaire) dans les pays membres de l'OCDE.

Preuves empiriques des répercussions des cultures issues des biotechnologies

Répercussions économiques

Une étude de Klumper et Qaim (2014) s'est basée sur la méthode de la méta-analyse – à partir de 147 études de cultures génétiquement modifiées, menées entre 1995 et 2014 dans le monde entier – afin d'évaluer les retombées des cultures issues des biotechnologies (de soja, maïs ou coton) sur les rendements, l'utilisation de pesticides et les bénéfices des agriculteurs. Elle a abouti à la conclusion selon laquelle, en moyenne, la biotechnologie a réduit l'utilisation de pesticides chimiques de 37 %, a

amélioré les rendements des cultures de 22 % et a accru les bénéfices des agriculteurs de 68 %. Les répercussions sont variables, en particulier selon les caractères modifiés et les régions géographiques. L'amélioration des rendements et la baisse de l'utilisation de pesticides sont plus importantes pour les cultures résistantes aux insectes que pour celles tolérantes aux herbicides. L'amélioration des rendements et des bénéfices des agriculteurs est plus marquée dans les pays en développement que dans les pays développés.

Hall et al. (2013) ont réalisé une revue systématique des travaux publiés afin de dépouiller et d'analyser les travaux publiés entre 2006 et 2010 sur les coûts et les bénéfices des cultures génétiquement modifiées par rapport à l'agriculture conventionnelle. Cette revue a abouti notamment à la conclusion selon laquelle la culture de plantes génétiquement modifiées avait toujours des retombées économiques sur les exploitations, par rapport à leur équivalent non génétiquement modifié. Ce constat est particulièrement vrai pour certaines variables économiques telles que la marge brute et le coût des semences, mais est moins flagrant pour les prix et le coût de l'énergie, notamment. Ces retombées économiques sur les exploitations sont positives dans certains cas et négatives dans d'autres. En règle générale, la variation de la marge brute, des recettes et du bénéfice net est positive, alors que celle du coût des semences, du coût de la main-d'œuvre et des coûts totaux est négative. Étant donné que le prix ne présente généralement pas de variation, il est probable que la hausse du bénéfice et des recettes s'explique en grande partie par l'amélioration du rendement (et la baisse des pertes). Les retombées économiques varient en fonction des cultures et des associations de caractères, ce qui indique que la méthode consistant à aborder les « cultures génétiquement modifiées » comme une seule technologie homogène est inefficace et qu'il convient d'examiner chaque culture et chaque association de caractères une par une. Selon cette revue, les répercussions économiques varient également en fonction du stade de développement du pays, ce qui laisse entendre que la situation de référence de la production agricole au moment de la commercialisation est un facteur clé qui joue sur l'impact économique. L'évolution des bénéfices à l'échelle des exploitations était la moins prononcée dans les pays les plus développés, où les cultures génétiquement modifiées procuraient des bénéfices nets supérieurs de 66 %, alors que les coûts des semences étaient supérieurs de 97 % et les coûts totaux de 23 %.

Selon Qaim (2009), qui a passé en revue 19 études, la marge brute était plus élevée pour le coton Bt que pour le maïs Bt, ce qui semble indiquer que, pour les exploitations, les retombées économiques de la culture du coton génétiquement modifié sont susceptibles d'être supérieures à celles de la culture du maïs génétiquement modifié. Brookes et Barfoot (2013) font également état d'importants gains de productivité, tandis que Barrows et al. (2014b) estiment que la culture du coton, du maïs et du soja génétiquement modifiés ont permis de réduire la surface d'exploitation des terres d'environ 13 millions d'hectares sur la période 2000-10.

Après avoir analysé 49 études antérieures, Carpenter (2010) a réuni des preuves d'un impact économique négatif de la culture du coton génétiquement modifié dans différents pays, notamment en Afrique du Sud, Australie, Chine, Colombie et Inde. De même, selon Wang et al. (2008), les agriculteurs ayant planté du coton Bt dans certains villages chinois gagnent moins d'argent que ceux cultivant du coton conventionnel.

L'étude collective de spécialistes de l'INRA et du CNRS (Beckert, et al. 2011) parvient à une conclusion plus nuancée, selon laquelle le rendement des cultures génétiquement modifiées résistantes aux herbicides peut augmenter les premières années après leur adoption, mais peut ensuite reculer au bout de cinq ans. Cette évolution s'explique en partie par l'apparition d'une résistance aux herbicides, du fait que les agriculteurs sont obligés d'utiliser des herbicides plus toxiques et de payer les semences plus cher que les semences conventionnelles. Pour les cultures Bt, le rendement ne progresse pas. Selon l'étude de l'*Union of Concerned Scientists* (2009), l'impact global des cultures génétiquement modifiées sur le rendement est faible, voire nul pour le soja tolérant aux herbicides (qui est pourtant la culture issue des biotechnologies la plus répandue).

Les revues de travaux publiés sur les répercussions à l'échelle des exploitations ont souligné des variations considérables en termes de nature et d'ampleur de l'impact. Par exemple, la hausse des marges

brutes permise par la culture de plantes Bt et de plantes tolérantes aux herbicides présente des variations colossales entre les pays, allant de 12 USD par ha aux États-Unis (pour le maïs) à 470 USD par ha en Chine (pour le coton) (Qaim, 2009). Le coton génétiquement modifié présente d'autres variations internationales, avec 12 % de hausse des bénéfices au Mexique et 340 % en Chine (Pehu et Ragasa, 2007). Certaines études ont également mis en lumière une forte variabilité entre les années et les régions. Plus les conditions de culture, la pression exercée par les ravageurs, les pratiques agricoles et le contexte social sont hétérogènes, plus les bénéfices possibles risquent d'être variables.

Après avoir évalué l'impact de neuf cultures transgéniques dans l'UE, le *National Center for Food and Agricultural Policy* a conclu que, dans leur ensemble, ces neuf cultures transgéniques avaient la capacité d'améliorer les rendements de 8.5 millions de tonnes par an, d'accroître le revenu net des cultivateurs de 1.6 milliard USD par an et de réduire l'utilisation de pesticides de 0.014 million de tonnes par an. Les tomates transgéniques offrent la plus forte hausse du rendement et du revenu des agriculteurs, alors que le maïs tolérant aux herbicides permet la plus importante réduction d'utilisation des pesticides. La progression du rendement la plus remarquable est celle de la betterave sucrière transgénique, tandis que le rendement du riz, du blé et du maïs tolérants au glyphosate reste stable (Gianessi, Sankula et Reigner, 2003).

Selon Traxler (2003), le rendement du soja tolérant au glyphosate ne présente pas de différence significative avec celui du soja conventionnel, aux États-Unis comme en Argentine. Une étude du ministère de l'Agriculture des États-Unis (1999a) révèle que si le soja tolérant au glyphosate semble avoir un rendement plus faible, dans certaines régions du Midwest américain, les producteurs de maïs Bt ont obtenu des rendements 26 % supérieurs à ceux des cultures conventionnelles non modifiées. Pour Brookes et al. (2003), la variation du rendement du maïs Bt résistant aux insectes en Espagne dépend, entre autres, de l'emplacement, des facteurs climatiques, de la date d'ensemencement et de l'utilisation d'insecticides. La hausse moyenne nationale du rendement s'établit à 6.3 %. En Australie, l'avantage qu'offre le colza génétiquement modifié par rapport aux variétés non OGM en termes de rendement est estimé à 12.7 % (Foster, 2003), contre 10 % au Canada (Serecon et al., 2001).

Aux États-Unis, il a été estimé que le recours à la lutte contre la chrysomèle du maïs au moyen des biotechnologies sur 4 millions d'hectares avait permis d'obtenir 231 millions USD de recettes annuelles supplémentaires à partir de l'amélioration du rendement des cultures, de réduire l'utilisation d'insecticides de 2 494 tonnes par an et d'éliminer des procédés agricoles 20.8 millions de litres d'eau par an (NCRC, 2010). Le rapport dénote également que l'amélioration du rendement du maïs tolérant aux herbicides et résistant aux insectes était supérieure là où la pression exercée par les ravageurs est forte et où les méthodes de lutte contre les ravageurs ou les adventices utilisées avant leur adoption étaient relativement peu efficaces.

Répercussions sur l'environnement

Knox et al. (2012) ont réalisé une *revue systématique* des travaux publiés entre 2006 et 2010 sur les répercussions sur l'environnement des cultures commerciales issues des biotechnologies. L'analyse de cette base de données a révélé que l'adoption des cultures génétiquement modifiées a entraîné une hausse non négligeable du taux de modification de l'environnement par rapport à l'agriculture conventionnelle. Or, en raison de la diversité des indicateurs environnementaux extraits des articles et de leurs limites, il ne peut être déterminé si cette évolution représente une modification bénéfique ou néfaste de l'environnement.

En appliquant aux cultures génétiquement modifiées l'indicateur du quotient d'impact sur l'environnement – qui évalue l'impact des pesticides sur l'environnement, la main-d'œuvre agricole et les consommateurs –, Brookes et Barfoot (2013) ont découvert que les caractères transgéniques ont contribué à une réduction notable des répercussions sur l'environnement associées à l'utilisation d'insecticides et d'herbicides dans les zones consacrées aux cultures issues des biotechnologies : l'utilisation de pesticides sur les cultures de plantes génétiquement modifiées a diminué, en moyenne, de 8.9 % et le quotient d'impact sur l'environnement de 18.3 % sur la période 1996-2011. En termes

absolus, le recul le plus flagrant de l'utilisation de pesticides est associé au maïs génétiquement modifié résistant aux herbicides, suivi du coton génétiquement modifié résistant aux insectes, alors que l'impact environnemental le plus profond est associé à l'adoption du maïs génétiquement modifié résistant aux insectes, suivi du coton génétiquement modifié résistant aux insectes et du canola génétiquement modifié résistant aux herbicides. Dans l'ensemble, les retombées sur l'environnement associées à l'utilisation d'herbicides sont plus nourries que la baisse de leur volume en termes absolus, ce qui semble indiquer une évolution vers des herbicides plus respectueux de l'environnement que ceux utilisés d'habitude sur les cultures conventionnelles. L'application du quotient d'impact sur l'environnement aux variétés de soja résistantes aux herbicides révèle des répercussions globalement positives sur l'environnement, par rapport aux variétés de soja non tolérantes aux herbicides. L'étude conclut également que les cultures issues des biotechnologies ont permis la réduction des émissions de gaz à effet de serre de 14.6 millions de tonnes de dioxyde de carbone sur la période 1996-2011, grâce à la baisse de la consommation de carburant pour les tracteurs et à l'intensification de la séquestration du carbone dans le sol.

Kleter et al. (2007) ont calculé qu'aux États-Unis, les applications d'ingrédients actifs des pesticides, l'impact écologique total par hectare, l'impact écologique et l'impact sur les exploitations étaient inférieurs, respectivement, de 30 %, 42 %, 39 % et 54 % dans le cas des applications de pesticides sur des cultures de colza conventionnel par rapport aux applications sur des cultures de colza génétiquement modifié.

Gusta et al. (2011) et Smyth et al. (2011a, 2011b) montrent que l'adoption de canola résistant aux herbicides a modifié les pratiques de lutte contre les plantes adventices au Canada, où les herbicides incorporés au sol sont remplacés par des herbicides foliaires de post-levée. Cette évolution a permis de réduire l'impact de la production de canola sur l'environnement – calculé à partir du quotient d'impact sur l'environnement – de 59 % entre 1995 et 2006.

Les études publiées jusqu'à présent sur les répercussions des plantes transgéniques sur la biodiversité agricole indiquent que les opinions divergent sur les conséquences des flux géniques et qu'il est nécessaire de réunir plus de données et de créer de nouveaux modèles pour analyser les conséquences imprévues que la transgénèse peut entraîner à long terme (Ervin et Welsh, 2005).

Le Conseil national de la recherche américain (*National Research Council*) a conclu que les cultures issues des biotechnologies ont été bénéfiques pour l'environnement aux États-Unis mais que « le recours excessif à une seule technique, associé à un manque de diversité des pratiques agricoles, pouvait porter préjudice aux avantages économiques et environnementaux » (NRC, 2010).

Wolfenbarger et al. (2008) ont réalisé une méta-analyse sur les conséquences des plantes Bt sur les guildes fonctionnelles d'arthropodes non visés. Leur comparaison des cultures Bt avec leurs homologues non génétiquement modifiées, traitées sans insecticides supplémentaires, n'a pas permis de conclure à des conséquences uniformément négatives ou positives. Certains effets ont été observés sur des espèces spécifiques, mais lorsque des insecticides ont été appliqués sur les cultures équivalentes non génétiquement modifiées, les cultures Bt ont présenté une plus grande abondance d'arthropodes non visés. L'incidence du pollen du maïs Bt sur les lépidoptères d'Europe non visés a été estimée extrêmement faible.

Perry et al. (2010) ont calculé que, selon le scénario le plus défavorable, le taux de mortalité des papillons était d'un individu pour 1 572 (un pour 5 000 pour la médiane) et celui des hétérocères d'un individu pour 392 (un pour 4 366 pour la médiane). En comparant ce résultat avec les autres pratiques culturales, ils constatent qu'à ce jour, il n'a été fait état d'aucun impact négatif du maïs Bt exprimant le gène Cry1Ab sur l'environnement. Álvarez-Alfageme et al. (2011) ont signalé des résultats antérieurs démontrant les effets toxiques des gènes Cry1Ab et Cry3Bb sur les coccinelles se nourrissant de maïs ; ces arguments n'ont pu être contestés.

