




Organisation des Nations Unies  
pour l'alimentation  
et l'agriculture

# PRODUIRE PLUS AVEC MOINS

## EN PRATIQUE

# LE MAÏS LE RIZ LE BLÉ

GUIDE POUR UNE PRODUCTION  
CÉRÉALIÈRE DURABLE



On trouvera dans le présent guide une application concrète du modèle Produire plus avec moins de la FAO pour une intensification durable de la production des cultures fondamentales en matière de sécurité alimentaire, à savoir le maïs, le riz et le blé. À l'aide d'exemples recueillis en Afrique, en Asie et en Amérique latine, il montre comment les systèmes agricoles fondés sur l'écosystème aident les petits agriculteurs à améliorer les rendements des céréales, à renforcer leurs moyens d'existence, à réduire la pression exercée sur l'environnement et à accroître la résilience face au changement climatique. En cette période de transition mondiale vers une alimentation et une agriculture durables, ce guide sera un précieux outil pour les décideurs et les agents du développement.



Produire plus avec moins  
en pratique  
le maïs • le riz • le blé

**GUIDE POUR UNE PRODUCTION CÉRÉALIÈRE DURABLE**

ORGANISATION DES NATIONS UNIES  
POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE  
Rome, 2016

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

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

ISBN 978-92-5-208519-5

© FAO, 2016

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

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

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

# Table des matières

Remerciements	<b>iv</b>
Avant-propos	<b>v</b>
Vue d'ensemble	<b>vii</b>
<i>Chapitre 1</i> Renouer le lien que nous avons avec les céréales	<b>1</b>
<i>Chapitre 2</i> Rendre la production céréalière durable	<b>17</b>
<i>Chapitre 3</i> Des systèmes agricoles qui produisent plus avec moins	<b>37</b>
<i>Chapitre 4</i> La voie à suivre	<b>83</b>
Bibliographie	<b>99</b>
Abréviations	<b>120</b>
Glossaire (troisième de couverture)	

## Remerciements

Le présent ouvrage a été réalisé sous la direction de William Murray, Directeur adjoint de la Division de la production végétale et de la protection des plantes (FAO). Des conseils et avis ont été donnés par Clayton Campanhola, Chef du programme stratégique Agriculture durable (FAO), et le groupe technique consultatif sur Produire plus avec moins – maïs, riz, blé, qui s'est réuni au Siège de la FAO, à Rome, du 15 au 17 décembre 2014.

### Auteurs principaux

Timothy G. Reeves, Graeme Thomas et Gordon Ramsay

### Révision technique finale

Shivaji Pandey

Des documents ont été établis aux fins de cet ouvrage par:

- Maïs** Gregory Edmeades (ex-CIMMYT)  
Kaushal K. Garg (ICRISAT)  
Bharat Sharma (IWMI)  
Suhas P. Wani (ICRISAT)
- Riz** Roland J. Buresh (IRRI)  
Jonne Rodenburg (AfricaRice)  
Marco Wopereis (AfricaRice)
- Blé** Mahmoud Solh (ICARDA)  
Hans Braun (CIMMYT)  
Wuletaw Tadesse (ICARDA)

### Examen par les pairs

Jesse Binamira (Ministère de l'agriculture, Philippines), Prem Bindraban (Virtual Fertilizer Research Center, États-Unis d'Amérique), Simone Borelli (FAO), Hans Braun (CIMMYT), Erik Busch-Petersen (FAO/AIEA), Sandra Corsi (FAO), Tony Fischer (CSIRO, Fellow, Australie), Theodor Friedrich (FAO), Raj Gupta (BISA, Inde), M.L. Jat (CIMMYT), Zeyaur Khan (ICRISAT, Kenya), Gurdev Khush (Prix mondial de l'alimentation 1996), Leslie Lipper (FAO), Andrew MacMillan (ex-FAO), Harinder Makkar (FAO), Chikelu Mba (FAO), Alexandre Meybeck (FAO), Joyce Mulila-Mitti (FAO), Patrick Mulvany (Food Ethics Council, Royaume-Uni), Rebecca Nelson (Cornell University, États-Unis d'Amérique), Godfrey Nzamujo (Centre Songhaï, Bénin), Rodomiro Ortiz (Swedish University of

Agricultural Sciences – Université suédoise d'agronomie), Ivan Ortiz-Monasterio (CIMMYT), Mark Peoples (CSIRO, Australie), B.M. Prasanna (CIMMYT), Jules Pretty (University of Essex, Royaume-Uni), Sanjay Rajaram (Prix mondial de l'alimentation 2014), Idupulapati Rao (CIAT), Bharat Sharma (IWMI), Norman Uphoff (Cornell University, États-Unis d'Amérique), Stephen Waddington (ex-CIMMYT) et Dennis Wichelns (California State University, États-Unis d'Amérique)

### Collaborateurs

Almalinda Abubakar (FAO), Moujahed Achouri (FAO), Caterina Batello (FAO), Aracely Castro Zuniga (FAO), Ivan Cruz (EMBRAPA, Brésil), Swapan Kumar Datta (ICAR, Inde), Muhammad Dost (FAO), Aziz El-Behri (FAO), Kevin Gallagher (FAO), Gualbert Gbehounou (FAO), Matthias Halwart (FAO), Barbara Herren (FAO), Toby Hodgkin (ex-Bioversity), Allan Hruska (FAO), Ljupcho Jankuloski (AIEA), Xianping Jia (Northwest Agriculture and Forest University, Chine), Amir Kassam (University of Reading, Royaume-Uni), Muratbek Karabayev (CIMMYT), Rachel Bezner Kerr (Cornell University, États-Unis), Josef Kienzle (FAO), Samuel Kugbei (FAO), Hafiz Muminjanov (FAO), Alberto Pantoja (FAO), Yongfan Piao (FAO), Adam Prakash (FAO), Yashpal Saharawat (ICAR, Inde), Derli Prudente Santana (EMBRAPA, Brésil), William Settle (FAO), Brian Sims (FAO), Luana Swensson (FAO), Christian Thierfelder (CIMMYT) et Michael Turner (FAO)

### Cartes

Les cartes de la production mondiale de maïs, riz, blé et légumineuses ont été réalisées pour le présent ouvrage par John Latham et Renato Cumani (FAO) sur la base des données du système mondial de zones agroécologiques, disponibles sur le portail FAO/IIASA à l'adresse suivante:  
<http://www.fao.org/nr/gaez>

*Conception graphique:* Thomas&Sansonetti

*Couverture:* Giancarlo de Pol

*Illustrations (Chapitre 3):* Cecilia Sanchez

# Avant-propos

**I**maginons un monde différent en 2030 – un monde meilleur pour nos enfants et nos petits-enfants. La faim et la pauvreté ont disparu. Les systèmes alimentaires sont productifs et durables. Chacun a sa place dans nos sociétés et nos villes sont sûres, tous les travailleurs ont un emploi décent et la parité homme-femme est enfin réalité.

Cette vision de 2030 sous-tend les Objectifs de développement durable (ODD), les jalons du développement mondial récemment adoptés par l'ONU. Les progrès de l'agriculture conditionneront très fortement la réalisation de ces objectifs. La plupart des habitants de la planète touchés par la faim et la pauvreté extrême vivent dans les zones rurales et sont notamment les millions de petits agriculteurs qui font les frais des bouleversements mondiaux actuels: creusement des inégalités économiques, dégradation inexorable des écosystèmes sur lesquels repose la production alimentaire et accélération du changement climatique qui menace la production végétale partout dans le monde.

Pour réaliser les ODD, il faut passer à une agriculture plus productive, et plus durable où chacun ait sa place – qui renforce les moyens d'existence ruraux et garantisse à tous la sécurité alimentaire, tout en puisant moins largement dans les ressources naturelles et en améliorant la résilience face au changement climatique.

**Cet ouvrage se veut une contribution** à la création du monde que nous appelons de nos vœux. Le maïs, le riz et le blé sont les piliers de la sécurité alimentaire mondiale. En 2014, la récolte mondiale de céréales a battu un record historique, mais la majeure partie a été produite dans quelques grandes zones de céréaliculture où les agriculteurs paient le prix de décennies de monoculture intensive: dégradation du sol, épuisement des eaux souterraines et ralentissement marqué de la progression des rendements. Dans de vastes zones du monde en développement, les exploitants agricoles n'obtiennent que des rendements bien inférieurs aux rendements potentiels parce que les ressources naturelles sont limitées et qu'ils n'ont pas accès aux connaissances et aux technologies qui leur permettraient d'améliorer leur productivité. Le changement climatique a des incidences qui risquent de compromettre un peu plus la céréaliculture, notamment la hausse des températures et la recrudescence des ravageurs, des maladies, des sécheresses et des inondations.

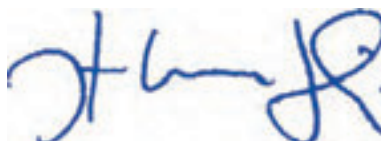
Nous devons préserver la production dans les grandes zones de culture de blé et de riz et améliorer les rendements dans les pays où la production doit être bien supérieure pour répondre aux besoins d'une population croissante. Il faut un nouveau modèle de production céréalière, qui soit à la fois très productif et durable sur le plan environnemental. Le modèle d'agriculture respectueuse des écosystèmes prôné par la FAO, Produire plus avec moins, répond à cette attente dans le cadre de systèmes agricoles associant l'agriculture de conservation, la santé des sols, les cultures et variétés améliorées, l'utilisation efficiente de l'eau et la protection intégrée.

On trouvera dans ce guide pratique de la production céréalière durable une analyse des progrès de l'adoption des techniques du modèle Produire plus avec moins par les petits producteurs du monde en développement, ainsi que des exemples de systèmes agricoles qui, comme le veut le modèle Produire plus avec moins, produisent plus de céréales par hectare et sont générateurs d'avantages sociaux, économiques et environnementaux non négligeables. Le guide montre comment les pratiques du modèle ont contribué à la reprise de la production dans les zones de culture de blé en Inde et au Kazakhstan, où les technologies de la Révolution verte avaient échoué, et à l'amélioration de la productivité des systèmes de culture de maïs à faible consommation d'intrants en Amérique centrale et en Afrique de l'Est.

Les exemples présentés illustrent l'intérêt qu'il y a à associer la céréaliculture à la production animale et à la foresterie. En Asie, les familles qui produisent du poisson dans leurs rizières récoltent plus de riz et ont une alimentation plus nourrissante. Au Brésil, un système maïs/élevage remplace la monoculture non durable de soja. En Zambie, la plantation d'arbres riches en azote dans les champs de maïs est plus rentable que l'emploi d'engrais minéraux.

**Le modèle Produire plus avec moins a déjà fait ses preuves** dans les champs des producteurs. Il reste aujourd'hui à en diffuser l'approche dans le cadre des programmes nationaux. À cet effet, il faudra redynamiser le partenariat mondial pour le développement et renforcer considérablement l'investissement dans l'agriculture. Fort de tels engagements, le modèle Produire plus avec moins nous aidera à atteindre les ODD. Il permettra d'accroître la production céréalière, de préserver la santé des écosystèmes, de renforcer la résilience face au changement climatique et d'améliorer progressivement la qualité des terres et du sol. Avec l'augmentation de la productivité et des revenus des petits exploitants agricoles, le modèle favorisera la croissance économique pour tous dont des millions de ruraux ont besoin pour s'affranchir de la pauvreté abjecte. En rattachant la production des petits agriculteurs à des programmes de protection sociale bien conçus, on garantira la sécurité alimentaire aux plus vulnérables, on améliorera leur nutrition et on contribuera à l'élimination définitive de la faim et de la malnutrition.

L'humanité a les connaissances, les technologies et le sens de l'intérêt collectif nécessaires pour faire de la vision d'un monde libéré de la faim une réalité. Il n'y a pas de temps à perdre.



**José Graziano da Silva**  
Directeur général  
de l'Organisation des Nations Unies  
pour l'alimentation et l'agriculture



# Vue d'ensemble

## 1. Renouer le lien que nous avons avec les céréales

*Le changement climatique, la dégradation de l'environnement et la stagnation des rendements sont autant de menaces pour la céréaliculture et la sécurité alimentaire mondiale. L'intensification durable de la production céréalière peut nous aider à nourrir le monde tout en préservant ses ressources naturelles.*

**D'**ici à 2050, s'agissant du maïs, du riz et du blé, la demande annuelle mondiale devrait atteindre quelque 3,3 milliards de tonnes, soit 800 millions de tonnes de plus que la récolte record de 2014. L'accroissement de la production devra essentiellement être assuré avec les terres agricoles existantes. Mais un tiers de ces terres est dégradé et la part d'eau prélevée par les agriculteurs est de plus en plus convoitée par d'autres secteurs.

Le changement climatique pourrait avoir des effets catastrophiques sur les rendements du blé et entraîner un fléchissement de 20 pour cent des rendements du maïs en Afrique. En Asie, l'élévation du niveau de la mer met en péril la riziculture dans les grands deltas fluviaux. Le potentiel de croissance de la production céréalière est en outre réduit par la stagnation des rendements et la baisse de rentabilité des systèmes de production à forte consommation d'intrants.

Si l'on n'agit pas, les 500 millions de petits exploitants agricoles familiaux du monde en développement, de même que les populations urbaines à faible revenu, seront frappés de plein fouet. Le changement climatique en Asie repoussant la production du blé vers les zones de culture pluviale moins productives, les consommateurs seront confrontés à des envolées des prix des aliments. La croissance démographique est susceptible d'aggraver la dépendance de l'Afrique à l'égard du riz importé. La progression de la demande et le fléchissement de la productivité pourraient entraîner un triplement des importations de maïs des pays en développement d'ici à 2050.

L'accroissement durable de la productivité des terres agricoles existantes constitue le meilleur choix si l'on veut éviter de nouvelles flambées des prix des denrées alimentaires, améliorer l'économie rurale et les moyens d'existence des agriculteurs, et réduire le nombre de personnes vulnérables à la faim et à la malnutrition. Le modèle d'intensification de la production végétale Produire plus avec moins, prôné par la FAO, vise à améliorer à la fois les rendements et la qualité nutritionnelle, tout en réduisant les coûts de production et les coûts environnementaux.

On trouvera dans un exposé des concepts et des pratiques du modèle Produire plus avec moins, des exemples de leur application pratique à la production de maïs, de riz et de blé, et un tour d'horizon des politiques, des institutions, des technologies, et des actions de renforcement des capacités nécessaires pour transposer à grande échelle les enseignements tirés des programmes nationaux et régionaux.

## 2. Rendre la production céréalière durable

*Il faut reconfigurer les systèmes de production agricole partout dans le monde pour favoriser une intensification durable. Les producteurs de céréales ont déjà entamé la transition en adoptant les composantes et les pratiques essentielles du modèle Produire plus avec moins.*

- ▶ **Agriculture de conservation.** Avec la perturbation minimale du sol, la mise en place de paillis et les rotations culturales, les producteurs de maïs et de blé parviennent à réduire les coûts, à accroître les rendements et à préserver les ressources naturelles. Dans les systèmes de riziculture irriguée, les exploitants se tournent vers le semis à sec sans travail préalable du sol. Pour améliorer leurs revenus et renforcer leur résilience face au changement climatique, les producteurs de céréales diversifient les cultures et intègrent les arbres, l'élevage et l'aquaculture dans leurs systèmes de production.
- ▶ **Santé du sol.** Les pratiques de l'agriculture de conservation contribuent à améliorer la teneur en matière organique et les propriétés physiques du sol, ce qui freine l'érosion et accroît l'efficacité de l'eau. Grâce à leur aptitude à fixer l'azote, les légumineuses rendent les sols plus fertiles et réduisent la nécessité des apports d'engrais minéraux. L'apport d'éléments nutritifs en fonction des besoins des cultures aide les agriculteurs à employer moins d'engrais et limite les excès nocifs pour l'environnement.
- ▶ **Cultures et variétés améliorées.** Les systèmes Produire plus avec moins tirent parti de l'association de groupes de cultures diversifiées complémentaires, et de leurs variétés améliorées, pour accroître la productivité et contribuer à assurer la sécurité alimentaire et nutritionnelle. Des variétés céréalières plus résistantes aux stress biotiques et abiotiques sont désormais cultivées. La mise au point de céréales plus productives et nutritives doit aller de pair avec l'établissement de systèmes assurant la multiplication rapide de semences de qualité.
- ▶ **Gestion efficace de l'eau.** Dans le souci de produire davantage avec chaque goutte d'eau, de nombreux producteurs de riz limitent l'inondation des rizières, ce qui contribue aussi à limiter les émissions de méthane. La riziculture pratiquée sans inondation peut réduire l'utilisation d'eau de 70 pour cent. L'irrigation d'appoint du blé avec de l'eau de pluie récupérée et stockée a permis de quadrupler la productivité du blé. La plantation sur des plates-bandes irriguées avec irrigation par rigoles entraîne une économie d'eau et une hausse des rendements du blé et du maïs.
- ▶ **Protection intégrée.** La première ligne de défense contre les ravageurs et les maladies est un écosystème agricole en bonne santé. Les producteurs de riz ayant bénéficié d'une formation sur la protection intégrée ont considérablement réduit le recours aux insecticides – et ce, sans baisse de rendement. Plantées en association avec le maïs, les légumineuses contribuent à l'élimination des adventices. Les producteurs de blé ont surmonté les épidémies de rouille en plantant des variétés résistantes et ils luttent contre les insectes nuisibles au moyen de rotations culturales.

Chacune de ces composantes contribue à la durabilité mais, pour obtenir les avantages maximaux, il faut impérativement qu'elles soient toutes pleinement intégrées dans des systèmes de production agricole Produire plus avec moins.

### 3. Des systèmes agricoles qui produisent plus avec moins

Concrètement, à quoi «ressemble» l'intensification durable de la production végétale? Ces exemples, choisis dans divers pays en développement de toutes les régions du monde, illustrent la mise en pratique de systèmes agricoles Produire plus avec moins.

1. **En Afrique de l'Est**, la culture de deux plantes locales dans les champs de maïs a contribué à mettre en déroute deux des pires ennemis de cette céréale dans la région. Le système «push-pull» a d'autres avantages, notamment la production de fourrage de qualité pour le bétail.
2. **Mises au point à Madagascar**, les pratiques du Système de riziculture intensive se sont diffusées jusqu'en Asie, où elles permettent aux exploitants agricoles de produire plus de riz et d'améliorer leurs revenus en employant moins d'eau, moins d'engrais et moins de semences.
3. **En Amérique centrale**, les agriculteurs ont mis au point un système de production «défriche-paillis» qui permet de préserver les arbres et les arbustes, de contribuer à la conservation du sol et de l'eau, de multiplier par deux les rendements du maïs et du haricot et même de résister aux ouragans.
4. **Dans le monde entier**, les producteurs de blé cultivent des légumineuses comme sources naturelles d'azote, en vue d'améliorer les rendements du blé. L'application des principes de l'agriculture de conservation peut permettre de bénéficier de tous les avantages de la rotation blé-légumineuses.
5. **En Amérique latine**, une graminée originaire d'Afrique tropicale a considérablement contribué à améliorer la productivité du bétail. Les agriculteurs brésiliens ont intégré la graminée *Brachiaria* dans un système de culture du maïs avec semis direct qui remplace la monoculture de soja.
6. **Dans les plaines indo-gangétiques d'Asie du Sud**, des techniques favorisant la conservation des ressources permettent d'obtenir de bons rendements du blé et de réduire les coûts de production de 20 pour cent. L'application des principes de l'agriculture de conservation à la riziculture générerait des effets de synergie bénéfiques pour les deux cultures.
7. **Partout dans le monde en développement**, il est fréquent de voir pois cajan, niébé, arachide, soja et pois sabre dans les champs de maïs. Compte tenu de leur forte productivité, les systèmes maïs-légumineuses conviennent particulièrement aux petits exploitants agricoles.
8. **En Asie**, l'élevage de poisson dans les rizières et tout autour contribue à la lutte contre les ravageurs du riz et à la fertilisation de la culture. L'amélioration des rendements, les recettes tirées de la vente du poisson et les économies réalisées sur les produits agrochimiques se traduisent par un accroissement de 50 pour cent des revenus des producteurs.
9. **En Afrique australe**, associés à la culture du maïs, des arbres et des arbustes de la famille des légumineuses fournissent des résidus de qualité riches en azote, qui contribuent à l'amélioration de la fertilité du sol, à l'accroissement des rendements et à la création de nouvelles sources de revenus.
10. **En Asie centrale**, le labour zéro, la couverture du sol et la rotation des cultures aideraient de nombreux pays à freiner l'érosion des sols et à accroître la production alimentaire. Au Kazakhstan, les producteurs de blé sont déjà bien engagés sur la voie d'une application intégrale des principes de l'agriculture de conservation.
11. **En Asie du Sud et du Sud-Est**, des millions de producteurs de riz produisent désormais du maïs pendant la saison sèche, en cultivant des hybrides à haut rendement qui consomment moins d'eau et génèrent des revenus plus substantiels. Gros plan: le Bangladesh.

## 4. La voie à suivre


*L'adoption du modèle Produire plus avec moins par les petits exploitants agricoles passe par une action concertée à tous les niveaux, menée avec la participation des pouvoirs publics, des organisations internationales, du secteur privé et de la société civile.*

**E**n appliquant le modèle Produire plus avec moins dans des conditions de production souvent difficiles, les producteurs céréaliers ont amélioré leur production ainsi que leurs moyens d'existence et leurs revenus, tout en préservant les ressources naturelles et en renforçant la résilience face au changement climatique. Mais le taux d'adoption des pratiques durables est encore relativement faible et il reste encore beaucoup à faire pour que l'agriculture engendre tous les avantages du modèle Produire plus avec moins.

Le passage à une intensification durable de la production végétale suppose des changements fondamentaux dans la gouvernance de l'alimentation et de l'agriculture. La mise en œuvre de ces changements demande une évaluation réaliste du coût global des transitions indispensables. Le passage à une intensification durable de la production végétale suppose aussi une adaptation méticuleuse des pratiques et des technologies de l'agriculture durable aux conditions spécifiques des sites d'application.

Un environnement politique, juridique et institutionnel favorable doit permettre d'établir l'équilibre souhaitable entre les initiatives du secteur privé, du secteur public et de la société civile et garantir la reddition de comptes, l'équité, la transparence et le respect de la légalité. La vision de la FAO relative à l'alimentation et l'agriculture durables peut orienter l'élaboration d'un cadre de politiques, stratégies et programmes nationaux visant à faciliter le passage à une intensification durable de la céréaliculture, qui soit particulièrement productive, économiquement viable, respectueuse de l'environnement et fondée sur l'équité et la justice sociale.

Par conséquent, les décideurs politiques doivent relever les grands défis suivants: appuyer le passage au modèle Produire plus avec moins dans le contexte de transformations structurelles plus générales; formuler des politiques qui favorisent l'adoption de systèmes de production durables par les exploitants agricoles; centrer les investissements agricoles sur la fourniture de biens publics et encourager les agriculteurs à investir dans la production végétale durable; établir et protéger les droits des producteurs à accéder aux ressources; promouvoir des marchés et des filières plus justes et plus efficaces; accroître l'appui en faveur de la recherche-développement agricole menée sur le long terme; promouvoir les innovations technologiques adaptées aux besoins des petits producteurs; redynamiser l'enseignement et la formation agricoles; renforcer les systèmes semenciers formels et informels; enfin, intensifier la collaboration avec les organisations, les instruments et les mécanismes internationaux.



Chapitre 1

# Renouer le lien que nous avons avec les céréales

*Le changement climatique, la dégradation de l'environnement  
et la stagnation des rendements sont autant de menaces  
pour la céréaliculture et la sécurité alimentaire mondiale.  
L'intensification durable de la production céréalière  
peut nous aider à nourrir le monde  
tout en préservant ses ressources naturelles.*



**A**vec une récolte annuelle cumulée de l'ordre de 2,5 milliards de tonnes, le maïs, le riz et le blé sont les principales cultures produites dans le monde et les piliers de la sécurité alimentaire mondiale. Chaque jour, l'humanité consomme des millions de tonnes de ces céréales sous l'une de leurs innombrables formes familières – bols de riz fumant ou assiettes de bouillie de maïs, pains, tortillas, tamales, naan, chapatis, pâtes, pizza, tourtes et pâtisseries. Des millions de tonnes parviennent aussi dans nos assiettes par des voies détournées, après avoir servi à nourrir les bovins, les cochons et les volailles qui produisent une grande partie de la viande, du lait et des œufs consommés dans le monde<sup>1,2</sup>.

Ensemble, le maïs, le riz et le blé constituent l'élément le plus important du régime alimentaire humain, puisqu'ils fourniraient 42,5 pour cent des apports énergétiques alimentaires mondiaux. Globalement, leur contribution à l'apport en protéines – environ 37 pour cent – arrive à la deuxième place, talonnant celle du poisson et des produits d'origine animale. Le blé, à lui seul, fournit plus de protéines que les viandes de volaille, de porc et de bovin réunies. Le maïs, le riz et le blé sont même la source de 6 pour cent des matières grasses que nous consommons.

Les trois céréales contribuent de manière essentielle à la sécurité alimentaire des pays en développement. En Afrique australe, elles assurent la moitié de l'apport énergétique. En Asie occidentale, le blé fournit environ 40 pour cent des protéines. En Asie du Sud, le blé et le riz apportent la moitié des calories et des protéines et 9 pour cent des matières grasses. Dans toutes les régions en développement, à l'exception de l'Amérique latine, les céréales constituent pour les populations une source de protéines plus importante que la viande, le poisson, le lait et les œufs réunis.

Même en Amérique du Nord et en Europe occidentale, où près des deux tiers des apports en protéines sont d'origine animale, le blé en apporte tout de même 20 pour cent. Si l'on prend en compte leur contribution indirecte, les céréales tiennent une place beaucoup plus importante: aux États-Unis, environ 40 pour cent des disponibilités en maïs produit localement – soit quelque 130 millions de tonnes en 2014 – sont utilisés pour nourrir les animaux d'élevage<sup>2,3</sup>.

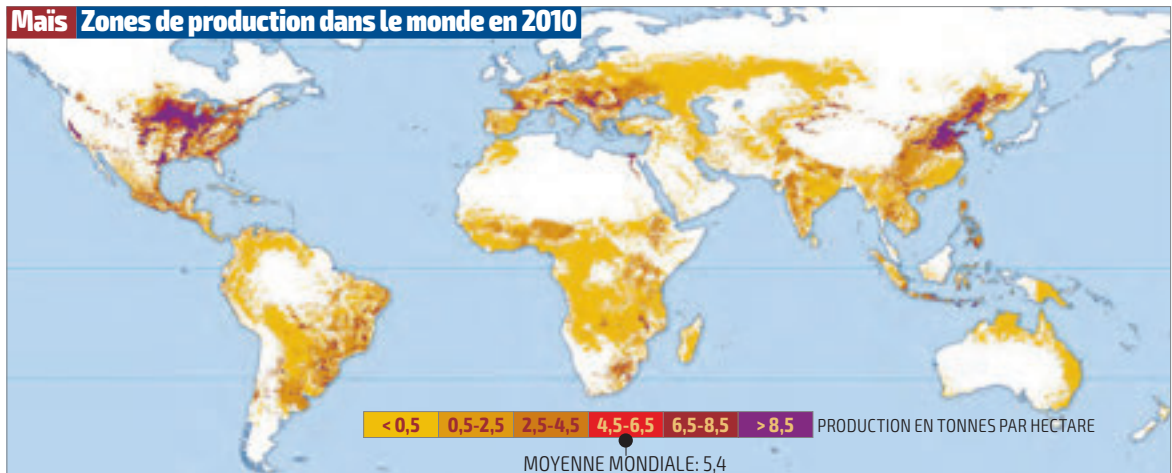
### **Les céréales occupent une place dominante dans la nutrition humaine**

depuis la nuit des temps, quand les premiers agriculteurs ont commencé à les cultiver. En effet, la révolution agricole et tout ce qui a suivi – en bref, le monde dans lequel nous vivons – dérivent d'un lien surprenant et solide, établi pour la première fois il y a quelque 10 000 ans entre des communautés de chasseurs-cueilleurs et d'abondantes plantes herbacées sauvages de la famille des Poaceae (ou graminées). Parmi les premières graminées à être semées et récoltées, au Moyen-Orient, on trouve les espèces *Triticum* qui ont évolué sur une période de 2 500 ans pour donner le blé tendre<sup>4</sup>.

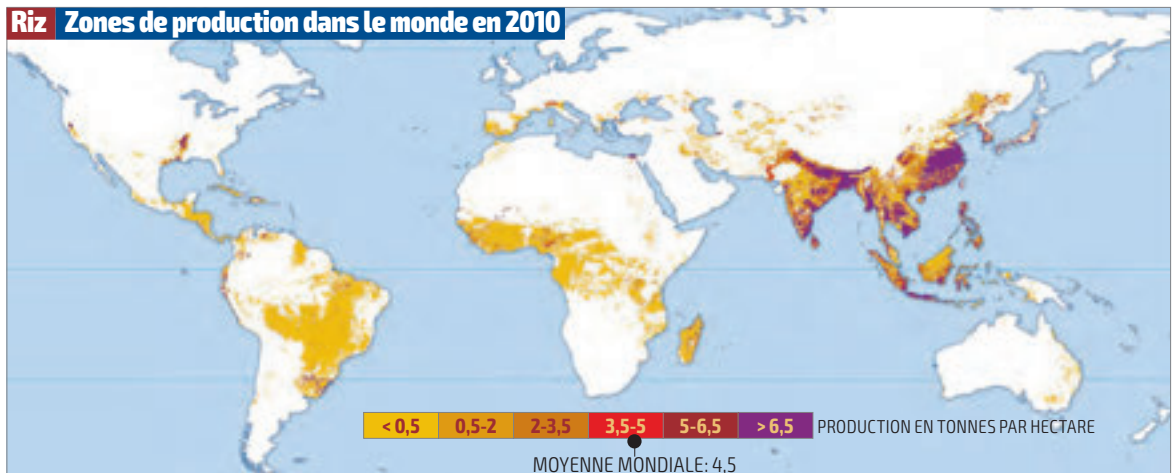
Les grains récoltés offraient aux chasseurs-cueilleurs une source concentrée d'énergie, de protéines et d'autres éléments nutritifs facile à stocker. La même découverte était faite, il y a entre 3 000 et 9 000 ans, en Asie de l'Est et en Afrique de l'Ouest, où les espèces de riz *Oryza sativa* et *Oryza glaberrima* étaient domestiquées à partir de leurs ancêtres sauvages<sup>5,6</sup>. L'origine des 2 500 variétés commerciales actuelles de maïs, qui remonte à quelque 7 000 ans, est une graminée de Mésopotamie du genre *Zea*, appelée teosinte<sup>4</sup>.

L'invention de l'irrigation en Mésopotamie, il y a 8 000 ans, a été une première étape fondamentale de l'intensification de la production céréalière, qui devait

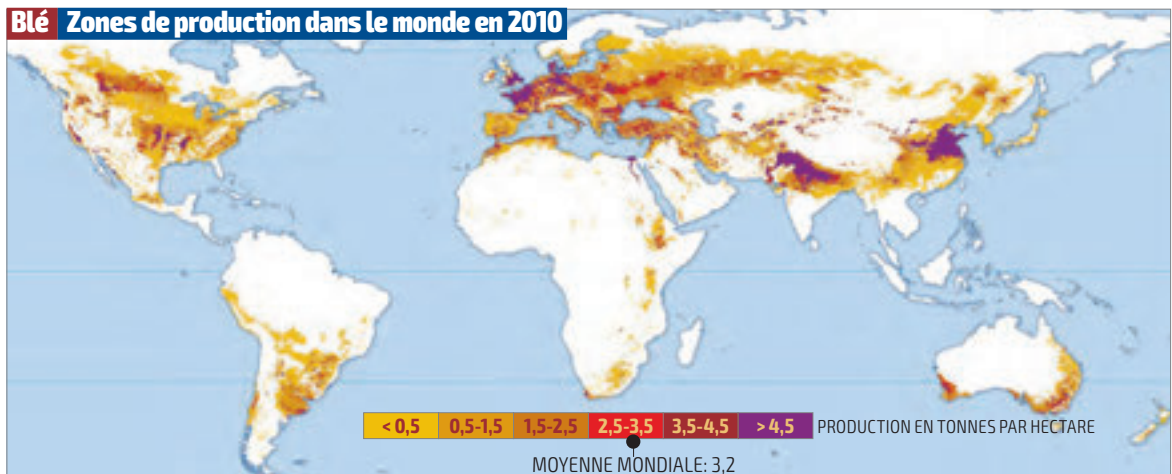
**Maïs** Zones de production dans le monde en 2010



**Riz** Zones de production dans le monde en 2010



**Blé** Zones de production dans le monde en 2010





permettre aux populations urbaines alors en pleine expansion de satisfaire leur demande de produits alimentaires en accroissant la productivité. Il y a 3 000 ans, la riziculture intensive était pratiquée en Chine<sup>4</sup> et des populations du Mexique avaient mis au point des systèmes d'irrigation du maïs<sup>7</sup>.

Les céréales ont favorisé l'instauration d'une sécurité alimentaire qui a permis à la population humaine de passer de 10 millions à 300 millions d'habitants pendant les 8 000 premières années du développement de l'agriculture<sup>8</sup>, mais toute baisse de production ou défaut d'approvisionnement provoquait une catastrophe. Des civilisations fondées sur l'agriculture irriguée dans les vallées de l'Indus et du Tigre se sont effondrées en raison de l'envasement des canaux et de la salinisation des sols<sup>9</sup>. La famine a dévasté la Rome antique quand ses ennemis ont bloqué les envois de céréales en provenance d'Afrique du Nord<sup>10</sup>. La civilisation maya de l'époque classique a probablement sombré en raison d'une épidémie de virus de la mosaïque du maïs<sup>11</sup>. En Europe, la fin de l'optimum climatique médiéval il y a 700 ans a été suivie de plusieurs étés humides qui ont favorisé une explosion des maladies fongiques chez le blé, déclenchant une famine dont les victimes se sont comptées par millions<sup>12</sup>.

La révolution agricole en Grande-Bretagne, qui a commencé à la fin du XVII<sup>e</sup> siècle, a été un autre jalon de l'intensification de la production céréalière et de l'histoire de la sécurité alimentaire. Les charrues améliorées, les variétés plus productives et la rotation des cultures intégrant des légumineuses ont aidé les agriculteurs à optimiser l'utilisation des ressources de leurs exploitations et à doubler le rendement du blé, qui est passé de 1 tonne à 2 tonnes à l'hectare, entre 1700 et 1850. Pendant la même période, la population d'Angleterre a augmenté, passant de 5 millions à 15 millions d'habitants<sup>13, 14</sup>.

La croissance démographique et l'intensification agricole se sont accélérées au cours du XX<sup>e</sup> siècle. Pendant les années qui ont suivi la deuxième guerre mondiale, on a observé un changement de paradigme dans l'agriculture des pays industrialisés, avec l'entrée en force de la génétique, de la biochimie et des sciences de l'ingénieur dans le secteur de la production végétale. L'emploi de lourdes machines agricoles consommant des carburants fossiles, l'utilisation de variétés végétales à haut rendement, l'irrigation et le recours aux produits agrochimiques ont entraîné des hausses de productivité considérables<sup>15</sup>.

L'intensification de la production végétale dans les pays en développement a véritablement commencé dans les années 60, alors qu'une croissance démographique exponentielle et d'importantes baisses de la production céréalière provoquaient des famines à grande échelle<sup>15</sup>. En 1970, selon les estimations, 37 pour cent de la population du monde en développement, soit près d'un milliard de personnes, souffraient de sous-alimentation<sup>16, 17</sup>. Confrontée à la menace d'une crise alimentaire mondiale, la communauté internationale s'est mobilisée derrière un ensemble d'initiatives de recherche, de développement et de transfert de technologies agricoles, qui est connu sous le nom de «Révolution verte». L'objectif était d'intensifier la production des trois cultures essentielles pour la sécurité alimentaire mondiale: le maïs, le riz et le blé.