L'évaluation à l'échelle des exploitations (*Farm-Scale Evaluation*) réalisée à l'initiative du gouvernement du Royaume-Uni a comparé la biodiversité dans les champs de betterave sucrière, maïs

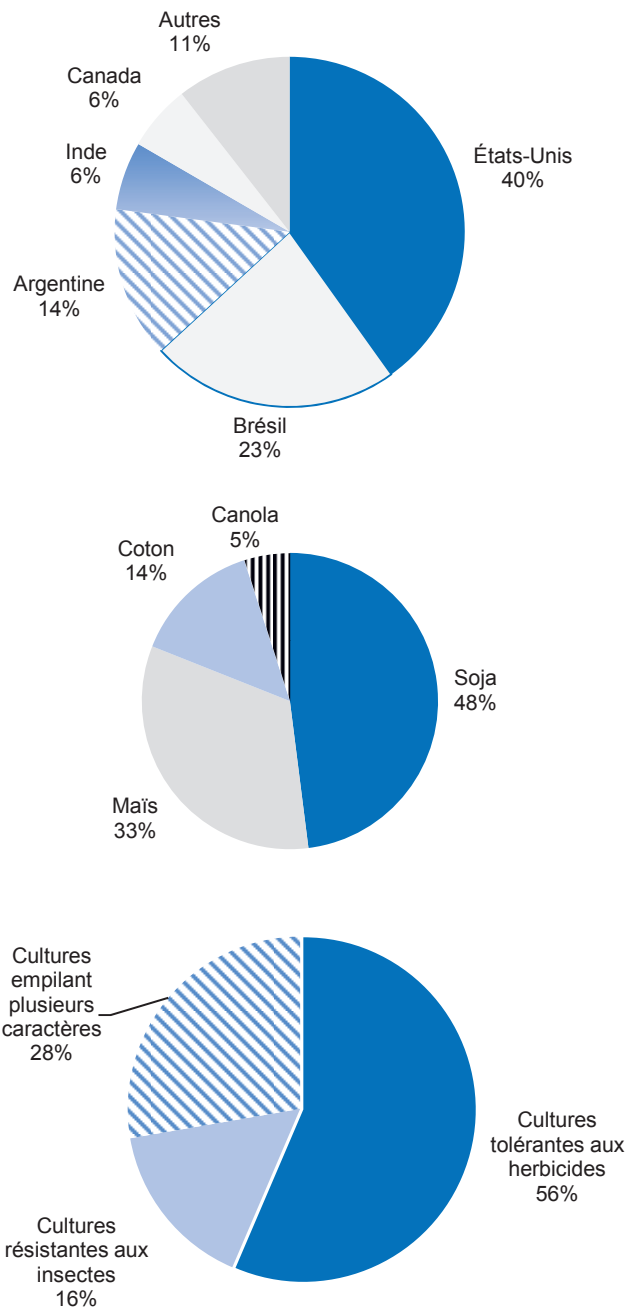
et colza tolérants au glyphosate avec celle de parcelles adjacentes comparables où sont cultivées des variétés non transgéniques équivalentes (DEFRA, 2003). Les conclusions ont montré des différences entre l'abondance de la vie sauvage sur un type de parcelles et sur l'autre. Néanmoins, l'étude a mis en valeur le fait que ces différences s'expliquent non par la modification génétique des cultures, mais par les nouvelles possibilités de lutte contre les adventices que les cultures génétiquement modifiées tolérantes aux herbicides offrent aux agriculteurs, notamment en termes de choix des herbicides et de mode d'application.

La *Royal Society* a publié les résultats d'évaluations généralisées de l'impact du maïs, du colza oléagineux de printemps (canola) et de la betterave sucrière transgéniques tolérants aux herbicides sur la biodiversité au Royaume-Uni. Ces études ont conclu que les principaux effets de ces cultures par rapport aux pratiques culturales conventionnelles concernaient la végétation adventice, avec les conséquences que cela implique pour les herbivores, les pollinisateurs et autres populations qui s'en nourrissent. Les conséquences des cultures transgéniques sur ces groupes ont été négatives dans le cas de la betterave sucrière, positives dans le cas du maïs et inexistantes dans le cas du colza oléagineux de printemps. D'après ces études, la commercialisation de ces plantes aurait des répercussions variées sur la biodiversité des terres agricoles, en fonction de l'efficacité des régimes transgénique par rapport aux utilisations conventionnelles d'herbicides et de l'importance du rôle tampon exercé par les champs voisins.

Au Royaume-Uni, une évaluation de quatre systèmes de cultures génétiquement modifiées tolérantes aux herbicides réalisée à l'échelle des grandes exploitations a révélé que le colza et la betterave sucrière OGM tolérants aux herbicides (mais pas le maïs transgénique tolérant aux herbicides) provoquaient une diminution de l'abondance des mauvaises herbes et de la vie sauvage qui leur est associée par rapport à la gestion conventionnelle des cultures sur la même période (Brooks et al., 2003 ; Brooks et al., 2005 ; Firbank et al., 2006 ; Haughton et al., 2003 ; Hawes et al., 2003 ; Heard et al., 2003). Les conséquences négatives sur les espèces adventices ont été considérées suffisamment importantes pour conclure que, dans l'ensemble, les cultures génétiquement modifiées tolérantes aux herbicides réduisent la biodiversité (UK ACRE, 2004; UK ACRE, 2005). À l'inverse, les travaux de recherche menés aux États-Unis, au Canada et en Amérique du Sud ont abouti à la conclusion opposée (à savoir, que les cultures génétiquement modifiées tolérantes aux herbicides ont renforcé la diversité des espèces adventices) (Gulden et al., 2009 ; Gulden et al., 2010 ; Puricelli et Tieska, 2005 ; Scursoni et al., 2006 ; Young et al., 2013). Selon les auteurs, cette observation s'explique par le fait que le glyphosate a laissé subsister davantage d'espèces adventices latifoliées et leur a permis d'acquérir une plus grande richesse et régularité que la lutte conventionnelle contre les adventices appliquée dans les systèmes de production américains comparables.

Les observations recueillies montrent également que les variations des taux d'utilisation des pesticides sont variables (van den Bergh et Holley, 2001). Par exemple, les études du ministère de l'Agriculture des États-Unis démontrent que, dans l'ensemble, plus les producteurs ont adopté de cultures transgéniques, plus les traitements insecticides ont diminué sur le maïs, alors que l'utilisation du glyphosate, notamment du Roundup®, a augmenté sur les cultures de maïs et de soja (USDA, 1999a et 1999b). Néanmoins, l'utilisation d'autres produits agrochimiques plus toxiques a reculé. La situation varie en fonction des méthodes de production et des régions.

Graphique 5A.1. Superficie des cultures issues des biotechnologies dans le monde, par pays, plante et caractère, 2014 (%)



Source : James (2015), *Global status of commercialized biotech/GM crops: 2014*, ISAA Brief 49-2015.

Tableau 5A.1. Superficie des cultures issues des biotechnologies dans le monde en 2014, par pays

Classement	Pays	Superficie (million hectares)	Cultures biotechnologiques
1	États-Unis	73.1	Maïs, soja, coton, canola, betterave à sucre, luzerne, papaye, courge
2	Brésil	42.2	Soja, maïs, coton
3	Argentine	24.3	Soja, maïs, coton
4	Inde	11.6	Coton
5	Canada	11.6	Canola, maïs, soja, betterave à sucre
6	Chine	3.9	Coton, papaye, peuplier, tomate, poivron
7	Paraguay	3.9	Soja, maïs, coton
8	Pakistan	2.9	Coton
9	Afrique du sud	2.7	Maïs, soja, coton
10	Uruguay	1.6	Soja, maïs
11	Bolivie	1	Soja
12	Philippines	0.8	Maïs
13	Australie	0.5	Coton, canola
14	Burkina Faso	0.5	Coton
15	Myanmar	0.3	Coton
16	Mexique	0.2	Coton, soja
17	Espagne	0.1	Maïs
18	Colombie	0.1	Coton, maïs
19	Soudan	0.1	Coton
20	Honduras	<0.05	Maïs
21	Chili	<0.05	Maïs, soja, canola
22	Portugal	<0.05	Maïs
23	Cuba	<0.05	Maïs
24	République tchèque	<0.05	Maïs
25	Roumanie	<0.05	Maïs
26	République slovaque	<0.05	Maïs
27	Costa Rica	<0.05	Coton, soja
28	Bangladesh	<0.05	Brinjal/aubergine
	Total	181.5	

Source : James (2015), *Global status of commercialized biotech/GM crops: 2014*, ISAA Brief 49-2015.

Chapitre 6

L'agriculture de précision est-elle le début d'une nouvelle révolution ?

L'agriculture de précision est une démarche de gestion à l'échelle de toute l'exploitation, dont l'objectif est d'optimiser le rendement d'utilisation des intrants tout en améliorant l'empreinte environnementale de l'agriculture. Il s'agit d'une pratique de gestion relativement nouvelle, rendue possible par le développement des technologies de l'information et de la télédétection. Il existe un large éventail de technologies d'agriculture de précision, mais celles qui sont le plus couramment adoptées sont des technologies à forte intensité de savoir. Les informations sur l'agriculture de précision proviennent d'enquêtes sporadiques aussi bien dans le temps que dans l'espace, car les pays ne collectent pas de données régulièrement. Bien que l'agriculture de précision ait mis l'accent jusqu'ici sur les grandes cultures, les technologies de précision peuvent s'appliquer à tout le système de production agroalimentaire (production animale, aquacole et forestière). Ce chapitre s'intéresse au concept et à l'utilisation de l'agriculture de précision dans les pays de l'OCDE, aux principaux obstacles qui empêchent de la mettre au service d'une croissance verte, et à son impact sur l'efficacité d'utilisation et la productivité des ressources.

Principaux messages

- Les données concernant l'utilisation des technologies de l'agriculture de précision par les exploitants sont peu nombreuses car les pays ne collectent généralement pas ce type de données.
- L'adoption des technologies de l'agriculture de précision reste pour le moment cantonnée à quelques pays et secteurs (principalement les grandes cultures).
- Le guidage par GPS est la technologie la plus largement utilisée en agriculture de précision.
- D'importants gains d'efficacité et de productivité peuvent être réalisés dans le secteur des grandes cultures, en particulier lorsque la variabilité intra-parcellaire des rendements est élevée.
- Les lacunes techniques, le manque de connaissances, les coûts élevés au démarrage, auxquels s'ajoutent dans certains cas le risque que la rentabilité de l'investissement soit insuffisante, ainsi que des contraintes structurelles et institutionnelles, sont des obstacles majeurs à l'adoption de l'agriculture de précision par les exploitants.
- L'agriculture de précision a un rôle important à jouer pour promouvoir la croissance verte de l'agriculture dans les pays de l'OCDE, mais la prévalence d'exploitations de petite taille dans plusieurs pays rend son adoption à grande échelle problématique.

Appliquer le bon traitement au bon endroit au bon moment

L'agriculture de précision est une pratique de gestion relativement nouvelle, rendue possible par le développement des technologies de l'information et de la télédétection. Elle conjugue l'application de technologies et principes agronomiques pour gérer la variabilité spatiale et temporelle associée à tous les aspects de la production agricole aussi bien végétale qu'animale (encadré 6.1).

L'agriculture de précision, définie comme une approche systémique permettant d'optimiser les rendements des cultures grâce à la collecte et au traitement systématiques de données sur les cultures et les parcelles, peut en particulier améliorer la gestion des éléments nutritifs en adaptant plus précisément la consommation et l'application d'intrants à la croissance idéale des plantes et aux besoins en matière de gestion.

On a souvent tendance à réduire le concept d'agriculture de précision aux technologies à débit variable, qui permettent de moduler les apports d'intrants agricoles. Les possibilités technologiques sont très larges et vont de l'acquisition automatique de données et d'informations pour une fertilisation modulée, à l'optimisation de la gestion du parc de machines agricoles (Auernhammer, 2001). Ce terme recouvre en réalité de nombreuses technologies qui apportent des informations plus précises sur les ressources gérées et permettent dans le même temps à l'exploitant de répondre aux variations intra-parcellaires en modulant les apports d'intrants et l'irrigation, au lieu d'appliquer à toute une parcelle un même traitement dont l'efficacité ne pourra être optimale.

Encadré 6.1. Qu'est-ce que l'agriculture de précision?

L'agriculture de précision est une notion relativement large. Pour certains, elle consiste à utiliser les fonctionnalités de guidage automatique de leur tracteur, pour d'autres à cibler l'application des herbicides au moyen de cartes préprogrammées. Au fil des ans, l'accent s'est déplacé des technologies de modulation des doses, vers les systèmes de guidage des véhicules puis vers la cartographie des rendements. Le terme s'est démocratisé avec l'apparition des systèmes de géolocalisation (GPS) et de navigation par satellite (GNSS), et d'autres méthodes de télédétection, qui ont permis aux exploitants de créer des cartes précises de leurs parcelles fournissant des informations détaillées sur leur positionnement exact une fois sur le terrain. On distingue cinq grands groupes de technologies utilisées en agriculture de précision :

- Les systèmes d'information géographique (SIG), logiciels de gestion des données spatiales.
- Les systèmes de géolocalisation (GPS), qui fournissent des informations topographiques sur les positions utilisées dans les SIG, même si un GPS différentiel est nécessaire pour obtenir des informations intra-parcellaires précises.
- Les capteurs, qui permettent de mesurer les propriétés des sols, les ravageurs, la santé des cultures, etc. afin de moduler les opérations de gestion selon les besoins. Ces capteurs peuvent être placés dans les champs et leur signal est capté par des boîtiers portatifs ou des dispositifs montés sur les tracteurs, ou ils peuvent faire partie de dispositifs de télédétection qui prennent des photographies aériennes ou satellitaires.
- Le suivi des rendements, qui permet de mesurer le rendement des cultures durant la récolte, et de cartographier les rendements en donnant des informations sur la production et la variabilité.
- Les technologies de modulation des doses, qui utilisent un système de contrôle du débit pour adapter l'apport d'intrants à chaque site. Cette approche est utilisée pour moduler l'application d'intrants en fonction des besoins.

Source. D'après Zarco-Tejada et al. (2014), *Precision Agriculture: An opportunity for EU farmers – potential support with the Cap 2014-200*, [www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/note/join/2014/529049/IPOL-AGRI_NT\(2014\)529049_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/note/join/2014/529049/IPOL-AGRI_NT(2014)529049_EN.pdf).

La gestion des cultures et certains aspects des activités d'élevage peuvent être optimisés, en utilisant les informations collectées par des capteurs embarqués sur les machines agricoles (propriétés des sols, surface foliaire, santé animale), ou dérivées de données de télédétection à haute résolution (état physiologique des plantes). Au cours des ans, la simple utilisation de techniques de « culture en fonction du sol » a laissé la place aux systèmes de guidage des véhicules et aux technologies de modulation qui évolueront à leur tour dans le sens de la gestion de la qualité des produits et de l'environnement. La définition de l'agriculture de précision continue de changer à mesure des avancées technologiques et nous comprenons de mieux en mieux les possibilités offertes (McBratney et al., 2005).

Bien que l'agriculture de précision ait jusqu'ici concerné essentiellement les grandes cultures, les technologies de précision peuvent s'appliquer à tout le système de production agroalimentaire (production animale, aquacole et forestière). C'est sur les terres labourables que l'utilisation des technologies de l'agriculture de précision est la plus répandue et développée. Les producteurs spécialisés en grandes cultures qui exploitent de grands domaines dans les principales régions productrices d'Europe, des États-Unis et d'Australie, et qui ont adopté des modèles d'activité avancés pour une meilleure rentabilité, recourent davantage à l'agriculture de précision.

Le meilleur exemple de réussite de l'agriculture de précision sur des terres labourables est peut-être celui de l'agriculture à circulation raisonnée (CTF) : appliquée sur l'ensemble de l'exploitation, elle vise à éviter que le passage de lourds engins agricoles abîme inutilement les cultures et tasse les sols, ce qui permet de réduire les coûts¹. En Australie et au Royaume-Uni en particulier, les agriculteurs ont ainsi réussi à faire baisser le coût des machines et des intrants de jusqu'à 75 % dans certains cas, tout en améliorant les rendements (Tulberg et al., 2007 ; Bowman, 2008).

Les technologies de l'agriculture de précision s'appliquent à une large gamme de produits agricoles et horticoles : maïs, soja, pomme de terre, blé, betterave sucrière, canne à sucre, orge, sorgho, coton, avoine, riz, raisin, agrumes, bananes, thé, palmier-dattier, tabac, olives, tomates et kiwis (Bramley, 2009). Le développement et l'adoption de technologies et méthodologies de précision en viticulture sont plus récents que dans le secteur des grandes cultures. L'élevage de précision est axé quant à lui sur la surveillance automatisée de la production de lait et d'œufs de chaque individu ; la détection précoce des maladies ; et le suivi du comportement, de la productivité et de l'environnement physique des animaux (microclimat et émissions de gaz polluants, par exemple).

À l'heure actuelle, les techniques de gestion agricole de précision dépendent presque entièrement du secteur privé qui assure la fourniture des services, dispositifs et produits nécessaires aux agriculteurs. La participation du secteur public est généralement très limitée, malgré l'attention croissante accordée par les pouvoirs publics au rôle de l'innovation pour maintenir plus durablement la productivité. À titre d'exemple d'initiative publique récente visant à « généraliser l'adoption de l'agriculture de précision » on peut citer la création d'un groupe de réflexion à l'Union européenne dans le cadre du *Partenariat européen d'innovation « Productivité et développement durable de l'agriculture »*. Ce groupe s'intéressera pour commencer à la saisie et au traitement des données, mais il est envisagé d'étendre le processus pour réaliser une évaluation comparative fondée sur des observations factuelles des performances de l'agriculture de précision et une étude d'impact.

Les données dont on dispose sur les taux d'adoption sont peu nombreuses et souvent datées parce que les pays ne collectent pas régulièrement de données sur l'utilisation de l'agriculture de précision, et parce que les fabricants et fournisseurs d'équipements divulguent rarement leurs données de vente. Les informations dont on dispose proviennent pour la plupart d'enquêtes sporadiques aussi bien dans le temps que dans l'espace : il est donc difficile d'évaluer avec exactitude le taux d'adoption et les différentes technologies utilisées.

Pour résumer, les résultats des études analysées révèlent des tendances similaires dans plusieurs pays membres de l'OCDE :

- Les taux d'adoption des technologies de l'agriculture de précision n'ont pas évolué aussi rapidement que prévu ;
- Les taux d'adoption des systèmes de guidage automatique sont plus élevés que ceux des technologies de modulation intra-parcellaire des doses ;
- Le pourcentage des exploitants qui ont adopté des techniques de collecte de données (de diagnostic) est plus élevé que celui des exploitants qui utilisent effectivement ces informations aux fins d'une gestion modulée.

La conclusion générale des études disponibles est que l'adoption des technologies de l'agriculture de précision au niveau des exploitations a été lente, inégale – dans l'espace et dans le temps – et qu'elle est souvent moins importante que ce qui était initialement prévu (voir par exemple Bramley, 2009 ; Evans et al., 2013 ; Lamb et al., 2008 ; Reichardt et Jürgens, 2009 ; Griffin et al., 2010 ; Mandel et al., 2011).

En dépit du faible taux d'adoption, le nombre d'exploitants utilisant des technologies agricoles de précision a régulièrement progressé depuis dix ans : en Allemagne, entre 2001 et 2006, le pourcentage d'exploitants pratiquant l'agriculture de précision est passé de 7 % à 11 %, et celui d'agriculteurs non informés a reculé de 46 % à 28 % (Reichardt et al., 2009) ; parmi les producteurs céréaliers d'Australie, ce pourcentage est passé de 5 % en 2006 à 20 % en 2012 (Robertson et al., 2012), et selon une enquête réalisée dans l'Ohio (États-Unis) en 2010, 39 % de l'ensemble des exploitations et 48 % des exploitants affichant plus de 100 000 USD de chiffre d'affaires ont déjà opté pour l'agriculture de précision (Diekmann et Batte, 2010).

Dans l'Union européenne, l'adoption demeure à des niveaux plutôt modestes et se concentre essentiellement dans les grandes exploitations commerciales des grandes régions céréalières de l'UE (Zarco-Tejada et al., 2014). L'utilisation de capteurs pour piloter la fertilisation azotée est très répandue, probablement parce qu'elle aide les agriculteurs à respecter la réglementation de l'UE sur les nitrates et parce qu'elle bénéficie d'aides publiques. Le guidage par GPS suscite un intérêt croissant, surtout dans les zones où les exploitations sont relativement étendues, comme en Allemagne orientale, et les exploitants, mieux informés des possibilités offertes par l'agriculture à circulation raisonnée sur les terres labourables². L'adoption de l'agriculture de précision dans le secteur des fruits et légumes et de la viticulture est plus récente et a été marquée par une forte progression des systèmes de vision numérique.³ Dans les filières des fruits et légumes à forte valeur, des méthodes d'irrigation de précision sont mises au point pour économiser l'eau, augmenter les rendements et améliorer la qualité, tandis que des systèmes automatiques de suivi individuels sont utilisés pour suivre la croissance animale ainsi que la production de lait et d'œufs, détecter les maladies et surveiller le comportement des animaux et leur environnement physique.

L'adoption de technologies de précision devrait continuer d'évoluer suivant les mêmes schémas : elle devrait progresser plus rapidement là où l'utilisation d'intrants agricoles est déjà relativement efficiente et dans les pays où la main-d'œuvre est peu nombreuse et où les terres sont abondantes (comme l'Australie, les États-Unis ou le Canada), le taux d'adoption s'accroissant lorsque les prix des produits de base sont élevés et les taux d'intérêt, faibles. L'adoption devrait être plus lente dans les pays moins riches en terres mais disposant de beaucoup de main-d'œuvre et de capital (comme l'Europe) (Swinton et Lowenberg-DeBoer, 2001).

Les paragraphes suivants proposent des exemples illustrant la pénétration de ces technologies dans les pays de l'OCDE considérés (Australie, États-Unis, Royaume-Uni et Allemagne) et tentent de repérer les tendances qui se dégagent quant aux technologies adoptées et aux cultures concernées.

Australie – un champion des technologies de guidage par GPS

Selon une enquête de Robertson et al. (2012), 20 % des céréaliers australiens appliquaient des technologies de précision pour gérer les intrants variables. Jochinke et al. (2007) ont mené en 2006 une enquête auprès des agriculteurs membres de la Wimmera Conservation Farming Association et constaté que 42 % d'entre eux avaient adopté ce type de technologies. Les résultats détaillés de l'enquête sont présentés dans le tableau 6.1. Comme on peut le voir, les systèmes de guidage automatique sont les principales technologies d'AP appliquées. Jochinke et al. (2007) indiquent que leurs résultats sont comparables aux situations observées dans les autres régions d'Australie.

Comme on l'a vu précédemment, l'Australie joué un rôle de pionnier en matière de guidage par GPS (agriculture à circulation raisonnée). Il a été constaté que l'agriculture à circulation raisonnée (CTF) améliorait de 50 % l'économie de carburant déjà permise par les systèmes sans labour (Tullberg, 2009). Cependant, selon les données du Bureau australien de statistique, 25 % seulement des exploitations ont opté à ce jour pour l'agriculture à circulation raisonnée.⁴

Des travaux de recherche publique sont consacrés à la viticulture de précision, et l'application de technologies de précision aux cultures sucrières apparaît aussi intéressante pour des raisons économiques et environnementales. Tullberg et al. (2007) ont passé en revue les taux d'adoption de cette technologie qui sont élevés dans les systèmes de culture australiens.

Tableau 6.1. Instruments d'agriculture de précision utilisés par les membres de la Wimmera Conservation Farming Association en 2006

Instruments d'agriculture de précision		Répondants (%) (N=146)
Guidage		
Guidage automatique	2 cm	16
Guidage automatique	10 cm	13
Guidage automatique	< 100 cm	2
Guidage visuel-<1 m, avec barres lumineuses		27
Bras de traceurs		1
Autres		
Cartes de rendement		14
Photos aériennes		3
Sonde EM38 ou radiométrie gamma pour l'analyse des sols		3
Semoirs avec système de modulation		2
Contrôle automatique de profondeur du semis		<1

Source : d'après Jochinke, D.C., B.J. Noonon, N.G. Wachsmann and R.M. Norton (2007), « The adoption of agriculture de précision in an Australian broadacre cropping system—Challenges and opportunities », *Field Crops Research*.

États-Unis : les technologies de suivi des rendements gagnent du terrain

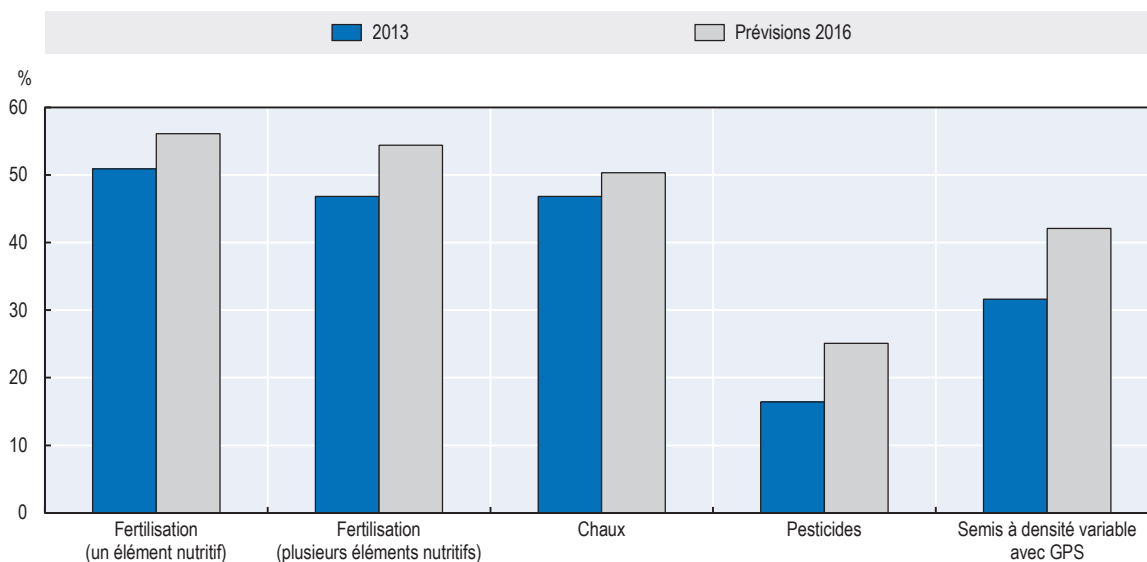
Un rapport du Service de recherche économique du ministère de l'Agriculture des États-Unis (USDA/ERS), établi d'après les données de l'enquête ARMS (Agricultural Resource Management Survey) collectées depuis dix ans, indique que l'adoption par les exploitants des principales technologies informatiques de précision – suivi des rendements, modulation intra-parcellaire des doses et cartographie GPS – a été mitigée (Schimmelpfenning et Ebel, 2011). Si l'adoption des techniques de suivi des rendements, qui marque souvent la première étape de l'utilisation de technologies d'AP en culture céréalière, a bien progressé (elles sont utilisées sur plus de 40 % de la superficie céréalière), les exploitants ont pour la plupart choisi de ne pas la compléter par des cartes GPS détaillées ou des systèmes de modulation des doses qui permettent d'exploiter les informations précises concernant les rendements. L'éducation des responsables d'exploitation, la sophistication technique et le sens de la gestion agricole figurent parmi les facteurs qui, selon le rapport, pourraient expliquer en partie ce retard.