## La Révolution verte et ses lendemains

La Révolution verte a été guidée initialement par les travaux du biologiste américain Norman Borlaug et de chercheurs du Centre international d'amélioration du maïs et du blé (CIMMYT), au Mexique et de l'Institut international de recherche sur le riz (IRRI), aux Philippines. Elle est montée en puissance pendant les années 60, avec l'introduction en Asie du Sud de variétés de riz et de blé semi-naines à haut rendement. Appuyées par des programmes publics de développement des infrastructures d'irrigation et d'amélioration de l'approvisionnement en produits agrochimiques, ces variétés ont permis de faire progresser les rendements en quelques années seulement autant que l'avait fait la révolution agricole en Angleterre en plus d'un siècle<sup>1</sup>.

C'est essentiellement grâce à la Révolution verte que le monde a bénéficié d'un bond quantitatif de la production alimentaire. La production mondiale annuelle de céréales est passée de 640 millions de tonnes en 1961 à près de 1,8 milliard de tonnes en 2000. Les progrès les plus spectaculaires ont été observés dans le monde en développement: la production de maïs a augmenté de 275 pour cent, celle du riz de 194 pour cent et celle du blé de 400 pour cent. La hausse de la production rizicole en Asie a été due en grande partie à une plus forte intensité de culture, les producteurs pouvant passer d'une seule récolte à trois récoltes par an<sup>18</sup>.

Entre 1960 et 2000, alors que sa population faisait plus que doubler, le monde en développement voyait les disponibilités par habitant de céréales produites localement bondir de 50 pour cent<sup>1,17</sup>. La proportion de personnes sous-alimentées est tombée, passant de plus d'un tiers de la population en 1970 à 18 pour cent à la fin du siècle<sup>19</sup>.

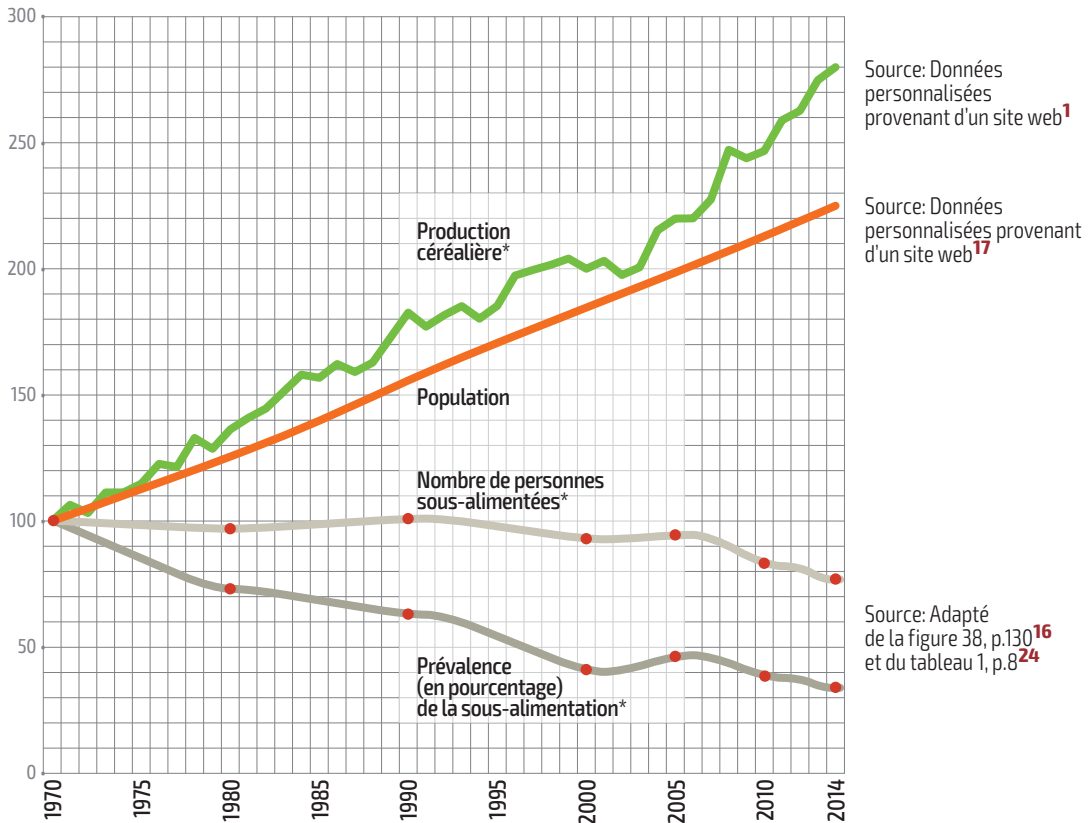
Du fait de la baisse du coût de production unitaire des céréales, les revenus des exploitants agricoles ont augmenté, ce qui a contribué en Asie à un recul significatif de la pauvreté rurale<sup>20</sup>. Les consommateurs urbains ont aussi bénéficié de décennies de prix stables et relativement bas des céréales<sup>21</sup>. L'intensification a aussi signifié que les 250 pour cent d'augmentation de la production céréalière du monde en développement, observés entre 1960 et 2000, ont été obtenus avec une extension de la surface cultivée de seulement 44 pour cent, ce qui a limité la nécessité de convertir des habitats naturels en terres agricoles<sup>1</sup>.

Aujourd'hui, les pays en développement fournissent les deux tiers de la production céréalière mondiale<sup>1</sup>. Des variétés améliorées sont cultivées sur la plupart des terres à blé d'Asie et d'Afrique du Nord<sup>22</sup>, ainsi que dans les rizières d'Asie tropicale<sup>23</sup>. En Afrique de l'Ouest, des variétés précoces permettent de doubler la production de riz et de maïs depuis 2000<sup>1</sup>.

La contribution de la Révolution verte à la sécurité alimentaire est indéniable [FIGURE 1.1]. L'incidence de la sous-alimentation chez les populations des pays en développement a reculé de 12,9 pour cent<sup>24</sup>. En 2014, la production céréalière mondiale aurait atteint 2,5 milliards de tonnes, faisant baisser les cours internationaux bien en-deçà de leur pic de 2011<sup>25</sup>. Et l'on peut accroître encore la production – car, dans la plupart des régions en développement, les rendements des principales cultures vivrières, notamment les céréales, sont égaux à la moitié de ceux qu'il est techniquement possible d'obtenir avec une optimisation des intrants et de la gestion<sup>26</sup>.

**Figure 1.1 Production céréalière, croissance démographique, nombre de personnes sous-alimentées et prévalence de la sous-alimentation dans le monde en développement, 1970-2014**

Indice (1970=100)



\* Les données relatives à 2014 sont provisoires

**Le problème est que la performance agricole** passée n'est pas représentative des résultats futurs. L'intensification de la production végétale, fondée sur la monoculture et une consommation élevée d'intrants externes, a altéré la biodiversité et les services écosystémiques – notamment la diversité génétique des cultures, la formation du sol et la fixation biologique de l'azote – au point de compromettre la durabilité de la production alimentaire elle-même<sup>27, 28</sup>. Le bond quantitatif de la production céréalière imputable à la Révolution verte s'est souvent traduit par la dégradation des terres, la salinisation des zones irriguées, la surexploitation des eaux souterraines, l'apparition de résistances aux ravageurs et l'altération de l'environnement, du fait de l'accroissement des émissions de gaz à effet de serre et de la pollution des cours et plans d'eau par des nitrates<sup>15</sup>.

La double et triple monoculture intensive du riz en Asie est associée à l'épuisement des éléments nutritifs du sol, au développement de la toxicité des sols et à la recrudescence des ravageurs et des maladies<sup>18</sup>. L'augmentation des rendements du riz a marqué le pas en Asie de l'Est et du Sud-Est, des régions qui assurent 60 pour cent de la production mondiale<sup>29</sup>. Le tassement de la croissance des rendements a été confirmé par des études conduites en Inde dans les principaux

États producteurs de riz, et dans les grandes zones rizicoles d'Asie de l'Est. Le recul des rendements des variétés modernes, malgré la quantité considérable d'intrants employés, est de plus en plus avéré<sup>20</sup>.

La stagnation des rendements dans les grandes régions productrices de blé est considérée comme le résultat d'une série complexe de facteurs, notamment le ralentissement du rythme de l'amélioration génétique, la baisse de la fertilité des sols, le déclin de l'efficacité de l'utilisation des intrants et différents stress biotiques et abiotiques<sup>22</sup>. S'agissant du blé, le risque de développement de rouilles a augmenté avec l'intensification de la culture et l'essor de la monoculture, et les insectes nuisibles sont de plus en plus fréquemment responsables de baisses de production<sup>30</sup>.

La production intensive crée souvent des environnements luxuriants particulièrement appréciés des ravageurs, ce qui contraint à recourir toujours plus lourdement aux pesticides alors que les insectes, les adventices et les agents pathogènes y deviennent résistants. Aujourd'hui, l'agriculture emploie quelque 2,5 millions de tonnes de pesticides par an<sup>31</sup>. Dès le début des années 90, on a constaté que les coûts en matière de santé publique de l'utilisation excessive de pesticides dans les rizières asiatiques étaient supérieurs aux avantages économiques de la lutte phytosanitaire<sup>32</sup>. À l'échelle mondiale, quelque 220 espèces d'adventices ont développé une résistance à un ou plusieurs herbicides, faisant peser une lourde menace sur les céréales<sup>33</sup>.

L'adoption généralisée partout dans le monde de variétés de céréales à haut rendement a entraîné un appauvrissement à grande échelle de la diversité phylogénétique et une érosion de la biodiversité en général. En Indonésie, par exemple, la Révolution verte a conduit à abandonner un millier de cultivars locaux de riz au profit de variétés modernes qui, compte tenu de l'étroitesse de leur socle génétique, sont plus vulnérables face aux ravageurs et aux maladies. La monoculture a aussi contribué à réduire l'agrobiodiversité et la diversité des régimes alimentaires partout dans le monde, en prenant la place de la polyculture associant céréales, légumes secs et oléagineux<sup>18, 20</sup>.

En outre, la culture intensive contribue considérablement à l'émission des gaz à effet de serre responsables du changement climatique. Les émissions liées à l'agriculture et au changement de couvert végétal, principalement aux fins d'une conversion à l'agriculture, ont quasiment doublé au cours des 50 dernières années<sup>34</sup> et représentent aujourd'hui 25 pour cent de l'ensemble des émissions anthropogéniques<sup>35</sup>. Entre 2001 et 2010, les émissions directement liées à la production végétale et animale sont passées de 4,7 milliards à plus de 5,3 milliards de tonnes d'équivalent dioxyde de carbone, l'augmentation étant essentiellement imputable aux pays en développement<sup>34</sup>.

En tant que grosse consommatrice d'engrais minéraux, la production céréalière contribue largement aux émissions d'oxyde nitreux d'origine agricole, qui représentent 58 pour cent des émissions totales; la culture de riz aquatique et l'élevage produisent près de la moitié de toutes les émissions de méthane<sup>36, 37</sup>.

**Selon certaines critiques, la Révolution verte** a principalement profité aux agriculteurs qui exploitaient les terres les plus fertiles et accédaient facilement aux intrants et aux marchés, mais n'a pas atteint la majorité des petits agriculteurs pauvres en ressources<sup>38</sup>. Ces critiques font valoir un paradoxe aveuglant: les trois quarts des habitants de la planète touchés par la pauvreté et la faim vivent en zone rurale et travaillent dans le secteur de l'agriculture et de la production alimentaire<sup>39, 40, 41</sup>.

Une autre critique adressée au modèle d'agriculture intensive prôné par la Révolution verte est que ses coûts environnementaux élevés seraient subis par les générations futures. Aucun organisme n'a été créé pour percevoir des compensations et les investir dans la régénération de l'environnement. Si les prix à la production répercutaient l'ensemble des coûts de production – l'agriculture payant effectivement pour les dégâts environnementaux qu'elle provoque – les prix des produits alimentaires ne seraient pas restés aussi bas pendant aussi longtemps<sup>15</sup>.

Une chose est sûre: malgré la baisse régulière de la proportion de personnes sous-alimentées dans le monde, les systèmes alimentaires et agricoles actuels ne sont pas parvenus à offrir à toute la population de la planète une nourriture suffisante permettant de mener une vie saine et active. Aujourd'hui, le *nombre absolu* de personnes souffrant de sous-alimentation chronique dans le monde n'est inférieur que de 20 pour cent à ce qu'il était il y a un demi-siècle<sup>24</sup>.

En outre, selon les estimations, 2 milliards de personnes présenteraient une malnutrition en micronutriments liée à une carence en vitamines et en minéraux dans leur régime alimentaire. Les augmentations de rendements permises par le recours massif aux engrais minéraux, qui fournissent essentiellement de l'azote, du phosphore et du potassium, ont coïncidé avec un déclin de la valeur nutritionnelle des céréales<sup>42</sup>, et même des légumes<sup>43, 44</sup>.

Chez les ménages ruraux à faible revenu en particulier, les régimes alimentaires monotones essentiellement composés de féculents constituent la norme, tandis que les aliments riches en micronutriments, tels que la viande, les produits laitiers, les légumes secs, les fruits et les légumes sont généralement rares. Cinquante ans de production intensive de maïs, de riz et de blé ont probablement contribué à accroître l'apport énergétique alimentaire mais n'ont pas permis d'améliorer dans les mêmes proportions la nutrition humaine globale<sup>45</sup>.

Le modèle d'intensification de la production végétale promu par la Révolution verte constituait la réponse adaptée à la crise alimentaire qui guettait l'humanité dans les années 60. Mais le monde est maintenant entré dans l'ère de l'après-Révolution verte.

## Plus de 3 milliards de tonnes d'ici à 2050

L'agriculture mondiale – et le lien qui existe de longue date entre l'humanité et le maïs, le riz et le blé – est confrontée à une «série sans précédent de pressions convergentes»<sup>46</sup>. La première d'entre elles est la demande de denrées alimentaires et d'autres produits agricoles, qui jamais à aucun moment de notre histoire n'a atteint une telle ampleur. La population mondiale devrait augmenter, passant de 7,3 milliards de personnes à plus de 9,6 milliards entre aujourd'hui et 2050, les régions en développement enregistrant la majeure partie de l'augmentation; dans les 48 pays les moins avancés, la population pourrait doubler et atteindre 1,8 milliard<sup>17</sup>. Parallèlement, dans les pays en développement, l'urbanisation et l'enrichissement relatif des populations favorisent une transition nutritionnelle qui se traduit par une consommation plus élevée de protéines animales, et partant, une forte progression de la production animale et de son utilisation intensive des ressources.

Selon une nouvelle étude réalisée par la FAO et l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), la consommation mondiale de céréales augmentera de 390 millions de tonnes entre 2014 et 2024. Le facteur

essentiel de l'augmentation sera l'essor de la demande d'aliments pour animaux, les céréales secondaires – dont le maïs à concurrence de 70 pour cent – comptant pour plus de la moitié du total. D'ici à 2024, les pays en développement consommeront une quantité supplémentaire de 170 millions de tonnes de maïs, de riz et de blé, destinés à l'alimentation humaine<sup>47</sup>.

À plus long terme, la FAO a estimé que, d'ici à 2050, la demande mondiale annuelle relative aux trois céréales atteindrait près de 3,3 milliards de tonnes. La majeure partie de l'augmentation permettra d'assurer une production annuelle d'environ 455 millions de tonnes de viande<sup>48</sup>, soit 50 pour cent de plus qu'en 2012<sup>1</sup>. La quantité de céréales employées aux fins de la fabrication de biocarburants devrait augmenter, passant de 130 millions de tonnes par an aujourd'hui à 182 millions de tonnes en 2020<sup>48</sup>; selon un certain scénario, elle pourrait atteindre près de 450 millions de tonnes d'ici à 2050<sup>49, 50</sup>.

Il n'est pas nécessaire de répondre entièrement à la demande de maïs, de riz et de blé en accroissant la production. Chaque année, un tiers de la totalité des aliments produits aux fins de la consommation humaine, notamment 30 pour cent de céréales, est perdu ou gaspillé, ce qui a des répercussions négatives considérables sur la disponibilité des denrées alimentaires et des coûts environnementaux élevés<sup>51</sup>. La réduction sensible des pertes et des gaspillages de nourriture et l'adoption de régimes alimentaires durables, plus sains et moins riches en protéines animales, contribueraient à limiter la nécessité d'accroître la production céréalière.

Cependant, compte tenu de l'ampleur de la future demande, il faut des systèmes de production céréalière qui soient à la fois plus productifs et plus durables sur le plan environnemental. Environ 80 pour cent de la croissance de la production céréalière attendue à l'avenir dans les pays en développement devront résulter d'un processus d'intensification; en Asie du Sud, en Asie de l'Ouest et en Afrique du Nord, l'intensification sera responsable de 90 à 100 pour cent de l'augmentation<sup>48</sup>. Plus que jamais auparavant, la croissance agricole dépendra des gains de productivité permis par l'accroissement des rendements des cultures<sup>50</sup>.

Mais il sera plus difficile que par le passé de parvenir à améliorer les rendements des céréales. Dans la plupart des écosystèmes agricoles mondiaux, les sols ont été quasiment vidés de leurs stocks de carbone organique, qui sont essentiels à la fertilité<sup>52</sup>. Un tiers des terres cultivées sont de modérément à fortement dégradées du fait de l'érosion, de la salinisation, de la compaction et de la pollution chimique des sols<sup>53</sup>. Dans le nord-est de la Chine, si l'érosion des sols se poursuit au rythme actuel, la production céréalière de 93 millions d'hectares de terres agricoles pourrait s'effondrer de 40 pour cent dans les 50 prochaines années<sup>54</sup>. Dans le monde entier, les zones de production de blé irrigué sont de plus en plus touchées par la salinisation des sols et leur saturation en eau<sup>22</sup>. En Asie et en Amérique latine, on estime que l'expansion de la surface plantée en maïs ne saurait durer compte tenu des coûts environnementaux importants de cette production et du risque d'aggravation de la dégradation des terres<sup>55</sup>.

Parallèlement, la part agricole des prélèvements mondiaux d'eau douce – actuellement voisine de 70 pour cent – subit une concurrence croissante de la part d'autres secteurs. Un grand nombre de systèmes de culture pluviale ou irriguée arrivent aux limites de leur potentiel productif, et les réserves d'eau souterraine sont utilisées à un rythme plus rapide que celui de leur reconstitution naturelle dans les principales régions céréalières du monde entier<sup>53</sup>. En Afrique du Nord et en Asie de l'Ouest, les pénuries d'eau pourraient influencer sur la productivité des cultures d'une manière encore plus décisive que les pénuries

de terres<sup>56</sup>. Dans certains pays asiatiques, la concurrence pour l'eau résultant de la demande des usagers domestiques et industriels entraîne une réduction de la surface cultivée en riz<sup>23</sup>. La pénurie d'eau devrait conduire à réserver l'irrigation à des cultures ayant une valeur marchande supérieure à celle du blé, ce qui contribuerait à repousser cette culture dans des zones pluviales moins productives<sup>57</sup>.

Un autre frein à la progression de la production est le ralentissement sensible des rythmes d'amélioration des rendements du maïs, du riz et du blé, qui oscillaient en moyenne entre 2 et 3 pour cent par an pendant la période de la Révolution verte. À l'échelle mondiale, le taux annuel moyen de croissance des rendements du maïs est égal à 1,5 pour cent, notamment en raison des progrès réalisés aux États-Unis, mais il est tombé à 1 pour cent s'agissant du riz et du blé – c'est-à-dire en deçà du niveau minimal requis, selon une estimation récente, pour garantir la sécurité alimentaire mondiale en 2050<sup>50</sup>.

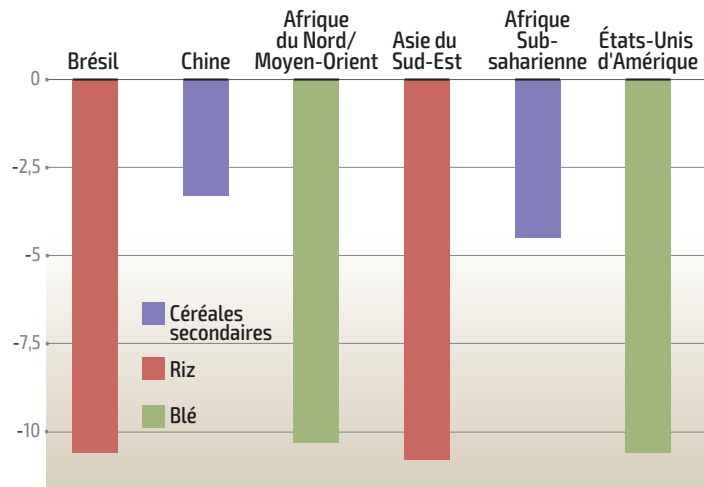
Le ralentissement de la croissance de la productivité céréalière tient au fait qu'il y a moins de mesures d'incitation et de demande en ce qui concerne les technologies visant à améliorer les rendements, compte tenu de la forte baisse des prix réels des marchandises agricoles observée entre le début des années 60 et le début des années 2000<sup>58</sup>. Un autre facteur est l'appui insuffisant accordé à l'agriculture. La Révolution verte a reposé essentiellement sur des activités de recherche-développement (R-D), des systèmes d'approvisionnement en intrants et des services de vulgarisation financés par les gouvernements<sup>15</sup>. Mais le rythme de croissance des dépenses publiques affectées à la R-D agricole dans le monde développé a ralenti – et est même devenu négatif aux États-Unis en 2004 – entraînant une réduction de la diffusion de technologies dans les pays en développement<sup>59, 60</sup>.

À l'échelle mondiale, le financement public affecté annuellement à la R-D agricole a augmenté de 22 pour cent entre 2000 et 2008, pour atteindre 31,7 milliards d'Usd<sup>61</sup>, la Chine et l'Inde comptant pour près de la moitié de l'augmentation; les dépenses consacrées par les pays à faible revenu à la R-D agricole représentaient seulement 2,1 pour cent du total mondial en 2009, soit moins qu'en 1960<sup>26</sup>.

## Les effets du changement climatique

**L**e changement climatique, le défi environnemental le plus sérieux auquel l'humanité ait jamais été confrontée, devrait être lourd de conséquences pour le maïs, le riz et le blé. À l'échelle mondiale, on estime que les tendances à l'augmentation des températures et des précipitations observées depuis 1980 ont fait baisser les rendements du blé de 5,5 pour cent et ceux du maïs de 3,8 pour cent, par rapport à ce qu'ils auraient été si le climat était resté stable<sup>62</sup>. Au cours des prochaines décennies, on devrait assister à la poursuite de la hausse des températures, à l'élévation du niveau des mers, à une recrudescence des ravageurs et des maladies, à la survenue de pénuries d'eau et de phénomènes climatologiques extrêmes et à l'appauvrissement de la biodiversité<sup>63</sup>. Selon une étude récente concernant les effets du changement climatique sur l'agriculture, si les exploitants agricoles ne s'adaptent pas, les rendements mondiaux des cultures en 2050 pourraient être de 6,9 pour cent inférieurs à ce qu'ils auraient probablement été sans changement climatique; s'agissant des céréales, l'écart atteindrait même 10 pour cent, à la fois dans les pays développés et dans les pays en développement |FIGURE 1.2|<sup>64</sup>.

**Figure 1.2 Baisses des rendements céréaliers prévues en 2050 en raison du changement climatique, si aucune mesure d'adaptation n'est prise (en pourcentage)\***



\* Par rapport aux valeurs de référence de 2050 en l'absence de changement climatique; résultat moyen de trois modèles de circulation générale

Source: Adapté de la figure 2, p.4<sup>64</sup>

Le maïs étant essentiellement une culture pluviale, l'accroissement de la variabilité des précipitations entraînera des baisses de production dues à la sécheresse et aux inondations en Afrique subsaharienne et en Asie<sup>65,66</sup>. Les incidences négatives seront tout particulièrement ressenties dans les zones où les sols dégradés ont perdu leur capacité de régulation des stress thermiques et hydriques menaçant les cultures<sup>55</sup>. On peut s'attendre à ce que le changement climatique fasse baisser les rendements du maïs en favorisant les maladies fongiques, que ce soit du point de vue de leur incidence, de leur gravité ou de celui de leur répartition, ce qui constitue un autre risque pour la sécurité alimentaire<sup>67</sup>.

Sous les tropiques, la productivité du riz est vouée à décliner. Les variétés de riz à haut rendement cultivées aujourd'hui sont intolérantes aux principaux stress abiotiques qui seront probablement amplifiés par le changement climatique, notamment les hausses de température, la sécheresse et la salinisation. L'élévation du niveau de la mer et la multiplication des tempêtes feront peser une menace particulière sur les systèmes rizicoles des zones côtières<sup>68</sup>. Dans la mesure où la moitié de l'augmentation de la production de riz de ces vingt-cinq dernières années est attribuée aux deltas fluviaux du Bangladesh, du Myanmar et du Viet Nam, une baisse importante de leurs capacités productives entraînerait une crise majeure de la sécurité alimentaire mondiale<sup>69</sup>.

La multiplication des épisodes de canicule de courte durée pourrait avoir des effets catastrophiques sur les rendements du blé. Il est prévu que les terres à blé d'Asie du Sud et de l'Ouest et d'Afrique du Nord soient les plus touchées par les stress thermiques et les pénuries d'eau ainsi que par une recrudescence des ravageurs et des agents pathogènes disséminés dans le sol. En Asie du Sud, les plaines indo-gangétiques constituent aujourd'hui un mégaenvironnement propice à la culture du blé; en 2050, plus de la moitié de la surface totale pourrait souffrir de stress thermique et de la multiplication des maladies fongiques. Le changement climatique pourrait aussi contribuer à appauvrir le contenu nutritionnel du blé<sup>22,70</sup>.



Les pressions croissantes qui sont exercées pour que l'agriculture elle-même réduise sa contribution significative au changement climatique auront aussi des répercussions sur la production céréalière. Dans le contexte de l'atténuation du changement climatique et de l'adaptation à ses effets, les producteurs de céréales devront limiter l'expansion des terres cultivées, brider leur consommation d'engrais minéraux et réduire les émissions de méthane imputables aux rizières en utilisant moins d'eau<sup>37</sup>.

Pour parvenir à fournir 3,3 milliards de tonnes de céréales par an, cible fixée pour 2050, il n'est pas nécessaire que les rendements du maïs, du riz et du blé progressent à un rythme aussi spectaculaire que pendant la Révolution verte. La question est de savoir le degré de gravité que les incidences de la stagnation des rendements céréaliers, et de cette «série sans précédent de pressions convergentes» – dégradation des ressources naturelles, faibles marges d'expansion des terres cultivées, pénuries d'eau et effets potentiellement catastrophiques du changement climatique – auront sur la production céréalière et la sécurité alimentaire mondiale.

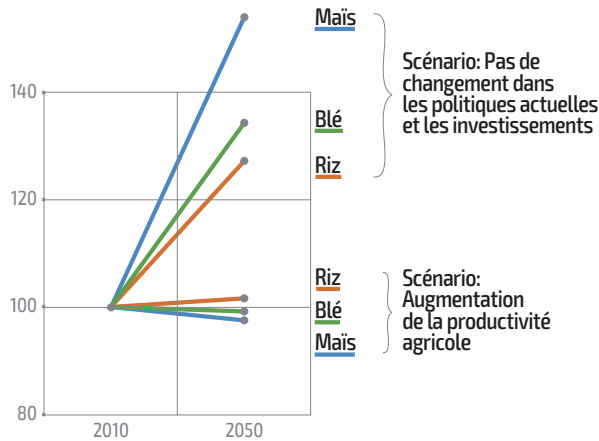
## Incidences les plus graves pour les populations les plus vulnérables

Les scénarios relatifs à l'avenir indiquent que les pressions tendant à faire baisser la production céréalière toucheront les populations les plus vulnérables d'une manière disproportionnée. Ces populations englobent une grande partie des 500 millions de petits agriculteurs et exploitants familiaux du monde en développement qui produisent environ 80 pour cent des produits alimentaires mondiaux<sup>26</sup>, ainsi que la plupart des milliards de personnes à faible revenu qui doivent leur survie quotidienne aux céréales.

Dans le monde développé, le maïs sert surtout à nourrir les animaux et à produire des biocarburants maïs, dans de nombreux pays en développement, il est essentiellement consommé comme aliment. Tant en Afrique subsaharienne qu'en Méso-Amérique, les petits exploitants agricoles cultivent généralement le maïs en tant que culture vivrière destinée à la consommation du ménage et à la vente sur les marchés urbains. Le maïs tient une place particulièrement importante dans les régimes alimentaires des populations pauvres rurales ou urbaines d'Afrique subsaharienne et d'Amérique latine<sup>55</sup>. La demande croissante de maïs et sa productivité déclinante pourraient entraîner, d'ici à 2050, un triplement des importations de ce produit par le monde en développement, pour un coût annuel de 30 milliards d'USD<sup>71</sup>.

Le riz est l'aliment de base de plus de 3,5 milliards d'habitants de la planète, avec une consommation annuelle par personne supérieure à 100 kg dans de nombreux pays d'Asie et certains pays d'Afrique. Dans ces deux régions, le riz est essentiellement une culture de petits agriculteurs, produite sur des exploitations dont la plupart ont une surface comprise entre 0,5 et 3 ha<sup>23</sup>. En Afrique, l'explosion de la demande de riz chez les consommateurs urbains est satisfaite par les importations plutôt que par la production nationale; les importations de riz usiné ont quasiment triplé entre 2000 et 2012 pour atteindre 13,8 millions de tonnes. À elle seule, l'Afrique de l'Ouest absorbe quelque 20 pour cent du riz vendu à l'échelle internationale<sup>72</sup>. La croissance démographique amplifiera la

**Figure 1.3 Évolution des cours mondiaux des céréales,**  
prévue entre 2010 et 2050 dans deux scénarios\*  
Indice (2010 = 100)



\* Prix ajustés pour tenir compte des effets de l'inflation

Source: Adapté de la figure 2, p.92 et de la figure 4, p.94<sup>21</sup>

dépendance de la région, ce qui rendra les consommateurs africains encore plus vulnérables face à d'éventuelles hausses des prix<sup>23</sup>.

Le recul de la productivité du blé et l'augmentation de ses prix frapperont de plein fouet les pays caractérisés par une forte incidence de la pauvreté et une sécurité alimentaire particulièrement tributaire du blé<sup>30</sup>. En Asie du Sud, où 90 pour cent de l'offre en blé sont destinés à la consommation humaine, environ 60 pour cent des habitants vivent avec moins de 2 USD par jour; en Asie centrale, où la consommation annuelle de blé par personne est égale à 160 kg, les taux de pauvreté peuvent atteindre 40 pour cent<sup>2,73</sup>. Les pays africains sont de plus en plus tributaires des importations de blé, qui ont atteint la quantité record de 41 millions de tonnes en 2013/2014<sup>74</sup>. Alors que le changement climatique déplace la production vers les latitudes plus élevées où les conditions sont plus favorables, la mise en péril des moyens d'existence des petits producteurs de blé ne cesse de se préciser<sup>22</sup>.

Les incidences que l'inflation des cours des céréales observée en 2008 a eu sur les populations les plus pauvres du monde ont contribué à aiguïser la perception de la fragilité du système alimentaire mondial<sup>23</sup>. La flambée des prix du blé, par exemple, a déclenché des émeutes urbaines au Moyen-Orient et en Afrique du Nord<sup>30</sup>. La tendance à la baisse actuellement affichée par les prix des céréales ne devrait être que de courte durée, les prix étant destinés à se stabiliser au-dessus des niveaux relativement bas enregistrés avant 2008<sup>47</sup>.

Selon une étude réalisée par l'Institut international de recherche sur les politiques alimentaires (Ifpri), si l'on s'en tient au statu quo, c'est-à-dire un scénario dans lequel aucune modification n'est apportée aux politiques et investissements agricoles actuels, le prix réel des céréales pourrait augmenter considérablement entre 2010 et 2050, freinant la baisse du nombre de personnes exposées au risque de souffrir de la faim dans de nombreuses régions.

Mais l'étude présente un autre scénario, plus optimiste: avec des investissements suffisants dans *l'accroissement durable des rendements sur les terres agricoles existantes*, la hausse de productivité ainsi obtenue permettrait de faire en

sorte que les prix des céréales (corrigés pour tenir compte des effets de l'inflation) en 2050 demeurent très proches de ceux de 2010 [FIGURE 1.3]. Une baisse des prix du maïs entraînerait une diminution des coûts du lait et de la viande, et une baisse du coût du riz contribuerait à alléger la charge des pays importateurs nets de denrées alimentaires. Globalement, les gains de productivité permettraient d'améliorer la sécurité alimentaire dans toutes les régions, réduisant d'environ 40 pour cent la population exposée au risque de souffrir de la faim dans le monde entier<sup>21</sup>.

## Produire plus avec moins

L'amélioration durable des rendements sur les terres agricoles existantes constitue le principe même du modèle d'intensification de la production végétale Produire plus avec moins, prôné par la FAO. Ce modèle doit permettre de relever les défis interdépendants d'aujourd'hui: stimuler la productivité des cultures et assurer la sécurité alimentaire et nutritionnelle pour tous, tout en réduisant la pression exercée par l'agriculture sur les ressources naturelles, ses incidences négatives sur l'environnement et sa contribution majeure au changement climatique<sup>15</sup>. Un faisceau d'éléments concrets a montré que les pratiques agricoles qui favorisent la conservation des ressources naturelles contribuent aussi à accroître la productivité des cultures et à améliorer le flux de services écosystémiques<sup>75-77</sup>.

Dans l'approche Produire plus avec moins, on reconnaît que la sécurité alimentaire dépendra autant du maintien de la durabilité que de l'augmentation de la productivité des cultures<sup>78</sup>. L'approche vise la réalisation des deux objectifs, en promouvant des pratiques et des technologies agricoles qui permettent de protéger l'environnement, d'utiliser les ressources naturelles d'une manière plus efficace, de freiner le changement climatique, de contribuer aux moyens d'existences ruraux et d'avoir un effet bénéfique sur la santé humaine<sup>31, 79</sup>.

Une production végétale respectueuse des écosystèmes est, par essence, «intelligente face au changement climatique». Elle aide les petits exploitants agricoles à s'adapter au changement climatique car elle rend leurs systèmes de production plus résilients face aux stress environnementaux, tels que la sécheresse, la hausse des températures et la recrudescence des ravageurs et des maladies<sup>37</sup>. Forte de la conservation et de l'utilisation d'une grande variété de règnes, d'espèces et de patrimoines génétiques dans les écosystèmes agricoles, ce type de production améliore à la fois la productivité et la résilience<sup>27</sup>.


En outre, le modèle Produire plus avec moins ouvre des perspectives prometteuses s'agissant d'atténuer le changement climatique: en tirant parti des processus biologiques naturels, le modèle contribue à freiner l'emploi des engrais minéraux et réduit les émissions d'oxyde nitreux à la source; du fait d'une utilisation plus efficace de l'eau, il peut favoriser la diminution des émissions de méthane imputables aux rizières irriguées<sup>37</sup>. Les pratiques de gestion qui permettent de rétablir la santé des sols pourraient entraîner la fixation dans le sol d'environ 1,8 tonne de carbone par ha chaque année<sup>80</sup>. La fixation du carbone est susceptible de compenser les émissions dues aux combustibles fossiles, à raison de 1,3 milliard de tonnes de carbone par an, soit l'équivalent de 15 pour cent de l'ensemble des émissions des combustibles fossiles<sup>81</sup>.

Il faut être beaucoup plus attentif, non seulement à la quantité, mais aussi à la *qualité* des aliments produits et consommés. L'approche Produire plus avec moins

promeut la diversification de la production des petits exploitants agricoles, afin d'y inclure des aliments à hautes concentrations et biodisponibilité d'éléments nutritifs – viande, produits laitiers, volaille et poisson – qui corrigent de multiples carences nutritionnelles, sans oublier les légumes secs, les fruits et les légumes feuilles. La diversification améliore la disponibilité d'une gamme plus variée d'aliments riches en éléments nutritifs, contribuant directement à la sécurité alimentaire et nutritionnelle des ménages<sup>31</sup>.

Enfin, un développement socioéconomique équitable et généralisé dans les zones rurales passe obligatoirement par l'amélioration de la productivité de la petite agriculture. Cette amélioration contribue à accroître les revenus des producteurs et à stimuler l'emploi, à diversifier les sources de revenus des ménages, à faciliter l'accès à l'alimentation et à favoriser le développement des entreprises rurales. Si l'on en croit les données empiriques relatives à de nombreux pays à faible revenu et pauvres en ressources, la croissance agricole peut être cinq fois plus efficace pour faire reculer la faim et la pauvreté que la croissance dans les autres secteurs<sup>82</sup>.

**Il est temps de renouer le lien** entre l'humanité et les céréales. L'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture considère que le modèle Produire plus avec moins constitue la voie à suivre – et, au demeurant, la seule option viable – pour accroître durablement la production de maïs, de riz et de blé. Dans le *chapitre 2* du présent ouvrage, on trouvera une description des composantes, des pratiques et des technologies du système agricole Produire plus avec moins, et un examen des progrès concernant leur adoption par les petits producteurs céréaliers des pays en développement. Le *chapitre 3* présente des exemples de mise en pratique de systèmes intégrés Produire plus avec moins, choisis partout dans le monde en développement. Enfin, le *chapitre 4* traite des cadres politiques et institutionnels et des innovations en matière de technologie, éducation et renforcement des capacités, qu'il faudra mettre en place pour transposer à plus grande échelle les enseignements tirés des programmes nationaux et régionaux.



Chapitre 2

## Rendre la production céréalière durable

*Il faut reconfigurer les systèmes de production agricole partout dans le monde pour favoriser une intensification durable. Les producteurs de céréales ont déjà entamé la transition en adoptant les composantes et les pratiques essentielles du modèle Produire plus avec moins.*



**I**l faut reconfigurer les systèmes de production agricole partout dans le monde pour favoriser une intensification durable. Les producteurs de céréales ont déjà entamé la transition en adoptant les composantes et les pratiques essentielles du modèle Produire plus avec moins

Les systèmes agricoles Produire plus avec moins permettent de stimuler la productivité des cultures et de diversifier la production alimentaire, tout en régénérant et en améliorant simultanément le capital naturel et les services écosystémiques. À cet effet, ces systèmes accroissent l'efficacité de l'utilisation des intrants agricoles – notamment l'eau, les éléments nutritifs, l'énergie et la main d'œuvre – et renforcent la résilience face aux stress abiotiques, biotiques et économiques et au changement climatique.

L'intensification durable, selon le modèle Produire plus avec moins, apporte aux petits exploitants agricoles et à la société dans son ensemble une série d'avantages productifs, socioéconomiques et environnementaux, tels que: production et rentabilité élevées et stables; hausse des revenus agricoles et amélioration des moyens d'existence ruraux; disponibilité et consommation accrues d'une gamme diversifiée d'aliments assurant un régime alimentaire sain; renforcement de la capacité d'adaptation et réduction de la vulnérabilité face au changement climatique et aux autres chocs; amélioration du fonctionnement et des services des écosystèmes; enfin, réduction des émissions de gaz à effet de serre d'origine agricole et de l'empreinte carbone<sup>1</sup>.

En outre, le modèle favorisera le passage général à une alimentation et une agriculture fondées sur les principes du développement durable – une agriculture qui garantit la sécurité alimentaire mondiale, ouvre des perspectives économiques et sociales et protège et améliore les services écosystémiques dont elle dépend<sup>2</sup>.

Les systèmes agricoles Produire plus avec moins sont fondés sur cinq composantes complémentaires et les pratiques correspondantes<sup>1</sup>:

- ▶ **Agriculture de conservation**, c'est-à-dire perturbation minimale des sols, paillis de surface, rotation des cultures et production intégrée associant cultures, arbres et animaux;
- ▶ **Santé des sols**, c'est-à-dire, gestion intégrée de la nutrition des sols, contribuant à améliorer la croissance des cultures, à renforcer la tolérance aux stress et à accroître l'efficacité des intrants employés;
- ▶ **Cultures et variétés améliorées** adaptées aux systèmes de production agricole à petite échelle et caractérisées par un fort potentiel productif, une résistance aux stress biotiques et abiotiques et une meilleure qualité nutritionnelle;
- ▶ **Gestion efficace de l'eau**, permettant d'améliorer la productivité de chaque goutte, d'accroître l'efficacité de la main d'œuvre et de l'utilisation d'énergie et de réduire la pollution d'origine agricole de l'eau;
- ▶ **Protection intégrée**, fondée sur les bonnes pratiques agricoles, les variétés résistantes, les ennemis naturels et, s'il y a lieu, l'emploi judicieux de pesticides présentant relativement peu de risques.

Dans la perspective de la publication du présent ouvrage, la FAO a conduit un examen approfondi des progrès accomplis par les petits producteurs de maïs, de riz et de blé du monde en développement, s'agissant d'adopter des pratiques durables contribuant à la conservation des ressources. L'examen a confirmé des constatations récentes, à savoir que ces deux dernières décennies, dans le contexte du passage à une intensification durable, certaines des avancées les

plus importantes ont été réalisées par des petits exploitants agricoles de pays en développement<sup>3</sup>.

Dans ce chapitre, on trouvera une description de chacune des composantes du système de production agricole Produire plus avec moins et des pratiques correspondantes, ainsi que des exemples illustrant leur application fructueuse par des petits producteurs céréaliers. Cependant, il convient de considérer les composantes et les pratiques prises individuellement comme de simples *éléments* concourant à la production durable des trois cultures. Chacune des composantes décrites ci-dessous contribue à la durabilité mais, pour obtenir les avantages maximaux, il faut impérativement qu'elles soient toutes pleinement intégrées dans des systèmes de production agricole Produire plus avec moins (voir le chapitre 3).

## Agriculture de conservation

**L**e modèle Produire plus avec moins intègre les trois pratiques fondamentales de l'agriculture de conservation, une approche mise en œuvre sur quelque 155 millions d'ha de terres agricoles, partout dans le monde<sup>4</sup>.

Premièrement, les agriculteurs évitent ou limitent les perturbations mécaniques du sol. Le travail excessif du sol, au moyen de charrues, de hermes et de houes, contribue à enfouir la couverture protectrice de surface, à tuer la faune et la flore du sol, à favoriser une décomposition rapide de la matière organique, à altérer la fertilité du sol et à en dégrader la structure. Deuxièmement, des cultures de couverture ou du paillis sont maintenues en permanence sur la surface du sol pour limiter l'érosion, faciliter l'infiltration de l'eau, conserver l'humidité du sol, éliminer les adventices et favoriser la prolifération de la faune et de la flore du sol, qui sont indispensables à sa santé et améliorent la performance des cultures. Troisièmement, les agriculteurs assurent un apport régulier d'éléments nutritifs aux cultures, limitent les attaques de ravageurs et de maladies et renforcent la stabilité globale du système en cultivant une gamme plus large d'espèces et de variétés végétales, dans le cadre d'associations et de rotations culturales, et – s'il y a lieu – en intégrant la foresterie, l'élevage et l'aquaculture dans leurs systèmes de production<sup>1</sup>.

En améliorant la santé du sol, en allégeant la pression exercée par les ravageurs et les agents pathogènes, en freinant l'érosion, en améliorant la disponibilité de l'eau et des éléments nutritifs et en favorisant la fixation du carbone dans le sol, l'agriculture de conservation renforce la résilience des cultures face au réchauffement climatique, à la sécheresse et aux inondations, appuie les services écosystémiques et contribue à atténuer le changement climatique. En outre, ce type d'agriculture abaisse les coûts de production en faisant économiser sur les machines, la main-d'œuvre, les carburants fossiles, l'irrigation, les engrais minéraux et les pesticides. Cependant, l'agriculture de conservation n'est pas une approche uniforme – les méthodes employées pour mettre en pratique ses principes essentiels varient en fonction des cultures et des conditions locales<sup>5-9</sup>.

Ces deux dernières décennies, le labour a été considérablement réduit voire, dans certains cas, entièrement éliminé, sur de vastes surfaces affectées à la culture du blé et du maïs. Dans les plaines indo-gangétiques, les producteurs de blé pratiquant le labour zéro ou le travail minimal du sol en ont récolté les fruits: hausse des rendements et meilleure conservation du sol et de l'eau. Le labour zéro est considéré comme la technique la plus performante dans les plaines, s'agissant de favoriser la conservation des ressources<sup>10, 11</sup> (voir le chapitre 3, page 58). Son



application a fait progresser les rendements moyens de 7 pour cent et, de plus, a permis aux producteurs d'économiser jusqu'à 30 jours de travail et 52 USD de coût du travail du sol par hectare et d'améliorer leur revenu net moyen de 97 USD par ha (FIGURE 2.1)<sup>12</sup>.

Au Maroc, où l'agriculture intensive avec labour profond et retournement complet du sol a entraîné une dégradation des sols et une baisse de fertilité rapides, on constate maintenant que des systèmes d'agriculture de conservation sont appliqués à la culture du blé dans diverses conditions de production, et qu'ils se traduisent par une amélioration des rendements et de la productivité des facteurs (intrants). D'autres cultures d'hiver, des rotations culturales associant légumes secs et oléagineux et des cultures irriguées de plein champ bénéficient aussi de la technique du labour zéro<sup>13</sup>.

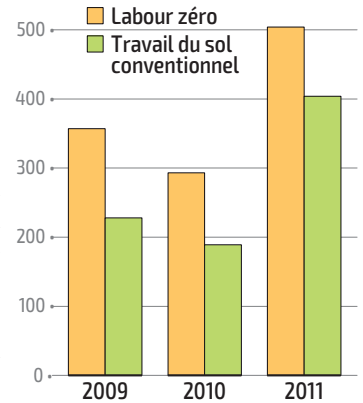
En ce qui concerne la culture du maïs, le succès du labour zéro, ou de la réduction du travail du sol, est illustré par l'adoption généralisée en Amérique latine des systèmes de culture fondés sur le semis direct et le maintien de paillis. Ces dernières décennies, les zones exploitées en permanence selon ce système se sont étendues pour atteindre plus de la moitié de la surface cultivée totale au Brésil, au Paraguay et en Argentine<sup>4,14</sup>. En Afrique subsaharienne, les systèmes de culture du maïs appliquant les principes de l'agriculture de conservation favorisent une meilleure conservation de l'humidité du sol pendant les périodes sèches saisonnières et sont plus productifs que les systèmes fondés sur le travail conventionnel du sol à l'aide de charrues, de herses et de houes<sup>15</sup>.

En Asie tropicale, la majeure partie du riz continuera à être produite pendant la saison des pluies, quand le sol est trop saturé d'eau pour convenir à d'autres cultures de base. Cependant, la pratique traditionnelle asiatique consistant à repiquer le riz dans un sol mis en boue est gourmande en main-d'œuvre, en eau et en énergie. De plus, dans les systèmes riz-blé, cette pratique retarde la plantation du blé et dégrade la structure du sol. Étant donné que la main-d'œuvre et l'eau sont de moins en moins disponibles, beaucoup de producteurs pratiquant la riziculture irriguée se tournent vers le semis du riz sur sol sec associé au labour zéro, ce qui conduit à éliminer la mise en boue du sol. De nombreuses études ont permis de démontrer que, par rapport à la culture en rizière mise en boue, la culture avec semis à sec demande 33 pour cent d'eau d'irrigation en moins et réduit les coûts de production d'un montant pouvant aller jusqu'à 125 USD par ha<sup>16</sup>.

L'adoption du semis à sec du riz reste très variable en Asie mais, dans une zone du nord-est de l'Inde, on a constaté que les taux d'adoption dépassaient les 50 pour cent d'agriculteurs<sup>17</sup>. Les efforts visant à promouvoir l'agriculture de conservation dans le secteur de la riziculture en Inde s'appuient sur de nouvelles technologies qui ont été mises au point dans la région et ont trait au nivellement des terres, à la lutte contre les adventices et au semis en ligne, lequel permet de positionner les engrais et les semences à une profondeur optimale<sup>16</sup>.

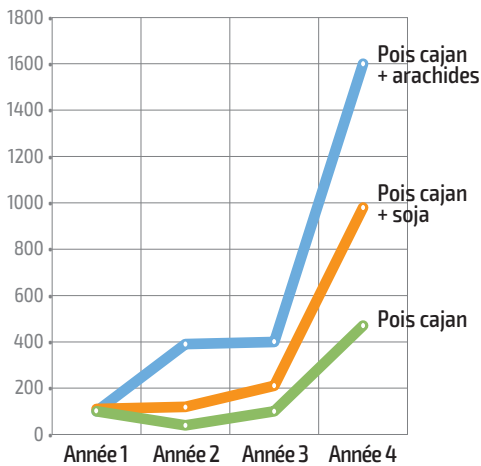
**Dans le modèle Produire plus avec moins**, les céréales sont considérées non pas comme des monocultures mais comme des composantes de rotations culturales et de systèmes de production agricole mixtes. Dans les environnements hostiles, les petits agriculteurs ont traditionnellement l'habitude de faire se succéder en rotation des cultures et des essences d'arbres fourragers et d'associer la production animale et la production végétale, afin de réduire les risques liés à de mauvaises récoltes. À plus grande échelle, la diversification rend les systèmes

**Figure 2.1 Bénéfices nets de la culture du blé, avec application de la technique du labour zéro et avec travail du sol conventionnel, Haryana (Inde) (USD/ha)**



Source: Adapté du tableau 5, p.13<sup>12</sup>

**Figure 2.2 Évolution du nombre d'agriculteurs ayant adopté le système légumineuses-maïs, à la suite d'essais, Ekwendeni (Malawi)**



Source: Adapté de la figure 2, p.446<sup>24</sup>

agricoles plus résilients, en limitant les pertes dues aux stress biotiques ou abiotiques particuliers qui touchent les monocultures uniformes sur le plan génétique<sup>18</sup>.

La production diversifiée a d'autres avantages: elle accroît la disponibilité de résidus végétaux susceptibles de devenir du paillis de surface et permet de recycler sur l'exploitation les éléments nutritifs et la matière organique dans le fumier animal. De plus, si toutefois il existe des marchés pour écouler les autres produits, les producteurs céréaliers peuvent diversifier leurs sources de revenus.

Le blé est cultivé en rotation avec d'autres cultures dans toutes les régions productrices. En Inde, un système irrigué de rotation blé-coton est pratiqué sur une surface estimée à 1,4 million d'ha et, au Pakistan, 2,6 millions d'ha<sup>19</sup>. Des systèmes analogues sont courants en Égypte, au Tadjikistan, en Turquie et en Ouzbékistan. Traditionnellement, en Asie du Sud, la récolte tardive du coton repousse la plantation du blé à décembre, ce qui expose ensuite cette culture à un éventuel stress thermique lors de la maturation des grains, à la fin avril et en mai. Pour surmonter ce blocage, on sème le blé comme

une culture relais dans les champs de cotonniers sur pied, sans travail préalable du sol, ce qui avance le semis de 44 jours et fait grimper les rendements, parfois de 40 pour cent<sup>20, 21</sup>.

Dans la Plaine de Chine du Nord, un système de rotation blé-maïs fournit plus de 50 pour cent du blé produit par le pays et quelque 33 pour cent du maïs<sup>22</sup>. En Inde, les systèmes blé-maïs les plus productifs et rentables reposent sur l'aménagement de plates-bandes surélevées permanentes qui sont semencées en ligne à travers les résidus de cultures<sup>23</sup>. La pratique de la rotation du blé avec des légumineuses à grains – notamment pois-chiche, lentille et fève – tend à se répandre dans les zones de culture pluviale du blé, en particulier celles qui sont caractérisées par des sols à faible teneur en azote, typiques de l'Asie occidentale et de l'Afrique du Nord. L'introduction des légumineuses permet de diversifier la production, d'enrichir le sol grâce à la fixation biologique de l'azote, d'améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau et d'interrompre le cycle de développement des adventices, des ravageurs et des agents pathogènes.

Ces dernières années, de nombreux petits exploitants agricoles d'Afrique australe ont rétabli la pratique traditionnelle consistant à associer la plantation de légumineuses telles qu'arachide, soja et pois cajan, à celle du maïs |FIGURE 2.2|<sup>24 - 26</sup>. Souvent, les légumineuses sont appréciées comme sources d'aliments et de revenus plus que pour leur contribution à la fertilité des sols – les légumineuses annuelles dont le seul intérêt est de servir d'engrais vert n'ont guère de partisans.

La rotation du maïs avec d'autres cultures – et son intégration dans des systèmes d'agroforesterie et de production animale – est une technique bien établie et particulièrement prometteuse pour ce qui est d'améliorer l'efficacité de l'utilisation des ressources<sup>27</sup>. En Afrique, dans les zones de savane, les agriculteurs cultivent souvent le maïs sous les frondaisons d'un acacia, *Faidherbia albida*, qui laissent tomber sur le sol des feuilles riches en azote employées comme paillis de surface, engrais naturel et aliment pour animaux (voir le chapitre 3, page 71). Le développement d'une agriculture de conservation intégrant les arbres a contribué à favoriser la diffusion de ce type d'agriculture dans les systèmes mixtes culture-élevage d'Afrique subsaharienne<sup>28</sup>.

Au Brésil, l'introduction de la culture sans labour du maïs en rotation avec le soja a servi de moteur à l'adoption généralisée de l'agriculture de conservation. Dans la zone de savane tropicale du pays, le maïs est cultivé entre des rangées d'arbres, pendant les deux ou trois premières années qui suivent leur plantation. La surface est ensuite utilisée pour des cultures intercalaires de plantes fourragères et de maïs. Une fois le pâturage établi, les animaux y broutent jusqu'à ce que les arbres soient prêts à être récoltés<sup>29,30</sup> (voir le chapitre 3, page 55). Cette diversification permet d'atténuer les incidences de la variabilité climatique et de l'instabilité des marchés sur les revenus agricoles. Elle permet aussi de freiner le défrichement des forêts à des fins agricoles, de protéger la biodiversité, de maîtriser l'érosion des sols et d'améliorer la structure et la fertilité des sols<sup>31-32</sup>.

Les systèmes fondés sur la riziculture tendent à se diversifier. Ces deux dernières décennies, le système de rotation riz-maïs s'est rapidement diffusé au Bangladesh<sup>33</sup>. La culture de pommes de terre selon le principe du labour zéro se développe dans les basses plaines rizicoles du Viet Nam, où les rizières sont drainées au moyen du creusement de rigoles et les tubercules de pommes de terre sont placés sur les buttes ainsi créées. De l'engrais est ajouté dans le sol autour des tubercules, puis les buttes sont recouvertes avec la paille de riz abandonnée après la récolte<sup>34</sup>. Les agriculteurs des vallées intérieures d'Afrique de l'Ouest diversifient également leurs systèmes rizicoles en y associant la production de légumes<sup>35</sup>.

En Asie, la riziculture est associée à la production de poisson et à l'élevage. La conduite d'une activité d'aquaculture dans les fossés creusés autour des rizières améliore la productivité du riz en fournissant des nutriments supplémentaires aux plantes et constitue pour les agriculteurs une source d'aliments nutritifs qui profite au ménage<sup>36</sup>. Au Bangladesh, les exploitants agricoles cultivent du maïs et de l'herbe à éléphant pendant la période séparant les deux principales campagnes rizicoles, car c'est un excellent moyen de produire des aliments, des revenus monétaires et du fourrage, notamment dans les zones où la terre est rare. Dans l'un des districts étudiés, le système riz-fourrage a permis aux agriculteurs de générer un bénéfice économique net moyen de 2 630 USD par ha, contre 1 815 USD quand ils produisent seulement du riz<sup>37</sup>.

## Santé du sol

Par «santé du sol», on entend l'aptitude du sol à fonctionner comme un système vivant qui concourt à la productivité des végétaux et des animaux, maintient ou améliore la qualité de l'eau et de l'air et promeut la santé des végétaux et des animaux<sup>38</sup>. Dans le modèle Produire plus avec moins, la santé du sol est un facteur essentiel de l'utilisation efficiente des intrants productifs naturels et externes par les plantes. La santé du sol renforce la résilience des cultures face aux stress abiotiques et biotiques qui seront amplifiés par le changement climatique.

Un sol agricole est jugé sain quand sa flore et sa faune sont gérés de telle sorte que le sol facilite un bon développement racinaire et une croissance satisfaisante des plantes et offre la plupart des services écosystémiques qu'il fournirait à l'état naturel. Les façons culturales intensives excessives détruisent la structure du sol en brisant les agrégats, en réduisant la teneur en matière organique et la porosité et en bouleversant les fonctions du sol qui y sont associées, à savoir, l'infiltration, la rétention et la libération de l'eau et des éléments nutritifs<sup>6</sup>.

Un certain nombre de bonnes pratiques agricoles favorisent la santé du sol, améliorent sa fertilité et concourent à la fois à la productivité des cultures et à

leur durabilité. Il s'agit notamment de l'emploi judicieux d'engrais minéraux et organiques et de certaines pratiques de l'agriculture de conservation, notamment le labour zéro et le recours au paillis de résidus de culture et aux cultures de couverture associant différentes espèces.

Il est urgent de mettre en œuvre toutes ces pratiques dans de nombreuses grandes régions productrices de riz, de blé et de maïs, afin de corriger les pénuries de macronutriments et de micronutriments et d'accroître les quantités de

carbone organique présent dans le sol<sup>39, 40</sup>. La reconstitution des stocks de carbone est un processus coûteux, en termes de temps et d'intrants – notamment les amendements organiques – requis. Il est donc capital que les seuils viables de carbone organique des sols soient préservés dans le cadre des recommandations du modèle Produire plus avec moins relatives à la santé du sol.

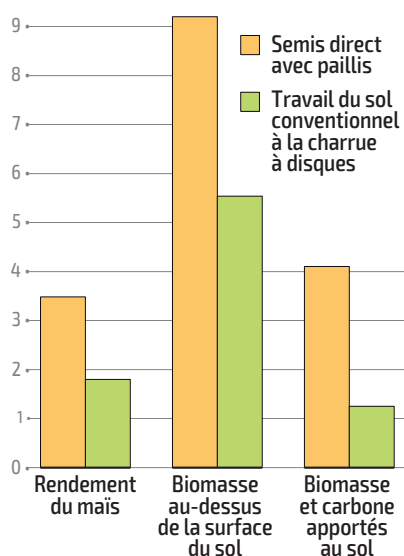
Au Maroc, il est ressorti d'études conduites dans les zones de culture du blé que le labour zéro et le maintien de résidus de culture sur la surface permettaient de conserver dans le sol davantage de carbone organique et d'agrégats stables face à l'action destructive de l'eau, que ce que l'on observe dans les terres labourées<sup>13, 41, 42</sup>. Dans les systèmes intensifs riz-blé et maïs-blé des plaines indo-gangétiques, des études ont montré que l'agriculture de conservation se traduisait par une amélioration significative des propriétés physiques et chimiques du sol<sup>43</sup>.

Dans les systèmes productifs fondés sur le maïs de l'ouest du Mexique, le semis direct du maïs – les résidus de culture servant de paillis de surface – a eu des effets bénéfiques sur la santé du sol, notamment en réduisant les pertes par ruissellement et l'érosion des sols. Sur une période de cinq ans, la quantité de carbone dans le sol a augmenté de près de 30 pour cent et les rendements du maïs ont quasiment doublé [FIGURE 2.3]<sup>44</sup>.

On sait de longue date que les légumineuses cultivées avant les céréales ou en même temps qu'elles contribuent à améliorer la santé du sol et la productivité. Du fait de la fixation biologique de l'azote, les légumineuses apportent au sol jusqu'à 300 kg d'azote par ha et par an, ce qui explique pourquoi le rendement d'un blé cultivé après des légumineuses est plus élevé (voir le chapitre 3, page 52). Au Mexique, les légumineuses cultivées en rotation avec le maïs fournissent de la matière organique et de l'azote qui contribuent à faire grimper les rendements du maïs de 25 pour cent (voir le chapitre 3, page 64).

À Lombok, en Indonésie, des *Sesbania grandiflora*, légumineuses arborescentes dont la valeur nutritive est particulièrement élevée, sont plantées sur les diguettes des rizières. Les feuilles qui tombent, riches en azote, contribuent à améliorer la teneur du sol en éléments nutritifs et la productivité de la culture. La pratique tend à se généraliser dans d'autres parties d'Asie<sup>45</sup>. En Ouganda, où le manque d'azote dans le sol constitue le principal facteur limitant dans les systèmes de production agricole, la culture de pois mascate avant la campagne rizicole a permis de doper les rendements du riz qui sont passés de 1,5 tonne à 2,3 tonnes par ha, soit une augmentation égale à celle qui est obtenue avec l'engrais minéral<sup>46</sup>.

**Figure 2.3 Effets du travail du sol et de la gestion des résidus sur les rendements du maïs, la biomasse et les stocks de carbone du sol, La Tinaja (Mexique) (t/ha)**



Source: Adapté des tableaux 4-6, p.429<sup>44</sup>

**Tant les engrais organiques que les engrais minéraux** contribuent d'une manière importante au maintien de la santé et de la productivité des sols. En Inde, huit ans de travaux de recherche sur un système riz-blé ont permis de montrer que l'emploi combiné de fumier de ferme (un mélange de déjections animales et de résidus de cultures) et d'engrais vert, à raison de 5 à 6 tonnes par ha, associé à l'épandage de 90 kg d'azote sous la forme d'engrais minéral, permettait de conserver la productivité du blé tout en réduisant de moitié les apports d'engrais minéraux<sup>47</sup>.

Dans la mesure où les engrais minéraux sont souvent trop coûteux pour les petits exploitants agricoles d'Afrique subsaharienne, un bon nombre d'entre eux se sont tournés vers la «gestion intégrée de la fertilité des sols» qui consiste à compléter les éléments nutritifs de synthèse par des intrants organiques obtenus au moyen des techniques suivantes: recyclage amélioré des déchets et compostage des résidus de cultures; emploi du fumier animal et intégration de légumineuses à grains, d'arbres et d'arbustes dans le cadre de la plantation de cultures intercalaires, de rotations culturales et de l'agroforesterie<sup>48,49</sup>.

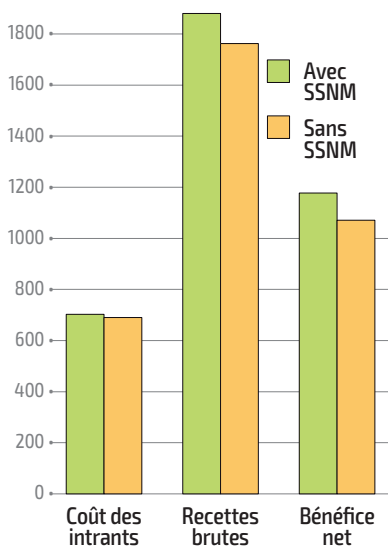
Dans les systèmes agricoles qui associent production végétale et élevage, les animaux sont souvent nourris à partir des ressources locales, notamment les pâturages, les résidus de cultures et les arbres et arbustes fourragers. Les excréments et l'urine des animaux recyclent les éléments nutritifs et la matière organique, ce qui contribue au maintien de la fertilité et de la structure du sol. Les systèmes agricoles intégrés permettent d'améliorer la productivité de l'exploitation et font faire des économies aux agriculteurs en intensifiant les cycles des éléments nutritifs et de l'énergie.

Cependant, les engrais organiques ne sont pas toujours disponibles en quantité voulue et la très grande variabilité de leurs teneurs en éléments nutritifs fait qu'il est difficile pour les agriculteurs de calculer les quantités à épandre. Au Zimbabwe où, sur de vastes surfaces, les sols présentent une pénurie inhérente d'azote et de phosphore, il est ressorti d'une étude relative à 450 exploitations productrices de maïs que les augmentations de rendement permises par l'agriculture de conservation ne pouvaient être pleinement obtenues qu'avec un recours complémentaire aux engrais minéraux<sup>50</sup>. Il faut très rapidement assurer une gestion plus judicieuse de ces derniers – notamment avec l'emploi des dosages corrects et l'épandage aux moments qui conviennent – et améliorer les pratiques agronomiques, si l'on veut accroître l'efficacité de l'utilisation des engrais, c'est-à-dire la quantité de céréales produites par unité d'engrais épandu.

Au Malawi, les producteurs de maïs qui peuvent bénéficier des conseils des services de vulgarisation sur la lutte contre les adventices, la rotation culturale, la plantation de cultures intercalaires et le calendrier des épandages d'engrais, parviennent souvent à obtenir, avec la même quantité d'engrais, des rendements plus de deux fois supérieurs à la moyenne nationale<sup>51</sup>.

Dans le contexte de la riziculture, l'efficacité de l'emploi des engrais a aussi fait de nets progrès avec l'apparition de la gestion des éléments nutritifs en fonction du site (approche «site-specific nutrient management» [SSNM]), une stratégie qui optimise l'utilisation des éléments nutritifs du sol existants et corrige les déficits au moyen d'engrais minéraux<sup>52</sup>. Dans les essais de terrain, les rendements du riz par hectare ont augmenté de 0,2 tonne au Viet Nam, 0,3 tonne aux Philippines et 0,8 tonne en Inde. Aux Philippines, le bénéfice net par hectare des producteurs de riz ayant adopté l'approche SSNM était supérieur de 10 pour cent à celui des producteurs qui ne l'avaient pas adoptée |FIGURE 2.4|<sup>53</sup>.

**Figure 2.4 Données économiques relatives à la gestion des éléments nutritifs en fonction du site (SSNM), appliquée à la riziculture irriguée, Luçon centrale (Philippines) (USD/ha/an)**



Source: Adapté du tableau 9, p.19 et du tableau 10, p.21<sup>53</sup>

Dans le sud de l'Inde, l'approche SSNM a permis aux producteurs de blé de réduire leur consommation d'engrais tout en obtenant des rendements supérieurs de 23 pour cent aux rendements obtenus avec les quantités d'engrais recommandées<sup>54</sup>. La gestion des éléments nutritifs en fonction du site s'est également avérée intéressante dans le contexte de la culture du maïs. En Indonésie, aux Philippines et au Vietnam, les agriculteurs ont enregistré des hausses de rendement allant de 0,9 à 1,3 tonne par ha<sup>53</sup>.

Les micronutriments, tels que le calcium, le magnésium, le soufre, le fer et le zinc, jouent un rôle important dans l'amélioration de la santé du sol, de la productivité des cultures et de la valeur nutritionnelle des céréales. Il est démontré que l'emploi d'engrais contenant des micronutriments améliore considérablement la qualité nutritionnelle des cultures, de même que leur rendement, la production de biomasse et la résilience face aux ravageurs, aux maladies et à la sécheresse<sup>55</sup>.

Des innovations technologiques récentes facilitent la gestion améliorée des éléments nutritifs dans les systèmes de production de maïs, de riz et de blé. Dans le cadre de l'approche SSNM, l'Institut international de recherche sur le riz (IRRI) et ses partenaires ont contribué à l'introduction au Bangladesh d'un «tableau de couleurs des feuilles», qui permet aux producteurs de riz de déterminer le moment où il convient d'ajouter de l'urée pour en obtenir un effet optimal. Au lieu d'épandre à la volée, à plusieurs reprises, et en grandes quantités, l'engrais azoté pendant la saison de croissance, les agriculteurs comparent la couleur des feuilles du riz aux différentes couleurs correspondant à des carences en azote bien précises. Grâce aux tableaux, il a été possible de réduire la consommation d'urée de quelque 20 pour cent, tout en obtenant

des hausses de rendement allant jusqu'à 31 pour cent. Les bénéfices totaux sont estimés à 22,8 millions d'USD<sup>52,56</sup>.

L'efficacité a encore été améliorée au Bangladesh, avec le recours à l'«enfouissement profond» plus précis de briquettes d'urée, à une profondeur de 7 à 10 cm. En 2012, plus de 400 000 producteurs de riz suivaient cette pratique, qui a permis de faire augmenter de 250 kg par ha le rendement moyen, de réduire de 7 000 tonnes la consommation d'engrais, et de faire économiser au gouvernement 1,6 million d'USD de subventions à l'achat d'engrais<sup>57</sup>.

L'efficacité de l'emploi d'engrais a été notablement améliorée par l'utilisation de capteurs optiques portables associée à l'application d'un algorithme correspondant à la culture, qui permet de mesurer en temps réel la vigueur d'une culture de blé et d'adapter les apports d'azote aux besoins. Au Mexique, du fait de la gestion de l'azote au moyen de capteurs, il a été possible de limiter la consommation d'engrais au moment de la plantation et lors des premiers stades de la croissance, et de mieux maîtriser les épandages aux stades de développement ultérieurs<sup>58</sup>. Dans les plaines indo-gangétiques, le même système a été mis en œuvre dans le cadre de l'agriculture de conservation, afin de réaliser des économies sur les épandages d'engrais, tout en obtenant des rendements plus élevés et en limitant les incidences sur l'environnement<sup>59</sup>.

## Cultures et variétés améliorées

L'emploi de variétés améliorées constitue un autre moyen important de faire progresser la productivité du maïs, du riz et du blé. Les systèmes agricoles Produire plus avec moins doivent s'appuyer sur des variétés plus productives, qui utilisent les éléments nutritifs et l'eau d'une manière plus efficiente, présentent une meilleure résistance aux ravageurs et aux maladies et soient plus tolérantes à la sécheresse, aux inondations et à la hausse des températures. Il faut des variétés adaptées aux zones et aux systèmes de production peu favorisés, qui produisent des aliments plus intéressants sur le plan nutritionnel et contribuent à améliorer l'offre de services écosystémiques.

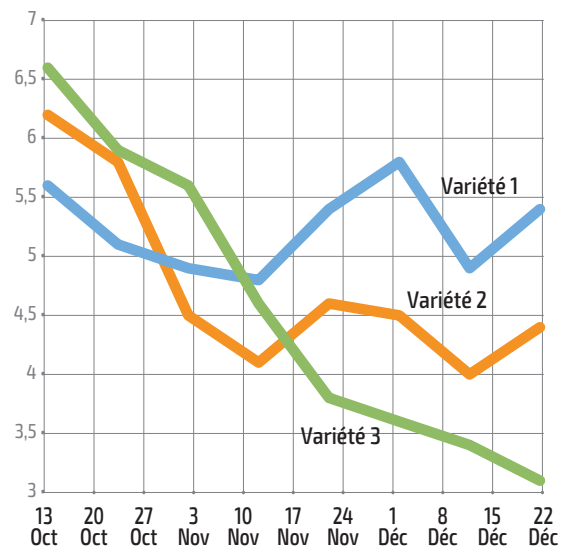
Ces nouvelles cultures et variétés seront déployées dans divers environnements agroécologiques où la biodiversité associée – notamment les animaux d'élevage, les agents pollinisateurs, les prédateurs de ravageurs, les organismes du sol et les arbres capables de fixer l'azote – occupe également une place importante. Les variétés convenant au modèle Produire plus avec moins doivent pouvoir s'adapter à l'évolution des pratiques de production et se prêter à la protection intégrée<sup>1</sup>.

**Avec le changement climatique**, la tolérance à la chaleur et à la sécheresse deviendra un caractère très important chez les céréales, notamment sous les tropiques<sup>60</sup>. Le projet «Maïs résistant à la sécheresse pour l'Afrique» du Centre international d'amélioration du maïs et du blé (CIMMYT) a permis de mettre au point des variétés, y compris des hybrides, dont le rendement dépasse de 25 pour cent celui des variétés commerciales, dans des conditions de sécheresse particulières. Certaines variétés sont également tolérantes à la chaleur, et produisent des rendements supérieurs de 27 pour cent à ceux des variétés commerciales<sup>61</sup>. Du blé tolérant à la chaleur, créé à partir de matériel génétique détenu par le CIMMYT et le Centre international de recherches agricoles dans les régions sèches (ICARDA), a été diffusé dans plusieurs pays. Un réseau pour l'amélioration du blé, parrainé par le CIMMYT, travaille actuellement à la mise au point de variétés de blé à haut rendement susceptibles de s'adapter à la hausse incessante des températures d'été au Kazakhstan (voir le chapitre 3, page 75).

On a fait appel à des cultivars qui donnent de bons rendements tout en ayant une période de croissance plus brève et qui contribuent ainsi à réduire le risque d'exposition à d'éventuels stress thermiques de fin de saison, pour concevoir des rotations culturales adaptées à chacune des trois céréales. En Asie du Sud, l'emploi de variétés de riz à maturation précoce pendant la saison de la mousson a permis d'avancer la plantation de la culture suivante: blé, maïs ou autre culture de saison sèche. Les obtenteurs végétaux s'emploient aussi à sélectionner les cultivars de blé adaptés à un semis précoce

Au Bangladesh, l'emploi d'un maïs hybride à haut rendement comme culture de saison sèche s'est avéré être une bonne stratégie du point de vue de l'adapta-

**Figure 2.5 Rendements de cultivars de blé élités en fonction de la date de plantation, Bihar et Madhya Pradesh (Inde) (t/ha)**



Source: Adapté de la figure 16, p.23<sup>62</sup>

tion à la hausse des températures et à l'aggravation des pénuries d'eau (voir le chapitre 3, page 79).