L'étude indique que les exploitants qui appliquent des pratiques culturales anti-érosives ont tendance à adopter plus rapidement des systèmes de suivi des rendements. Les systèmes de guidage, qui permettent aux conducteurs de machines de connaître leur position exacte dans le champ, semblent avoir le vent en poupe puisque 35 % des producteurs de blé les utilisaient en 2009. Les exploitants équipés de dispositifs de suivi des rendements ont obtenu de meilleurs rendements de maïs et de soja que les autres. Bien que les techniques de cartographie par GPS soient moins répandues que celles de suivi des rendements, les producteurs de maïs et de soja qui ont utilisé un GPS ont amélioré leur rendement sur tout le territoire national. Les rendements de ces deux cultures ont été également plus élevés lorsque des technologies de modulation intra-parcellaire ont été utilisées pour l'épandage d'intrants. Les dépenses moyennes de carburant, par unité de surface cultivée, sont inférieures pour les producteurs de maïs et de soja qui utilisent des systèmes de suivi des rendements. L'utilisation de technologies de modulation va de pair avec une baisse des dépenses de carburant pour le maïs et le soja.

L'enquête biennale sur les ventes de services d'agriculture de précision fournit de très nombreuses données sur l'utilisation des technologies agricoles de précision et les services connexes offerts par les entreprises américaines spécialisées (Holland et al., 2013). Le Graphique 6.1 montre qu'en 2013 plus de 50 % des vendeurs d'intrants agricoles considérés offraient des services de modulation intra-parcellaire des doses pour un seul élément nutritif. Pour l'application de plusieurs éléments nutritifs, les entreprises

indiquaient un taux d'adoption légèrement moins élevé. Selon les projections pour 2016 établies par les participants à l'enquête, la demande de technologies de modulation des doses de semences et de pesticides devrait augmenter.

Graphique 6.1. Technologies de précision à débit variable



Note : 171 répondants à l'enquête dans 34 états.

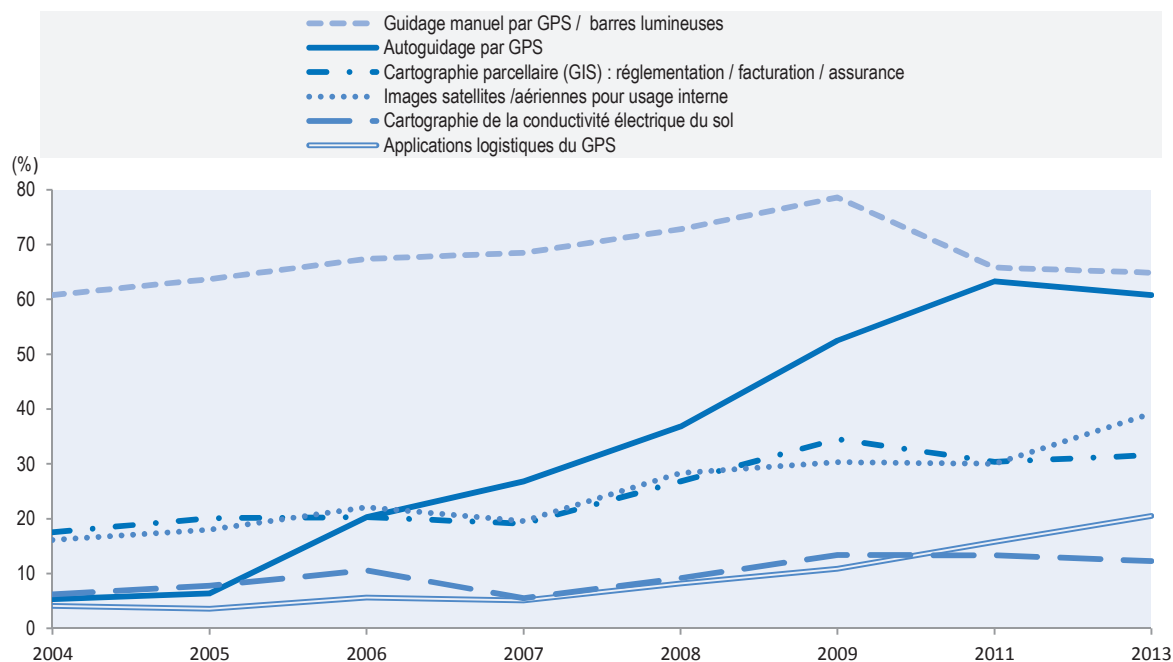
Source : D'après Holland, J.K., B. Erickson et D.A. Widmar (2013), *2013 Precision Agricultural Services Dealership Survey Results*.

Le graphique 6.2 illustre l'adoption des technologies d'agriculture de précision par type de service de 2004 à 2013. L'autoguidage par GPS connaît l'évolution la plus positive en termes de taux d'adoption. L'adoption d'autres technologies, notamment de cartographie parcellaire ou de logistique par GPS, progresse aussi, mais beaucoup moins rapidement que celles d'autoguidage par GPS.

Allemagne : des taux d'adoption en progression

Les données les plus récentes et les plus complètes concernant l'adoption de technologies d'agriculture de précision par les exploitants sont fournies par Reichardt et Jürgens (2009). Selon leur étude, le pourcentage des exploitants pratiquant l'agriculture de précision est passé d'environ 7 % en 2001, à plus de 10 % en 2007. L'étude a constaté que la plupart des agriculteurs ayant adopté des technologies d'agriculture de précision sont plus actifs dans le domaine des techniques de collecte de données que dans celui des techniques de modulation des doses.

Les deux raisons les plus souvent invoquées pour justifier l'adoption de techniques d'agriculture de précision étaient l'amélioration de la précision des activités agricoles (76 % des exploitations en 2012) et la réduction des coûts d'intrants (63 % des exploitations en 2012). Dans l'enquête de 2012 presque la moitié des agriculteurs qui n'utilisaient pas ces techniques faisaient valoir qu'elles n'étaient pas rentables et/ou que les coûts étaient trop élevés au démarrage ; 28 % déclaraient qu'elles n'étaient pas appropriées ou adaptées au type ou à la taille de leur exploitation ; et 27 % considéraient qu'elles étaient trop compliquées.

Graphique 6.2. Adoption des technologies d'agriculture de précision dans le temps, par type de service

Note: 171 répondants à l'enquête dans 34 états.

Source : Graphique 20 dans Holland, J.K., B. Erickson et D.A. Widmar (2013), *2013 Precision Agricultural Services Dealership Survey Results*.

Royaume-Uni : des taux d'adoption en progression

En Angleterre, 22 % des exploitations étudiées en 2012 avaient adopté des technologies basées sur le GPS, en particulier des systèmes d'autoguidage. L'adoption d'autres applications de l'agriculture de précision (échantillonnage du sol, modulation des doses ou cartographie des rendements) a progressé entre 2009 et 2012 (tableau 6.2).

Tableau 6.2. Proportion d'exploitations utilisant des techniques d'agriculture de précision

Technique	2009	2012
	% d'exploitation	
GPS (système mondial de localisation)*	14	22
Cartographie des sols	14	20
Modulation des doses	13	16
Cartographie des rendements	7	11
Téléométrie	1	2

Note : Données basées sur les réponses d'au moins 1392 exploitations en 2009 et 2731 en 2012.

Source : D'après Department for Environment, Food and Rural Affairs (2013), *Farm Practices Survey Autumn 2012-England*, www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/181719/defra-stats-foodfarm-environment-statsrelease-autumn2012edition-130328.pdf (consulté le 4 février 2014).

D'importants gains d'efficience et de productivité des ressources

Les agriculteurs qui ont déjà adopté des technologies d'agriculture de précision ou qui envisagent de le faire sont la plupart du temps motivés dans cette décision par la perspective d'accroître la rentabilité (Diekmann et Batte, 2010 ; Reichardt et al., 2009). Le recours à ces technologies permet d'améliorer l'efficience technologique et allocative en utilisant des techniques et des sources d'information perfectionnées dans le but de rendre le système de gestion plus efficace. Par essence, l'agriculture de précision améliore la productivité des ressources en permettant une utilisation plus efficace des ressources naturelles.

Comme nous l'avons déjà noté, l'agriculture de précision est une forme de gestion des exploitations qui repose sur la collecte d'informations et l'aide à la prise de décision dont le but est d'améliorer le processus agricole en intervenant avec précision à chaque étape. Elle peut ainsi constituer un système de gestion dans lequel la production et la rentabilité agricoles sont optimisées moyennant l'utilisation de moins d'intrants (machines, main-d'œuvre, engrais, produits chimiques, semences, eau, énergie, etc.), ce qui améliore la productivité et la gestion et la qualité du travail, tout en apportant des avantages environnementaux.

L'objectif de l'agriculture de précision est d'obtenir soit un rendement des cultures similaire avec moins d'intrants, soit un rendement des cultures supérieur avec le même volume d'intrants en les utilisant de manière plus efficace. En règle générale, cette pratique s'apparente aux investissements consacrés à l'exploitation des terres. Sa mise en œuvre engendre des coûts d'information, des frais de traitement des données, des dépenses de matériel informatique et de logiciels, ainsi que des coûts d'apprentissage dus au fait que l'exploitant doit élaborer des systèmes de gestion et calibrer ses machines. À l'inverse, l'adoption de technologies de précision peut réduire les frais de carburant et d'engrais par rapport à ceux engendrés par les méthodes agricoles conventionnelles. Les différentes technologies ne contribuent pas de la même manière à l'efficience technologique et allocative et leur rentabilité peut se révéler extrêmement variable.

L'agriculture à circulation raisonnée (CTF) et les systèmes de guidage automatique sont les techniques les plus rentables sur les terres labourables puisque les études montrent qu'elles procurent de nets avantages dans la quasi-totalité des cas. Les résultats sont toutefois très contrastés pour les technologies à débit variable, qui permettent par exemple d'optimiser l'épandage d'engrais ou de pesticides sur les zones qui en ont besoin.

Plusieurs études ont conclu que l'utilisation de ces technologies pour l'épandage d'engrais ne présentait aucun intérêt financier notable. Les avantages financiers tirés des méthodes de modulation des débits dépendent du type de culture, de la zone géographique, de la taille des champs et du type d'agriculture, du facteur limitant (eau ou éléments nutritifs) ainsi que des intrants effectivement utilisés. Les études expérimentales révèlent des effets économiques différents selon l'élément considéré (épandage différencié d'engrais azotés, phosphatés et potassiques).

Les expériences d'épandage modulé d'engrais azotés ont livré des résultats mitigés aux États-Unis, en Australie et au Danemark en n'entraînant pas nécessairement de réduction des taux d'épandage (encadré 6.2). La situation est encore différente en ce qui concerne l'application ciblée d'engrais phosphorés et potassiques. D'un point de vue agronomique, dans les systèmes arables, ces engrais peuvent être appliqués à des intervalles de quelques années selon les caractéristiques nutritives du sol et il n'est souvent pas nécessaire d'ajuster l'application d'engrais en fonction des besoins effectifs de la plante alors cultivée.

C'est pourquoi, dans le cas du phosphore et du potassium, les techniques d'agriculture de précision s'appuient généralement plus sur les caractéristiques du sol. En particulier lorsque la superficie cultivée est importante, des prestataires peuvent proposer de cartographier la teneur en éléments nutritifs du sol, ce qui peut guider l'application d'engrais phosphorés et potassiques.

Encadré 6.2. Impacts économiques : conclusions des observations empiriques

D'après les résultats de 234 études publiées entre 1988 et 2005, l'agriculture de précision est rentable dans 68 % des cas en moyenne (Griffin et Lowenberg-DeBoer, 2005). Le rapport USDA/ERS a mis en lumière qu'aux États-Unis : i) à l'échelle du territoire, les cultivateurs de maïs et de soja utilisant des contrôleurs de rendement obtenaient des rendements largement supérieurs à ceux de leurs homologues n'ayant pas recours à ces équipements ; ii) les cultivateurs de maïs et de soja utilisant des contrôleurs de rendement affichaient des frais de carburant par acre inférieurs ; iii) les dépenses moyennes d'engrais par acre étaient légèrement supérieures pour les cultivateurs de maïs utilisant des contrôleurs de rendement mais elles étaient inférieures pour les cultivateurs de soja ; iv) les frais moyens de carburant par acre étaient inférieurs pour les cultivateurs utilisant des technologies d'épandage d'engrais à débit variable pour le maïs et le soja, tout comme pour les cultivateurs de soja ayant recours à des systèmes de guidage ; v) les utilisateurs de systèmes de cartographie GPS et de technologies d'épandage d'engrais à débit variable affichaient des rendements plus élevés pour le maïs et le soja (Schimmelpfening et Ebel, 2011). Godwin et al. (2003) ont montré qu'en 2011, les technologies d'agriculture de précision à bas coût pouvaient être rentables à partir de 80 hectares de superficie exploitée, contre 250 hectares pour les systèmes intégrés. Les prix des céréales et engrais azotés ayant doublé depuis, tandis que ceux de ces équipements restaient stables, la superficie minimum permettant de les rentabiliser s'est réduite, améliorant la rentabilité de l'agriculture de précision pour les exploitations de taille moyenne, une tendance qui devrait continuer. D'autres éléments donnent à penser que de plus en plus d'exploitants devraient adopter ces technologies dans l'avenir, notamment le fait que, d'après les études, leurs utilisateurs sont souvent jeunes (Diekmann et Batte, 2010) et diplômés du supérieur (Diekmann et Batte, 2010, Reichardt et al., 2009) – la tendance générale va à l'augmentation du niveau d'instruction et les jeunes générations maîtriseront mieux les technologies de l'information.