Une autre incidence attendue du changement climatique est la multiplication des inondations, qui fait peser une menace particulière sur la riziculture en Asie<sup>63</sup>. Les variétés «Sub-1» récemment développées par l'IRRI, qui tolèrent la submersion pendant une période pouvant aller jusqu'à 18 jours, ont été adoptées par les agriculteurs à un rythme sans précédent, grâce à un appui substantiel de la part du gouvernement<sup>52</sup>. Du maïs tolérant à de multiples stress a été mis au point pour les plaines indo-gangétiques, où il donne de bons résultats, tant en cas de sécheresse qu'en cas de saturation en eau<sup>61</sup>.

Les variétés résistantes ou tolérantes aux stress biotiques constituent le moyen le plus économique et le plus respectueux de l'environnement de lutter contre la recrudescence de ravageurs et les maladies. Pour combattre la menace que fait peser la rouille noire du blé (Ug99), une race de rouille des tiges particulièrement virulente, le CIMMYT, l'ICARDA et les systèmes nationaux de recherche agricole ont identifié du matériel génétique résistant qui a été incorporé dans des variétés à haut rendement diffusées dans de nombreux pays<sup>64</sup>. L'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) et la FAO ont travaillé ensemble, et avec plusieurs pays, à la mise au point de variétés de blé mutantes qui soient résistantes à cette même rouille<sup>65</sup>.

Le Centre du riz pour l'Afrique (AfricaRice) a développé et contribué à diffuser largement les variétés «Nouveau Riz pour l'Afrique» (NERICA), qui associent le rendement élevé et diverses caractéristiques du riz asiatique à la résistance des espèces africaines à l'adventice parasite *Striga*, une plante nuisible qui provoque de graves dégâts à la fois dans les cultures de riz et dans les cultures de maïs de la région<sup>66,67</sup>. Pour conférer la résistance à un organisme nuisible majeur du riz, le champignon de la pyriculariose, l'IRRI combine des gènes provenant de races différentes dans le même type de riz. La plantation de cultures intercalaires de diverses variétés de riz peut également constituer un moyen de lutte efficace contre la pyriculariose. En Chine, la plantation conjointe de riz gluant et d'un hybride résistant à la pyriculariose empêche la multiplication de l'inoculum du champignon pathogène, ce qui permet de réduire considérablement l'emploi de pesticides<sup>68</sup>.

Un autre domaine particulièrement prometteur de la sélection variétale est celui de la biofortification, qui consiste à enrichir le contenu nutritionnel des cultures vivrières au moyen de l'amélioration génétique. Le programme Harvest Plus (Programme-défi sur la biofortification) du Groupe consultatif pour la recherche agricole internationale (CGIAR) a promu la biofortification de sept cultures, notamment le maïs, le riz et le blé. Le Bangladesh a produit la première variété mondiale de riz enrichi en zinc, et des variétés de maïs à forte teneur en vitamines A ont été mises à la disposition de plus de 500 000 ménages en Afrique<sup>69</sup>. La valeur nutritionnelle a été considérablement améliorée dans le maïs à teneur élevée en protéines «Quality Protein Maize», qui contient près de deux fois plus de protéines assimilables qu'un maïs conventionnel<sup>70,71</sup>.

**Dans le but de mettre au point des variétés convenant** au modèle Produire plus avec moins, les obtenteurs doivent pouvoir accéder à la plus vaste gamme possible de sources de caractères souhaitables, c'est-à-dire les collections de céréales dans les banques de gènes, les variétés locales cultivées par les agriculteurs et les espèces sauvages apparentées. Il faut intensifier la caractérisation des ressources génétiques des céréales afin d'identifier les caractères adaptés à



une agriculture respectueuse des écosystèmes et d'intégrer ces caractères dans le processus de sélection végétale<sup>72</sup>. Par exemple, les races locales de blé peuvent fournir des caractères importants du point de vue de la tolérance à la sécheresse et à la chaleur, notamment une biomasse plus fournie, ce qui favoriserait considérablement l'adaptation des céréales au changement climatique dans le monde entier<sup>73</sup>.

Une autre nouvelle tendance de la sélection végétale est l'amélioration des composantes des systèmes céréaliers avec cultures intercalaires. Des recherches récentes ont permis de mieux comprendre les interactions entre les géotypes et les espèces de végétaux cultivés, notamment les mécanismes susceptibles de tenir à l'écart les ravageurs et les maladies. Associée à la sélection végétale, qui permet de combiner les caractères de différentes plantes pour accroître la performance globale, la technique des cultures intercalaires pourrait contribuer à améliorer la durabilité d'une production alimentaire peu gourmande en intrants, dans de nombreuses parties du monde<sup>74, 75</sup>.

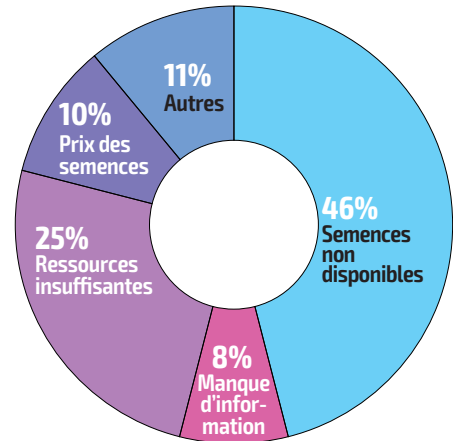
Par ailleurs, l'amélioration génétique de la qualité nutritionnelle des résidus de cultures céréalières suscite un intérêt croissant. Après la récolte des épis de maïs, les petits exploitants agricoles d'Amérique centrale et d'Afrique subsaharienne utilisent fréquemment la majeure partie des feuilles et des tiges pour nourrir les animaux. Des études conduites au Mexique laissent penser que les collections de matériel génétique recèlent un vaste potentiel inexploité s'agissant d'améliorer la valeur fourragère des tiges de maïs, une amélioration qui permettrait aux agriculteurs de laisser davantage de résidus dans les champs pour recouvrir le sol<sup>76</sup>.

En associant, d'une part, des pratiques telles que l'agriculture de conservation et, d'autre part, des cultivars améliorés capables d'utiliser l'eau et les éléments nutritifs avec plus d'efficacité, on pourrait accroître la productivité et la rentabilité globales de la plupart des systèmes de production végétale. Les variétés qui assimilent les engrais avec une grande efficacité sont susceptibles de limiter la perte dans les champs des éléments nutritifs provenant des engrais, aujourd'hui estimée à 50 pour cent s'agissant de l'azote et 45 pour cent s'agissant du phosphore<sup>77, 78</sup>.

**La sélection variétale de céréales plus productives**, plus efficaces et plus nutritives doit aller de pair avec la mise en place de systèmes semenciers formels qui assurent la multiplication rapide et l'offre de semences améliorées aux petits producteurs, et avec la fourniture d'un appui en faveur des initiatives d'agriculteurs visant la conservation et l'amélioration de la biodiversité agricole locale. Les deux types de systèmes semenciers, formel et à assise communautaire, joueront un rôle essentiel dans la diffusion des variétés céréalières convenant au modèle Produire plus avec moins<sup>1</sup>.

Dans un grand nombre de pays, les exploitants agricoles n'adoptent pas les nouvelles variétés faute de systèmes semenciers performants [FIGURE 2.6]. La production de semences est particulièrement importante lorsqu'il est question de variétés hybrides de cultures à pollinisation croisée, telles que le maïs. On observe une tendance croissante à recourir à des partenariats public-privé pour améliorer l'offre en semences. En Chine, le secteur privé produit et commercialise

**Figure 2.6 Principaux obstacles à l'adoption du maïs tolérant à la sécheresse par les petits agriculteurs en Éthiopie\***



\* Résultats d'une enquête auprès des ménages agricoles

Source: Adapté de Fisher, M., Abate, T., Lunduka, R., Asnake, W., Alemayehu, Y. & Madulu, R. 2015. Drought tolerant maize for farmer adaptation to drought in sub-Saharan Africa: Determinants of adoption in eastern and southern Africa. *Climate change*. DOI 10.1007/s10584-015-1459-2. Figure 2.

les semences d'un riz hybride mis au point par le secteur public<sup>79</sup> et, en Inde et dans d'autres pays, le secteur privé commence maintenant à produire et vendre des semences de blé.

La Société brésilienne de recherche agricole (EMBRAPA) a ouvert la voie en établissant des partenariats avec le secteur privé pour commercialiser ses variétés hybrides de maïs et, dans le processus, a généré des ressources destinées à financer la poursuite des travaux de recherche-développement (R-D)<sup>80</sup>. En 2014, le projet «Maïs résistant à la sécheresse pour l'Afrique» a permis la production et la distribution de quelque 40 000 tonnes de semences de maïs amélioré, une opération conduite en partenariat avec environ 110 sociétés semencières privées et publiques, ONG et organisations paysannes<sup>81</sup>.

Le blé étant autogame, la pratique consistant à utiliser comme semences des grains prélevés dans les récoltes précédentes continue à prévaloir et le taux de remplacement variétal est faible, notamment dans les zones d'agriculture pluviale et les lieux reculés. Pour améliorer l'accès aux variétés améliorées, l'ICARDA a aidé ses partenaires nationaux à conduire un processus accéléré d'expérimentation et de diffusion de variétés résistantes à la rouille. Grâce au processus accéléré de multiplication et de production à grande échelle de semences, conduit en collaboration avec des programmes nationaux et des groupements d'agriculteurs, il a été possible de fournir aux producteurs céréaliers 80 000 tonnes de semences certifiées<sup>82</sup>.

Les banques de semences et réseaux semenciers communautaires complètent les systèmes semenciers formels, en conservant et en améliorant les semences provenant de diverses sources, notamment les échanges entre agriculteurs et les marchés locaux. Le processus à assise communautaire de sélection et de multiplication de variétés céréalières compétitives du point de vue du rendement et adaptées aux conditions locales permet aux petits producteurs d'accéder à une gamme de semences plus large que celle qui est normalement à leur portée, ce qui contribue à la fois à la sécurité alimentaire et à la conservation de la biodiversité agricole. Les variétés des agriculteurs constituent aussi une source de matériel de base utilisé dans les programmes formels d'amélioration des cultures – un certain nombre de banques de semences communautaires ont été créées en partenariat avec des instituts de sélection végétale<sup>83</sup>.

En Afrique de l'Ouest, où le développement variétal est lent, une organisation d'agricultures s'est spécialisée dans la production de semences de base et de semences certifiées de variétés de riz aromatique cultivées dans la vallée du fleuve Sénégal<sup>52</sup>. Au Népal<sup>84</sup> et au Timor-Leste<sup>85</sup>, la production et la diffusion de semences de maïs ont été accélérées par la participation de producteurs de semences opérant à l'échelle communautaire.

## Gestion efficace de l'eau

Partout dans le monde, la concurrence pour les ressources en eau s'intensifie dans de nombreuses zones céréalières. Le gaspillage de l'eau destinée à la production végétale a favorisé l'épuisement des nappes aquifères et la réduction du débit des cours d'eau, et de nombreux bassins fluviaux n'ont plus suffisamment d'eau pour satisfaire les demandes de l'agriculture, du secteur industriel et des centres urbains. De plus, l'utilisation excessive d'engrais minéraux et de pesticides a entraîné la pollution des cours d'eau, des lacs et des zones côtières, portant atteinte aux écosystèmes terrestres et aquatiques et à la santé humaine<sup>86</sup>.

Alors que les demandes concurrentes d'eau douce se multiplient, les producteurs de céréales devront considérablement améliorer la productivité de l'eau dans leurs systèmes agricoles et réduire les incidences négatives de la céréaliculture sur la qualité des eaux souterraines et des eaux de surface.

Il n'existe pas d'approche unique permettant de relever le défi que pose la nécessité de produire davantage de denrées alimentaires, d'aliments pour animaux, de fourrage et de fibres alors que l'eau est moins abondante et de plus mauvaise qualité. Il faut associer les technologies permettant d'économiser l'eau d'irrigation, l'utilisation équilibrée des ressources en eau de surface et en eau souterraine et les bonnes pratiques d'agriculture et de gestion des sols, notamment le labour zéro, le maintien des résidus de culture, la plantation sur plates-bandes surélevées et la diversification des cultures<sup>87</sup>.

L'Institut international de recherche sur les cultures des zones tropicales semi-arides (ICRISAT) a promu dans les zones d'agriculture pluviale une série de pratiques de gestion de l'eau, en particulier la récupération et le stockage, la revégétalisation et diverses autres stratégies de couverture du sol et la gestion améliorée des terres et des éléments nutritifs du sol. En Inde, les structures de récupération de l'eau de pluie qui se remplissent pendant la mousson, contribuent à réduire le ruissellement de 40 pour cent et les pertes de sol de 50 pour cent et à accroître l'intensité de culture de 180 pour cent<sup>88, 89</sup>. Au Honduras, l'introduction du principe du paillis et diverses autres techniques de conservation des sols ont permis de multiplier par deux les rendements du maïs dans les systèmes d'agriculture itinérante, de réduire l'érosion du sol et d'améliorer la qualité et la disponibilité de l'eau au profit des usagers résidant en aval (voir le chapitre 3, page 48).

Grâce à l'aménagement de plates-bandes surélevées, on constate une meilleure productivité de l'eau dans les zones de culture pluviale du maïs. Le système de billonnage amélioré («broad bed and furrow» en anglais), promu par l'ICRISAT, est une technique de conservation de l'humidité et de drainage *in situ* adaptée aux sols argileux qui sont fréquemment gorgés d'eau pendant la saison des pluies. Jusqu'à quatre rangées de plantes peuvent être semées avec des semoirs de précision sur les plates-bandes en dos d'âne, qui conservent l'eau dans le profil du sol et font s'écouler l'eau de ruissellement en excès jusqu'à de petites citernes aux fins d'une utilisation ultérieure<sup>90</sup>.

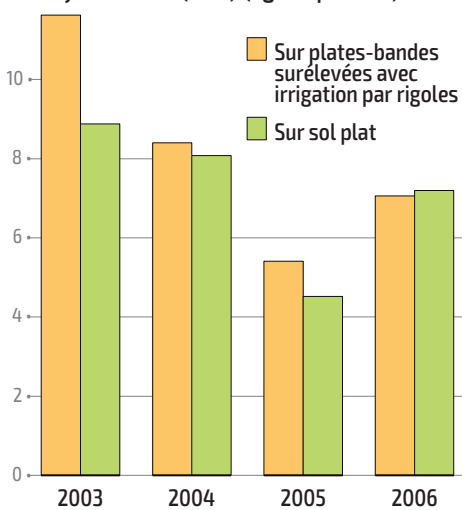
Plusieurs stratégies peuvent améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau dans les zones d'agriculture pluviale. L'une d'entre elles est l'application des pratiques de l'agriculture de conservation qui contribuent à limiter les pertes par évaporation de l'eau contenue dans le sol et à améliorer la capacité de rétention d'eau du sol. Il n'est pas aisé d'améliorer cette capacité, cependant des progrès modestes mais durables peuvent être obtenus avec une bonne gestion du sol et des cultures. Les variétés de blé qui présentent de la vigueur au démarrage, extraient l'eau du sol à plus grande profondeur, tolèrent un certain seuil de stress lié à l'eau du sol et portent un pourcentage de grains plus élevé à la récolte, sont généralement plus efficaces du point de vue de l'utilisation de l'eau<sup>64, 91</sup>. Aujourd'hui, des variétés et des hybrides de riz et de maïs plus efficaces sont disponibles partout. Des concentrations suffisantes d'éléments nutritifs assimilables par les cultures, notamment le potassium, favorisent aussi l'efficacité de l'utilisation de l'eau<sup>92</sup>.

Lorsque les précipitations sont insuffisantes, la technique consistant à récolter et à stocker l'eau de ruissellement puis à l'utiliser en quantité limitée pour arroser la culture aux étapes cruciales de sa croissance, constitue une option viable. En République arabe syrienne, cette «irrigation d'appoint» réalisée d'une à trois fois

au printemps, à raison de 100 à 300 mm, a permis de faire grimper les rendements du blé de 2 à 6 tonnes par ha et de quadrupler la productivité de l'eau: soit un résultat spectaculaire obtenu avec une faible quantité d'eau<sup>64</sup>.

En adoptant la même stratégie, on peut avancer la plantation du blé afin d'éviter la sécheresse et les gelées risquant de survenir plus tard pendant la saison de croissance. Des recherches conduites en Turquie et dans la République islamique d'Iran ont montré que le semis précoce du blé, associé à l'apport d'une irrigation d'appoint de 50 à 70 mm, permettait d'améliorer les rendements de plus de 2 tonnes par ha<sup>93</sup>.

**Figure 2.7** **Efficiences de l'utilisation de l'eau dans le système de cultures intercalaires irriguées pois cajan-maïs, Madhya Pradesh (Inde) (kg/ha par mm)**



Source: Adapté du tableau 7, p.469<sup>98</sup>

**L'efficacité de l'utilisation de l'eau dans le contexte de l'irrigation** est généralement de l'ordre de 50 pour cent voire moins encore. L'apport de la quantité optimale d'eau dont a besoin une culture ou une variété donnée, associé à de bonnes pratiques de gestion, constitue la technique qui a le plus de chances d'améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau<sup>94</sup>.

Selon une étude récente, la production moyenne de riz dans les plaines indo-gangétiques était de 0,7 kg de grains pour chaque mètre cube d'eau d'irrigation utilisée. Cependant, dans l'État indien du Punjab, des infrastructures d'irrigation et de drainage adaptées et de bonnes pratiques de gestion permettaient d'obtenir une productivité de l'eau égale en moyenne à 1,5 kg par mètre cube<sup>95</sup>.

La plantation sur des plates-bandes surélevées avec irrigation par des rigoles qui canalisent l'eau entre deux rangées de culture, améliore notablement la porosité du sol, la teneur en carbone et les taux d'infiltration, ce qui accroît l'efficacité de l'utilisation de l'eau par le blé et les autres cultures<sup>64</sup>. Quand leur sol n'est pas travaillé, les plates-bandes présentent encore plus d'avantages. En Égypte, l'ICARDA et des instituts nationaux ont promu l'aménagement de plates-bandes surélevées comme élément à part entière d'un système de production intégré mis en place dans le delta du Nil. Après l'introduction

de semoirs adaptés et de la gestion améliorée des cultures, les rendements du blé ont progressé globalement de 25 pour cent et l'efficacité de l'utilisation de l'eau de plus de 50 pour cent<sup>96</sup>.

Au Pakistan, les agriculteurs ont signalé que la culture pratiquée sur des plates-bandes surélevées non travaillées avec irrigation par rigoles permettait d'enregistrer des améliorations du rendement du maïs allant de 30 à 50 pour cent, par rapport à la culture irriguée sur sol plat<sup>97</sup>. En Inde, dans le cadre de ce système, les agriculteurs ont bénéficié d'une augmentation de la productivité par unité de surface due à la plantation de cultures intercalaires de pois chiches, de pois cajan et de soja entre les rangées de maïs [FIGURE 2.7]<sup>98</sup>.

S'agissant de la riziculture irriguée, pour accroître l'efficacité de l'utilisation de l'eau, les producteurs recourent à diverses techniques du modèle Produire plus avec moins. En Asie du Sud, sur une surface estimée à 4 millions d'ha de terres irriguées, les exploitants agricoles ont adopté le nivellement de précision au laser qui – comparé au nivellement avec des planches en bois – permet d'économiser l'eau et d'obtenir des gains de productivité de 16 pour cent<sup>12, 43</sup>.

Dans le cadre de la riziculture irriguée, les autres techniques contribuant aux économies d'eau sont les suivantes: aménagement de diguettes périphériques,

qui améliorent l'utilisation de l'eau de pluie et réduisent la dépendance à l'égard de l'eau apportée par les canaux, le semis à sec associé au labour zéro, la technique de l'humectation et assèchement alternés, l'irrigation intermittente et le repiquage précoce des jeunes plants<sup>16,99</sup>.

En Afrique de l'Ouest, où le riz est généralement cultivé sur des terrains en pente et dans les bas-fonds, sans irrigation ni drainage suffisant, AfricaRice promeut une approche de développement peu onéreuse appelée «smart valleys» (vallées intelligentes), qui repose sur des travaux de terrassement simples tels que l'aménagement de diguettes, associés à des infrastructures simples d'irrigation et de drainage. La construction de diguettes et le nivellement du sol renforcent la résilience face à la sécheresse et, de plus, réduisent les risques de lessivage des engrais en cas de fortes pluies<sup>100,101</sup>.

Les rendements moyens s'échelonnent entre 3,5 et 4 tonnes par ha, ce qui a eu des répercussions positives sur les revenus des agriculteurs. L'approche «smart valleys», qui a été mise au point et validée avec la participation active d'agriculteurs du Bénin et du Togo, a été intégrée dans la stratégie nationale béninoise pour le développement des vallées intérieures<sup>52</sup>.

En Asie, la méthode de l'humectation et assèchement alternés, en vertu de laquelle une rizière peut ne pas être irriguée pendant une période allant jusqu'à dix jours, a permis de réduire les besoins en eau de 15 à 30 pour cent, sans baisse de rendement<sup>102</sup>. Adaptée aux rizières de bas-fonds où la disponibilité de l'eau est stable, cette technique contribue à réduire les dépenses de carburant liées au pompage de l'eau; elle contribue également à limiter les émissions de méthane provenant des rizières, à hauteur de 70 pour cent<sup>103</sup>. La pratique a été intégrée dans des programmes nationaux au Bangladesh, au Myanmar, aux Philippines et au Viet Nam. Appliquée d'une manière optimale, la méthode pourrait permettre dans certaines zones de passer d'une à deux récoltes de riz par an<sup>52</sup>.

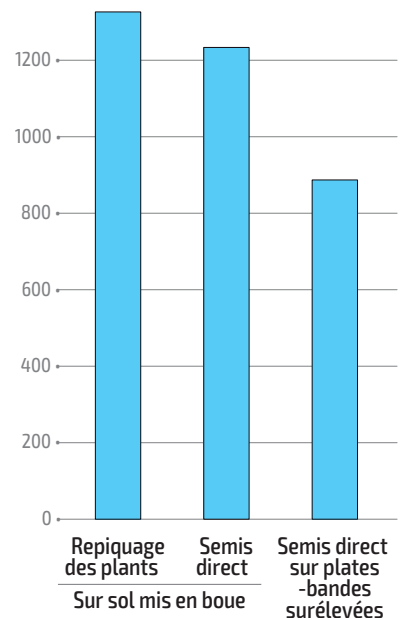
Par rapport à la culture en rizières inondées, le Système de riziculture intensive est fondé sur des pratiques qui contribuent à réduire de près de moitié la consommation d'eau par hectare, en prévoyant des périodes d'assèchement entre deux irrigations et en réduisant considérablement l'épaisseur de la lame d'eau (voir le chapitre 3, page 44).

Dans de nombreuses zones, la pratique du repiquage des plants de riz dans un sol mis en boue a été remplacée par le semis direct – les semences peuvent être semées à la volée sur les champs humides ou mis en boue, ou plantées au moyen d'un semoir adapté, sans travail préalable du sol. Comparé au repiquage, le semis direct permet d'obtenir des rendements similaires tout en réduisant d'un tiers la quantité d'eau d'irrigation |FIGURE 2.8|<sup>16</sup>.

Une autre pratique, qui convient à la riziculture en saison sèche, est le système du «riz aérobie», dans lequel le riz est cultivé sur sol sec, l'irrigation n'étant pratiquée que si elle est nécessaire. Expérimentée et adoptée par des agriculteurs aux Philippines et dans le nord de la Chine, la technologie repose sur l'emploi de variétés adaptées à des sols bien drainés, non boueux et non saturés, dans les zones d'agriculture pluviale où l'eau est rare<sup>104</sup>.

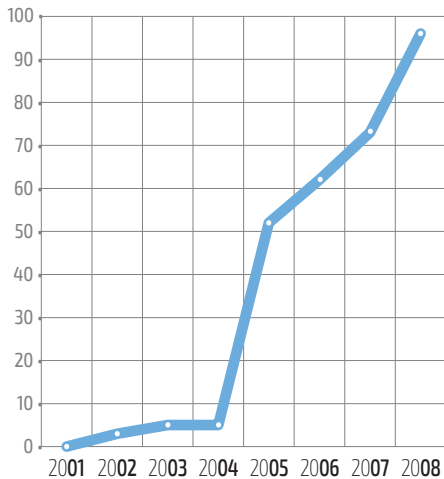
Bien gérée, la technique du riz aérobie peut donner des rendements égaux à seulement 75 à 80 pour cent des rendements du riz inondé, mais avec 50 à 70 pour cent d'eau en moins. Les besoins en main-d'œuvre sont également plus faibles<sup>52</sup>. En Inde, sur les sols noirs, le semis à

**Figure 2.8 Quantités d'eau d'irrigation utilisées dans la riziculture avec repiquage et dans la riziculture avec semis direct (mm)\***



\* Données tirées de 44 études de pays  
Source: Adapté du tableau 8, p.339<sup>16</sup>

**Figure 2.9 Progression de l'adoption de la protection intégrée dans la zone de riziculture de la province d'An Giang (Viet Nam) (pourcentage de la surface totale)**



Source: Adapté de la figure 6, p.218<sup>109</sup>

sec du riz à travers un paillis de surface, pendant la période précédant la mousson, a constitué une option rentable pour les agriculteurs qui avaient l'habitude de laisser la terre en jachère<sup>62</sup>.

## Protection intégrée

Les insectes nuisibles, les maladies et les adventices provoquent des dégâts considérables – de l'ordre de 20 à 50 pour cent – dans les champs de maïs, de riz et de blé des petits producteurs<sup>105</sup>. Ils peuvent aussi entraîner une baisse de la qualité du grain et des pertes après récolte dues à des infestations et des altérations des produits. S'agissant des adventices, le sarclage manuel qui fait partie des tâches demandant le plus de temps aux petits agriculteurs incombe généralement aux femmes.

La première ligne de défense contre les ravageurs et les maladies est un écosystème agricole en bonne santé. Le modèle Produire plus avec moins fait appel à la protection intégrée (Pi), stratégie de protection des cultures visant à éviter les problèmes, qui met à profit et améliore les processus biologiques et la biodiversité associée aux cultures servant de base à la production végétale. L'approche a été mise au point en réaction à l'emploi excessif généralisé de pesticides, qui contribue à réduire les populations de prédateurs naturels des ravageurs, entraîne des infestations de ravageurs secondaires, favorise l'apparition de résistances aux pesticides et accroît les risques en matière de santé humaine et d'environnement. Selon une étude récente, au moins 50 pour cent des pesticides employés sont tout simplement inutiles dans la plupart des écosystèmes agricoles<sup>106</sup>.

Dans les programmes de Pi, les exploitants agricoles sont formés de manière à pouvoir fonder leur décision relative à la lutte contre les ravageurs sur un seuil économique qui établit le niveau de dégâts acceptable, en dessous duquel le coût des mesures de lutte n'est pas compensé par une quelconque amélioration de la productivité. La stratégie fondamentale consiste à prévoir et éviter les problèmes et, s'ils sont inévitables, à les détecter précocement afin de pouvoir les maîtriser par des moyens naturels, des quantités réduites de pesticides relativement peu dangereux n'étant utilisées qu'en dernier ressort<sup>1</sup>.

**La protection intégrée a été mise en œuvre** pour la première fois dans les rizières asiatiques pour combattre la cicadelle brune, responsable de baisses majeures de récoltes. Les infestations de cicadelles étaient déclenchées par la pulvérisation généralisée d'un insecticide à large spectre qui tuait les prédateurs naturels de l'insecte nuisible et favorisait la croissance rapide de ses populations<sup>107, 108</sup>.

Pour faire face à une infestation de ce type au Viet Nam, la FAO a appuyé la mise en place d'un processus communautaire de lutte contre l'insecte nuisible et les maladies associées, au moyen de la Pi. Les mesures appliquées ont notamment été les suivantes: contrôle par les agriculteurs du nombre de cicadelles et du nombre de prédateurs naturels dans les rizières, élimination des plants infectés, optimisation du calendrier de semis, optimisation de l'emploi d'engrais et plantation de variétés plus résistantes<sup>52</sup>. L'utilisation d'insecticide par les agriculteurs vietnamiens a reculé de 70 pour cent et, avec un appui substantiel de l'État, la

zone de riziculture bénéficiant de la PI dans une province a été étendue exponentiellement (FIGURE 2.9)<sup>109</sup>.

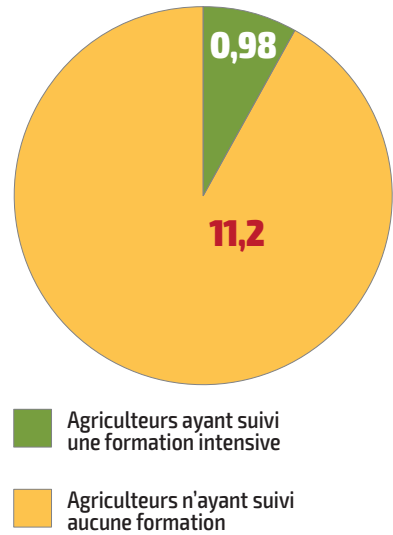
Lorsque la riziculture est associée à l'aquaculture, le poisson se nourrit des insectes nuisibles, des champignons pathogènes et des adventices, ce qui réduit la nécessité de recourir à des moyens de lutte chimiques. Les agriculteurs qui produisent en association du riz et du poisson utilisent jusqu'à 68 pour cent de pesticides en moins par hectare que ceux qui produisent seulement du riz (voir le chapitre 3, page 68).

Des études conduites partout en Asie ont mis en évidence l'intérêt de mener la formation relative à la PI dans le cadre d'écoles pratiques d'agriculture, forme d'enseignement pour adultes qui encourage les producteurs de riz à adapter les pratiques de la PI à des conditions écologiques variées et évolutives. En général, les agriculteurs fréquentant les écoles pratiques d'agriculture divisent par trois les quantités d'insecticide pulvérisées par saison et enregistrent une augmentation globale des rendements. Dans une zone d'Indonésie, les agriculteurs ont pratiquement éliminé les insecticides et obtenu des améliorations de rendement de 21 pour cent. Ils ont également acquis des compétences sociales et entretiennent de meilleures relations avec les prestataires de services<sup>110, 111</sup>.

S'agissant de la culture du maïs, la formation intensive des agriculteurs peut favoriser un recul sensible de l'emploi de pesticide. Au Nicaragua, les agriculteurs ayant bénéficié d'une formation pulvérisaient leurs champs beaucoup moins souvent que les autres, et employaient moins de 10 pour cent de la quantité habituelle d'insecticide (FIGURE 2.10)<sup>112</sup>. Il existe des moyens non chimiques extrêmement efficaces de lutter contre les ravageurs du maïs. Dans la cordillère des Andes au Pérou, en Équateur et en Bolivie, les petits agriculteurs appliquent de l'huile minérale ou alimentaire sur les verticilles et les soies du maïs et parviennent ainsi à éviter jusqu'à 76 pour cent des infestations d'insectes nuisibles<sup>113-115</sup>. Au Brésil, pour lutter contre la légionnaire d'automne, des scientifiques ont mis au point deux pesticides biologiques très efficaces, qui sont moins toxiques et mieux ciblés que le pesticide de synthèse à large spectre. Leurs principes actifs sont des isolats d'une bactérie et d'un virus susceptibles de réduire le nombre de légionnaires de plus de 95 pour cent<sup>116-118</sup>.

Dans les champs de maïs africains, on a fait appel à la rotation des cultures et à la gestion améliorée des sols pour lutter contre l'adventice parasite *Striga*, qui est responsable de baisses de récolte importantes dans les petites exploitations<sup>119</sup>. À Madagascar, le maïs est planté avec une culture de couverture de la famille des légumineuses, qui stimule la germination des semences de *Striga*, puis fait dépérir les jeunes pousses d'adventices en les privant de lumière<sup>52</sup>. Le riz est semé plus tard dans les résidus de légumineuses. Le semis direct, qui permet d'éviter le mélange de semences d'adventices dans la zone racinaire et d'accroître la résilience et la stabilité globale du système, est particulièrement efficace quand il est associé à l'adoption de variétés NERICA de riz pluvial<sup>66, 67, 120</sup>. En Afrique de l'Est, un système novateur de PI met à contribution les interactions chimiques entre deux plantes locales pour bloquer la croissance de l'adventice *Striga* et détruire les foreurs du maïs (voir le chapitre 3, page 40).

**Figure 2.10 Effets des activités de formation sur la quantité moyenne d'insecticide utilisée par les producteurs de maïs au Nicaragua (litres/ha)**



Source: Adapté du tableau 1, p.196<sup>112</sup>

**En ce qui concerne la culture du blé**, la Pi repose essentiellement sur des pratiques de gestion des cultures et la plantation de cultivars résistants. Le blé est touché par une série de maladies. La maladie du blanc provoque des baisses de récolte pouvant aller jusqu'à 45 pour cent<sup>121</sup>, et certaines attaques du champignon *Septoria tritici* se sont soldées par la perte de la moitié des récoltes<sup>122</sup>. En Asie du Centre et de l'Ouest et en Afrique du Nord, la rouille jaune est responsable de pertes de récolte atteignant 80 pour cent<sup>64</sup>.

La création et le déploiement rapide de variétés de blé résistantes ont aidé l'Éthiopie à surmonter une épidémie de rouille des tiges qui, dans la région de Balé, avait pratiquement anéanti la récolte de blé. Des variétés résistantes ont été plantées sur environ 80 pour cent de la superficie nationale affectée au blé et se sont vu attribuer le mérite de la récolte record de 2014<sup>64</sup>.

L'emploi de variétés résistantes associé au semis précoce permet de lutter efficacement contre la mouche de Hesse, mais il faut mettre en œuvre une stratégie de Pi plus complexe pour combattre les autres insectes nuisibles. En ce qui concerne la punaise des céréales, les recommandations préconisent de procéder à des pulvérisations ciblées depuis le sol, de planter des herbes médicinales qui attirent les prédateurs naturels et d'employer des préparations fongiques qui tuent l'insecte nuisible dans ses refuges hivernaux. La lutte contre la cèphe des chaumes a été améliorée par le recours à des variétés résistantes, le report de la date de semis, la rotation culturale et l'utilisation de parasitoïdes<sup>64</sup>.

Les approches participatives telles que le système des écoles pratiques d'agriculture sont aussi très fréquemment adoptées pour diffuser les techniques de Pi permettant de lutter contre les ravageurs du blé. L'introduction de la Pi enseignée dans des écoles pratiques d'agriculture ayant donné d'excellents résultats en matière de lutte contre les punaises des céréales, cette démarche est devenue la principale stratégie de protection phytosanitaire en République islamique d'Iran<sup>123</sup>.

La lutte contre les adventices qui, elle aussi, est déjà une composante importante du modèle Produire plus avec moins, va l'être d'autant plus que les cas d'adventices développant une résistance aux herbicides se multiplient. Éviter de perturber le sol, maintenir une couverture de surface, pratiquer la rotation des cultures et empêcher le semis d'adventices constituent autant de mesures efficaces pour alléger la pression exercée par les adventices sur les cultures.

**Comme l'examen ci-dessus l'a montré**, les producteurs céréaliers du monde entier ont amélioré leur productivité en appliquant une ou plusieurs composantes du système agricole Produire plus avec moins, notamment l'agriculture de conservation, l'emploi de variétés améliorées, la gestion judicieuse de la santé du sol, l'accroissement de l'efficacité de l'utilisation de l'eau et la protection intégrée. Un grand nombre de producteurs ont rendu leur système productif plus résilient en diversifiant les cultures et en intégrant cultures, foresterie et production animale. Dans le *Chapitre 3* ci-après, on trouvera 11 exemples de systèmes de céréaliculture Produire plus avec moins dans la pratique – qui intègrent toutes les composantes et recommandations, ou la plupart d'entre elles, du modèle Produire plus avec moins.