Technologies à débit variable

Thöle et Ehler (2010) ont analysé un capteur pendulaire de biomasse (« crop-meter »). Ils ont conclu que l'utilisation de ce capteur pouvait améliorer l'efficacité de l'apport d'azote de 10 à 15 % en réduisant les volumes appliqués sans impact sur le rendement des cultures. Un fournisseur allemand de technologies d'agriculture de précision a fait état d'une hausse de 5 % du rendement des cultures de blé d'hiver pour la même quantité d'engrais épandue et d'une augmentation de 5 % du rendement des cultures moyennant une réduction de 12 % de l'épandage d'engrais (www.agricon.de/nc/de/produkte-leistungen/sensoren-agronomie/effekte-im-getreide?cid=2743&did=1718&sechash=fb130ca9). En se fondant sur certaines considérations théoriques appliquées à l'épandage d'engrais sur les cultures de maïs aux États-Unis, Dillon et Kusunose (2013) montrent que les taux d'application ne seraient pas nécessairement réduits par l'utilisation de technologies à débit variable. Le bilan des expériences d'apport modulé d'azote est tout aussi mitigé en Australie, au Danemark et ailleurs (Lawes et Robertson, 2011, Biermacher et al., 2009, Boyer et al., 2011 ; Berentsen et al., 2002, cités dans Oleson et al., 2004).

D'après les études menées par Anselin et al. (2004) et Meyer-Aurich et al. (2008, 2010), l'apport ciblé d'engrais azotés représenterait un gain financier brut compris entre 10 et 25 EUR par hectare en Allemagne, selon le type de capteur utilisé et la taille du champ, avec une amélioration de 10 à 15 % de l'efficacité de l'apport en azote grâce à une réduction de l'épandage sans impact sur le rendement des cultures. Pour cela, l'évaluation des critères économiques a révélé que la superficie cultivée devait être supérieure à 250 hectares pour que ces techniques apportent un avantage financier. D'après d'autres études, les analyses économiques et statistiques menées sur une période de dix ans n'ont révélé aucun avantage économique significatif, au sens statistique du terme, à utiliser des capteurs pour moduler l'épandage d'engrais (Boyer et al., 2011). Cette conclusion rejoint des observations antérieures (Liu et al., 2006 ; Anselin et al., 2004), selon lesquelles la rentabilité serait inférieure à 8 EUR par hectare, ce qui couvre à peine les coûts de mise en place. Selon des études menées au Danemark, les apports différenciés d'engrais entre les zones à faible et à haut rendement d'un champ à l'aide de capteurs n'ont aucun effet économique (travaux de Berentsen, cités dans Oleson et al., 2004).

Systèmes de guidage automatique

Au Royaume-Uni, les avantages financiers des systèmes de guidage ont été estimés à au moins 2.2 EUR par hectare pour une exploitation de 500 hectares (Knight et al., 2009) mais ces avantages s'accroissent avec l'adoption d'autres systèmes plus complexes tels que l'agriculture à circulation raisonnée (2-5 %), qui augmenteraient les recettes de 18 à 45 EUR par hectare pour le blé d'hiver. En Allemagne, il a été estimé que la réduction des intrants représentait un gain de 27 EUR par hectare pour cette même culture.

La situation est analogue pour l'application ciblée de chaux. Le pH du sol est un paramètre agronomique important qui peut considérablement varier sur les parcelles. Il influence directement la disponibilité des éléments nutritifs pour les cultures puisque ces éléments ne sont solubles que dans une certaine fourchette de pH. Un pH déséquilibré entraîne des pertes financières et des problèmes environnementaux. Ainsi, la modulation des apports de chaux peut optimiser la disponibilité des nutriments sur toute la superficie du champ. La cartographie des sols ou les systèmes de contrôle du pH embarqués peuvent être employés pour cartographier la répartition spatiale des taux de pH sur la

parcelle et prescrire les taux d'application de chaux appropriés (Bongiovanni et Lowenberg-DeBoer, 2000 ; Wang et al., 2003).

La lutte raisonnée contre les mauvaises herbes et les ravageurs peut contribuer à réduire fortement l'application de pesticides et donc à rendre leur utilisation plus efficace. Les systèmes de guidage automatique sont bien connus pour accroître l'efficacité des intrants en évitant les zones de chevauchement lors de l'épandage. Les avantages économiques ont été bien étudiés et contribuent au succès de cette technologie de précision (Knight et al., 2009).

À titre d'exemple, les investissements à consentir pour mettre en place des systèmes de guidage automatique sont généralement inférieurs à ceux d'autres technologies d'agriculture de précision, pour un risque inférieur, et les résultats obtenus sont plus convaincants pour l'exploitant. Par ailleurs, ces systèmes sont simples d'utilisation et ne requièrent aucune expérience en agronomie. Leurs avantages, comme l'amélioration de la rentabilité, résident dans la réduction du coût des intrants (semences, engrais, produits chimiques, carburant et main d'œuvre) et l'accroissement des rendements, la simplification et l'accélération des tâches, l'amélioration des conditions de travail et la possibilité d'étendre les horaires de travail sur la parcelle.

Quoi qu'il en soit, les technologies d'agriculture de précision ont pour but d'optimiser l'utilisation des intrants plutôt que d'augmenter la production par hectare. En outre, ces technologies n'ont que peu d'effet sur les fonctions de production, à l'exception de l'irrigation de précision, qui améliore généralement les rendements des cultures.

L'agriculture de précision peut également avoir un effet favorable sur les ressources naturelles grâce à la lutte raisonnée contre les ravageurs. Une autre technique de précision, l'agriculture à circulation raisonnée, présente elle aussi un avantage : elle optimise l'utilisation des ressources en réduisant le nombre de traces de passage sur le sol et en rendant l'espace ainsi préservé aux cultures, tout en limitant les compactations du sol dues aux machines lourdes.

Pour compenser leur coût, les technologies d'agriculture de précision doivent accroître les revenus, ce qui peut se faire au détriment de l'environnement. Cependant, même si l'agriculture de précision dispose d'une information juste, une application des intrants au mauvais moment peut avoir des répercussions négatives sur l'environnement. En effet, Morari et al. (2013) ont montré que les normes exigeantes concernant la qualité du blé pouvaient inciter à utiliser de grandes quantités d'engrais afin de tirer davantage parti des prix de vente plus élevés du blé de grande qualité.

Il serait toutefois possible d'avoir recours aux technologies d'agriculture de précision pour bénéficier de ces avantages financiers. De plus, Meyer-Aurich et al. (2010) ont montré que de mauvaises décisions sur l'application d'engrais peuvent se révéler onéreuses si, outre le rendement, la qualité de la production est influencée par le taux d'épandage. Une gestion raisonnée de l'exploitation a plus de chances d'être rentable dès lors que l'on s'attache à la qualité, d'autant que plus les parcelles sont hétérogènes, plus il est avantageux de pratiquer des apports différenciés plutôt que de traiter la parcelle de manière uniforme. Dans ce cas particulier, seules les technologies d'agriculture de précision permettent d'améliorer la qualité.

Effet positif sur l'emploi dans les secteurs amont et aval mais variable sur les exploitations

Les informations sur les effets de l'agriculture de précision sur l'emploi ou la main d'œuvre agricole sont peu nombreuses. Néanmoins, l'étude réalisée par CropLife en 2013 donne un aperçu des tendances que ces technologies impriment indirectement au travail hors de l'exploitation (Holland et al., 2013). On peut supposer que les négociants, concessionnaires et fabricants d'équipements ou fournisseurs d'intrants recherchent de plus en plus à employer des candidats formés à l'agriculture de précision.

Des observations ponctuelles révèlent que l'adoption de ces technologies accroît le temps consacré au travail de bureau par rapport aux méthodes agricoles conventionnelles (Möbius, 2012). Meyer-Aurich et al. (2008) livrent une analyse économique des technologies d'agriculture de précision à

l'échelon de l'exploitation et concluent que, selon sa taille et sa structure, la mise en place de ces technologies peut réduire les besoins de main d'œuvre en raison des possibilités d'automatisation qu'offrent les technologies de modulation.

Cette observation est confirmée par Pedersen et al. (2006), qui montrent que les systèmes autonomes nécessitent des investissements importants mais moins de main d'œuvre que les systèmes classiques car ils sont plus souples et peuvent considérablement réduire les coûts de main d'œuvre et les contraintes liées aux restrictions sur le temps de travail quotidien. Kingwell et Fuchsbichler (2011) ont montré que, dans le contexte *australien*, la quantité de travail nécessaire, et donc le coût de la main d'œuvre, pouvait être réduite par rapport à celle des exploitations conventionnelles grâce à l'agriculture à circulation raisonnée. Maheswari et al. (2008) ont toutefois mis en lumière que le coût de la main d'œuvre par hectare (pour la production de légumes) pouvait être nettement accru par le recours à l'agriculture de précision par rapport à l'utilisation de méthodes conventionnelles.

L'adoption de pratiques d'agriculture de précision a des répercussions sur la gestion et l'organisation de l'exploitation. Il faut notamment y mettre en place des systèmes et processus informatiques. Dans certains cas, il est possible que l'exploitant ait recours aux services de prestataires spécialisés dans l'agriculture de précision et à des services de vulgarisation agricole. Les pratiques d'agriculture de précision comme les systèmes de guidage peuvent rendre la main d'œuvre plus disponible, ce qui a un effet indirect sur d'autres pratiques agricoles. Par ailleurs, l'adoption de technologies de précision peut avoir des répercussions sur les pratiques des exploitants voisins en influant sur la location de terres ou d'outils technologiques (Batte, 2003).

En résumé, les informations disponibles donnent à penser que les technologies d'agriculture de précision ont un effet positif sur l'emploi dans les secteurs amont et aval mais potentiellement négatif au sein de l'exploitation en raison des possibilités d'automatisation qu'elles offrent. On peut néanmoins s'attendre à ce que ces technologies augmentent la productivité de la main d'œuvre sur l'exploitation. Les conclusions d'études dans ce domaine étant limitées, il est important que les futurs travaux de recherche analysent plus en détail les effets sur l'emploi de l'agriculture de précision.

Amélioration de l'empreinte écologique de l'agriculture

Si les techniques de l'agriculture de précision peuvent paraître intéressantes pour gérer les effets indirects des activités agricoles sur l'environnement et réduire la pollution, leurs avantages environnementaux n'ont toutefois pas été encore véritablement évalués et les données chiffrées font défaut.

Il ressort de certains travaux de recherche que la gestion modulée des intrants, notamment des engrais et des produits chimiques, que permettent les technologies de l'AP peut améliorer l'empreinte écologique des activités agricoles. L'agriculture de précision, en réduisant par exemple le chevauchement des passages des machines, limite les émissions de GES et la pollution diffuse de l'eau par les engrais, les produits agrochimiques et les carburants. Les systèmes de cartographie et de guidage par GPS permettent d'éviter les excès de pulvérisation en signalant précisément les zones déjà traitées.

On peut citer aussi des exemples concernant le lessivage des nitrates dans les systèmes de culture, qui démontrent que les méthodes de modulation intra-parcellaire des doses ont réussi à réduire la pollution des eaux souterraines, et que les méthodes de l'agriculture de précision peuvent réduire l'érosion par un travail du sol différencié. Bongiovanni et Lowenberg-Deboer (2004) présentent un examen de la littérature sur les effets environnementaux.

Obstacles au développement du potentiel de la croissance verte

L'adoption de l'agriculture de précision en est toujours à ses débuts et toutes les technologies de l'information qu'elle met en jeu ne se diffuseront probablement pas dans tous les pays, ni uniformément à l'intérieur de chacun d'entre eux. Le coût élevé et la complexité de ces technologies, la formation des

exploitants et le sens de la gestion agricole qu'exige la pratique de cette agriculture, ainsi que l'impossibilité de concrétiser les avantages économiques attendus dans certains cas figurent parmi les principaux facteurs faisant obstacle à une adoption plus large qu'évoquent plusieurs études (Khanna et al., 1999 ; Griffin et al., 2004 ; Reichardt et Jürgens, 2009 ; Robertson et al., 2012 ; Rutt, 2011). Une adoption à plus grande échelle dépendra en grande partie de la baisse du prix des technologies de l'agriculture de précision et/ou de leur plus grande facilité d'installation et d'entretien.

Les caractéristiques structurelles des exploitations sont des facteurs d'adoption déterminants

L'agriculture de précision se caractérise par une série de méthodes, de démarches et d'outils que les exploitants doivent étudier en détail pour décider de la formule optimale à adopter pour leur activité. Les facteurs au niveau de l'exploitation, tels que la taille de cette dernière, ou la surface et la géométrie des parcelles, ainsi que l'hétérogénéité des sols jouent un rôle prépondérant dans l'adoption des technologies de l'agriculture de précision et influent par conséquent dans une large mesure sur son potentiel de croissance. L'un des objectifs des technologies de modulation des doses étant de gérer l'hétérogénéité intra-parcellaire du sol, un degré raisonnable d'hétérogénéité observable constitue évidemment une condition préalable pour que l'exploitant envisage de gérer cette hétérogénéité. Toutefois, si la technologie ne permet qu'une réduction limitée des doses d'intrants utilisés sur une zone donnée de la parcelle, il est fort probable que l'amélioration de la rentabilité soit très faible⁵.

S'agissant de la taille de l'exploitation, il est évident que les économies d'échelle constituent un élément important du calcul de l'avantage économique et de la décision d'adopter des technologies de l'agriculture de précision particulièrement coûteuses : les estimations coûts-avantages indiquent en effet que, pour amortir l'investissement sur l'ensemble de l'exploitation, il faut que celle-ci ait une taille minimale (Kingwell et Fuchsichler, 2011). Des études démontrent que, dans l'Union européenne, les systèmes d'autoguidage sont rentables s'ils sont mis en œuvre sur des parcelles de 100 à 300 ha (Frank et al., 2008 ; Lawes et Robertson, 2011)⁶.

En plus de la taille de la parcelle, savoir si les caractéristiques de l'exploitation se prêtent à une mise en œuvre des méthodes de l'agriculture de précision constitue un autre aspect important pour une adoption réussie. Si la parcelle est de petite taille ou si l'exploitant n'est pas propriétaire des technologies, il peut être préférable de recourir à des entreprises de services agricoles spécialisés, à la mutualisation des moyens de production et aux approches coopératives pour introduire les technologies de l'agriculture de précision.

Wagner (2009) présente des estimations de coûts pour trois approches technologiques différentes de la fertilisation azotée modulée (tableau 6.3). Le coût annuel d'un système de capteurs a diminué passant de 21.38 EUR par ha, sur une surface cultivée de 250 ha, à seulement 5.35 EUR par ha sur une surface de 1 000 ha. Ainsi, de nombreux rapports indiquent que l'accroissement de la taille de l'exploitation a un effet positif sur la probabilité d'adoption des technologies de l'agriculture de précision (Roberts et al., 2004 ; McBride et Daberkow, 2003, par exemple).

Tableau 6.3. Coûts estimés de trois stratégies de fertilisation modulée

	Cartographie	Capteurs	Services en ligne par internet
Matériel/logiciels	Terminal équipé d'un GPS (4 800 EUR), contrôleur de rendement pour la moissonneuse-batteuse (8 500 EUR), logiciel SIG (1 500 EUR)	Yara-N-Sensor® avec terminal et installation (22 350 EUR)	Yara-N-Sensor® avec terminal et installation (22 350 EUR), contrôleur de rendement pour la moissonneuse-batteuse (8 500 EUR)
Coûts annuels*	3 010 EUR	4 545 EUR	6 274 EUR
Informations complémentaires	-	-	Mesures de la conductivité électrique (5 EUR, une fois tous les 6 ans)
Coût annuel par ha*	-	-	1.02 EUR
Prestataire de services	Préparation des cartes (2 EUR/ha)	Contrôle annuel du système (800 EUR)	Traitement des données, élaboration des règles de décision (2 EUR/ha), contrôle annuel du système (800 EUR)
Coût annuel *	2 EUR/ha	800 EUR p.a.	2 EUR/ha + 800 EUR p.a.
Coût/ha (250 ha)	14.04 EUR	21.38 EUR	31.31 EUR
Coût/ha (500 ha)	8.02 EUR	10.69 EUR	17.17 EUR
Coût/ha (1000 ha)**	5.01 EUR	5.35 EUR	10.09 EUR

* Calculés selon la méthode de l'amortissement croissant, durée d'amortissement de 6 ans pour le matériel et les logiciels, taux d'intérêt de 6 %.

** La deuxième moissonneuse-batteuse nécessaire pour une surface de 1 000 ha n'est pas équipée d'un contrôleur de rendement.

Source : Wagner, P. (2009), « The economic potential of Precision Farming – An interim report with regard to nitrogen fertilization » dans E.J. van Henten et al. (2009), *Precision Agriculture '09*.

Un haut niveau d'expertise de l'exploitant agricole est indispensable

L'agriculture de précision est une approche de l'activité agricole qui exige un haut niveau d'expertise de par la masse d'informations à traiter et le volume de connaissances incorporées. Le concept même de l'AP est fondé essentiellement sur la collecte de données, leur traitement et la gestion modulée des intrants. Pour en exploiter pleinement le potentiel, la difficulté tient à l'impératif d'intégrer toutes les données à un plan applicable à l'échelle intra-parcellaire. Compte tenu de la masse de données susceptibles d'être collectées entre le semis et la récolte, certains agriculteurs risquent de manquer de moyens pour les traduire en informations exploitables.

L'absence de sensibilisation, les délais requis pour apprendre à manier les technologies, le manque de connaissances techniques, l'incompatibilité de machines provenant de fabricants différents, le coût élevé des technologies, et la difficulté de quantifier les avantages de l'agriculture de précision figurent parmi les principaux obstacles le plus fréquemment mentionnés par les agriculteurs aux États-Unis, en Europe et en Australie (Diekmann et Batte, 2010 ; Reichardt et al., 2009 ; Reichardt et Jurgens, 2009).

Les agriculteurs peuvent être rebutés par la complexité des technologies à utiliser. La création par les pouvoirs publics d'un environnement porteur peut beaucoup contribuer à l'adoption de l'agriculture de précision par les exploitants, en leur fournissant soutien et conseil dans le cadre élargi que constitue le système national de connaissances et d'innovation agricoles (SCIA), où interagissent une multitude d'acteurs. L'acquisition et le transfert de connaissances en matière d'agriculture de précision doivent

être aussi simples que possible. Plusieurs études sur la pratique de l'AP menées aux États-Unis, au Royaume-Uni, au Danemark et en Allemagne ont fait apparaître que les coûts élevés et le très long processus d'apprentissage qu'elle impose constituent les principaux facteurs responsables de la lenteur de la diffusion des connaissances dans ce domaine.

S'agissant des technologies de l'information en agriculture, Fernandez-Cornejo et al. (2001) constatent que la probabilité d'adoption des technologies de l'agriculture de précision est supérieure de 15 % chez les exploitants agricoles ayant fait des études supérieures. D'après Griffin et al. (2004), l'adoption de l'AP est « à forte intensité de capital humain ». Ces observations peuvent être mises en rapport avec un aspect de l'adoption des technologies qui a été constaté dans d'autres contextes agricoles : l'apprentissage par la pratique. Il a été montré que l'aversion pour le risque a un impact négatif important sur l'adoption des technologies de l'information, et pèse davantage dans la décision que tous les autres facteurs réunis (Fernandez-Cornejo, et al 2001).

Les facteurs qui ralentissent l'adoption dans certaines régions sont liés au capital social et à la puissance des réseaux d'information. Kutter et al. (2011) analysent les facteurs sociaux, tels que le rôle de la communication et de la coopération dans l'adoption des technologies de l'AP. Pour ce qui est de la communication, ils étudient diverses sources d'information et différents canaux de communication et leur impact sur l'adoption de ces technologies. Par ailleurs, ils examinent les investissements conjoints, le recours à des entreprises de services agricoles, et la sous-traitance des données en tant que formes possibles de coopération.

Sur la base d'entretiens qualitatifs, Kutter et al. (2011) concluent que la littérature professionnelle, les journées de rencontre des acteurs de l'agriculture et les salons jouent un rôle clé en tant qu'instruments de communication. Ils constatent aussi que la coopération entre prestataires de services, agriculteurs et industriels est importante pour faire avancer le processus d'adoption.

Ces conclusions sont conformes à l'analyse de Aubert et al. (2012) qui soulignent qu'il importe de coordonner tous les acteurs (agriculteurs, fournisseurs d'intrants, équipementiers et courtiers) afin d'améliorer l'adoption des technologies. De telles actions de coordination pourraient être lancées par des coopératives ou des associations d'agriculteurs (Aubert et al., 2012). McBride et Daberkow (2003) font observer que le soutien technique personnalisé (assuré, par exemple, par des conseillers en phytotechnie et/ou des fournisseurs d'intrants) a une incidence très importante sur la probabilité d'adoption des technologies de l'AP par l'exploitant (voir aussi Bramley et Trengove, 2013).

Par ailleurs, Aubert et al. (2012) reconnaissent que les programmes de formation sont une question déterminante dans le processus d'adoption des technologies de l'agriculture de précision. Zhang et al. (2002) constatent aussi que des programmes de formation à destination des différents acteurs (chercheurs, industriels, vulgarisateurs et conseillers) sont nécessaires pour accélérer la mise en œuvre de ces technologies. Reichardt et al. (2009), qui sont parvenus à des conclusions analogues, soulignent l'importance d'enseigner l'agriculture de précision dans les établissements d'enseignement professionnel et technique afin d'en améliorer la mise en œuvre.

Parmi les autres facteurs sociaux et socio-économiques étudiés dans la littérature figurent la formation et l'âge des exploitants agricoles (voir Adrian et al., 2005 ; Aubert et al., 2012 ; Walton et al., 2008). McBride et Daberkow (2003) montrent que la probabilité qu'un agriculteur se convertisse à l'agriculture de précision diminue avec l'âge. Néanmoins, Aubert et al. (2012) ne constatent pas de corrélation entre l'âge des exploitants et les taux d'adoption.

Pour ce qui est de la formation, un niveau d'étude assez élevé influe sur la probabilité d'adoption, en raison de la sophistication des technologies et souvent de leur complexité d'utilisation (Aubert et al., 2012 ; Reichardt et Jürgens, 2009 ; McBride et Daberkow, 2003). Toutefois, Pannell et al. (2006) estiment que, pour les prévisions d'adoption, la participation à des formations technologiques spécifiques est probablement plus déterminante que le niveau de formation.

Des coûts de démarrage élevés freinent l'adoption

L'avantage relatif des technologies de l'agriculture de précision par rapport à l'agriculture classique (et, par exemple, à une gestion uniforme des intrants) est un facteur important qui a une incidence sur l'adoption (Aubert et al., 2012) et, par conséquent, sur le potentiel de développement de ces technologies. Cet avantage relatif peut présenter des dimensions économiques, sociales ou environnementales (Pannell et al., 2006).

En termes d'avantage économique relatif, on peut affirmer que, pour la plupart des technologies de modulation intra-parcellaire des doses, l'économie de l'exploitation affiche actuellement des résultats mitigés en raison du coût élevé de ces technologies et de l'apprentissage qu'elles nécessitent, de leur complexité, de l'absence de compatibilité de leurs composants technologiques, de l'absence ou de l'insuffisance des algorithmes de décision, et de l'effet de frein exercé par l'aplatissement de la courbe de rentabilité. Par exemple, selon le mode de gestion des engrais azotés utilisé, le coût annuel des technologies de gestion modulée (non compris les coûts d'apprentissage) varie de 3 010 EUR à 6 274 EUR (tableau 6.3). Cela représente une importante dépense d'équipement pour assurer un épandage mieux ciblé d'engrais azotés.

Il ressort d'un examen de 108 études réalisé par Lambert et Lowenberg-DeBoer (2000) que 63 % des études analysées font état d'un résultat net positif des démarches d'agriculture de précision. Toutefois, 11 % des études affichent des résultats négatifs et 26 % des résultats mitigés (Lambert et Lowenberg-DeBoer, 2000). Même si cet examen date de 14 ans, il continue de refléter la situation économique de l'agriculture de précision (tableau A6.1).

Un autre facteur important ayant une incidence sur l'avantage relatif et, par conséquent, sur le potentiel de croissance des applications de l'agriculture de précision concerne la disponibilité d'algorithmes de décision appropriés. Ces algorithmes confèrent aux données collectées sur un site particulier leur pertinence en termes de gestion modulée. Sans eux, les agriculteurs sont incapables de traduire ces données spatialisées en informations agronomiques utiles pour la gestion modulée des cultures. La gestion modulée repose sur une interaction complexe de facteurs agronomiques, pathologiques et hydriques des sols. Par exemple, les caractéristiques agronomiques des sols peuvent influencer sur les mouvements hydriques des sols et la prévalence de maladies à petite échelle dans n'importe quel champ particulier.

Les algorithmes mentionnés ci-dessus peuvent être établis pour répondre à différents critères. Par exemple, la maximisation des rendements peut ne pas être l'objectif poursuivi sur toutes les parties d'un champ. Des programmes pour la gestion des champs sont en cours d'élaboration afin de minimiser les coûts sur des sites prédéterminés qui sont connus pour leurs rendements inférieurs dans les champs d'un exploitant agricole. McBride et Daberkow (2003) ainsi que Reichardt et Jürgens (2009) étayaient cet argument par des données empiriques. Ils montrent que le pourcentage d'exploitants qui ont adopté les techniques de collecte de données (à des fins de diagnostic) est beaucoup plus élevé que le pourcentage de ceux qui ont réellement exploité cette information pour la gestion modulée. Wagner (2009) souligne l'importance des règles de décision pour l'économie de l'agriculture de précision. Gandorfer et al. (2011) estiment aussi que l'élaboration d'algorithmes de décision à objectifs économiques est déterminante pour l'avenir des applications de l'agriculture de précision.

Enfin, Aubert et al. (2012) montrent clairement que la majorité des facteurs évoqués ci-dessus jouent un rôle primordial dans la décision d'adoption. De plus, ces conclusions sont en grande partie confirmées par les résultats de l'enquête menée par Reichardt et Jürgens (2009), qui sont présentés dans le tableau 6.4.

Globalement, les conditions décrites ci-dessus expliquent les faibles taux d'adoption de nombre de technologies de modulation intra-parcellaire des doses. En revanche, l'avantage relatif économique et social plus notable qu'offrent les systèmes d'autoguidage ou de gestion automatique des tronçons des pulvérisateurs conduit à des taux d'adoption beaucoup plus élevés.

Du point de vue environnemental, on pourrait dire que les technologies de l'agriculture de précision procurent des avantages relatifs si les algorithmes de décision répondent à des considérations environnementales ou en tiennent compte. Toutefois, l'avantage relatif sur le plan environnemental ne semble pas être (actuellement tout au moins) un facteur décisif d'adoption (Reichardt et Jürgens, 2009).