Chapitre 3

# Des systèmes agricoles qui produisent plus avec moins

*Concrètement, à quoi «ressemble»  
l'intensification durable de la production végétale?  
Ces exemples, choisis dans divers pays en développement  
de toutes les régions du monde, illustrent la mise en pratique  
de systèmes agricoles Produire plus avec moins.*

# Principaux éléments

## 3 Maïs/foresterie, Amérique centrale. Plus de maïs et moins d'érosion sur les coteaux tropicaux.

Le système «défriche-paillis» permet de cultiver du maïs et des haricots sur un sol non travaillé, enrichi par une couverture de résidus de taille. Le système permet de créer des stocks d'éléments nutritifs dans le sol, de réduire le temps de préparation du sol et de sarclage et de produire des rendements deux fois supérieurs à ceux de la culture itinérante traditionnelle. De nombreux agriculteurs appliquant le système «défriche-paillis» ont diversifié la production en y intégrant la culture de jardins potagers familiaux et l'élevage. [Page 48](#)



## 1 Maïs/élevage, Afrique de l'Est. Le système «push-pull» permet de lutter contre les ravageurs du maïs et de stimuler la production laitière.

Un système novateur de protection intégrée tire parti des interactions chimiques entre deux plantes locales pour détruire les foreurs du maïs et bloquer la croissance de l'adventice *Striga*. Le système «push-pull» permet de maintenir une couverture végétale sur le sol toute l'année et de produire du fourrage de qualité, ce qui en fait la base d'une production cultures/élevage à faible consommation d'intrants. [Page 40](#)



## 2 Riz, Asie. De meilleurs rendements par des plantes prospères sur un sol sain.

Avec des plants largement espacés sur un sol aéré, le Système de riziculture intensive a produit des rendements deux fois supérieurs à ceux des rizières inondées. La place que le système accorde à la santé du sol contribue à améliorer l'accès des plants de riz aux éléments nutritifs, et la réduction de l'irrigation permet d'endiguer les émissions de méthane. Les besoins en main d'œuvre, très élevés, pourraient être limités par des innovations technologiques. [Page 44](#)



## 4 Blé/légumineuses, dans le monde entier. Les avantages supplémentaires des légumineuses cultivées avant le blé.

Les résidus de légumineuses apportent au sol jusqu'à 300 kg d'azote par hectare. En conséquence, le blé cultivé après des légumineuses produit de meilleurs rendements et les grains ont une teneur en protéines plus élevée. En outre, certaines légumineuses sécrètent des acides qui rendent le phosphore plus facilement assimilable par les racines du blé, et émettent un gaz qui stimule le développement général de la plante. [Page 52](#)



## 5 Maïs/élevage, Amérique latine. Des «pompes à éléments nutritifs» au profit du bétail et du maïs.

Les systèmes maïs-élevage durables reposent notamment sur l'introduction de pâturages de *Brachiaria*, une graminée qui empêche le compactage du sol et est plus nourrissante que les graminées de savane autochtones. Les systèmes de labour zéro qui intègrent la *Brachiaria* permettent de produire jusqu'à trois cultures de céréales par an. La plantation d'une culture relais de *Brachiaria* dans le maïs favorise un usage optimal des ressources en terres et en limite la dégradation. [Page 55](#)



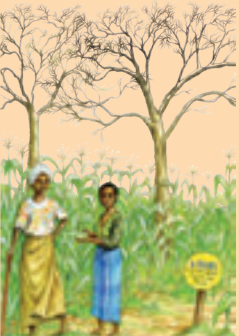


## 6 Riz/blé, plaines indo-gangétiques. L'agriculture de conservation est la clé de la sécurité alimentaire.

Dans le grenier à blé de l'Asie du Sud, les agriculteurs pratiquent le labour zéro pour réduire les coûts et produire plus de blé. La technique de l'humectation et assèchement alternés des rizières peut permettre de réduire de moitié la consommation d'eau. Le nivellement du sol au laser contribue à améliorer les rendements des deux céréales. Les exploitants agricoles économisent sur les engrais avec une gestion de l'azote adaptée aux besoins et recourent à des légumineuses pour éliminer les adventices. [Page 58](#)

## 9 Maïs/foresterie, Afrique australe. Quand des arbres et des arbustes sont moins onéreux que les engrais.

En Zambie et au Malawi, les arbustes et les arbres de la famille des légumineuses font partie intégrante des systèmes de culture du maïs. En deux ans, ils permettent d'accroître la quantité d'azote dans le sol de 250 kg par hectare, ce qui se traduit par un quadruplement de la production de maïs. Le système maïs/foresterie est résilient face à la sécheresse et plus rentable que la culture de maïs avec apport d'engrais. [Page 71](#)



## 7 Maïs/légumineuses, dans le monde entier. Le système traditionnel favorise une utilisation plus productive

des terres. Les rotations culturales, les cultures intercalaires et les cultures relais associant des légumineuses au maïs permettent d'améliorer la productivité des terres, ce qui rend les systèmes maïs-légumineuses particulièrement intéressants pour les petits producteurs. La rotation avec une légumineuse peut faire grimper les rendements du maïs de 25 pour cent. Le maïs planté avec des cultures intercalaires de légumineuses dans le cadre d'un



système d'agriculture de conservation produit 33 pour cent de grains de plus qu'une monoculture. [Page 64](#)

## 10 Blé, Asie centrale. Les agriculteurs cessent de labourer dans la steppe du Kazakhstan.

Le Kazakhstan est l'un des pays du monde où l'adoption de l'agriculture de conservation est la plus avancée. Avec le semis direct et le labour zéro, on obtient de meilleurs rendements du blé que sur les terres labourées, et ce pour des coûts de production inférieurs. Les rotations associant le blé à d'autres cultures permettent de générer des revenus supplémentaires et de laisser sur le sol des résidus qui contribuent à la conservation de l'humidité du sol et freinent la germination des semences d'adventices. [Page 75](#)



## 8 Riz/aquaculture, Asie. Des rizières plus productives.

Un hectare de rizière peut fournir 9 tonnes de riz et 750 kg de poisson par an. Le poisson élevé dans les rizières contribue à améliorer l'alimentation familiale et constitue pour les plantes une source naturelle d'éléments nutritifs et un moyen de lutte phytosanitaire. Grâce à l'augmentation des rendements du riz, aux recettes tirées de la vente du poisson et aux économies réalisées sur les produits agrochimiques, les revenus de la production rizipoisson peuvent être supérieurs de 400 pour cent à ceux de la monoculture de riz. [Page 68](#)



## 11 Riz/maïs, Asie. Des hybrides à haut rendement facilitent l'adaptation au changement climatique.

En cultivant du maïs au lieu de riz pendant la saison sèche, les producteurs allègent la demande pesant sur les ressources en eau souterraine et doublent leurs bénéfices. Un grand nombre d'agriculteurs améliorent un peu plus leurs revenus en associant le maïs à des cultures intercalaires de légumes. Les producteurs de maïs qui ont suivi une formation sur les techniques de gestion des cultures permettant d'économiser les ressources emploient moins d'engrais minéraux mais obtiennent des rendements deux fois plus élevés que la moyenne nationale. [Page 79](#)



**Zone agroécologique**

Pluviale tropicale

**Céréale dominante** Maïs**Autres cultures/produits**

Viande, lait, fourrage, légumineuses, légumes

**1. Maïs/élevage Afrique de l'Est**

# Le système «push-pull» permet de stimuler la production laitière

**La culture de deux plantes locales dans les champs de maïs a contribué à mettre en déroute deux des pires ennemis de cette céréale. Le système «push-pull» a d'autres avantages.**

**D**es insectes foreurs des tiges et l'adventice parasite *Striga* sont les fléaux des cultures de maïs en Afrique. Les larves foreuses d'un papillon de nuit autochtone (la pyrale) se nourrissent des tiges succulentes du maïs et les dévorent de l'intérieur, provoquant des baisses de récolte allant de 20 à 80 pour cent. Les ministères de l'agriculture recommandent souvent l'emploi de pesticides de synthèse pour lutter contre les larves foreuses des tiges, mais la plupart des petits agriculteurs n'ont pas les moyens d'en acheter<sup>1</sup>.

La plante parasite *Striga*, qui se fixe sur les racines des céréales et siphonne à son profit l'eau et les éléments nutritifs, pousse sur quelque 40 pour

cent des terres arables d'Afrique subsaharienne. Dans l'ouest du Kenya, elle infeste pas moins de 76 pour cent des terres affectées à la culture du maïs ou du sorgho, entraînant des pertes annuelles évaluées à plus de 40 millions d'USD. Parfois, les infestations de *Striga* sont responsables de la perte totale des récoltes. Il est extrêmement difficile de lutter contre la *Striga* car chaque plante produit des milliers de semences minuscules qui peuvent rester viables dans le sol pendant de nombreuses années. Quand les agriculteurs abandonnent des zones trop infestées pour cultiver de nouvelles terres, la *Striga* les suit<sup>1</sup>.

**5 premiers pays producteurs de maïs en 2013**

(millions de tonnes)

Éthiopie	6,67
Kenya	3,39
Ouganda	2,75
Burundi	0,16
Rwanda	0,67

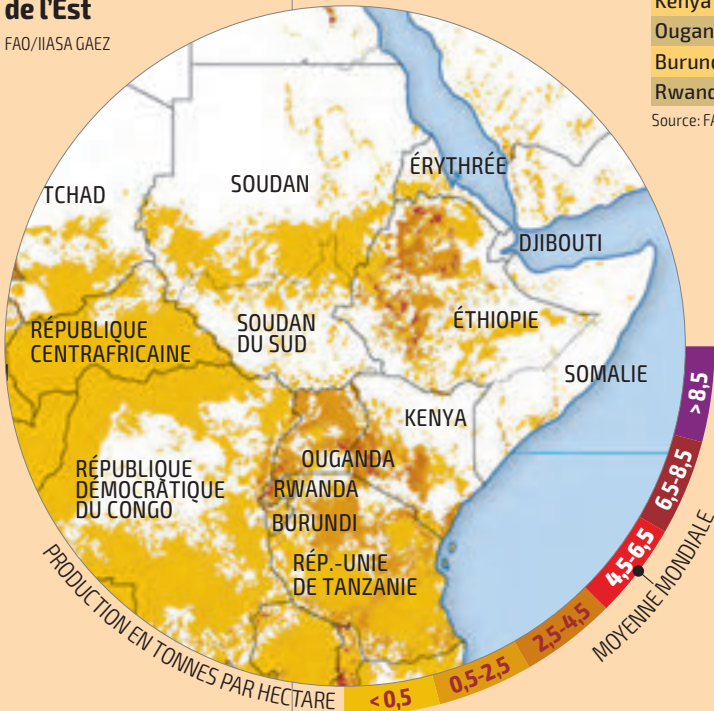
Source: FAOSTAT

En 1993, le Centre international sur la physiologie et l'écologie des insectes (CIPE), à Nairobi, a commencé à travailler avec l'Institut de recherche agronomique du Kenya, Rothamsted Research (Royaume-Uni) et d'autres partenaires, afin de trouver des moyens abordables et respectueux de l'environnement de lutter contre les foreurs des tiges. Le fruit de leurs travaux est aujourd'hui connu sous le nom de système de protection intégrée «pushpull», qui permet de lutter contre les pyrales en exploitant les interactions chimiques complexes entre végétaux et insectes dans un écosystème agricole diversifié sur le plan biologique<sup>1</sup>.

Dans ce système, le maïs est associé à une culture intercalaire de *Desmodium*, une plante de la famille des légumineuses, tandis qu'une graminée fourragère courante, l'herbe à éléphant, est plantée en bordure, tout autour

**Zones productrices de maïs en Afrique de l'Est**

FAO/IIASA GAEZ





du champ. Le *Desmodium* produit des substances chimiques volatiles qui attirent les prédateurs des insectes nuisibles du maïs. Plus important encore, en émettant un faux signal de détresse qui indique aux pyrales que la zone est déjà infestée, ces substances chimiques poussent («push») les femelles pondieuses à chercher des habitats où leurs larves rencontreront moins de concurrence pour se nourrir<sup>1</sup>.

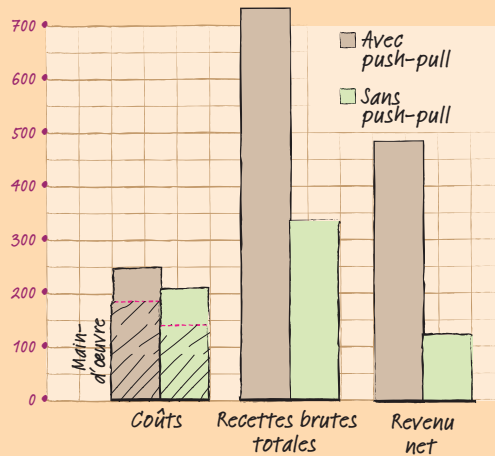
C'est là que l'herbe à éléphant entre en jeu. Elle produit également des substances chimiques volatiles qui attirent («pull») les pyrales femelles, puis sécrète une substance collante qui piège les larves lorsqu'elles se nourrissent de ses tiges. Peu de larves atteignent l'âge adulte. En outre, l'herbe à éléphant attire des prédateurs de l'insecte mineur des tiges, notamment fourmis, forficules et araignées<sup>1</sup>. Pendant les essais, on a constaté que le nombre d'œufs de pyrale et les dégâts causés par le mode d'alimentation de la larve étaient sensiblement plus importants dans les parcelles de monoculture de maïs que dans les parcelles sur lesquelles le système push-pull avait été appliqué<sup>2</sup>.

**Au cours de leurs travaux**, les chercheurs de l'ICIPE ont fait une découverte stupéfiante: le *Desmodium* se comporte également comme une «fausse plante hôte» de la *Striga*, en exsudant d'abord des substances chimiques qui induisent la germination de ses semences, puis d'autres substances chimiques qui inhibent la croissance des racines de l'adventice<sup>1</sup>. On a constaté lors des essais, que les parcelles de maïs conduites selon le système push-pull présentaient peu de dégâts dus à la pyrale et, de plus, étaient quasiment exemptes de *Striga* après deux saisons<sup>3</sup>. Le système push-pull de lutte phytosanitaire a d'autres avantages. À la fois le *Desmodium* et l'herbe à éléphant sont des cultures pérennes qui assurent une couverture du sol toute l'année, ce qui contribue à la conservation de l'humidité du sol et en améliore la structure, limite l'érosion et rend les écosystèmes agricoles plus résilients face à la sécheresse et aux autres phénomènes climatologiques extrêmes. De plus, étant donné qu'il s'agit d'une légumineuse, le *Desmodium* fixe l'azote dans le sol et met cet élément à la disposition de la culture de maïs.

L'herbe à éléphant (à gauche) et le *Desmodium* (à droite) protègent le maïs des insectes foreurs et des adventices

**LE SYSTÈME  
EXPLOITE LES  
INTERACTIONS  
CHIMIQUES  
COMPLEXES ENTRE  
VÉGÉTAUX  
ET INSECTES**

Figure 3.1 Données économiques relatives à la production de maïs dans le district de Kisii (Kenya) (USD/ha)



Source: Adapté du tableau 1, p.61<sup>1</sup>

Au début de 1997, l'ICIPE et ses partenaires ont présenté le système push-pull aux producteurs de maïs et de sorgho du Kenya et de l'est de l'Ouganda, en recourant à la méthode des agriculteurs-formateurs pour favoriser la diffusion du message. En 2010, plus de 25 000 exploitants agricoles résidant autour du lac Victoria avaient adopté le système. Selon une évaluation d'impact réalisée dans 24 villages, 19 pour cent des producteurs avaient adopté le système essentiellement à des fins phytosanitaires, notamment la lutte contre la *Striga*, et dans le but d'améliorer la productivité de la culture. Et 75 pour cent de ces agriculteurs ont déclaré que les rendements étaient de trois à quatre fois supérieurs aux anciens. Certains récoltaient 5 tonnes de maïs par ha dans des champs où, auparavant, le rendement était inférieur à 1 tonne<sup>3</sup>. Dans le district de Kisii, le revenu par hectare des producteurs de maïs appliquant le système push-pull était le triple du revenu par hectare de leurs voisins [FIGURE 3.1]<sup>1</sup>.

Près de la moitié de ces producteurs avaient adapté le système en associant le maïs à des cultures intercalaires de haricots et d'autres légumi-

neuses à grains, telles que les arachides, le soja et le niébé, et à des légumes tels que le chou vert. L'intégration de haricots dans le système ne réduit en rien les effets du *Desmodium* sur la *Striga* et les foreurs des tiges<sup>3</sup>.

**L'herbe à éléphant intégrée dans le système** aide les agriculteurs à accroître la production alimentaire et, de surcroît, contribue à l'alimentation du bétail. Au demeurant, l'évaluation réalisée par l'ICIPE auprès des agriculteurs a permis de constater que la production de fourrage constituait une puissante motivation pour l'adoption du système push-pull<sup>3</sup>. Par exemple, dans l'un des districts du lac Victoria, les producteurs ne pouvaient satisfaire que la moitié de la demande locale de lait en raison du manque d'aliments de bonne qualité à fournir aux animaux. Après l'adoption du système push-pull par 700 exploitants, la production laitière était passée de 7 millions à 8 millions de litres par an<sup>1</sup>.

Davantage de fourrage pour le bétail signifie davantage de fumier que les agriculteurs peuvent épandre dans les champs, ce qui réduit le besoin d'engrais minéraux. Les exploitants agricoles

En raison de leur volatilité, les larves foreuses des tiges peuvent faire perdre jusqu'à 80 pour cent des récoltes



partisans du système push-pull ont pu diversifier leur production par d'autres moyens – par exemple, en vendant des produits biologiques et en élevant de la volaille. Les agriculteurs interrogés lors de l'évaluation de l'ICIPE ont déclaré que le surcroît de revenus provenant de la hausse de production leur permettait de financer diverses dépenses, notamment le paiement de la scolarité des enfants et l'amélioration des logements<sup>3</sup>.

Il est ressorti de l'évaluation, toutefois, que certains exploitants n'avaient pas adopté le système faute d'être suffisamment informés à son sujet. Le système push-pull permet de limiter les besoins en main d'œuvre en réduisant le temps de sarclage, ce qui n'empêche pas que certains agriculteurs ne disposaient pas de suffisamment de bras dans la famille – ou n'avaient pas les moyens d'en louer – pour établir le système dans leurs champs. De plus, les exploitants n'ayant qu'un bail annuel étaient réticents à investir dans une technologie qui ne produisait pas rapidement des avantages tangibles. Le manque de semences de *Desmodium* et leur prix élevé ont aussi ralenti le rythme de l'adoption<sup>3</sup>.

**En 2014, 70 000 petits exploitants agricoles** d'Éthiopie, du Kenya, de République-Unie de Tanzanie et d'Ouganda, – dont plus de la moitié de femmes – luttait contre la *Striga* au moyen de la plantation de cultures intercalaires de *Desmodium*<sup>4</sup>.

Le Centre international sur la phylogénétique et l'écologie des insectes et

ses partenaires ont adapté le système push-pull à des zones plus arides et au changement climatique, en identifiant et en intégrant dans le système un couple de plantes résistantes à la sécheresse: la desmodie comme culture intercalaire et la graminée *Brachiaria* comme plante de bordure<sup>5</sup>.

Le système push-pull est aujourd'hui considéré comme la base d'un mode de production intégrée cultures-élevage peu exigeant en intrants externes, qui pourrait améliorer considérablement la sécurité alimentaire en Afrique de l'Est. Selon une enquête récemment effectuée auprès de 900 exploitants agricoles, en Éthiopie, au Kenya et en République-Unie de Tanzanie, il existe un fort potentiel d'adoption du système, notamment parmi les femmes et tous ceux qui ont conscience des dégâts provoqués par la *Striga* et qui peuvent accéder facilement aux intrants nécessaires<sup>6</sup>.

Pour que le système push-pull devienne une composante permanente de l'agriculture de la région, les services publics de vulgarisation devront fournir un appui régulier, et des stratégies de vulgarisation à assise communautaire fondées notamment sur les écoles pratiques d'agriculture, les manifestations organisées par des agriculteurs-formateurs et les réunions publiques locales, devront être mises en œuvre<sup>3</sup>.

Il faudra aussi veiller à ce que l'offre de semences de *Desmodium* et de *Brachiaria*, ainsi que de semences de variétés et d'hybrides de maïs améliorés, soit suffisante.

**GRÂCE AU SYSTÈME  
PUSH-PULL,  
LA PRODUCTION  
LAITIÈRE  
A AUGMENTÉ  
DE 1 MILLION DE  
LITRES EN UN AN**

**Zone agroécologique**  
Mousson tropicale, systèmes  
irrigués et pluviaux  
**Céréale dominante** Riz

## 2 • Riz Asie

# De meilleurs rendements par des plantes prospères sur un sol sain

**Les producteurs de riz adoptent des pratiques de gestion de la culture, du sol et de l'eau qui, conjointement, produisent plus de riz et de revenus avec moins d'eau, d'engrais et de semences.**

**D**ans la majeure partie de l'Asie, le riz est traditionnellement cultivé de la manière suivante: on inonde d'abord les champs, puis on les laboure pour créer un sol boueux et mou qui recouvre souvent une couche tassée et dense empêchant l'eau de s'échapper vers les horizons profonds<sup>1</sup>. Les plants de riz, âgés de 20 à 60 jours, sont alors repiqués dans les champs en touffes de deux à quatre plants, réparties de manière aléatoire ou en lignes serrées. Pour éliminer les adventices, le riz est inondé en permanence par une lame d'eau épaisse de 5 à 15 cm, jusqu'à maturation de la culture<sup>2,3</sup>.

Ce système a permis de cultiver le riz pendant des millénaires avec des rendements faibles mais relativement stables<sup>4</sup>. Quand la Révolution verte a introduit les variétés à haut rendement, les engrais minéraux et les moyens chimiques de lutte phytosanitaire, la productivité par hectare de nombreuses rizières asiatiques a doublé en l'espace de 20 ans<sup>5</sup>.

Une série de pratiques de gestion de la culture, du sol et de l'eau, connue sous le nom de Système de riziculture intensive (SRI), répondent à une approche radicalement différente. Les plants de 8 à 15 jours sont repiqués brin par brin, souvent selon un quadrillage établissant un espacement de 25 x 25 cm entre les plants. Pour que le sol soit humide mais aéré, l'irrigation pratiquée de manière intermittente est entrecoupée de périodes d'assèchement de

### 5 premiers pays producteurs de riz en 2013 (millions de tonnes)

Indonésie	71,3
Viet nam	44,0
Thaïlande	38,8
Myanmar	28,0
Philippines	18,4

Source: FAOSTAT

trois à six jours. Le sarclage est réalisé à intervalles réguliers et le compost, le fumier de ferme et l'engrais vert sont préférés aux engrais minéraux. Dès que les plants fleurissent, une fine lame d'eau est maintenue dans le champ jusqu'à 20 jours avant la récolte<sup>3,6</sup>.

Depuis qu'il a été mis au point pour la première fois à Madagascar au début des années 80, le SRI a donné lieu à de nombreux essais qui ont montré que le système produisait des rendements supérieurs à ceux de la riziculture inondée traditionnelle, tout en consommant moins d'eau, de semences, d'engrais et de pesticide<sup>2</sup>. Il a été observé que, par rapport aux systèmes de riziculture inondée, le SRI avait permis d'améliorer

### Zones productrices de riz en Asie du Sud-Est

FAO/IIASA GAEZ

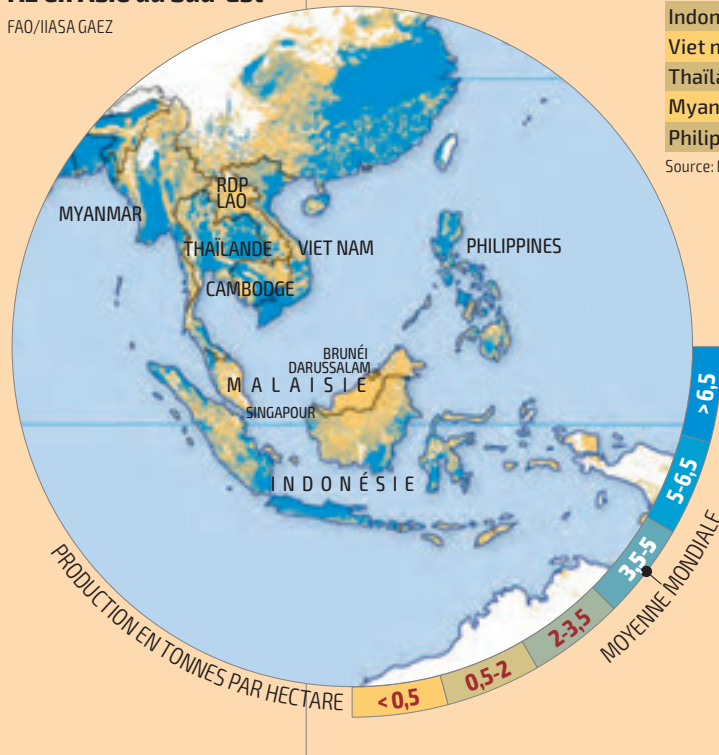
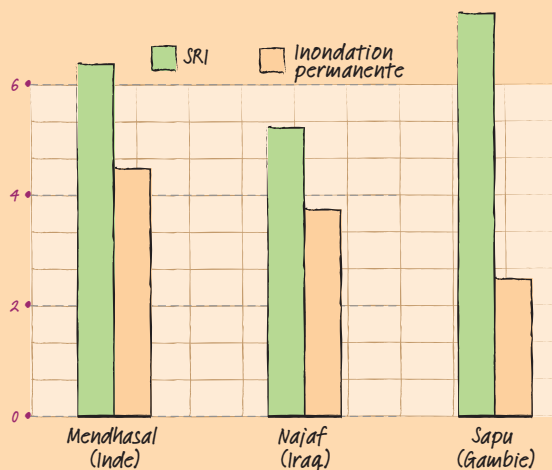




Figure 3.2 Rendements de la riziculture avec inondation permanente et du Système de riziculture intensive (SRI) (t/ha)



Source: Adapté des tableau 3, p.84<sup>7</sup>; tableau 9, p.127<sup>8</sup>; tableau 1, p.9<sup>9</sup>

rer les rendements, de 40 pour cent en Inde<sup>7</sup> et en Iraq<sup>8</sup> et de près de 200 pour cent en Gambie<sup>9</sup> (FIGURE 3.2). Lors d'essais comparatifs avec les pratiques améliorées actuellement mises en œuvre en Chine, les rendements obtenus avec les méthodes du SRI ont été supérieurs de 10 pour cent<sup>10</sup>. Le riz cultivé dans le cadre du SRI consomme de 25 à 47 pour cent d'eau de moins que les systèmes inondés en Inde<sup>11</sup> et en Chine<sup>12, 13</sup>, et demande 10 à 20 pour cent de semences en moins que les systèmes traditionnels du Népal<sup>14</sup>.

**Les gouvernements des principaux pays producteurs de riz – Cambodge, Chine, Indonésie et Viet Nam** – ont intégré les méthodes du SRI dans leurs programmes nationaux de sécurité alimentaire et des millions de producteurs de riz en ont adopté les pratiques<sup>2</sup>. Selon les rapports, plus d'un million de producteurs de riz vietnamiens appliquent le SRI; leur revenu par hectare a augmenté en moyenne de 110 USD, du fait d'une réduction des coûts de production de 40 pour cent<sup>15</sup>. Les agriculteurs ayant reçu une formation sur la gestion des éléments nutritifs en fonction du site au Viet Nam, ont bénéficié d'un surcroît

de revenu annuel allant jusqu'à 78 USD par ha<sup>16</sup>.

Dans le district de Morang, au Népal, un groupe d'exploitants agricoles a indiqué que le SRI faisait souvent doubler les rendements. De plus, le fait que le riz soit mûr avec parfois quatre semaines d'avance permettait d'économiser l'eau, limitait les risques de baisse de récolte et libérait la terre pour d'autres cultures<sup>14</sup>. Au Mali, dans la région de Tombouctou, les agriculteurs ayant adopté le SRI produisaient deux fois plus de riz par hectare que leurs voisins. Étant donné que les parcelles cultivées selon les méthodes du SRI pouvaient être récoltées 10 à 15 jours plus tôt, les planteurs ont abandonné les variétés à cycle court et à rendement relativement faible pour adopter des variétés à cycle de durée intermédiaire plus productives<sup>2</sup>.

Le Système de riziculture intensive pourrait permettre de résoudre beaucoup des problèmes auxquels le secteur rizicole est confronté. Compte tenu de la place importante qu'il accorde aux sources organiques de nutrition des plantes et à l'efficacité optimale de l'utilisation des engrais, le SRI constitue un moyen de réduire la pollution de l'environnement par les nitrates prove-

**DES INNOVATIONS  
TECHNIQUES  
POURRAIENT  
PERMETTRE  
DE RÉDUIRE LES  
BESOINS EN  
MAIN-D'ŒUVRE  
ASSOCIÉS AU SRI**

nant des rizières<sup>17</sup>. Il peut permettre aux exploitants agricoles de continuer à produire du riz dans les zones d'agriculture pluviale, par exemple le nord-est de la Thaïlande, qui sont de plus en plus fréquemment frappées par la sécheresse, et dans les principales zones de riziculture irriguée de la Chine, du Pakistan et de l'Inde, où, d'ici à 2025, il est prévu qu'il n'y ait plus assez d'eau disponible pour satisfaire la demande<sup>18</sup>.

En outre, le système pourrait contribuer à réduire considérablement les émissions de méthane imputables aux rizières irriguées<sup>19</sup>. À l'heure actuelle, plus de 90 pour cent du riz produit dans le monde proviennent de rizières inondées qui émettent chaque année une quantité de méthane représentant globalement quelque 625 millions de tonnes d'équivalent dioxyde de carbone<sup>20</sup>. Les émissions pourraient être réduites de près d'un sixième si toutes les rizières inondées en permanence étaient drainées au moins une fois pendant la saison de culture<sup>21</sup>. Or, le Système de riziculture intensive prévoit plusieurs drainages pendant la saison de culture<sup>6</sup>.

**Des scientifiques s'emploient à trouver des explications rigoureuses** au fait que le SRI utilise moins de ressources avec une productivité plus élevée, et se penchent aussi sur les façons dont les principes du SRI sont suivis par les agriculteurs<sup>3</sup>.

Un aspect important du SRI est l'amélioration de la santé du sol. L'irrigation intermittente et l'usage de compost et de paillis organiques contribuent considérablement à la multiplication des bactéries du sol aux effets bénéfiques<sup>22, 23</sup>. Étant donné que, dans le cadre du SRI, le riz est planté brin par brin dans un sol sain et aéré et qu'il dispose de plus d'espace pour absorber l'énergie solaire, il peut développer un chevelu racinaire plus fourni, qui favorisera la pousse d'un plus grand nombre de tiges<sup>24</sup>. Les plants peuvent aussi avoir des panicules plus longs, davantage de grains par panicule



et un pourcentage supérieur de grains mûrs<sup>7</sup>.

La hausse des rendements peut être due à une disponibilité accrue des éléments nutritifs et à des conditions de croissance plus satisfaisantes, favorisant le développement physiologique des plants<sup>9</sup>. Selon une explication plus générale, le SRI exploiterait le potentiel génétique du plant de riz d'une manière plus exhaustive<sup>2, 6</sup>. Cependant, un examen récent des rendements élevés attribués au SRI a conduit à mettre en évidence la grande diversité des pratiques du SRI, qui fait qu'il est difficile de tirer des conclusions générales sur les effets du SRI considéré comme un ensemble unique de technologies<sup>3</sup>.

Une grande partie du débat relatif au SRI porte sur ses besoins supplémen-



taires en main-d'œuvre. En Gambie, s'agissant du repiquage, le coût de la main-d'œuvre était deux à trois fois plus élevé que dans les systèmes de riziculture inondée conventionnelle<sup>9</sup>. Une étude récente réalisée en Inde a conclu que, compte tenu de ses très fortes exigences en main-d'œuvre, le système avait des coûts de production beaucoup plus élevés et était «réellement non économique»<sup>25</sup>.

Cependant, les partisans du SRI rétorquent que celui-ci génère des emplois. Au Tamil Nadu (Inde), la production dans le cadre du SRI s'est avérée être l'option qui convenait le mieux pour employer la main-d'œuvre familiale autrement oisive pendant la saison sèche<sup>11</sup>.

Les besoins en main-d'œuvre associés au SRI pourraient être réduits par cer-

taines innovations techniques, notamment l'emploi de bacs à semis pour simplifier la préparation et le repiquage des jeunes plants<sup>9</sup>. Une autre option consiste à éliminer entièrement le repiquage en le remplaçant par le semis direct, une technique qui, au Népal, a permis d'obtenir des rendements supérieurs de 50 pour cent aux rendements du riz repiqué<sup>14</sup>. Dans la province du Sichuan, en Chine, les jeunes plants sont repiqués sur des plates-bandes surélevées permanentes, non labourées et irriguées par rigoles, soit sous du paillis organique soit sous un film plastique<sup>26</sup>.

Plus d'un million de producteurs de riz vietnamiens appliquent les pratiques du SRI

**Zone agroécologique**  
Pluviale sur coteaux tropicaux  
**Céréale dominante** Maïs  
**Autres cultures/produits**  
Viande, lait, bois d'œuvre,  
bois de chauffe, fruits,  
légumineuses, légumes

**3 · Maïs/foresterie Amérique centrale**

# Plus de maïs et moins d'érosion sur les coteaux tropicaux

**Les agriculteurs ont mis au point un système de production défriche-paillis qui permet de préserver les arbres et les arbustes, et de multiplier par deux les rendements du maïs et du haricot.**

**D**ans le sud-ouest du Honduras, sur les pentes raides des coteaux, la méthode traditionnelle de culture sur brûlis du maïs, du haricot et d'autres cultures alimentaires a entraîné une déforestation et une dégradation de l'environnement à grande échelle. Un grand nombre d'agriculteurs ont abandonné la pratique venue du fond des âges qui consiste à laisser en jachère les champs défrichés, suffisamment longtemps pour que le couvert forestier repousse et que le sol retrouve son intégrité.

Étant donné qu'il n'y a plus d'arbres pour retenir le sol épuisé,

l'érosion s'est aggravée, ce qui a réduit la qualité de l'eau et, s'agissant des usagers en aval, sa disponibilité. Avec le déclin de la productivité agricole, la pauvreté rurale et la malnutrition ont progressé<sup>1,2</sup>.

Conscients du fait que la culture sur brûlis n'était pas durable, les exploitants agricoles du département hondurien de Lempira ont mis au point pour produire leurs cultures un système à bas coût contribuant à la conservation des ressources<sup>1</sup>. Au lieu de défricher la forêt et de brûler la végétation, ils ont adopté une approche «défriche-paillis». Ils

**5 premiers pays producteurs de maïs en 2013**

(millions de tonnes)

Mexique	22,66
Guatemala	1,73
El Salvador	0,87
Honduras	0,60
Nicaragua	0,55

Source: FAOSTAT

**Zones productrices de maïs en Amérique centrale**

FAO/IIASA GAEZ



commencent par semer à la volée le sorgho ou le haricot dans une zone de forêt secondaire naturellement régénérée et bien développée. Après la plantation, ils coupent et taillent sélectivement les arbres et les arbustes et étendent les feuilles et les petits rameaux sur la surface du sol pour créer une couche de paillis. Les arbres fournissant du bois d'œuvre prisé, des fruits et du bois de chauffe sont laissés sur pied<sup>1,2</sup>.

Une fois que le sorgho et les haricots ont été récoltés, le maïs est planté (le maïs n'est pas employé comme culture pionnière car le paillis freine la sortie de ses jeunes pousses). Les agriculteurs continuent à tailler les arbres de manière à ce que les cultures reçoivent suffisamment de lumière solaire, et les feuilles, les branches et les résidus de culture servent à maintenir une couverture semi-permanente sur le sol. Le sol n'est pas travaillé et l'épandage d'engrais n'est pratiqué qu'en cas de nécessité<sup>2</sup>.

**Au début des années 90, l'Organisation des Nations Unies** pour l'alimentation et l'agriculture a commencé à collaborer étroitement avec des groupements paysans locaux pour mettre au point et diffuser un ensemble de pratiques aujourd'hui connu sous le nom de système agroforestier défriche-paillis de Quesungual (Quesungual Slash-and-Mulch Agroforestry System – QSMAS)<sup>1</sup>. Depuis lors, le système a été adopté par plus de 6 000 agriculteurs à faible revenu, dans le sud-ouest du Honduras<sup>2</sup>.

Grâce au QSMAS, ces agriculteurs ont pu doubler la productivité de la culture itinérante – les rendements du maïs sont passés de 1,2 tonne à 2,5 tonnes par ha et les rendements du haricot de 325 à 800 kg<sup>1</sup>. L'accroissement de la productivité a contribué à améliorer la sécurité alimentaire et a permis aux exploitants agricoles de libérer de l'espace dans leurs champs pour expérimenter différentes options de production alimentaire. Près de la moitié des agriculteurs ayant adopté les pratiques du QSMAS emploient une partie de leurs terres et de leurs re-



Le système défriche-paillis a été adopté par plus de 6 000 petits exploitants agricoles

Avec le système QSMAS, les rendements du haricot passent de 325 à 800 kg par hectare



venus supplémentaires pour diversifier la production, notamment en intégrant la culture de jardins potagers familiaux et l'élevage<sup>2</sup>.

Les producteurs honduriens ont adhéré au système parce que celui-ci est fondé sur des pratiques agricoles autochtones familiaires, qu'il est plus productif et rentable que l'agriculture sur brûlis et qu'il présente un grand nombre d'autres avantages. En contribuant à retenir l'humidité du sol et à limiter l'érosion, le QSMAS a rendu les exploitations plus résilientes face aux épisodes climatiques extrêmes, tels que la sécheresse de 1997 et l'ouragan Mitch de 1998. Le système demande aussi moins de temps, s'agissant des façons culturales et du sarclage – un atout important dans une zone où le manque de main-d'œuvre constitue un frein majeur à l'amélioration de la productivité des exploitations.

Les communautés rurales bénéficient aussi d'une eau de meilleure qualité et plus disponible pendant la saison sèche, qui va de novembre à avril. Les arbres conservés sur les exploitations appliquant le QSMAS couvrent quelque 40 pour cent des besoins du ménage en bois de chauffe<sup>2</sup>.

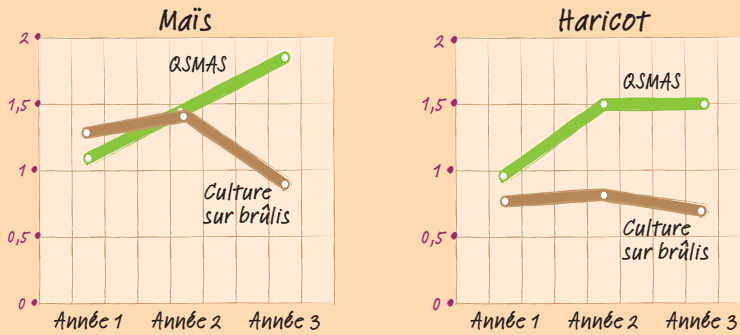
La réussite du QSMAS a aussi tenu au fait que les communautés locales et les agents de vulgarisation ont été encoura-

gés à mettre en commun leurs idées et à apprendre les uns des autres. Grâce à ce processus participatif, le QSMAS a eu des retombées au-delà des champs des agriculteurs. Dès qu'elles ont été sensibilisées aux problèmes créés par la déforestation, les institutions communautaires ont interdit la culture sur brûlis<sup>2</sup>.

**En 2005, le Centre international d'agriculture tropicale (CIAT)** a lancé un projet d'une durée de quatre ans dont le but était de poursuivre la mise au point du QSMAS et d'améliorer les moyens d'existence des populations rurales pauvres. Le Centre s'est efforcé de définir les principes fondamentaux des pratiques de gestion mises en œuvre dans le QSMAS, les avantages biophysiques qui rendent le système résilient, les facteurs sociaux qui favorisent son acceptation, et les autres zones de culture du maïs où le système pourrait être adopté.

Lors d'essais réalisés sur 15 parcelles, les différences entre la culture sur brûlis et la méthode défriche-paillis sont clairement apparues dans les mesures de la durabilité et de la résilience. S'agissant du QSMAS, le cycle de production comprend environ 10 à 12 ans de production de cultures annuelles, suivis de sept ans de jachère. En revanche, avec les cultures sur brûlis, les rendements commencent

Figure 3.3 Rendements moyens obtenus dans le système de culture sur brûlis et dans le système QSMAS, Somotillo (Nicaragua) (t/ha)



Source: Adapté du tableau 3,4, p.48<sup>2</sup>

à décliner dès la deuxième année de production [FIGURE 3.3]. Dans le contexte de l'agriculture sur brûlis, la teneur du sol en azote diminue au fil du temps, alors qu'elle augmente sensiblement dans les parcelles où le QSMAS est appliqué. En mesurant les émissions de méthane et d'oxyde nitreux ainsi que les stocks de carbone dans le sol et les arbres, le CIAT a également constaté que la contribution potentielle du QSMAS au réchauffement climatique mondial n'était que le quart de celle de la culture sur brûlis<sup>2</sup>.

Le système de production de maïs s'est étendu à d'autres régions du Honduras et en El Salvador, au Guatemala et au Nicaragua, où les exploitants agricoles ont souvent adapté les pratiques de base – taille progressive, couverture permanente et perturbation minimale du sol, et emploi efficient des engrais minéraux – aux conditions locales<sup>3</sup>.

Lors d'essais conduits au Guatemala, les rendements du maïs ont augmenté de 11 à 25 pour cent dans des sols enrichis par les résidus de taille du *Gliricidia sepium*. Les taux d'adoption ont atteint 88 pour cent dans les zones où le système a été promu<sup>2</sup>.

Au Nicaragua, où les agriculteurs se sont informés sur la méthode défriche-paillis en rendant visite à des agriculteurs honduriens, les rendements

du maïs sur les sites de validation ont été plus de deux fois supérieurs aux rendements de la culture sur brûlis, avec une augmentation de la rentabilité de 83 pour cent. En conséquence, en 2010, plus de la moitié des agriculteurs d'une communauté nicaraguayenne avaient adopté le QSMAS. Aujourd'hui, l'Institut de technologie agricole du Nicaragua promeut le système<sup>4</sup>.

**Le système agroforestier défriche-paillis Quesungual** est considéré comme une méthode susceptible de remplacer la culture sur brûlis dans les zones de coteaux subhumides tropicales<sup>3</sup>. Selon les estimations, il y a une probabilité de 50 pour cent de trouver des conditions analogues à celles des sites d'essais du QSMAS dans 18 pays d'Afrique, d'Asie et d'Amérique latine, les zones concernées les plus étendues étant situées au Brésil, en El Salvador et en République démocratique du Congo<sup>4</sup>.

LE SYSTÈME EST JUGÉ ADAPTÉ AUX ZONES TROPICALES DE COTEAUX SUBHUMIDES

**Zone agroécologique**

Pluviale ou irriguée, tempérée ou subtropicale

**Céréale dominante** Blé**Autres cultures**

Légumineuses à grains et légumineuses fourragères

**4 • Blé/légumineuses Dans le monde entier**

# Les avantages supplémentaires des légumineuses cultivées avant le blé

**Les producteurs de blé cultivent des légumineuses pour améliorer la santé du sol et l'enrichir naturellement en azote, ce qui contribue à stimuler les rendements.**

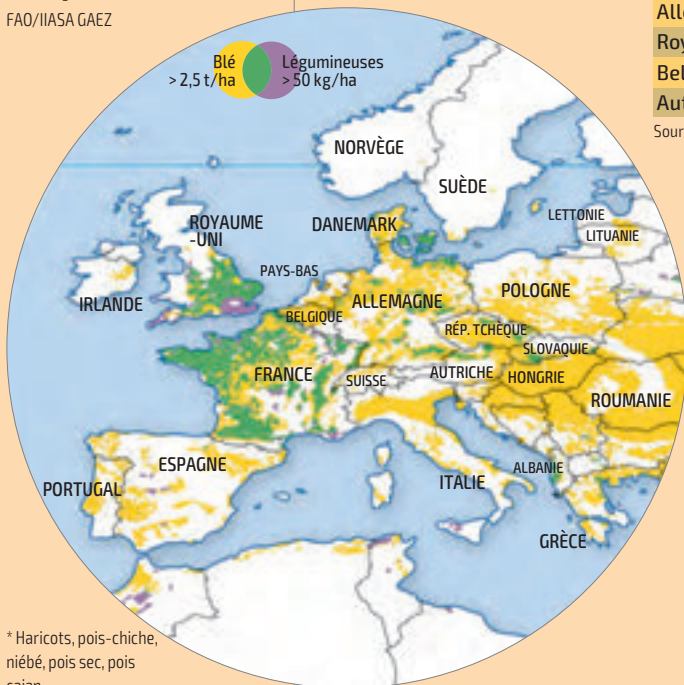
Une culture de légumineuses peut en elle-même constituer un excellent investissement. Dans la mesure où elles extraient de l'atmosphère 70 à 80 pour cent de l'azote dont elles ont besoin, grâce à la fixation biologique de l'azote dans leurs nodules racinaires, les légumineuses à grains et les légumineuses fourragères peuvent généralement se passer de l'apport d'engrais azotés pour produire des rendements optimaux<sup>1</sup>. Les légumineuses à grains, telles que les lentilles, qui sont riches en protéines, fibres alimentaires, vitamines, minéraux, antioxydants et phyto-œstrogènes<sup>2</sup> sont susceptibles d'être vendues pour générer des revenus. Les légu-

mineuses fourragères, notamment la luzerne, peuvent servir à nourrir les animaux sur l'exploitation.

Quand elles sont cultivées avant le blé, les légumineuses ont un autre avantage précieux – l'azote contenu dans leurs résidus permet de réduire la quantité d'engrais azoté qu'il faut fournir au blé<sup>3</sup>. À l'échelle mondiale, quelque 190 millions d'ha de légumineuses à grains apporteraient au sol une quantité d'azote comprise entre 5 et 7 millions de tonnes<sup>4</sup>. Grâce à cette «fertilisation naturelle», le blé cultivé après des légumineuses a un rendement plus élevé et est plus riche en protéines que le blé produit après une autre culture de blé<sup>5</sup>.

## Zones productrices de blé et de légumineuses\* en Europe occidentale

FAO/IIASA GAEZ



\* Haricots, pois-chiche, niébé, pois sec, pois cajan

### 5 premiers pays producteurs de blé en 2013

(millions de tonnes)

France	38,61
Allemagne	25,01
Royaume-Uni	11,92
Belgique	1,80
Autriche	1,59

Source: FAOSTAT

en Asie de l'Ouest et en Afrique du Nord. Typiquement, les rotations avec la culture de blé pluviale intègrent des légumineuses à grains telles que le pois chiche, la lentille et la fève et des légumineuses fourragères telles que la vesce, le trèfle d'Alexandrie et les espèces *Medicago*<sup>6-8</sup>.

Il est extrêmement important de bien choisir la légumineuse à intégrer dans un système donné de culture du blé, car différentes espèces et variétés de légumineuses cultivées au même endroit peuvent présenter des différences notables du point de vue de la production de matière sèche, de la fixation et de l'accumulation de l'azote et de la qualité des résidus. Les quantités d'azote rési-



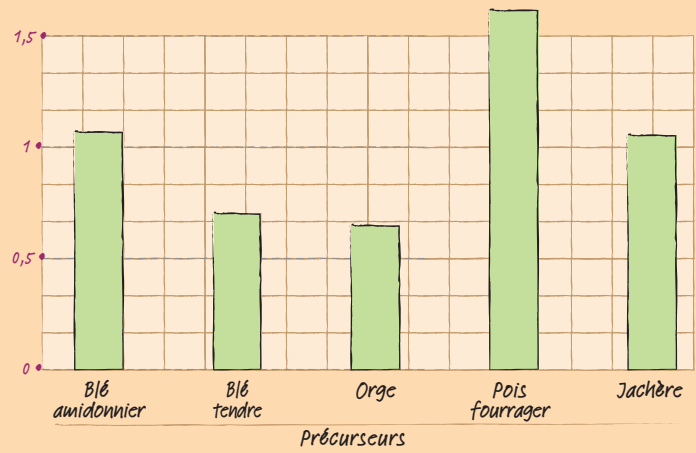
duel provenant de légumineuses à grains sont très variables mais sont susceptibles de couvrir de 20 à 40 pour cent des besoins du blé<sup>3</sup>. Les légumineuses à grains peuvent apporter au sol de 30 à 40 kg d'azote par ha, mais les légumineuses cultivées pour servir d'engrais vert ou de fourrage destinés aux activités d'élevage emmagasinent l'azote beaucoup plus rapidement et sont capables de fixer jusqu'à 300 kg d'azote par ha<sup>9</sup>.

**Les légumineuses améliorent l'assimilation des autres éléments nutritifs par le blé.** Le blé cultivé après des légumineuses tend à avoir un système racinaire plus sain que le blé cultivé après du blé, ce qui améliore son aptitude à utiliser les autres éléments nutritifs disponibles. Les racines du pois chiche et du pois cajan sécrètent des acides organiques susceptibles de mobiliser certaines formes de phosphore fixées par le sol et ainsi, de rendre le phosphore plus facilement assimilable<sup>5</sup>.

De plus, les légumineuses libèrent de l'hydrogène dans le sol à raison de 5 000 litres par ha et par jour. Sous-produit de la fixation de l'azote, l'hydrogène est oxydé par des microbes du sol entourant le système racinaire de la plante, ce qui entraîne des modifications de la biologie du sol propices au développement du blé<sup>1,5</sup>. Les légumineuses à enracinement profond, telles que le pois cajan, la dolique d'Égypte et le pois mascate, contribuent à améliorer la structure du sol, notamment du point de vue des biopores, et concourent ainsi au drainage et à l'aération<sup>10</sup>.

Le système de production dominant dans les zones arides consiste à semer le blé à l'automne et à laisser le champ en jachère pendant l'été. Au Moyen-Orient et en Afrique du Nord, les champs sont généralement laissés en jachère parce qu'il n'y a pas assez d'humidité dans le sol pour assurer la production de cultures d'été pluviales. Cependant, avec la mise au point de variétés de légumineuses à maturation précoce, les agriculteurs peuvent désormais remplacer

**Figure 3.4 Rendements du blé tendre produit à la suite de certaines cultures, région de Balé (Éthiopie) (t/ha)**



Source: Adapté du tableau 4, p.140<sup>17</sup>

les longues jachères par des cultures de légumineuses, ce qui permet d'utiliser les terres d'une manière plus productive<sup>11, 12</sup>. La culture de légumineuses alimentaires pendant l'été contribue à améliorer non seulement la fertilité du sol et l'efficacité de l'utilisation de l'eau, mais aussi le rendement de la culture de blé suivante<sup>13</sup>.

Sur les hauts plateaux d'Éthiopie, des légumes secs sont cultivés avec les céréales, soit en rotation soit en cultures intercalaires, pour répartir les risques liés à la sécheresse et améliorer la fertilité du sol<sup>14-16</sup>. Dans la région de Balé, les rendements obtenus avec la rotation blé-pois fourrager dépassent largement ceux des rotations blé-blé et blé-orge [FIGURE 3.4]<sup>17</sup>. Un système de rotation fève-blé a permis d'enregistrer des hausses de rendement du blé allant jusqu'à 77 pour cent avec une réduction des besoins en engrais azoté<sup>18</sup>. En République islamique d'Iran, on a montré que les cultures intercalaires associant céréales et légumineuses étaient plus productives et rentables que la monoculture de blé<sup>19</sup>.

**Parvenir à intégrer les légumineuses d'une manière qui soit doublement avantageuse** – c'est-à-dire, rentabilité de la culture de légumineuses et retombées positives maximales sur la culture



Après une culture de pois fourrager, les rendements du blé augmentent considérablement



Le soja planté dans des champs de blé sur pied est plus productif

**LE SEMIS EN LIGNE DU BLÉ À TRAVERS LES RÉSIDUS DE CULTURE DE LÉGUMINEUSES FAVORISE LA CONSERVATION DE LA STRUCTURE, DE L'HUMIDITÉ ET DES ÉLÉMENTS NUTRITIFS DU SOL**

de céréales suivante – ne va pas de soi pour un grand nombre d'exploitants agricoles. En général, la culture de légumineuses est jugée plus risquée que celle du blé ou d'autres céréales. Ce jugement est dû en partie au fait que les légumineuses sont souvent plus sensibles aux stress biotiques et abiotiques susceptibles de réduire les rendements et la biomasse des plantes. Si la légumineuse ne produit pas suffisamment de biomasse pour assurer un bon rendement et laisser de l'azote résiduel dans les résidus de tiges et de racines, le petit producteur perd des revenus pendant une campagne de production sans compensation pendant la suivante. En outre, les prix des légumineuses à grains sont souvent plus instables que ceux des céréales.

Étant donné qu'elles ont un cycle de croissance plus court, certaines légumineuses ne prélèvent pas autant d'eau dans le sol que le blé et laissent davantage d'humidité résiduelle au profit de la culture de blé. Cependant, cette humidité peut facilement disparaître si les résidus de légumineuses sont pâturés de façon intensive ou prélevés à d'autres fins. Il est donc recommandé de laisser les résidus afin qu'ils servent de couverture de surface et de semer le blé au

moyen d'un semoir, avec une perturbation minimale du sol<sup>5</sup>.

Pour limiter les risques, les producteurs sont encouragés à planter des légumineuses seulement quand il y a suffisamment d'humidité retenue dans le profil du sol ou suffisamment d'eau disponible par irrigation. Le semis précoce favorise la production de biomasse et la fixation de l'azote mais, d'un autre côté, est susceptible aussi d'intensifier la sensibilité aux agents pathogènes. Pour bénéficier de tous les avantages de la rotation blé-légumineuses, il faut laisser les résidus sur la surface du sol et semer tant les légumineuses que les céréales sans préparation préalable du sol, afin de favoriser la conservation de la structure, de l'eau et des éléments nutritifs du sol.

5. Maïs/élevage Amérique latine

# Des « pompes à éléments nutritifs » au profit du bétail et du maïs

Les agriculteurs brésiliens intègrent une graminée originaire d'Afrique tropicale dans un système de culture du maïs avec semis direct qui remplace la monoculture de soja.

**Zone agroécologique**  
Savane tropicale  
**Céréale dominante** Maïs  
**Autres cultures/produits**  
Viande, lait, fourrage, riz, millet, sorgho

L'élevage constitue un élément particulièrement important des systèmes de petite agriculture pratiqués dans les prairies de savane d'Amérique latine. Cependant, la production par unité animale dans les zones tropicales est largement inférieure à celle qu'affichent les régions tempérées. L'un des freins majeurs est la quantité et la qualité du fourrage, source d'alimentation du bétail essentielle dans les systèmes d'élevage de ruminants. Surpâturage, pratiques agricoles qui entraînent l'épuisement des éléments nutritifs du sol et absence d'espèces fourragères plus adaptées aux stress biotiques et abiotiques – tous ces facteurs concourent à la faible productivité. L'amélioration de la qualité et de la productivité du fourrage de prairie permettrait de faire progresser la production de viande et de lait<sup>1</sup>.

Un grand nombre d'éleveurs d'Amérique latine ont adopté un système d'élevage durable qui associe fourrage et céréales. L'une des composantes clés du système est une graminée originaire d'Afrique subsaharienne, la *Brachiaria*, qui pousse bien dans les sols pauvres, supporte le pâturage intensif et est relativement exempte de ravageurs et de maladies.

Grâce à ses racines puissantes et abondantes, la *Brachiaria* peut régénérer la structure du sol avec beaucoup d'efficacité et contribuer à éviter le compactage du sol, qui freine l'infiltration de l'eau de pluie et la croissance des racines. Elle est aussi capable de convertir le phosphore résiduel du sol en des formes organiques

facilement assimilables, au profit d'une culture ultérieure de maïs<sup>2</sup>.

À l'issue d'une recherche récente, le CIAT a constaté une autre caractéristique particulière de la *Brachiaria*: un mécanisme chimique propre aux racines de l'une des espèces de *Brachiaria* inhibe les émissions par le sol d'oxyde nitreux, un gaz principalement dérivé des engrais minéraux qui fait partie des plus redoutables gaz à effet de serre responsables du changement climatique<sup>3</sup>.

Cette graminée versatile est maintenant cultivée sur quelque 80 millions d'ha en Amérique latine<sup>4</sup>. Compte tenu de son adaptation aux sols peu fertiles, la *Brachiaria* a été employée

**5 premiers pays producteurs de maïs en 2013**

(millions de tonnes)

Brésil	80,54
Argentine	32,12
Paraguay	4,12
Venezuela	2,25
Colombie	1,77

Source: FAOSTAT

**Zones productrices de maïs en Amérique du Sud**

FAO/IIASA GAEZ

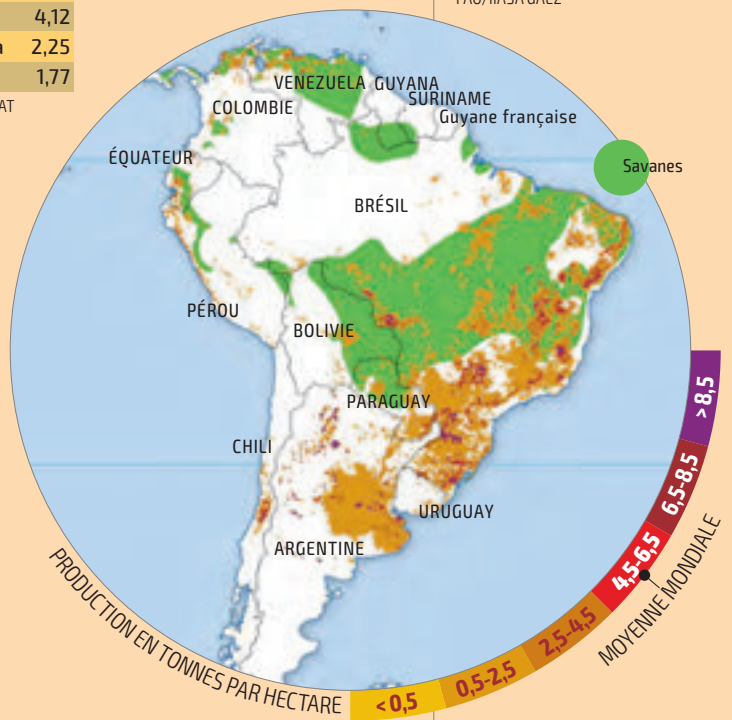
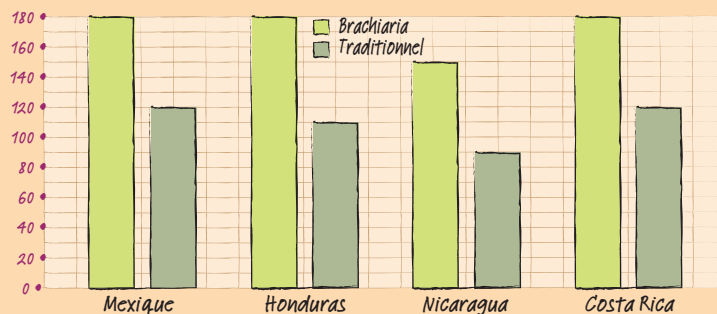


Figure 3.5 Productivité des bovins élevés sur pâturage traditionnel et sur pâturage de *Brachiaria* (kg/ha/an)



Source: Adapté du tableau 1<sup>5</sup>

dans les pâturages extensifs à faible consommation d'intrants, mais elle convient aussi aux prairies exploitées de manière intensive<sup>1</sup>.

Au Mexique et en Amérique centrale, la productivité des animaux nourris de *Brachiaria* peut être supérieure de 60 pour cent à celle des animaux consommant la végétation autochtone [FIGURE 3.5]. La valeur de la production supplémentaire a été estimée à 1 milliard d'USD par an<sup>5</sup>. Au Brésil, les bénéfices économiques annuels seraient de l'ordre de 4 milliards d'USD<sup>6</sup>.

**La rotation associant cultures annuelles et pâturage** est une pratique qui progresse dans l'écorégion des cerrados au Brésil, où les bovins constituent une source de revenus majeure pour de nombreux agriculteurs. Des années de mauvaise gestion des troupeaux, de surpâturage et de reconstitution insuffisante des stocks d'éléments nutritifs du sol ont entraîné une baisse de la productivité et de la rentabilité des systèmes d'élevage traditionnels<sup>7, 8</sup>.

Là où les écosystèmes naturels ont été remplacés par la monoculture intensive de soja, une grande partie des sols est compactée et sujette à l'érosion en cas de fortes précipitations. Dans ces conditions, les techniques traditionnelles de lutte contre l'érosion du sol, notamment les plantations le long des courbes de niveau, se sont révélées inefficaces<sup>9</sup>.

De nombreux producteurs ont donc adopté des systèmes de labour zéro, qui garantissent une meilleure couverture du sol et ont d'autres avantages environnementaux. Au début des années 90, le labour zéro était pratiqué sur moins de 10 pour cent des cerrados; en 1996, ce pourcentage était passé à 33 pour cent. Si l'on tient compte de l'extension de la zone cultivée, la surface totale exploitée selon le principe du labour zéro dans les cerrados a été multipliée par plus de 17<sup>10</sup>.

Selon les estimations, la moitié environ de la surface cultivée totale au Brésil est exploitée dans le cadre de systèmes de culture avec semis direct et paillis, qui permettent en général de produire trois cultures par an, toutes plantées sans interruption en semis direct<sup>11</sup>. Dans les cerrados, des systèmes diversifiés de ce type sont mis en œuvre sur plus de 4 millions d'ha, remplaçant la monoculture du soja avec labour, un système productif inefficace. Une séquence typique fait succéder au maïs (ou au riz) une autre céréale, telle que le millet ou le sorgho, ou bien la graminée *Eleusine*, associée à une culture intercalaire d'une espèce fourragère, par exemple la *Brachiaria*<sup>11, 12</sup>.

Les espèces fourragères font office de «pompes à éléments nutritifs», en produisant pendant la saison sèche de grandes quantités de biomasse qui peuvent être pâturées ou bien servir d'engrais vert. L'association du maïs et

APRÈS UNE MONOCULTURE INTENSIVE DE SOJA, LE SOL EST COMPACTÉ ET SUJET À L'ÉROSION



de la *Brachiaria* à la fin de la saison des pluies permet d'aller chercher l'eau du sol à plus de 2 m de profondeur et de stimuler une photosynthèse active plus tard pendant la saison sèche. Le résultat est une repousse végétative vigoureuse après les premières pluies de la saison suivante, ou après une pluie de la saison sèche, ce qui garantit une couverture permanente du sol<sup>13</sup>.

**Étant donné que la *Brachiaria* fournit un excellent fourrage**, les exploitants agricoles peuvent décider de convertir la parcelle en pâturage ou d'y produire des céréales une année de plus. Ces systèmes sont mis en œuvre dans des périmètres irrigués et dans les régions humides caractérisées par des pluies fortes et fréquentes qui rechargent les réserves d'eau profonde. Dans les meilleurs systèmes de culture avec semis direct et paillis, la production annuelle totale de matière sèche, au-dessus et en dessous de la surface du sol, se situe en moyenne autour de 30 tonnes par ha, contre 4 à 8 tonnes dans les systèmes de monoculture<sup>14</sup>.

Pour limiter la concurrence entre les cultures, des systèmes de cultures inter-

calaires novateurs ont été mis au point. Dans le système «Santa Fé» associant maïs et *Brachiaria*, conçu au Brésil, on plante la graminée plus tard ou plus profondément, afin qu'elle germe après le maïs. Les jeunes plants de *Brachiaria* poussent à l'ombre du maïs et n'entrent guère en compétition avec celui-ci. Une fois le maïs récolté, cependant, il y a moins d'ombre et le pâturage établi se développe très rapidement sur les résidus de maïs<sup>15</sup>.

Cette intégration étroite entre cultures fourragères et céréales permet de mieux utiliser la surface agricole totale et de faire un usage plus intensif des pâturages tout en limitant leur dégradation. Des systèmes similaires de culture avec semis direct et paillis font l'objet d'expérimentations dans d'autres parties du monde, notamment l'Afrique subsaharienne<sup>11</sup>.

La graminée *Brachiaria* contribue à régénérer la structure du sol et à éviter son compactage

**Zone agroécologique**

Subtropicale, mousson et systèmes irrigués

**Céréales dominantes** Riz, blé**Autres cultures**

Maïs, pommes de terre, canne à sucre, coton, légumineuses

**6 · Riz/blé Plaines indo-gangétiques**

# L'agriculture de conservation est la clé de la sécurité alimentaire

**Des techniques favorisant la conservation des ressources permettent d'obtenir de meilleurs rendements du blé tout en réduisant les coûts de production de 20 pour cent.**

**S'**étendant sur 2,25 millions de km carrés en Asie du Sud, depuis le Bangladesh jusqu'au Pakistan en passant par l'Inde et le Népal, les plaines indo-gangétiques sont à la fois la principale région productrice de riz et le grenier à blé de 1,8 milliard de personnes<sup>1, 2</sup>. Ces 30 dernières années, grâce essentiellement aux variétés améliorées et aux technologies de la Révolution verte, les exploitants agricoles de la région ont mis au point un système de rotation culturale qui permet de produire du riz pendant la mousson d'été et du blé pendant la courte saison d'hiver. Aujourd'hui, ce système riz-blé est pratiqué sur environ

13,5 millions d'ha et, selon les estimations, produit annuellement 80 millions de tonnes de riz et 70 millions de tonnes de blé<sup>3, 4</sup>.

Dans la zone la plus productive des plaines – le nord-ouest de l'Inde, notamment les États du Punjab et de l'Haryana et l'ouest de l'État de l'Uttar Pradesh – l'expansion de la surface affectée au système de production riz-blé et les augmentations de rendement de 3 pour cent par an ont permis à l'Inde de faire bondir sa production de blé, qui est pas-

**5 premiers pays producteurs de riz et de blé en 2013**

(millions de tonnes)

Inde	252,71
Bangladesh	52,76
Pakistan	34,03
Rép. Islamique d'Iran	16,54
Népal	6,23

Source: FAOSTAT

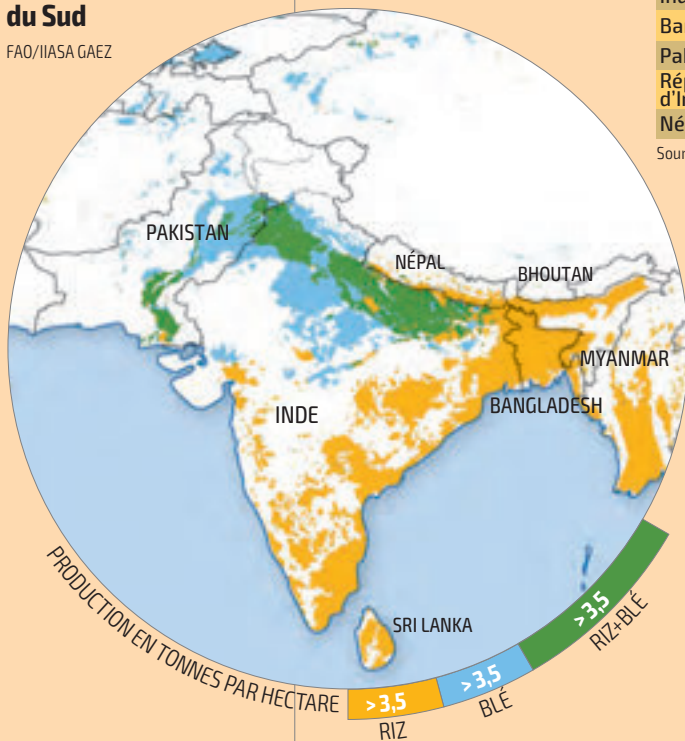
sée de 20 millions de tonnes en 1970 à 65 millions de tonnes en 1995. Vers cette époque, cependant, la productivité du riz et du blé a commencé à stagner, les rendements restant inférieurs de 30 à 70 pour cent aux rendements potentiels. Ce déclin a été attribué à une «fatigue du sol», due à des décennies de culture

intensive, à la baisse progressive de l'efficacité de l'utilisation des intrants, à l'épuisement des ressources en eau souterraine et à la hausse des températures<sup>5, 6</sup>.

Face à cette situation, le Consortium riz-blé, une initiative écorégionale des systèmes nationaux de recherche agricole et du Groupe consultatif pour la recherche agricole internationale (CGIAR), a lancé en 1995 une action concertée visant à promouvoir des techniques de céréaliculture favorisant la conservation des ressources, notamment: le labour zéro, le nivellement du sol au laser, le maintien des résidus de culture, la plantation sur plates-bandes permanentes, le

**Zones productrices de riz et de blé en Asie du Sud**

FAO/IIASA GAEZ





semis à sec du riz et le semis de surface du blé<sup>3</sup>.

En Inde et au Pakistan, la plupart de ces technologies ont été adoptées à un rythme «exponentiel»<sup>1, 5</sup>. Dans l'État de l'Haryana, par exemple, en 2002, on recensait 300 000 ha de blé cultivés selon le principe du labour zéro, alors qu'en 1997, ce système y était totalement inconnu. En 2005, sur l'ensemble du territoire de l'Inde, les techniques du labour zéro et du labour réduit étaient appliquées à la production de blé sur une superficie estimée à 1,6 million d'ha<sup>7</sup>.

**Dans l'est des plaines, un frein majeur à la productivité du blé** est le semis tardif. Le repiquage du riz débute en juillet mais se poursuit souvent jusqu'à la fin août, compte tenu de l'arrivée incertaine des pluies, du coût élevé du pompage de l'eau souterraine et des pénuries de main-d'œuvre. Ces retards entraînent une récolte tardive du riz, ce qui repousse le semis de la culture suivante, c'est-à-dire le blé, bien au-delà de la date de plantation optimale. De plus, un temps précieux est perdu en raison de l'habitude qu'ont les producteurs de labourer soigneusement les rizières récoltées, dont les sols sont souvent fortement

tassés par des mises en boue répétées et le poids des moissonneuses-batteuses<sup>1, 6</sup>.

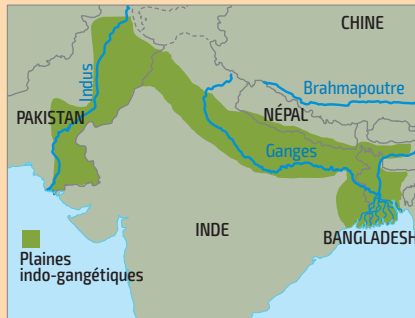
Dans un grand nombre de zones, la date de plantation du blé est désormais avancée grâce au semis direct – le blé est semé après la récolte du riz sans travail préalable du sol<sup>6, 8</sup>. Les semences et les engrais sont placés aux intervalles et aux profondeurs souhaités, avec une perturbation minimale du sol, au moyen de semoirs de fabrication locale montés sur un tracteur<sup>1</sup>.

Le labour zéro favorise une amélioration des rendements du blé, de l'ordre de 6 à 10 pour cent, car il permet de semer le blé en temps voulu, d'obtenir une meilleure récolte sur pied et de réaliser des économies non négligeables sur les opérations mécanisées, que ce soit du point de vue du temps passé ou du carburant consommé (FIGURE 3.6)<sup>9</sup>. Les agriculteurs économisent aussi sur l'eau un montant compris entre 50 USD et 70 USD par ha<sup>6, 10</sup>. Dans certaines zones, on a observé que la productivité de l'eau d'irrigation était supérieure, parfois de 65 pour cent, à celle que permettent les pratiques conventionnelles<sup>2</sup>.

La productivité de l'eau augmente encore davantage quand le blé est semé sur des plates-bandes surélevées, sans tra-

Le système riz-blé des plaines indo-gangétiques produit 150 millions de tonnes de céréales par an

S'étendant le long de la chaîne himalayenne, les plaines indo-gangétiques sont la principale région productrice de riz et le grenier à blé de 1,8 milliard de personnes



vail préalable du sol<sup>6</sup>. L'irrigation d'une rigole sur deux entre les plates-bandes permet d'économiser l'eau et aussi d'employer une eau plus saline – le sel se dépose sur les côtés des rigoles sèches, épargnant relativement complètement la zone racinaire<sup>11</sup>. La plantation du blé sur des plates-bandes surélevées présente d'autres avantages, notamment les suivants: limitation du risque de saturation en eau, réduction de la densité de semis et dégagement de plus d'espace pour placer l'engrais avec précision, procéder aux sarclages mécaniques et planter des cultures intercalaires et des cultures relais de haricot mungo<sup>12</sup>.