Tableau 6.4. Raisons faisant hésiter à introduire l'agriculture de précision (plus d'une réponse possible)

Réponses	2001* (N=126)	2003 (N=137)	2005 (N=167)	2006 (N=47)
Les machines sont encore trop chères	42.1	44.1	62.9	63.8
La technique est très compliquée à utiliser	6.3	5.1	11.4	8.5
L'avantage des techniques de l'AP n'a pas encore été démontré	11.1	9.6	9	4.4
J'attends d'avoir la preuve que l'AP ne pose plus de problèmes	28.6	20.6	24	25.5
Je veux pratiquer l'AP mais je n'en ai pas eu encore le temps	15.4	9.6	13.2	6.4
Mes parcelles sont trop petites	15.4	18.4	17.4	46.8

Les valeurs sont exprimées en % .

*Les enquêtes ont été menées de 2001 à 2005 au salon Agritechnica et en 2006 aux Journées des professionnels de l'agriculture de DLG.

Source : D'après Reichardt, M. et C. Jürgens (2009), « Adoption and future perspective of agriculture de précision in Germany: Results of several surveys among different agricultural target groups », *Precision Agriculture*, vol. 10, pp. 73-94.

Notes

1. L'agriculture à circulation raisonnée (CTF) confine tous les déplacements des véhicules agricoles dans des zones minimales de passage permanent à l'aide de technologies GNSS et de systèmes d'aide à la décision.
2. La création d'une association européenne pour promouvoir le développement de l'agriculture à circulation raisonnée témoigne de l'intérêt croissant que suscite en Europe la technologie CTF (www.controlledtrafficfarming.com).
3. En viticulture de précision par exemple, l'évaluation de la qualité du raisin et les cartes de rendement obtenues par des instruments de télédétection et de saisie au champ évitent de mélanger des grappes de qualité différente au moment des vendanges.
4. Source: ABS ARMS survey. Nombre d'entreprises agricoles pratiquant l'agriculture à circulation raisonnée.
5. Cela signifie que même des écarts relativement importants par rapport à des décisions de gestion optimale des intrants (de l'azote, par exemple) peuvent n'avoir que peu d'incidence sur la rentabilité attendue. En d'autres termes, la courbe de rentabilité est plate près de l'optimum, souvent sur un intervalle relativement étendu (Pannel, 2006).
6. S'agissant de l'efficacité d'utilisation des ressources et du traitement individuel des superficies des terres, des plantes ou des animaux, il est important d'obtenir des informations sur les changements qui se produisent dans le champ ou le troupeau d'animaux. Sur les petites exploitations, des applications simples fondées, par exemple, sur des téléphones portables et des étiquettes d'identification conviennent souvent pour informer sur les

changements spécifiques au site ou à l'animal, et ces applications peuvent guider l'utilisateur dans sa prise de décision (par exemple, Cunha et al. 2010; Delgado et al., 2013; So-In, et al., 2014). Les traitements peuvent comprendre un contrôle manuel lorsque cela est jugé nécessaire, si les solutions automatisées sont trop onéreuses.

Bibliographie

- Adrian, A.M., S.H. Norwood et P.L. Mask (2005), « Producers' perceptions and attitudes toward precision agriculture technologies », *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 48, n° 3.
- Anselin, L., R. Bogiovanni et J. Lowenberg-Deboer (2004), « A spatial econometric approach to the economics of site-specific nitrogen management in corn production », *American Journal of Agricultural Economics*, vol. 86, n° 3.
- Aubert, B.A., A. Schroeder et J. Grimaudo (2012), « IT as enabler of sustainable farming: An empirical analysis of farmers' adoption decision of precision agriculture technology », *Decision Support Systems*, vol. 54, n° 1.
- Auernhammer, H. (2001), « Precision farming - The environmental challenge », *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 30, n° 1-3.
- Bachmaier, M. et M. Gandorfer (2009), « A conceptual framework for judging the precision agriculture hypothesis with regard to site-specific nitrogen application », *Precision Agriculture*, vol. 10, n° 2.
- Batte, M. (2003), « Precision farming and land leasing practices », *Journal of the ASFMRA*, vol. 66.
- Batte, M.T. (1999), « Precision farming - Factors influencing profitability », Northern Ohio Crops Day meeting, Wood County, Ohio, 21 janvier, <http://aede.osu.edu/sites/drupal-aede.web/files/PrecisionFarming.pdf>.
- Berntsen, J., A. Thomsen, K. Schelde et O. Hansen (2002), « Ny strategi for GPS- gødskning med sensor », *Agrologisk*, vol. 3, numéro 2.
- Biermacher, J.T., B.W. Brorsen, F.M. Epplin, J.B. Solie et W.R. Raun (2009), « The economic potential of precision nitrogen application with wheat based on plant sensing », *Agricultural Economics*, vol. 40, n° 4.
- Bongiovanni, R. et J. Lowenberg-Deboer (2000), « *Economics of Variable Rate Lime in Indiana* », *Precision Agriculture*, vol. 2, pp. 55-70.
- Bongiovanni, R. et J. Lowenberg-DeBoer (2004), « Precision agriculture and sustainability », *Precision Agriculture*, vol. 5, pp. 359-87.
- Bowman, K. (2008), « Economic and environmental analysis of converting to Controlled Traffic Farming », Proceedings, 6th Australian Controlled Traffic Farming Conference, Dubbo, NSW, Australian Controlled Traffic Farming Association, www.ctfsolutions.com.au/ebm3-doc/132275/Bowman%20Economics.pdf.
- Boyer, C.N., B. Wade Brorsen, J.B. Solie et W.R. Raun (2011), « Profitability of variable rate nitrogen application in wheat production », *Precision Agriculture*, vol. 12.
- Bramley, R. (2009), « Lessons from nearly 20 years of precision agriculture research, development, and adoption as a guide to its appropriate application », *Crop & Pasture Science*, vol. 60.
- Bramley, R. et S. Trengove (2013), « Precision agriculture in Australia: Present status and recent developments », *Engenharia Agrícola*, vol. 33, n° 3.

- Bullock, D. S. et J. Lowenberg-DeBoer (2007), « Using spatial analysis to study the values of variable rate technology and information », *Journal of Agricultural Economics*, vol. 58, n° 3.
- Bullock, D.G., D.S. Bullock, E.D. Nafziger, T.A. Doerge, P.R. Carter, T.A. Peterson et S.R. Paszkiewicz (1998), « Does variable rate seeding of corn pay? », *Agronomy Journal*, vol. 90, n° 6.
- Dammer, K. (2005), *Demonstration der Langzeitwirkung bedarfsorientierter Fungizidbehandlung mit dem CROP-Meter*, Bornimer Agrartechnische Berichte, Heft 41 Eigenverlag, Potsdam.
- Defra (2013), *Farm Practices Survey Autumn 2012- England*, ministère de l'Environnement, de l'Alimentation et des Affaires rurales, www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/181719/defra-stats-foodfarm-environ-fps-statsrelease-autumn2012edition-130328.pdf (consulté le 4 février 2014).
- DeJonge, K.C., A.L. Kaleita et K.R. Thorp (2007), « Simulating the effects of spatially variable irrigation on corn yields, costs, and revenue in Iowa », *Agricultural Water Management*, vol. 92, pp. 99-109.
- Diekmann, F. et M. Batte (2010), « 2010 Ohio farming practices survey: Adoption and use of precision farming technology in Ohio », rapport n° AEDE-RP-0129-10.
- Dillon, C.R. et Y. Kusunose (2013), *Dispelling Misperceptions regarding Variable Rate Application*, *Precision Agriculture '13*, J.V. Stafford, Wageningen Academic Publishers.
- Evans, R.G., J. LaRue, K.C. Stone et B.A. King (2013), « Adoption of site-specific variable rate sprinkler irrigation systems », *Irrigation Science*, vol. 31.
- Fernandez-Cornejo, J., S. Daberkow et W. McBride (2001), « Decomposing the size effect on the adoption of innovations: Agrobiotechnology and precision agriculture », *AgBioForum*, vol. 4, n° 2.
- Frank, H., M. Gandorfer et P. Noack (2008), « Ökonomische Bewertung von Parallelfahrssystemen », in R. Müller, H. Sundermeier, L. Theuvsen, S. Schütze et M. Morgenstern, Referate der 28. GIL-Jahrestagung in Kiel 2008.
- Gandorfer, M., A. Meyer-Aurich et M. Kapfer (2011), « Ökonomische Aspekte von Precision Farming - aktueller Stand und Perspektiven », *Jahrbuch der Österreichischen Gesellschaft für Agrarökonomie*, vol. 20, pp. 34-43.
- Gebbers, R. et V.I. Adamchuk (2010), « Precision agriculture and food security », *Science*, vol. 327.
- Gerhards, R. et H. Oebel (2006), « Practical experiences with a system for site-specific weed control in arable crops using real-time image analysis and GPS-controlled patch spraying », *Weed Research*, vol. 46.
- Godwin, R., T. Richards, G. Wood, J. Welsh et S. Knight (2003), « An economic analysis of the potential for precision farming in UK cereal production », *Biosystems Engineering*, vol. 84.
- Griffin, T. et J. Lowenberg-DeBoer (2005), « Worldwide adoption and profitability of precision agriculture: Implications for Brazil », *Revista de Política Agrícola*, vol. 4, www.embrapa.br/publicacoes/tecnico/revista-Agricola/rpa-de-2005/pol_agr_04-2005-p-pg-embrapa.pdf.
- Griffin, T., J. Lowenberg-DeBoer, D. Lambert, J. Peone, T. Payne et S. Daberkow (2004), « Adoption, profitability, and making better use of precision farming data », *Staff Paper*, numéros 04-06, Department of Agricultural Economics, Purdue University, <http://ageconsearch.umn.edu/bitstream/28615/1/sp04-06.pdf>.
- Griffin, T., R. Bongiovanni et J. Lowenberg-DeBorer (2010), « Worldwide adoption of precision agriculture technology: The 2010 update », communication présentée à la 10^{ème} Conférence européenne sur l'agriculture de précision, Denver, CO, 22 juillet 2010.

- Henkel, J., S. Schöberl et O. Alexy (2013), « The emergence of openness: How and why firms adopt selective revealing in open innovation », *Research Policy*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.respol.2013.08.014>.
- Holland, J.K., B. Erickson et D.A. Widmar (2013), *2013 Precision Agricultural Services Dealership Survey Results*, Department of Agricultural Economics, Purdue University, West Lafayette.
- Jochinke, D.C., B.J. Noonon, N.G. Wachsmann et R.M. Norton (2007), « The adoption of precision agriculture in an Australian broadacre cropping system—Challenges and opportunities », *Field Crops Research*, vol. 104, n° 1-3, pp. 68-76.
- Khanna, M., O. Epough et R. Hornbaker (1999), « Site-specific crop management: Adoption patterns and incentives », *Review of Agricultural Economics*, vol. 21, n° 2.
- Kingwell, R. et A. Fuchsbichler (2011), « The whole-farm benefits of controlled traffic farming: An Australian appraisal », *Agricultural Systems*, vol. 104, pp. 513-21.
- Knight, S., P. Miller et J. Orson (2009), « An up-to-date cost/benefit analysis of precision farming techniques to guide growers of cereals and oilseeds », *HGCA Research Review 2009*, n° 71, Home-Grown Cereals Authority (HGCA), www.hgca.com/media/276988/rr71-final-project-report.pdf (consulté le 10 février 2014).
- Kutter, T., S. Tiemann, R. Siebert et S. Fountas (2011), « The role of communication and co-operation in the adoption of precision farming », *Precision Agriculture*, vol. 12, pp. 2-17.
- Lamb, D.W., P. Fraizer et P. Adams (2008), « Improving pathways to adoption: Putting the right P's in precision agriculture », *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 61, n° 1.
- Lambert, D.M. et J. Lowenberg-DeBoer (2000), *Precision agriculture profitability review*, West Lafayette, Site Specific Management Center, School of Agriculture, Purdue University, <http://agriculture.purdue.edu/SSMC> (consulté le 10 février 2014).
- Lawes, R.A. et M.J. Robertson (2011), « Whole farm implications on the application of variable rate technology to every cropped field », *Field Crops Research*, vol. 124, pp. 142-48.
- Maheswari, R., K.P. Ashok et M. Prahadeeswaran (2008), « Precision farming technology, adoption decisions and productivity of vegetables in resource-poor environments », *Agricultural Economic Research Review*, vol. 21, pp. 415-24.
- Maine, N., J. Lowenberg-DeBoer, W.T. Nell et Z.G. Alemu (2010), « Impact of variable-rate application of nitrogen on yield and profit: A case study from South Africa », *Precision Agriculture*, vol. 11, pp. 448-63.
- Mandel, R., R. Lawes et M. Robertson (2011), « What's preventing growers from implementing precision agriculture (PA)? », in J. Paterson et C. Nicholls, *Agribusiness Crop updates 2011*, Perth, pp. 148-52.
- Marchant, B., M. Oliver, T. Bishop et B. Whelan (2013), « The economics of precision agriculture », in M. Oliver, T. Bishop et B. Marchant, *Precision Agriculture for Sustainability and Environmental Protection*, Routledge, Abington, UK.
- McBratney, A., B. Whelan et T. Ancev (2005), « Future directions of precision agriculture », *Precision Agriculture*, vol. 6, pp. 7-23.
- McBride, W.D. et S.G. Daberkow (2003), « Information and the adoption of precision farming technologies », *Journal of Agribusiness*, vol. 21, numéro 1.
- Meyer-Aurich, A., A. Weersink, M. Gandorfer et P. Wagner (2010), « Optimal site-specific fertilization and harvesting strategies with respect to crop yield and quality response to nitrogen », *Agricultural Systems*, vol. 103.