Dans l'ouest des plaines indo-gangétiques, l'application de la technique du labour zéro à la culture du blé a contribué à réduire les coûts de production par hectare de 20 pour cent et à accroître les revenus nets des producteurs de 28 pour

Le semis à sec du riz contribue à limiter l'utilisation d'eau, les coûts de l'énergie et les besoins en main-d'œuvre



cent, tout en endiguant les émissions de gaz à effet de serre<sup>13</sup>.

Dans l'est des plaines, où le drainage est insuffisant, certains agriculteurs, soit sèment le blé à la volée, soit, à l'aide d'un semoir à tambour, sèment des semences de blé préalablement mises à tremper, sur un sol non travaillé. Ce «semis de surface» est une technologie à bas coût particulièrement adaptée aux petits producteurs qui n'ont pas suffisamment de ressources pour travailler leurs terres; elle leur permet de cultiver du blé dans des champs qui, sinon, resteraient en jachère<sup>6, 11</sup>. Les rendements ne sont pas plus élevés que ceux du blé semé à la volée sur un sol préparé selon la méthode conventionnelle mais, du fait des économies réalisées sur les coûts du travail du sol, l'application de la technique génère un gain de revenus<sup>14</sup>.

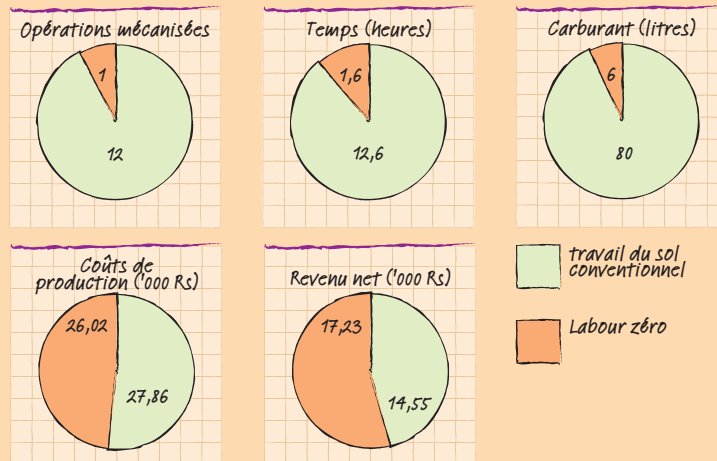
### S'agissant du riz, le Consortium a promu le remplacement

des cultivars à cycle long par des cultivars à cycle court et le semis à sec direct qui, en éliminant le repiquage, contribue à limiter l'utilisation d'eau, les coûts de l'énergie et les besoins en main-d'œuvre. Avec le semis à sec, les champs sont préparés en juin et une variété de riz à cycle court est semée après irrigation pour avoir le temps de s'établir avant le début de la mousson en juillet<sup>6</sup>.

Pendant la croissance de la culture, diverses approches sont encouragées en vue d'aider les agriculteurs, soit à améliorer la production de riz avec la même quantité d'eau, soit à employer moins d'eau sans compromettre les rendements. L'une de ces approches est la technique de l'humectation et assèchement alternés qui consiste à inonder la rizière puis à la laisser s'assécher avant de l'irriguer de nouveau. Une autre de ces approches est celle du riz aérobie qui consiste à semer la céréale directement sur le sol sec, puis à irriguer. Les deux approches permettent d'économiser l'eau à hauteur de 30 à 50 pour cent<sup>6</sup>. La plantation du riz sur des plates-bandes surélevées permet aussi d'obtenir des rendements sensiblement meilleurs<sup>12</sup>.



Figure 3.6 Données économiques relatives au labour zéro et au travail du sol conventionnel dans le contexte de la culture du blé, Haryana (Inde) (par ha)



Source: Adapté des tableaux 1 et 2, p.93<sup>9</sup>

Le nivellement du sol au laser fait partie des autres technologies favorisant la conservation des ressources qui ont été introduites dans les plaines indo-gangétiques. De nombreuses rizières ont des surfaces irrégulières, ce qui se traduit par des gaspillages d'eau, une germination sous-optimale et des rendements plus faibles. Traditionnellement, les producteurs nivelent leur champ au moyen de racloirs et de planches en bois. Aujourd'hui, des entrepreneurs privés proposent, à des prix abordables par les petits producteurs, les services de tracteurs guidés par laser qui réalisent un nivellement plus précis des rizières. Selon des études récemment conduites dans le nord-ouest de l'Inde, la technologie est beaucoup plus efficace que le nivellement traditionnel et permet de réduire l'irrigation de 40 pour cent, de renforcer l'efficacité des engrais et d'améliorer les rendements du riz et du blé de 5 à 10 pour cent. Elle apporte les mêmes avantages quelle que soit la taille de l'exploitation<sup>1, 14-16</sup>.

**Les agriculteurs ont aussi introduit de nouvelles rotations culturales** qui interrompent les cycles de croissance des insectes nuisibles et des adventices et sont bénéfiques pour la santé du sol.

Au Pakistan, dans la province du Punjab, les petits producteurs pratiquent une rotation associant le riz et le trèfle d'Alexandrie, une espèce fourragère qui améliore la fertilité du sol et fait disparaître les adventices susceptibles d'infester les cultures de céréales suivantes<sup>17</sup>. Dans l'est des plaines, où les champs restent généralement en jachère pendant 80 jours après la récolte du blé, une culture estivale de haricot mungo sur un sol non préparé au préalable produit 1,45 tonne par ha, soit l'équivalent de 745 USD. De plus, ce haricot enrichit le sol en azote grâce au phénomène de la fixation biologique<sup>14</sup>.

Dans le souci de réduire le gaspillage d'engrais, le Consortium riz-blé a promu la gestion de l'azote adaptée aux besoins, avec l'introduction d'un tableau de couleurs des feuilles permettant de déterminer le meilleur moment de procéder aux épandages d'engrais. Les tableaux initialement conçus pour le riz ont été spontanément adaptés au blé par les agriculteurs<sup>18</sup>. À l'aide des tableaux, ils ont réduit l'apport d'engrais de 25 pour cent sans enregistrer de baisse de rendement<sup>1</sup>.

Selon les enquêtes conduites en 2009 dans des villages des plaines, un ménage agricole sur trois avait adopté au

**DES ENTREPRENEURS PRIVÉS EFFECTUENT LE NIVELLEMENT AU LASER, À DES PRIX ABORDABLES POUR LES PETITS PRODUCTEURS**

moins une technologie contribuant à la conservation des ressources, les taux les plus élevés – voisins de 50 pour cent – étant enregistrés dans le nord-ouest. Les exploitants s'étaient informés sur les technologies auprès de sources variées - notamment, autres agriculteurs et fabricants de matériel - et la plupart d'entre eux les avaient intégrées dans leurs pratiques traditionnelles de gestion des cultures. Dans le nord-est de l'Inde, les semoirs adaptés aux sols non labourés étaient le matériel de machinisme agricole le plus courant après les tracteurs<sup>18</sup>. Leur taux d'adoption impressionnant s'explique par la mise à disposition rapide de semoirs mis au point par le secteur privé avec un appui important des gouvernements des États et des collectivités locales<sup>7</sup>.

L'impact des pratiques et des technologies du modèle Produire plus avec moins est illustré par les augmentations récentes de la production de blé en Inde. Après les mauvais rendements enregistrés entre 2003 et 2007 dans l'État du Punjab, par exemple, la productivité du blé a progressé régulièrement et, en 2012, la production moyenne a dépassé 5 tonnes par ha<sup>19</sup>. En 2014, la production totale de blé en Inde a atteint la quantité record de 96 millions de tonnes<sup>4</sup>.

**Il reste encore beaucoup à faire pour parvenir à une transition générale** débouchant sur l'intensification durable de la céréaliculture dans les plaines indogangétiques, mais les enjeux sont colossaux. Jusqu'à aujourd'hui, dans le système riz-blé, l'adoption du labour zéro concerne essentiellement la culture du blé. L'application de cette technique à la riziculture permettrait de réduire un peu plus le recours à l'irrigation, sachant qu'il faut de toute urgence économiser l'eau<sup>7</sup>. De nombreux essais de culture du riz avec semis à sec sur sol non labouré ont montré que la mise en boue n'était pas essentielle à l'obtention de bons rendements<sup>12</sup>.

Plusieurs stratégies ont été proposées pour promouvoir l'adoption du semis à sec dans le secteur de la riziculture, notamment la plantation de cultures intercalaires de *Sesbania*, une technique qui contribue à réduire les infestations d'adventices et à améliorer les rendements des rizières non mises en boue<sup>9</sup>. Cependant, l'adoption à grande échelle du semis à sec est freinée par le fait que les exploitants agricoles n'ont pas accès au matériel nécessaire. Dans le nord-est

Le labour zéro à l'œuvre: un semoir «Happy Seeder» plante des semences de blé à travers une épaisse couverture de résidus de culture de riz



de l'Inde, une étude récente a montré que 57 pour cent des agriculteurs pratiquaient le semis à sec en 2012. Cependant, étant donné que seuls 10 pour cent d'entre eux possédaient des semoirs adaptés, la plupart étaient tributaires de prestataires de services. Un grand nombre d'agriculteurs ne pouvaient pas appliquer la technique du semis à sec parce que la demande de semoirs était supérieure à l'offre<sup>20</sup>.

Un basculement décisif en faveur des pratiques de l'agriculture de conservation dans le secteur de la riziculture – notamment le maintien de résidus de récolte – créerait des effets de synergie bénéfiques pour la culture des deux céréales. Alors que, s'agissant du blé, de nombreux producteurs ont adopté la technique du semis en ligne à travers les résidus de la culture de riz précédente, la plupart continuent à faire brûler la paille de riz après la récolte, ce qui entraîne une grave pollution de l'air<sup>19</sup>.

Afin de décourager le brûlage et d'encourager le labour zéro associé au maintien de paillis, les gouvernements des États du Punjab et de l'Haryana s'emploient aujourd'hui à développer à grande échelle un nouveau matériel technologique, le «Happy Seeder», un semoir qui est capable de semer le blé

à travers une épaisse couverture de résidus de riz<sup>21, 22</sup>. L'accélération de l'adoption des technologies favorisant la conservation des ressources passe aussi par des améliorations dans les domaines suivants: appui politique, connaissances techniques, infrastructures et accès aux marchés d'intrants et aux marchés de produits. Il faut suivre une approche systémique, au lieu de privilégier des technologies centrées sur les produits qui favorisent une utilisation intensive et non durable de la main d'œuvre, de l'eau et de l'énergie. La recherche d'une convergence entre des technologies et des pratiques à l'efficacité démontrée permettrait de tirer parti de tous les avantages de l'agriculture de conservation<sup>23</sup>.

**Enfin, il est peut-être temps** pour les agriculteurs des plaines indo-gangétiques de poursuivre la diversification de la production et de ne plus se limiter à la culture du riz et du blé. L'abandon de la monoculture de céréales au profit d'une diversification intégrant d'autres cultures à forte valeur permettrait de réduire les pressions biotiques et abiotiques qui s'exercent sur le système et de favoriser la conservation des ressources en sol et en eau<sup>6, 24</sup>. La diversification des cultures offre aussi aux petits exploitants de nouvelles sources de revenus plus intéressantes<sup>7</sup>. Dans le nord-ouest, la canne à sucre, le haricot mungo, la menthe, le maïs et les pommes de terre sont maintenant cultivés dans le cadre de rotations intégrées dans le système riz-blé. Dans l'est des plaines, où les hivers sont plus courts, on observe une tendance croissante à remplacer entièrement le blé par la pomme de terre et le maïs qui sont des cultures plus lucratives<sup>1</sup>.

**LA DIVERSIFICATION  
DES CULTURES  
OFFRE AUX PETITS  
AGRICULTEURS DE  
NOUVELLES SOURCES  
DE REVENUS PLUS  
INTÉRESSANTES**



**Zone agroécologique**

Pluviale ou irriguée, tempérée ou subtropicale

**Céréale dominante** Maïs**Autres cultures**

Légumineuses à grains et légumineuses fourragères

**7 • Maïs/légumineuses Dans le monde entier**

# Le système traditionnel favorise une utilisation plus productive des terres

**Il est fréquent de voir pois cajan, niébé, arachide et pois sabre dans les champs de maïs. Compte tenu de leur forte productivité, les systèmes maïs-légumineuses conviennent particulièrement aux petits exploitants agricoles.**

Il existe trois configurations de base des systèmes maïs-légumineuses. La première consiste en des cultures intercalaires de maïs et de légumineuses plantés simultanément dans la même rangée ou en rangées alternées. La deuxième approche est la culture relais dont le principe est de planter le maïs et les légumineuses à des dates décalées de sorte qu'ils poussent côte à côte pendant au moins une partie de leur cycle de développement. Enfin, le maïs et les légumineuses peuvent aussi être produits comme des monocultures en rotation, le maïs étant semé dans le même champ que les légumineuses après que celles-ci ont été récoltées.

Des systèmes de ce type sont fréquemment mis en œuvre dans l'ensemble du monde en déve-

loppement. Les légumineuses souvent cultivées sont le haricot, le pois cajan, le niébé, l'arachide et le soja, qui sont essentiellement produits à des fins alimentaires, et les légumineuses non comestibles destinées aux animaux, notamment le pois mascate et le pois sabre. Toutes fixent l'azote dans le sol et sont utiles comme sources de résidus susceptibles de servir de paillis sur la surface du sol.

## La plantation de cultures intercalaires maïs-haricot est une pratique traditionnelle des petits agriculteurs en Amérique latine, en particulier dans les

### 5 premiers pays producteurs de maïs en 2013

(millions de tonnes)

Nigéria	10,40
Ghana	1,76
Burkina Faso	1,71
Mali	1,50
Bénin	1,35

Source: FAOSTAT

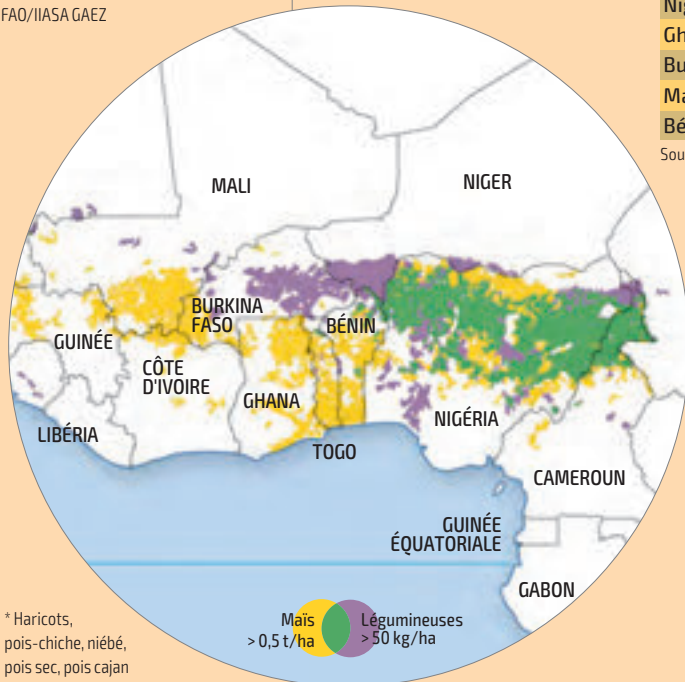
zones d'altitude où les terres sont rares. Quasiment 100 pour cent des haricots au Pérou, et quelque 80 pour cent en Équateur, sont plantés avec du maïs. Dans les zones d'Amérique centrale où les ressources en terres sont limitées et les précipitations peu abondantes, le maïs

est souvent produit en cultures intercalaires avec la féverole<sup>1,2</sup>.

En général, lorsqu'ils sont produits en cultures intercalaires, le maïs et le haricot ont des rendements inférieurs à leurs rendements respectifs en monoculture. Il est ressorti de certaines études que, en monoculture, le maïs produisait 5,3 tonnes par ha et, en cultures intercalaires, 5,2 tonnes avec des variétés naines de haricot et 3,7 tonnes avec des variétés grimpantes de haricot<sup>3</sup>. Cependant, dans les systèmes de cultures intercalaires, les coûts de production par unité de produit sont généralement plus faibles et, les prix de vente du haricot

## Zones productrices de maïs et de légumineuses\* en Afrique de l'Ouest

FAO/IIASA GAEZ



\* Haricots, pois-chiche, niébé, pois sec, pois cajan



étant le quadruple de celui du maïs, les revenus des exploitants agricoles sont plus élevés et plus stables<sup>4</sup>.

Compte tenu de sa tolérance à la sécheresse, le pois cajan est souvent produit en cultures intercalaires avec des céréales dans les petites exploitations agricoles d'Asie, d'Afrique et des Caraïbes. En outre, le pois cajan a un enracinement profond, si bien qu'il n'entre pas en compétition avec le maïs pour l'eau, et il a une faible vigueur au démarrage, ce qui laisse au maïs le temps de s'établir convenablement.

À l'instar de ce qui se passe avec le haricot, le maïs et le pois cajan plantés simultanément produisent légèrement moins que lorsqu'ils sont cultivés seuls. Cependant, le rendement global des cultures intercalaires dépasse celui qui aurait été obtenu avec les monocultures correspondantes – une étude approfondie réalisée en Afrique du Sud sur le système de cultures intercalaires maïs-pois cajan a conclu que le système était près de deux fois plus productif que les monocultures par unité de surface<sup>5</sup>. En Inde et à Sri Lanka, dans les systèmes maïs-pois cajan, la plantation de quatre rangées de maïs pour deux rangées de pois cajan permet de dégager les meilleurs bénéfices nets<sup>6</sup>.

Il ressort d'une étude, conduite sur trois ans dans le centre du Malawi, que les cultures intercalaires de maïs et de pois cajan appliquant les principes de l'agriculture de conservation produisaient près du double de biomasse végétative et, pendant les années les plus sèches, 33 pour cent de maïs de

plus que la monoculture de maïs conventionnelle avec labour<sup>7</sup>. Au Mozambique, la plantation de cultures

intercalaires maïs-légumineuses et le labour zéro pratiqués sur le long terme ont favorisé l'infiltration de cinq fois plus d'eau de pluie, du fait de la production de biomasse de bonne qualité employée en paillis<sup>8</sup>. Au Panama, la culture de maïs sur du paillis de pois sabre a permis aux agriculteurs d'économiser 84 kg d'apport d'azote par ha<sup>9</sup>.

Le système de culture relais est pratiqué au Brésil, en Colombie et en Amérique centrale, où le maïs est planté pendant la période mai-juin et le haricot semé entre les plants de maïs en août-septembre. De cette manière, le maïs se développe suffisamment pour servir de tuteur au haricot grimpant<sup>3</sup>. Dans le nord du Ghana, la plantation de niébé dans les champs, de trois à six semaines avant le maïs, permet de disposer d'un aliment nutritif à un moment où les autres cultures ne sont pas encore arrivées à maturité et, avec la conservation des résidus, d'apporter de l'azote au sol<sup>10</sup>.

**Les rotations maïs-légumineuses contribuent à la préservation de la fertilité du sol.** Au Mexique, les petits exploitants agricoles ont mis au point un système dans lequel du pois mascate est semé dans le maïs «hors saison», ce qui se traduit par une hausse sensible du pH du sol et de sa teneur en matière organique et en azote. Cette amélioration entraîne une augmentation de 25 pour cent du rendement de la culture de maïs

La récolte d'arachide par les agriculteurs africains est estimée à 11,5 millions de tonnes par an

**PAR UNITÉ DE SURFACE, LE SYSTÈME DE CULTURES INTERCALAIRES MAÏS-POIS CAJAN EST PRÈS DE DEUX FOIS PLUS PRODUCTIF QUE LA MONOCULTURE**

**LA ROTATION  
MAÏS-SOJA PERMET  
DE RÉDUIRE  
L'ÉROSION DU SOL  
ET DE FREINER  
LES ATTAQUES DE  
RAVAGEURS SUR LES  
DEUX CULTURES**

suivante. L'étude a conclu que la rotation culturale était plus efficace que le système de cultures intercalaires<sup>11</sup>.

Il est apparu dans un programme d'intensification durable des systèmes de culture maïs-légumineuses en Afrique orientale et australe dirigé par le CIMMYT que, dans le cadre de l'agriculture de conservation, les plus fortes progressions du rendement du maïs étaient obtenues quand la céréale était produite en rotation avec des légumineuses telles que le haricot, le niébé et le soja. Au Malawi, les pratiques agricoles habituelles produisaient un rendement du maïs de 3,7 tonnes par ha; avec l'agriculture de conservation, le rendement passait à 3,9 tonnes; avec l'agriculture de conservation et après une culture de soja, il atteignait 4,5 tonnes |FIGURE 3.7|<sup>12</sup>.

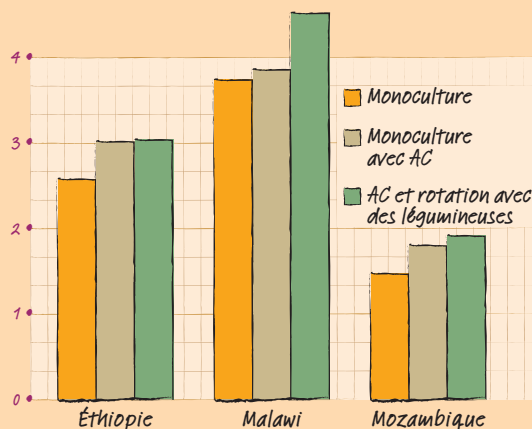
Un système de rotation maïs-soja particulièrement productif est mis en œuvre au Nigéria. Cultivé avant le maïs, le soja limite les infestations de *Striga* en induisant une germination prématurée de ses semences. Le soja produit environ 2,5 tonnes de grains et 2,5 tonnes de fourrage par ha, ainsi que des résidus qui fournissent 10 à 22 kg d'azote par ha. L'azote est utilisé par le maïs qui est cultivé à la suite et qui produit des rendements 2,3 fois supérieurs à ceux que l'on obtient en monoculture.

La production de soja des exploitants nigériens a bondi, passant de moins de 60 000 tonnes en 1984 à 600 000 tonnes en 2013<sup>13</sup>, portée par le fait que le système génère un revenu brut supérieur de 50 à 70 pour cent à celui de la production continue de maïs. Au Nigéria, la hausse des rendements du soja et l'expansion de la surface affectée à cette culture dans la zone de savane sèche ont permis d'accroître la quantité supplémentaire d'azote fixé dans le sol, pour un montant évalué à 44 millions d'USD par an<sup>14</sup>.

Au Brésil, le soja est souvent cultivé en rotation avec le maïs. Dans les états du Mato Grosso et du Paraná, dans le sud du pays, le maïs est une culture plantée en second lieu à la fin de la saison sur le paillis du soja à maturation précoce, ce qui contribue à mettre davantage d'humidité à la disposition du maïs et à limiter l'érosion du sol. La rotation permet de produire deux cultures dans le même champ et de freiner les attaques de ravageurs sur les deux cultures, ce qui garantit une production plus durable et une amélioration des revenus et des moyens d'existence des exploitants agricoles<sup>15</sup>.

**Les avantages des systèmes maïs-légumineuses sont bien connus**, cependant, les petits agriculteurs qui dépendent des

Figure 3.7 Impact de l'agriculture de conservation (AC) et de la rotation avec des légumineuses sur le rendement du maïs (t/ha)



Source: Adapté des tableaux 1 à 3, p.380<sup>12</sup>



cultures vivrières pour assurer la sécurité alimentaire du ménage – notamment en Afrique – répugnent souvent à affecter leur terre pendant un semestre ou une année entière à la production de légumineuses non comestibles, quels qu'en soient les avantages à long terme<sup>16</sup>. En Afrique, l'adoption de ces systèmes est également freinée par des marchés peu adaptés à l'absorption de cultures produites en rotation, par le manque de semences et par la perception que les agriculteurs ont des risques<sup>17</sup>.

Les gouvernements peuvent investir dans la mise au point de systèmes maïs-légumineuses adaptés aux petits producteurs, en considérant qu'il s'agit d'un moyen de parvenir à la sécurité alimentaire, d'accroître les revenus agricoles et d'améliorer la santé du sol. Dans la mesure où les légumineuses non comestibles telles que le pois mascate présentent un potentiel très élevé de fixation du carbone, des financements destinés à l'atténuation du changement climatique pourraient être mis à disposition pour encourager l'adoption de ces cultures par les petits agriculteurs.

En général, les variétés de maïs et de légumineuses qui produisent des rendements élevés en monoculture produisent aussi des rendements élevés dans les systèmes de cultures intercalaires. Cependant, on a observé des différences entre variétés s'agissant de leur adaptation aux systèmes maïs-légumineuses. La sélection végétale devrait viser à exploiter les interactions productives, par exemple, privilégier un maïs à forte tige susceptible de supporter un poids plus important de haricots. En outre, les systèmes maïs-légumineuses présentent généralement une adaptation marquée à un site spécifique. C'est pourquoi, le système et ses variantes doivent faire l'objet d'une validation soignée dans les champs des agriculteurs.

**Les variétés de maïs à forte tige supportent un poids plus important de haricot grim pant**

**Zone agroécologique**

Riziculture de mousson

**Céréale dominante** Riz**Autres produits**

Poissons, crustacés, escargots

**8 · Riz/aquaculture Asie**

# Des rizières plus productives

**De nombreux producteurs de riz élèvent du poisson dans les rizières pour produire des aliments, lutter contre les ravageurs et fertiliser la culture. Les résultats: baisse des coûts, accroissement des rendements et amélioration de la nutrition du ménage.**

Un champ de riz recouvert d'eau en permanence est plus qu'une culture – c'est un écosystème grouillant de vie, qui abrite notamment des canards, des poissons, des grenouilles, des crevettes, des escargots et des dizaines d'autres organismes aquatiques. Pendant des milliers d'années, les producteurs de riz ont puisé dans ce foisonnement de biodiversité aquatique pour rapporter aux membres du ménage une vaste gamme d'aliments riches en énergie et en nutriments. L'écosystème agricole traditionnel riz-poisson fournissait les micronutriments, les protéines et

les acides gras essentiels, qui tiennent une place particulièrement importante dans l'alimentation des femmes enceintes et des jeunes enfants<sup>1</sup>.

Pendant les années 60 et 1970, les systèmes agricoles traditionnels associant riziculture et aquaculture ont commencé à disparaître, en même temps que des politiques favorisant la culture des variétés de riz modernes à haut rendement – et un accroissement correspondant de la consommation de produits agrochimiques – transformaient l'agriculture asiatique. Les conséquences sociales et environnementales de cette évolution devenant plus apparentes, on observe que l'élevage de poisson dans les rizières suscite un regain d'intérêt<sup>2, 3</sup>.

Il existe deux grands systèmes de production riz-poisson. Le plus courant est le système de production concurrente qui consiste à produire le poisson et le riz dans le même champ au même moment; le système de production par rotation, dans lequel le riz et le poisson sont produits à des moments différents, est moins répandu. Tant les variétés modernes à tige courte que les variétés traditionnelles à tige longue peuvent être cultivées, et quasiment toutes les espèces importantes de poisson d'aquaculture d'eau douce et plusieurs espèces de crustacés peuvent être produites<sup>2, 4</sup>.

En Chine, les producteurs de riz élèvent le poisson dans des tranchées pouvant faire 1 m de large et 80 cm de profondeur, qui sont creusées d'un bord à l'autre de la rizière et tout autour d'elle

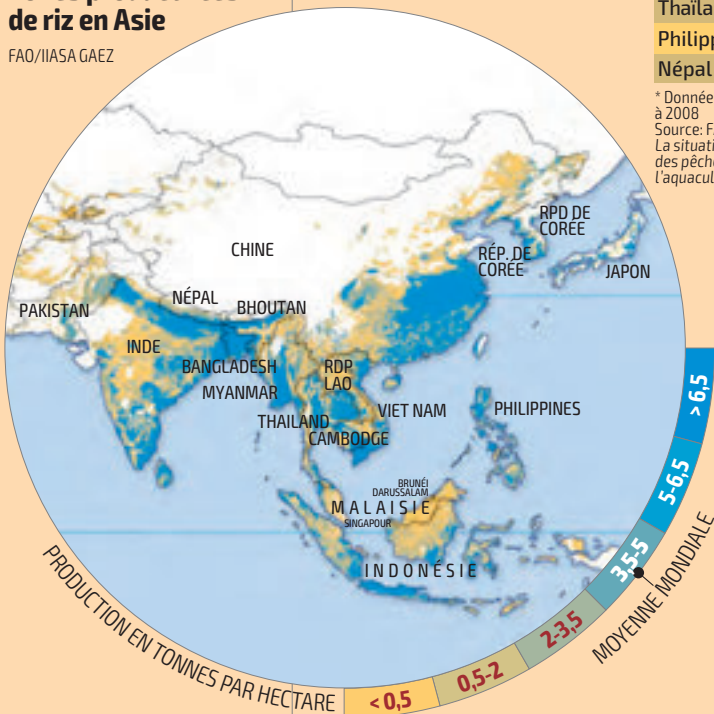
**Production de l'aquaculture en rizière en 2010**  
(tonnes)

Chine	1 200 000
Indonésie	92 000
Thaïlande	21 000*
Philippines	150
Népal	45

\* Données relatives à 2008  
Source: FAO, 2012.  
La situation mondiale des pêches et de l'aquaculture 2012. Rome.

**Zones productrices de riz en Asie**

FAO/IIASA GAEZ







et qui occupent quelque 20 pour cent de sa surface. Des écrans de bambou ou des filets empêchent le poisson de s'échapper. Dans les systèmes traditionnels riz-poisson, le poisson se nourrit des adventices et des sous-produits de la transformation des cultures, cependant, une production plus intensive demande généralement un apport d'aliments commerciaux pour nourrir le poisson. Avec une bonne gestion, un hectare de rizière peut produire chaque année de 225 à 750 kg de poissons ou de crustacés et, parallèlement, 7,5 à 9 tonnes de riz<sup>5</sup>.

**L'association de différentes espèces végétales et animales** rend les systèmes riz-poisson productifs et riches du point de vue nutritionnel. Les interactions entre espèces végétales et espèces animales qui contribuent à améliorer la durabilité de la production jouent un rôle tout aussi important. Il est ressorti d'études réalisées en Chine que l'incidence de la pyrale du riz était inférieure d'environ 50 pour cent dans les champs associant la production de riz et celle de poisson. À elle toute seule, une carpe commune peut consommer jusqu'à 1 000 larves d'escargots ampullaires par jour; la carpe herbivore se nourrit du champignon responsable du flétrissement des gaines du riz<sup>2</sup>.

La lutte contre les adventices est généralement simplifiée dans les rizières où un système riz-poisson est mis en

œuvre, parce que l'eau y est plus profonde que dans les autres rizières. En outre, le poisson peut être plus efficace que l'herbicide ou le sarclage manuel<sup>2</sup>. Forts du rôle joué par le poisson dans la protection intégrée, les systèmes riz-poisson produisent des rendements comparables, voire supérieurs, à ceux de la monoculture de riz, tout en consommant jusqu'à 68 pour cent de pesticides en moins. Ce résultat contribue à la préservation de la qualité de l'eau et à la conservation de la biodiversité<sup>6</sup>.

Dans le cadre du système, les interactions entre espèces végétales et animales favorisent aussi l'amélioration de la fertilité du sol. Les éléments nutritifs des aliments du poisson sont recyclés dans les champs par les déjections et mis immédiatement à la disposition de la culture de riz. Des rapports en provenance de Chine, d'Indonésie et des Philippines font valoir que les producteurs qui appliquent le système riz-poisson dépensent moins en engrais<sup>2</sup>.

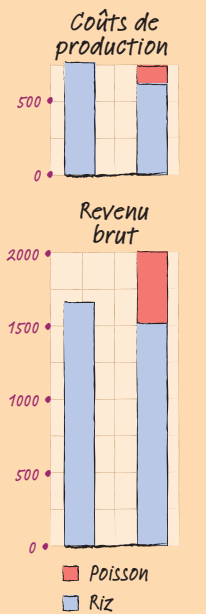
L'élevage du poisson entraîne une réduction de la surface affectée à la culture du riz. Cependant, la hausse des rendements du riz, les recettes tirées de la vente du poisson et les économies réalisées sur les engrais et les pesticides se traduisent par des bénéfices nets plus élevés que ceux de la monoculture de riz |FIGURE 3.8|<sup>2</sup>. Les marges bénéficiaires des agriculteurs élevant des espèces aquatiques à forte valeur marchande

Un hectare de rizière peut produire chaque année jusqu'à 750 kg de poisson et 9 tonnes de riz



Les escargots ramassés dans les rizières indonésiennes sont considérés localement comme un mets de choix

**Figure 3.8 Données économiques relatives au système riz-poisson et à la monoculture de riz en Indonésie (USD/ha)**



Source: Adapté du tableau 15, p.50<sup>2</sup>

peuvent être supérieures de plus de 400 pour cent<sup>6</sup>.

La production de poisson dans les rizières a également des retombées positives sur la santé des communautés. Le poisson se nourrit de vecteurs de maladies graves, notamment les moustiques qui transmettent le paludisme. Lors d'enquêtes conduites dans les champs en Chine, on a constaté que la densité de larves de moustiques dans les rizières où le système riz-poisson était appliqué était égale au tiers de la densité observée dans les rizières simples. Dans une zone d'Indonésie, la prévalence de la malaria qui était de 16,5 pour cent est tombée quasiment à zéro après l'intégration de la production de poisson dans les rizières<sup>2</sup>.

### L'association de la riziculture et de l'aquaculture contribue aussi à améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau.

Cependant, le système riz-poisson demande environ 26 pour cent d'eau en plus que la monoculture de riz<sup>2</sup>. C'est pourquoi, dans les zones où les ressources en eau sont limitées, l'introduction du système n'est pas recommandée. Cependant, la FAO a estimé que, à l'échelle mondiale, près de 90 pour cent du riz produit provenaient d'environnements se prêtant à l'élevage de poisson et autres organismes aquatiques<sup>6</sup>.

En Chine, l'aquaculture dans les rizières a progressé régulièrement au cours des deux dernières décennies et, en 2010, la production a atteint 1,2 million de tonnes de poisson et autres animaux aquatiques<sup>6</sup>. De nouvelles pistes de diversification de la production se profilent en Indonésie, où l'escargot *tutut*, un aliment traditionnel des habitants des zones rurales, est en passe de devenir un aliment diététique prisé par les consommateurs urbains<sup>4</sup>. La relance du système de production riz-poisson est activement encouragée par le gouvernement indonésien qui a

récemment lancé un programme visant l'établissement de ce système sur 1 million d'hectares<sup>7</sup>.

Cependant, alors que les avantages sociaux, économiques et environnementaux de l'aquaculture pratiquée dans les rizières sont clairement démontrés, le taux d'adoption du système demeure faible en dehors de la Chine. Partout ailleurs en Asie, le système de production riz-poisson est appliqué seulement sur un peu plus de 1 pour cent de la surface totale de riziculture irriguée. Il est intéressant de noter que le système est mis en œuvre sur une surface proportionnellement plus étendue hors d'Asie, à Madagascar, où elle est voisine de 12 pour cent<sup>2</sup>.

De multiples raisons expliquent la marginalité du système riz-poisson, notamment le manque d'informations sur ses avantages, la disponibilité sur le marché de pesticides peu onéreux et l'accès limité des petits exploitants agricoles au crédit dont ils ont besoin pour investir dans la production de poisson<sup>2</sup>. Il est difficile de surmonter ces obstacles qui mettent en jeu des politiques relatives à plusieurs secteurs.

Le système riz-poisson doit être promu par les hauts responsables agricoles et les agronomes qui ont conscience des avantages que présente l'intégration de l'aquaculture et de la riziculture, et qui peuvent

délivrer ce message aux communautés de producteurs de riz. De même qu'à une certaine époque, les stratégies de développement agricole ont promu la monoculture de riz à grande échelle, elles peuvent aujourd'hui encourager l'exploitation du potentiel des systèmes intensifs mais durables de production riz-poisson.