- Meyer-Aurich, A., M. Gandorfer et A. Heißenhuber (2008), « Economic analysis of precision farming technologies at the farm level: Two German case studies », in O.W. Castalonne, *Agricultural Systems: Economics, Technology, and Diversity*, Nova Science Publishers, Hauppauge NY, États-unis.
- Ministère de l'Environnement, de l'Alimentation et des Affaires rurales (2013), *Farm Practices Survey Autumn 2012- England*, www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/181719/defra-stats-foodfarm-environ-fps-statsrelease-autumn2012edition-130328.pdf (consulté le 4 février 2014).
- Möbius, J. (2012), « Görminer Landwirtschaftsbetrieb Peenetal », *Neue Landwirtschaft*, vol. 7, p. 45.
- Morari, F., S. Loddo, P. Berzaghi, J.C. Ferlito, A. Berti, L. Sartori, G. Visioli, N. Marmioli, D. Piragnolo et G. Mosca (2013), « Understanding the effects of site-specific fertilization on yield and protein content in durum wheat », in J.V. Stafford, *Precision Agriculture '13*, pp. 321-27, Wageningen Academic Publishers.
- Olesen, J., P. Sørensen, I. Thomsen, J. Eriksen, A. Thomsen et J. Berntsen, J. (2004), « Integrated nitrogen input systems in Denmark », in A. Mosier, J. Syers et J. Freney (dir. pub.) (2004), *Agriculture and the Nitrogen Cycle: Assessing the Impacts of Fertilizer Use on Food Production and the Environment*, Island Press, Washington; Covelo, Londres.
- Pannell, D.J. (2006), « Flat earth economics: The far-reaching consequences of flat payoff functions in economic decision making », *Review of Agricultural Economics*, vol. 28, n° 4.
- Pannell, D.J., G.R. Marshall, N. Barr, A. Curtis, F. Vanclay et R. Wilkinson (2006), « Understanding and promoting adoption of conservation practices by rural landholders », *Australian Journal of Experimental Agriculture*, vol. 46, n° 11.
- Pedersen, S.M., S. Fountas, H. Have et B.S. Blackmore (2006), « Agricultural robots – System analysis and economic feasibility », *Precision Agriculture*, vol. 7, pp. 295-308.
- Pierce, F.J. et P. Nowak (1999), « Aspects of precision agriculture », *Advances in Agronomy*, vol. 67.
- Reichardt, M. (2010), « Precision Farming in der deutschen Landwirtschaft – eine GIS – gestützte Analyse », Dissertation, Ruhr-Universität, Bochum, www-brs.ub.ruhr-uni-bochum.de/netahtml/HSS/Diss/ReichardtMaie/diss.pdf (consulté le 4 février 2014).
- Reichardt, M. et C. Jürgens (2009), « Adoption and future perspective of precision farming in Germany: Results of several surveys among different agricultural target groups », *Precision Agriculture*, vol. 10, pp. 73-94.
- Reichardt, M., C. Jürgens, U. Klöble, J. Hüter et K. Moser (2009), « Dissemination of precision farming in Germany: Acceptance, adoption, obstacles, knowledge transfer and training activities », *Precision Agriculture*, vol. 10, pp. 525-45.
- Roberts, R.K., B. English, J. Larson, R. Cochran, C. Goodman, S. Larkin, M. Marra, S. Martin, W. Shurley et J. Reeves (2004), « Adoption of site-specific information and variable-rate technologies in cotton precision farming », *Journal of Agriculture and Applied Economics*, vol. 36, n° 1.
- Robertson, M., R. Llewellyn, R. Mandel, R. Laws, R. Bramley, L. Swift, N. Metz et C. O'Callaghan (2012), « Adoption of variable rate fertiliser application in the Australian grains industry: Status, issues and prospects », *Precision Agriculture*, vol. 13, pp. 181-199.
- Rutt, K. (2011), *Precision Farming braucht einen Neuanfang*, DLG-Mitteilungen9/2011.
- Schimmelpfenning, D. et R. Ebel (2011), « On the doorstep of the information age - Recent adoption of precision agriculture », ministère de l'Agriculture des États-Unis, service de

recherche économique, *Economic Information Bulletin*, n° 80,
www.ers.usda.gov/media/81195/eib80_1_.pdf

- Schneider, M. et P. Wagner (2008), « Ökonomische Effekte der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung auf betrieblicher Ebene », in A. Werner, F. Dreger et J. Schwarz, *Informationsgeleitete Pflanzenproduktion mit Precision Farming als zentrale inhaltliche und technische Voraussetzung für eine nachhaltige Entwicklung der landwirtschaftlichen Landnutzung – Preagro II*, www.preagro.de/Veroeff/preagro_Abschlussbericht_2008.pdf.
- Swinton, S.M. et J. Lowenberg-DeBoer (2001), « Global adoption of precision agriculture technologies: Who, when and why? », in G. Grenier et S. Blackmore (dir. pub.), 3^{ème} *Conférence européenne sur l'agriculture de précision*, pp. 557-62, Agro Montpellier (ENSAM), Montpellier.
- Thöle, H. et D. Ehlert (2010), « Biomass related nitrogen fertilization with a crop sensor », *Applied Engineering in Agriculture*, vol. 26, n° 5.
- Tullberg, J., A. McHugh, B. Gharee Khabbaz, C. Scheer et P. Grace (2011), « Controlled traffic/permanent bed farming reduces GHG emissions », 5e Congrès mondial de l'agriculture de conservation (WCCA), « Resilient Food Systems for a Changing World », 26-29 septembre 2011, Brisbane, Australie.
- Tullberg, J., D. Yule et D. McGarry (2007), « Controlled traffic farming – From research to adoption in Australia », *Soil and Tillage Research*, vol. 97.
- Vellidis, G., B. Oritz, J. Beasley, R. Hill, H. Henry et H. Brannen (2013), « Using RTK-based GPS guidance for planting and inverting peanuts », in J.V. Stafford (dir. pub.), *Precision Agriculture '13*, 9^{ème} *Conférence européenne sur l'agriculture de précision*, Wageningen Academic Publishers.
- Wagner, P. (2009), « The economic potential of Precision Farming - An interim report with regard to nitrogen fertilization », in E.J. van Henten, D. Goense et C. Lokhorst (dir. pub.) (2009), *Precision Agriculture '09*, 7^{ème} *Conférence européenne sur l'élevage de précision*, Wageningen Academic Publishers.
- Wagner, P. et M. Schneider (2007), « Economic benefits of neural network-generated site-specific decision rules for nitrogen fertilization », in J.V. Stafford (dir. pub.), *Precision Agriculture '07*, 6^{ème} *Conférence européenne sur l'élevage de précision*, Wageningen Academic Publishers.
- Walton, J.C., D. Lambert, R. Roberts, J. Larson, B. English, S. Larkin, S. Martin, M. Marra, K. Paxton et J. Reeves (2008), « Adoption and abandonment of precision soil sampling in cotton production », *Journal of Agricultural and Resource Economics*, vol. 33, n° 3.
- Wang, D., Prato, T., Qiu, Z., Kitchen, N. et K. Sudduth (2003), « Economic and environmental evaluation of variable rate nitrogen and lime application for claypan soil fields », *Precision Agriculture*, vol. 4.
- Yule, D. et W. Chapman (2011), « Controlled traffic farming - More productivity, sustainability and resilience », communication présentée au 5^e World Congress of Conservation in Agriculture incorporating 3rd Farming Systems Design Conference, Brisbane.
- Zarco-Tejada, P., N. Hubbard et P. Loidjani (2014), *Precision Agriculture: An Opportunity for EU Farmers – Potential Support with the CAP 2014-2020*, département thématique des politiques structurelles et de cohésion, agriculture et développement rural, Parlement européen, www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/note/join/2014/529049/IPOL-AGRI_NT%282014%29529049_EN.pdf.
- Zhang, N., M. Wang et N. Wang (2002), « Precision agriculture—A worldwide overview », *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 36, n° 2-3.

Annexe 6A

Les avantages économiques de l'agriculture de précision

Tableau 6A.1. Avantages économiques des technologies d'agriculture de précision

Technologie de précision	Culture	Lieu	Effet économique	Source
Apport modulé d'azote	Blé d'hiver, canola	Allemagne	Augmentation du bénéfice net de 16 EUR/ha avec le N-sensor de Yara, par rapport à un traitement uniforme. Baisse du bénéfice net de 11 EUR/ha avec recours à la cartographie, par rapport à un traitement uniforme. Hors coût de la technologie.	Schneider et Wagner (2008)
Apport modulé d'azote	Blé d'hiver	États-Unis (Oklahoma)	Augmentation du bénéfice net (compte tenu des dépenses d'investissement liées aux capteurs et à l'épandage) de 15 USD avec un système d'apport complémentaire d'azote modulé par capteurs, d'après des expériences menées sur neuf sites durant neuf années.	Biermacher et al. (2009)
Apport modulé d'azote	Blé	États-Unis (Oklahoma)	Aucune augmentation du bénéfice net avec l'apport modulé d'azote, l'apport complémentaire uniforme de 90 kg d'azote/ha affiche en moyenne la meilleure rentabilité nette.	Boyer et al. 2011
Apport modulé d'azote	Mais	Afrique du Sud	L'apport modulé d'azote est légèrement plus rentable que la méthode conventionnelle de fertilisation.	Maine et al. 2010
Apport modulé d'azote et de chaux	Soja/mais	États-Unis/Canada	Augmentation des recettes annuelles pouvant aller jusqu'à 20 USD/ha.	Bongiovanni et Lowenberg-DeBoer (2000)

Tableau 6A.1. Avantages économiques des technologies d'agriculture de précision (suite)

Technologie de précision	Culture	Lieu	Effet économique	Source
Apport modulé d'azote et de phosphore	Céréales	Australie	Potentiel économique positif sur six des 20 parcelles étudiées, avec un gain supplémentaire de 15 AUD/ha hors coûts liés à la collecte d'informations et à l'application à débit variable.	Lawes et Robertson (2011)
Apport modulé de pesticides	Blé d'hiver	Allemagne	L'investissement initial à consentir pour le pulvérisateur de fongicides à capteurs s'élève à 13 000 EUR, rentabilisés dans un délai d'environ 2 ans sur une exploitation de 1 000 ha, dont 60 % consacrés à la culture de céréales.	Dammer (2005)
Irrigation modulée	Mais	États-Unis (Iowa)	L'irrigation de précision présente un intérêt économique dans un des 28 cas étudiés.	DeJonge et al. (2007)
Guidage automatique	Céréales et graines oléagineuses	Angleterre	Gain estimé à au moins 2 GBP/ha pour une exploitation de 500 ha.	Knight et al. (2009)
Guidage automatique	arachides	États-Unis (Géorgie)	Gain estimé à 34 USD/ha par rapport au guidage traditionnel	Vellidis et al. (2013)
Coupeure automatique des tronçons	Mais/soja	États-Unis (Kentucky)	Gains pouvant atteindre 36 USD/ha grâce à la réduction des intrants	Shockley et al. (2012)
Agriculture à circulation raisonnée	Blé d'hiver	Angleterre	Augmentation de 16-40 GBP/ha des recettes	Knight et al. (2009)
Agriculture à circulation raisonnée	Rotations de cultures diverses	Australie	Augmentation du bénéfice d'environ 50 % (à l'échelle de l'exploitation)	Kingwell et Fuchsbichler (2011)

ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES

L'OCDE est un forum unique en son genre où les gouvernements oeuvrent ensemble pour relever les défis économiques, sociaux et environnementaux que pose la mondialisation. L'OCDE est aussi à l'avant-garde des efforts entrepris pour comprendre les évolutions du monde actuel et les préoccupations qu'elles font naître. Elle aide les gouvernements à faire face à des situations nouvelles en examinant des thèmes tels que le gouvernement d'entreprise, l'économie de l'information et les défis posés par le vieillissement de la population. L'Organisation offre aux gouvernements un cadre leur permettant de comparer leurs expériences en matière de politiques, de chercher des réponses à des problèmes communs, d'identifier les bonnes pratiques et de travailler à la coordination des politiques nationales et internationales.

Les pays membres de l'OCDE sont : l'Allemagne, l'Australie, l'Autriche, la Belgique, le Canada, le Chili, la Corée, le Danemark, l'Espagne, l'Estonie, les États-Unis, la Finlande, la France, la Grèce, la Hongrie, l'Irlande, l'Islande, Israël, l'Italie, le Japon, le Luxembourg, le Mexique, la Norvège, la Nouvelle-Zélande, les Pays-Bas, la Pologne, le Portugal, la République slovaque, la République tchèque, le Royaume-Uni, la Slovénie, la Suède, la Suisse et la Turquie. La Commission européenne participe aux travaux de l'OCDE.

Les Éditions OCDE assurent une large diffusion aux travaux de l'Organisation. Ces derniers comprennent les résultats de l'activité de collecte de statistiques, les travaux de recherche menés sur des questions économiques, sociales et environnementales, ainsi que les conventions, les principes directeurs et les modèles développés par les pays membres.

Études de l'OCDE sur la croissance verte

Pratiques de gestion des exploitations agricoles favorisant la croissance verte

Chapitre 1. Quelles pratiques de gestion agricole pourraient concourir à la croissance verte

Chapitre 2. Rôle de la conservation des sols et de l'eau dans la transition vers une croissance verte

Chapitre 3. Agriculture biologique : quelle portée pour la croissance verte ?

Chapitre 4. Libérer le potentiel de la lutte intégrée contre les ennemis des cultures pour une croissance verte

Chapitre 5. Dans quelle mesure la biotechnologie agricole moderne est-elle déterminante pour une productivité plus durable ?

Chapitre 6. L'agriculture de précision est-elle le début d'une nouvelle révolution ?

Veillez consulter cet ouvrage en ligne : <http://dx.doi.org/10.1787/9789264252721-fr..>

Cet ouvrage est publié sur OECD iLibrary, la bibliothèque en ligne de l'OCDE, qui regroupe tous les livres, périodiques et bases de données statistiques de l'Organisation.

Rendez-vous sur le site www.oecd-ilibrary.org pour plus d'informations.