9 · Maïs/foresterie Afrique australe

# Quand des arbres et des arbustes sont moins onéreux que les engrais

Associés à la culture du maïs, des arbres et des arbustes de la famille des légumineuses fournissent des résidus de qualité riches en azote, qui contribuent à l'amélioration de la fertilité du sol, à l'augmentation des rendements et à la création de nouvelles sources de revenus.

**A**u Malawi et en Zambie, la sécurité alimentaire repose sur la production de maïs. Cependant, dans les deux pays, les rendements moyens ne sont que de 1,2 tonne par ha. Grossoïèremment, seul un petit producteur sur quatre en Zambie et un sur cinq au Malawi produisent suffisamment de maïs pour en vendre sur les marchés. Pluviale dans sa quasi-totalité, la culture du maïs est extrêmement vulnérable face aux fluctuations des précipitations et des températures, une vulnérabilité qui ne peut que s'aggraver avec le changement climatique. Au Malawi, en 2004–2005, une sécheresse a fait tomber les rendements moyens du maïs à seulement 0,76 tonne par ha, de sorte que 5 millions

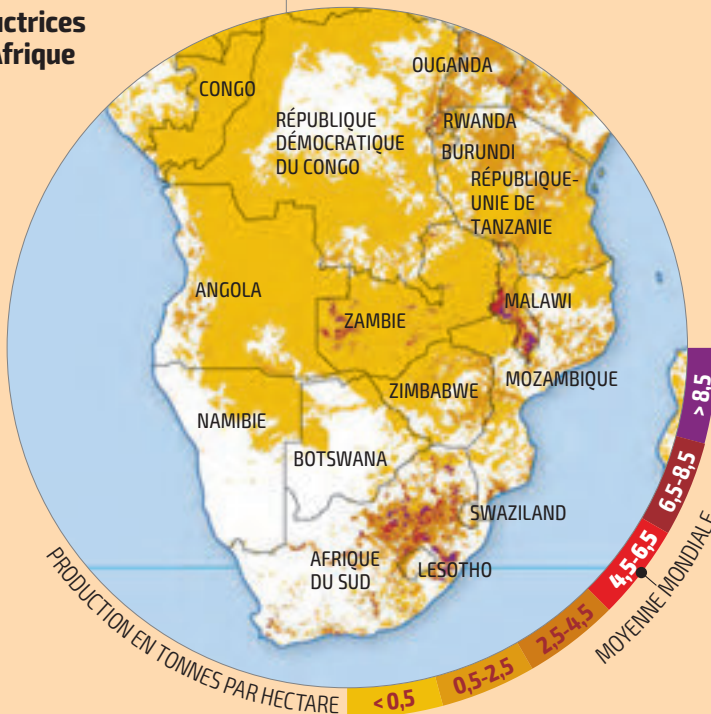
d'habitants, soit près de 40 pour cent de la population, ont eu besoin d'une aide alimentaire<sup>1</sup>.

L'un des principaux obstacles auxquels les agriculteurs sont confrontés lorsqu'ils tentent d'accroître la production du maïs est la faible fertilité du sol. Un grand nombre de producteurs ne peuvent ni se payer des engrais minéraux ni se procurer des quantités suffisantes d'engrais organique, tel que le fumier animal. Des décennies de culture intensive sans fertilisation ont épuisé les éléments nutritifs du sol, notamment l'azote<sup>1</sup>. Pour surmonter le problème, l'Union nationale des agriculteurs de Zambie (Zambia National Farmers' Union) a étudié les moyens d'intégrer

**Zone agroécologique**  
Pluviale tropicale  
**Céréale dominante** Maïs  
**Autres cultures/produits**  
Viande, lait, fourrage, bois de chauffe

## Zones productrices de maïs en Afrique australe

FAO/IIASA GAEZ



## 5 premiers pays producteurs de maïs en 2013

(millions de tonnes)

Afrique du Sud	12,37
Rép.-Unie de Tanzanie	5,36
Malawi	3,64
Zambie	2,53
Mozambique	1,63

Source: FAOSTAT

Les feuilles qui tombent du *Faidherbia* enrichissent le sol en azote et en matière organique

dans les systèmes de culture de maïs des arbres capables de fixer l'azote<sup>2</sup>. Le candidat jugé le plus prometteur a été une essence d'acacia africain, *Faidherbia albida*, dont la croissance présente une caractéristique inhabituelle. L'arbre est dormant au début de la saison des pluies et il perd ses feuilles juste au moment où les cultures sont établies dans les champs; les feuilles ne repoussent qu'à la fin de la saison des pluies. On peut cultiver le maïs directement sous la ramure dénudée de *Faidherbia*, puisque les arbres n'entrent pas en compétition avec la culture pour la lumière, les éléments nutritifs ou l'eau pendant que le maïs se développe<sup>3</sup>.

**Grâce aux feuilles en décomposition, le sol situé sous les arbres contient** jusqu'à deux fois la quantité de matière organique et d'azote que l'on trouve dans le sol qui n'est pas sous le couvert des arbres. On observe aussi une recrudescence sensible de l'activité microbologique du sol et une augmentation de sa capacité de rétention d'eau<sup>4</sup>.

De nombreuses études ont permis de constater que les rendements augmentaient quand le maïs était cultivé en association avec *Faidherbia* et que ces améliorations tendaient à être d'autant plus marquées que la fertilité du sol était faible. En Zambie, le maïs planté en dehors du couvert des arbres produisait un rendement moyen de 1,9 tonne par ha, contre 4,7 tonnes quand il était produit sous leur couvert [FIGURE 3.9]<sup>5</sup>; au Malawi, la culture du maïs en association avec *Faidherbia* entraînait une progression des rendements de 100 à 400 pour cent<sup>1</sup>.

Les deux pays promeuvent le *Faidherbia* dans le cadre de systèmes d'agriculture de conservation susceptibles d'offrir aux petits agriculteurs un moyen d'améliorer la productivité du maïs et les recettes tirées de sa vente. Au niveau national, il est recommandé de planter 100 arbres par ha selon un quadrillage établissant un espacement de 10 m x 10 m<sup>1</sup>.

En Zambie, le *Faidherbia* est aujourd'hui planté sur quelque 300 000 ha, dans le cadre de systèmes de culture du maïs appliquant les principes de l'agriculture de conservation. Au Malawi, on compte environ un demi-million d'exploitations avec ces arbres. Les agriculteurs ont pu établir la majeure partie du peuplement de *Faidherbia*, simplement en favorisant la repousse naturelle de jeunes plants sur leurs terres<sup>6</sup>.

Bien que faisant partie des essences d'acacia qui se développent le plus rapidement, le *Faidherbia* ne constitue pas une solution immédiate au problème de la fertilité du sol. Lors d'une enquête conduite auprès de 300 exploitants zambiens, un tiers d'entre eux ont indiqué que les rendements progressaient sur

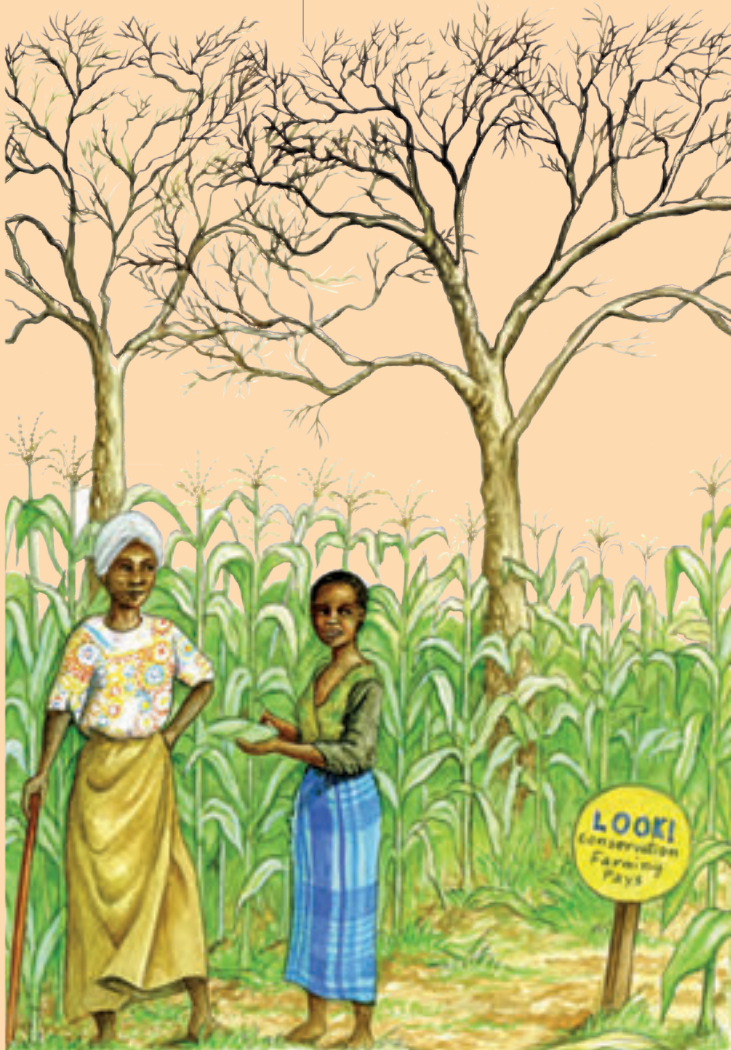
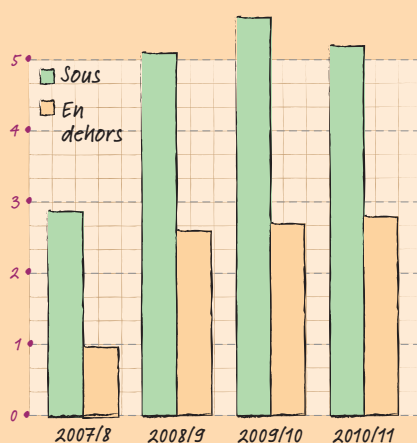


Figure 3.9 Rendements moyens du maïs sous le couvert de *Faidherbia albida* et en dehors (t/ha)



Source: Adapté de la figure 3, p.11<sup>5</sup>

une période de un à trois ans, mais 43 pour cent ont estimé qu'il fallait attendre jusqu'à six ans pour constater des avantages sur la production<sup>6</sup>.

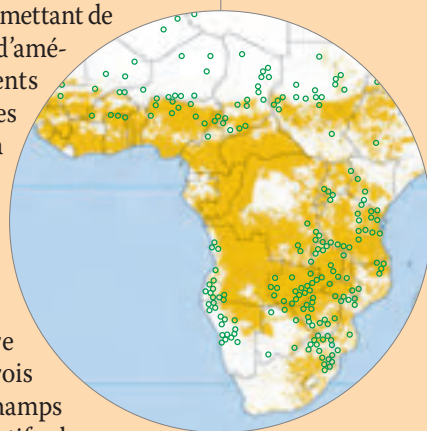
**La plantation d'arbres de la famille des légumineuses conduits en taillis**, tels que *Gliricidia sepium*, dont l'établissement demande moins de temps, constitue un autre moyen d'améliorer durablement la production de maïs. Dans les petites exploitations du sud du Malawi, le Centre mondial d'agroforesterie promeut un système dans lequel les petits agriculteurs plantent des *Gliricidia* en ligne dans les champs de maïs, les taillent deux ou trois fois par an et en enfouissent les feuilles dans le sol. Les résultats d'une étude conduite sur une décennie indiquent que sur des parcelles non fertilisées où du *Gliricidia* est associé au maïs en cultures intercalaires, les rendements moyens sont de 3,7 tonnes par ha et atteignent 5 tonnes par ha les bonnes années. Sur des parcelles non fertilisées et non plantées de *Gliricidia*, les rendements moyens oscillent entre 0,5 et 1,0 tonne par ha seulement<sup>1</sup>.

Dans les zones où la surface des exploitations est supérieure à 1 ha, la plantation d'arbustes de la famille des légumineuses, tels que *Sesbania sesban*,

dans les champs en jachère constitue une autre option permettant de revitaliser le sol et d'améliorer les rendements du maïs. Les arbres et les arbustes de la famille des légumineuses apportent au sol de 100 à 250 kg d'azote par ha dans les champs laissés en jachère pendant deux à trois ans. Même si les champs ne sont pas productifs deux années sur cinq, la production totale et la rentabilité des investissements sont plus avantageux quand le maïs est cultivé en rotation avec des arbres et des arbustes capables de fixer l'azote<sup>1</sup>.

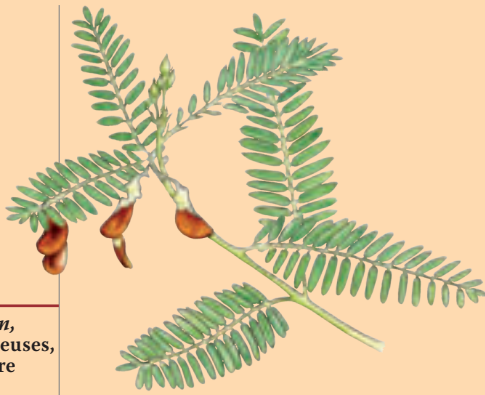
Une étude conduite dans l'est de la Zambie a montré que le bénéfice net moyen était égal à 130 USD par ha quand le maïs était produit sans engrais; 309 USD quand il était cultivé en rotation avec *Sesbania*; et 327 USD quand il était associé à *Gliricidia* dans un système de culture intercalaire. Pour chaque unité d'investissement, les agriculteurs qui intégraient les arbres et le maïs obtenaient un meilleur taux de rentabilité que ceux qui employaient des engrais minéraux, subventionnés ou non, pour produire du maïs sans interruption<sup>7</sup>. L'étude a confirmé que, par rapport à la culture de maïs recourant exclusivement aux engrais minéraux, la production de maïs dans des systèmes d'agroforesterie était à la fois intéressante sur le plan social et compétitive sur le plan financier<sup>8</sup>.

**L'adoption de l'agroforesterie a aidé les petits exploitants agricoles** d'Afrique orientale et australe à éliminer la barrière freinant l'adoption de l'agriculture de conservation: le manque de résidus de cultures pour maintenir en permanence une couverture de surface sur le sol. Étant donné que la plupart des petits agriculteurs africains pratiquent aussi l'élevage, ils récupèrent souvent



FAO

○ Répartition des sites plantés de *Faidherbia albida* dans les zones productrices de maïs en Afrique



L'arbuste *Sesbania sesban*, de la famille des légumineuses, revitalise le sol et améliore les rendements du maïs

la biomasse des résidus de cultures afin d'alimenter les animaux. Grâce aux arbres poussant sur les exploitations, il y a désormais suffisamment de biomasse pour, à la fois satisfaire les besoins de l'élevage et améliorer les rendements du maïs.

Les arbres fournissent aussi du combustible aux ménages ruraux – en Zambie, les agriculteurs ont pu récolter 15 tonnes de bois de chauffe par ha après la deuxième année de jachère avec *Sesbania* et 21 tonnes après la troisième année<sup>1</sup>.

L'agroforesterie contribue à améliorer la structure du sol et la filtration de l'eau, ce qui rend les exploitations, notamment celles qui dépendent des précipitations, plus résilientes face à la sécheresse et aux effets du changement climatique. De plus, elle peut jouer un rôle important dans l'atténuation du changement climatique. L'agriculture de conservation intégrant des arbres permet de fixer de 2 à 4 tonnes de carbone par ha et par an, contre 0,2 à 0,4 tonne quand elle n'intègre pas d'arbre. Par ailleurs, en améliorant la production du maïs et la

fourniture de bois de chauffe, les systèmes agricoles qui associent les arbres et le maïs sont susceptibles de freiner la conversion de forêts en terres agricoles, qui est une source majeure d'émissions de gaz à effet de serre.

Dans des pays sahéliens tels que le Burkina Faso et le Niger, il a été démontré que l'agroforesterie contribuait aussi à améliorer les rendements d'autres céréales, notamment le millet et le sorgho. Avec la poursuite des travaux de recherche et la participation des exploitants agricoles, l'agriculture de conservation intégrant des arbres pourrait être étendue à une gamme beaucoup plus variée de systèmes de culture vivrière dans toute l'Afrique<sup>1</sup>.

#### **L'agroforesterie ne demande pas d'investissement financier important.**

Au demeurant, les exploitants à faible revenu adoptent souvent le système avec plus d'empressement que les agriculteurs aisés. Le passage à un système maïs-foresterie demande un surcroît de main-d'œuvre au début mais, dès que l'exploitant maîtrise les nouvelles pratiques, la main-d'œuvre de l'exploitation peut être utilisée avec d'avantage d'efficacité. Cependant, l'intégration d'arbres dans la production vivrière est une pratique qui suppose de bonnes connaissances. L'appui politique, la poursuite des travaux de recherche et l'offre de services de conseil ruraux fondés sur la participation des petits agriculteurs jouent un rôle essentiel dans la diffusion à long terme des systèmes agricoles associant maïs, arbustes et arbres<sup>1</sup>.

**SOUVENT, LES  
EXPLOITANTS  
À FAIBLE REVENU  
ADOPTENT  
L'AGRO-FORESTERIE  
AVEC PLUS  
D'EMPRESSEMENT  
QUE LES  
AGRICULTEURS AISÉS**

## 10 · Blé Asie centrale

# Les agriculteurs cessent de labourer dans la steppe du Kazakhstan

**Le labour zéro, la couverture du sol et la rotation des cultures permettent aux producteurs de blé d'enrayer la dégradation des sols et d'accroître la production alimentaire.**

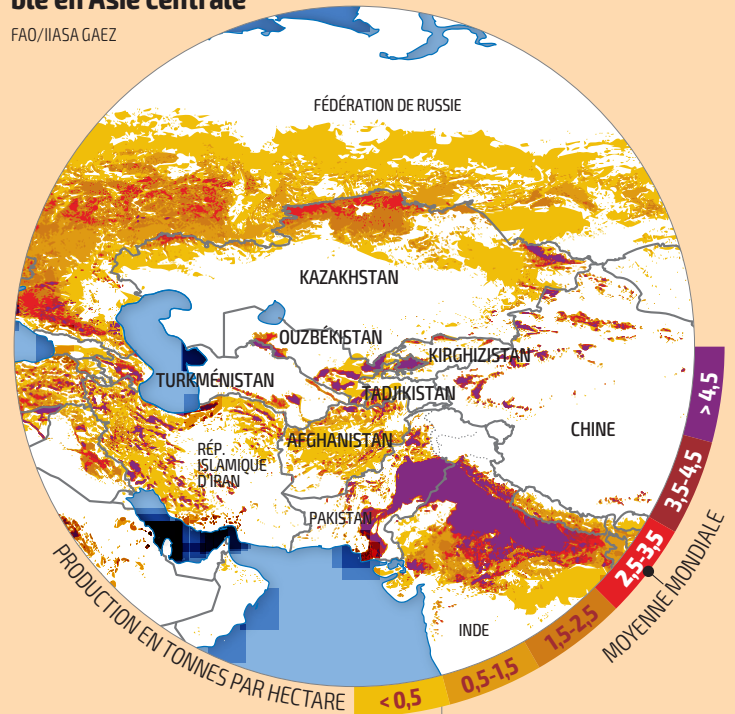
**A**u printemps 2012, alors que les exploitants agricoles des steppes semi-arides du nord du Kazakhstan semaient la culture annuelle de blé, la région est entrée dans l'une des pires périodes de sécheresse jamais enregistrées. Dans de nombreuses zones, aucune pluie n'est tombée d'avril à septembre. Aggravant un peu plus la situation, les températures estivales quotidiennes ont dépassé la normale de plusieurs degrés<sup>1</sup>. Cette année-là, de nombreux agriculteurs ont perdu toute leur récolte et, au niveau national, la récolte de blé qui avait atteint 23 millions de tonnes en 2011, est tombée à moins de 10 millions de tonnes<sup>2</sup>.

Cependant, certains exploitants n'ont pas perdu leur récolte. Ils faisaient partie du nombre croissant de producteurs kazakhs qui se sont entièrement convertis à l'agriculture de conservation, notamment le labour zéro, le maintien de résidus de cultures sur la surface du sol et la rotation culturale<sup>1</sup>. Ces pratiques leur ont permis d'améliorer la teneur en carbone organique et la structure du sol dans leurs champs, et de favoriser ainsi l'infiltration et la conservation de l'eau provenant de la fonte des neiges hivernales<sup>3</sup>. En conséquence, certains agriculteurs de la province de Kostanay ont obtenu en 2012 des rendements de 2 tonnes par hectare, soit près du double de la moyenne nationale enregistrée ces dernières années<sup>1</sup>.

Au Kazakhstan, sur une surface de 19 millions d'ha de terres agricoles, environ 2 millions sont exploités dans le cadre d'une application intégrale des principes de l'agriculture de conserva-

## Zones productrices de blé en Asie centrale

FAO/IIASA GAEZ



tion. Sur 9,3 millions d'ha, les agriculteurs pratiquent le travail minimal du sol, en employant des chisels étroits qui travaillent à faible profondeur |FIGURE 3.10|<sup>4, 5</sup>. L'adoption généralisée de l'agriculture de conservation dans la zone productrice de blé du nord du Kazakhstan est le fruit de la nécessité. Alors que le pays dispose de vastes ressources en terres pour produire du blé et qu'il est l'un des premiers producteurs et exportateurs mondiaux de blé et de farine de qualité<sup>6</sup>, la culture est totalement tributaire des précipitations et, par conséquent, très vulnérable en cas de perte d'humidité du sol<sup>1</sup>.

**Zone agroécologique**  
Pluviale (pluies, neige)  
continentale tempérée

**Céréale dominante** Blé

**Autres cultures**

Avoine, sarrasin, sorgho,  
oléagineux, légumineuses

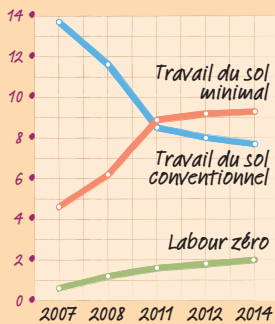
## 5 premiers pays producteurs de blé en 2013

(millions de tonnes)

Kazakhstan	13,94
Ouzbékistan	6,84
Afghanistan	5,16
Turkménistan	1,25
Tadjikistan	0,92

Source: FAOSTAT

**Figure 3.10**  
Évolution des surfaces cultivées selon différentes techniques de travail du sol au Kazakhstan (millions d'ha)



Source: Adapté du tableau 2, p.4<sup>4</sup>

Les producteurs de blé ont commencé à réduire les façons culturales dans les années 60 pour freiner les pertes de sol dues à l'érosion éolienne. À la fin du XX<sup>e</sup> siècle, le travail minimal du sol était une pratique courante. En 2000, le CIMMYT et la FAO, en collaboration avec des scientifiques et des agriculteurs du Kazakhstan, ont lancé un programme visant à introduire l'agriculture de conservation dans les zones de culture pluviale et, dans le sud du pays, la culture irriguée du blé sur des plates-bandes surélevées<sup>7</sup>.

Des essais menés dans le nord ont démontré que les terres exploitées selon le principe du labour zéro produisaient des rendements du blé de 25 pour cent supérieurs à ceux des terres labourées et que, parallèlement, les coûts de la main d'œuvre étaient réduits de 40 pour cent et les coûts du carburant de 70 pour cent. Les essais ont également mis en évidence les avantages qu'il y avait à cultiver de l'avoine pendant l'été, au lieu de laisser les champs en jachère. Avec la culture d'avoine, la production totale de céréales sur la même parcelle augmentait de 37 pour cent et l'érosion du sol était considérablement réduite<sup>7</sup>.

### Aujourd'hui, le Kazakhstan fait partie des pays où l'adoption du labour zéro est la plus avancée.

En 2008, la pratique du labour avait été entièrement abandonnée sur 1,4 million d'ha alors qu'en 2000, elle était de règle partout<sup>8</sup>. Cette évolution est attribuée à des taux d'adoption très élevés dans les grandes entreprises agricoles de plus de 50 000 ha, dont les gestionnaires s'efforcent d'améliorer la production tout en réduisant les coûts<sup>9</sup>. Cependant, l'approche a aussi trouvé des partisans dans les petites et moyennes exploitations, une catégorie qui, dans un pays à faible densité démographique comme le Kazakhstan, regroupe des exploitations dont la surface est comprise entre 500 et 2 500 ha<sup>10</sup>. Le taux d'adoption a été particulièrement élevé dans les exploitations implantées sur les riches sols noirs, où les bénéfices

importants permettent de financer l'investissement dans les machines agricoles adaptées à l'agriculture de conservation<sup>7</sup>.

Dans les zones de labour zéro, la lutte contre les adventices est souvent assurée au moyen d'herbicides<sup>11</sup>. Cependant, un grand nombre de producteurs ont constaté que l'association du labour zéro et du maintien d'une couverture permanente sur la surface du sol contribuait aussi à l'élimination des adventices. D'une part, quand la terre n'est pas travaillée, la réserve naturelle de semences d'adventices présentes dans le sol diminue au fil du temps et, d'autre part, la décomposition des résidus de culture libère des acides humiques qui bloquent la germination des semences. Le labour zéro suppose généralement l'emploi de davantage d'herbicides les premières années mais, après quatre ou cinq ans, l'incidence des adventices – comme l'utilisation d'herbicides – recule considérablement<sup>5</sup>.

Dans le nord du Kazakhstan, le fait de conserver en place les résidus de récolte présente un autre avantage: accroître la quantité d'eau mise à la disposition du blé. Les précipitations annuelles s'échelonnent de 250 à 350 mm, dont quelque 40 pour cent sous la forme de neiges hivernales; quand la neige est emportée par le vent, la surface du sol reste nue et sèche. Les chaumes de la culture de blé précédente piègent la neige qui, quand les températures remontent, fond dans le sol. Ce résultat est intéressant à double titre: il y a davantage d'humidité disponible dans le profil du sol et l'érosion est réduite, voire entièrement évitée. Des recherches conduites sur les exploitations ont conclu que, associé au labour zéro, le recours aux résidus de culture pour piéger la neige pouvait entraîner une hausse des rendements de 58 pour cent<sup>9</sup>.

S'agissant de l'adoption du troisième principe fondamental de l'agriculture de conservation, à savoir, des rotations culturales diversifiées qui contribueraient à améliorer la productivité des terres et aideraient les agriculteurs à combattre plus efficacement les rava-





geurs et les maladies du blé, les progrès ont été plus lents. Dans les steppes du Nord, la période de végétation estivale est brève et les années sèches très fréquentes<sup>12</sup>.

Cependant, il y a de moins en moins de zones où l'on pratique la jachère d'été traditionnelle, car les producteurs profitent des précipitations – parfois abondantes – quand il y en a, pour cultiver de l'avoine, du tournesol et du colza<sup>7</sup>. Des études ont montré l'intérêt potentiellement très élevé d'autres cultures adaptées aux rotations, notamment le pois fourrager, la lentille, le sarrasin et le lin<sup>13</sup>.

Il est ressorti d'une étude conduite sur 3 ans que le sorgho fourrager semé fin mai et récolté en août, non seulement fournissait du fourrage à vendre ou à ensiler, mais aussi laissait après la récolte des chaumes durables qui piègeaient très efficacement la précieuse neige hivernale<sup>9</sup>.

L'adoption de l'agriculture de conservation au Kazakhstan a entraîné une augmentation de la production annuelle de blé de près de 2 millions de tonnes, une quantité suffisante pour nourrir quelque 5 millions de personnes<sup>10</sup>. Il est possible d'améliorer encore la production avec la mise au point de variétés de blé à haut rendement qui soient plus adaptées au labour zéro ainsi qu'aux

hivers rudes et aux étés de plus en plus chauds prévalant dans le Nord. Cette option est en cours d'étude dans le cadre d'un programme conduit au Mexique avec le CIMMYT, dont l'objectif est de croiser des variétés de blé locales du Kazakhstan avec des cultivars du Mexique, du Canada et des États-Unis<sup>4</sup>.

**L'agriculture de conservation est jugée particulièrement adaptée** à tous les principaux systèmes de production végétale d'Asie centrale, depuis la zone productrice de maïs du nord du Kazakhstan jusqu'aux champs irrigués de blé, de riz et de coton de l'Ouzbékistan et du Tadjikistan. En limitant l'érosion et en assurant la santé des sols, ce type d'agriculture contribuerait à la lutte contre la désertification et la dégradation des terres, phénomènes dont le coût pour les pays d'Asie centrale est estimé à 2,5 milliards d'USD par an. En optimisant l'efficacité de l'utilisation de l'eau, l'agriculture de conservation pourrait être particulièrement intéressante dans les zones irriguées – la salinisation, due en grande partie à un excès d'irrigation, touche 11 pour cent des terres irriguées en République kirghize, 50 pour cent en Ouzbékistan et 96 pour cent au Turkménistan<sup>14</sup>.

Le Kazakhstan est l'un des premiers producteurs et exportateurs mondiaux de blé et de farine de qualité

**LE LABOUR ZÉRO ET LE RECOURS AUX RÉSIDUS DE CULTURE POUR PIÉGER LA NEIGE HIVERNALE PEUVENT ENTRAÎNER UNE HAUSSE DES RENDEMENTS DU BLÉ DE 58 POUR CENT**



Les producteurs de blé du Kazakhstan ont investi 200 millions d'USD dans les machines agricoles adaptées au labour zéro

**LA PLUPART DES PAYS D'ASIE CENTRALE N'ONT PAS ENCORE DE POLITIQUE VISANT À PROMOUVOIR L'AGRICULTURE DE CONSERVATION**

Ces dernières années, l'information sur l'agriculture de conservation est arrivée jusqu'aux agriculteurs de toute la région et certaines pratiques commencent à être mises en œuvre dans les exploitations. En Ouzbékistan, par exemple, le blé d'hiver est planté dans les champs de coton encore sur pied sur plus de 600 000 ha. Au Tadjikistan, le semis direct du blé d'hiver après la récolte de coton, avec perturbation minimale du sol, est pratiqué sur environ 50 000 ha<sup>5</sup>. Des essais récemment réalisés dans le cadre d'un projet de la FAO en Azerbaïdjan ont convaincu des petits exploitants agricoles d'adopter l'agriculture de conservation sur 1 800 ha de terres irriguées<sup>15</sup>.

Cependant, hormis dans le nord du Kazakhstan, l'application intégrale des principes de l'agriculture de conservation reste limitée. Même dans le sud du Kazakhstan, l'adoption de la culture irriguée du blé sur des plates-bandes surélevées non travaillées est freinée par le manque de semoirs adaptés et l'ignorance générale des agriculteurs en ce qui concerne les techniques de l'agriculture de conservation. La plupart des pays d'Asie centrale n'ont pas de politique visant à promouvoir l'agriculture de conservation. Bien au contraire: souvent, les producteurs ne sont guère invités à adopter des pratiques qui économisent l'eau car, alors, ils ne payeraient plus pour l'eau d'irrigation<sup>3</sup>. Certains pays ont même des réglementations relatives

aux façons culturales, qui interdisent aux agriculteurs de laisser des résidus de récolte dans les champs<sup>5</sup>. Des semoirs adaptés ont été expérimentés avec succès en Ouzbékistan, mais il est impossible d'en trouver dans le commerce<sup>11</sup>.

**Le passage à l'agriculture de conservation en Asie centrale** doit commencer par une action d'information sur ses avantages auprès de toutes les parties prenantes, notamment les exploitants agricoles, les chercheurs, les agents chargés de la vulgarisation et les décideurs politiques<sup>14</sup>. Les gouvernements peuvent favoriser la transition en appuyant la mise en place des moyens de fabriquer localement du matériel adapté à l'agriculture de conservation, notamment des semoirs convenant aux sols et aux conditions climatiques propres à chaque pays<sup>15</sup>.

De nombreux gouvernements pourraient prendre modèle sur le Kazakhstan, où les politiques publiques promeuvent l'agriculture de conservation et où la première priorité de la recherche agricole est la mise au point et la diffusion de technologies permettant d'économiser l'eau. En 2011, le Kazakhstan a établi un système allouant au matériel adapté à l'agriculture de conservation des subventions trois à quatre fois plus élevées que celles qui sont accordées aux technologies conventionnelles<sup>3</sup>. L'appui du gouvernement a encouragé les agriculteurs du nord du Kazakhstan à investir une somme estimée à 200 millions d'USD dans l'équipement de leur exploitation avec des machines agricoles adaptées à la pratique du labour zéro<sup>16</sup>.

## 11 • Riz/maïs Asie

# Le maïs hybride facilite l'adaptation au changement climatique

**De nombreux producteurs de riz cultivent désormais du maïs en saison sèche, en employant des hybrides qui contribuent à réduire la consommation d'eau et génèrent des revenus plus élevés.**

**Zone agroécologique**

Pluviale en saison de mousson et irriguée en hiver

**Céréales dominantes**

Riz, maïs

**Autres cultures/produits**

Légumes, pommes de terres, légumineuses, viande, œufs

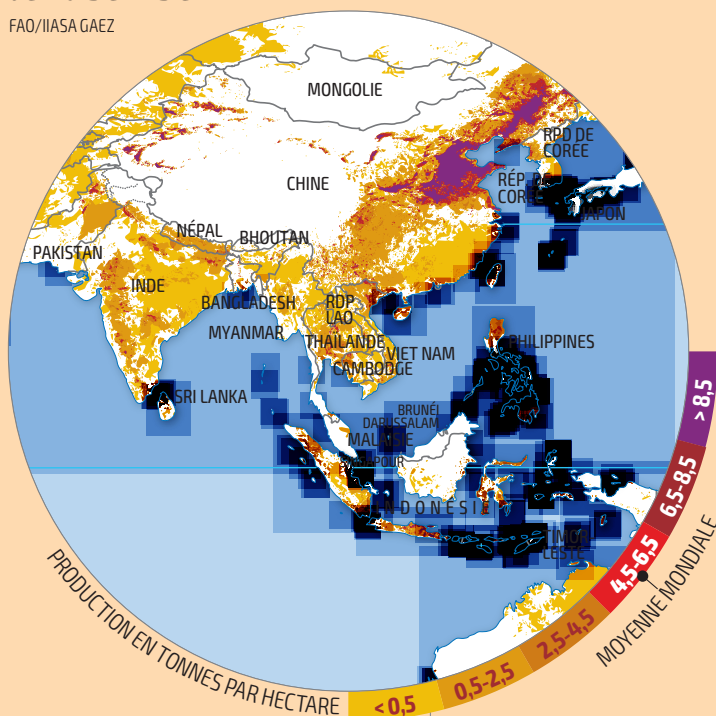
**T**raditionnellement, un grand nombre de producteurs de riz asiatiques produisent toute l'année, en plantant soit du blé soit du riz pendant la saison hivernale sèche, après la campagne rizicole de la mousson. Ces deux dernières décennies, cependant, les systèmes agricoles riz-maïs se sont rapidement diffusés dans toute l'Asie, essor lié à la forte demande de maïs et à la mise au point d'hybrides de maïs adaptés aux zones ne disposant pas de ressources en eau suffisantes pour que l'on puisse y produire du riz en permanence<sup>1</sup>.

Selon les derniers résultats enregistrés, des systèmes riz-maïs étaient mis en œuvre sur plus de 3,3 millions d'ha en Asie, les plus vastes surfaces de production se trouvant en Indonésie (1,5 million d'ha), en Inde (0,5 million) et au Népal (0,4 million). L'expansion récente de la surface affectée à la rotation riz-maïs a été particulièrement rapide au Bangladesh, où les agriculteurs ont commencé à produire du maïs en vue de le vendre comme aliment pour animaux au secteur national de l'élevage de volaille en pleine expansion. Entre 2000 et 2013, la production de maïs a bondi, passant de seulement 10 000 tonnes à 2,2 millions de tonnes, et la surface récoltée est passée de 5 000 ha à 320 000 ha<sup>1,2</sup>.

**Le maïs pousse bien dans les sols alluviaux fertiles du Bangladesh** et les rendements y sont parmi les plus élevés de la région. Le maïs est semé au début de la saison froide, *Rabi*, qui va de novembre à avril, après la récolte du riz cultivé pendant la saison de la mousson, *Aman*, correspondant à la période juillet-dé-

## Zones productrices de maïs en Asie

FAO/IIASA GAEZ



cembre. Alors que le maïs de *Rabi* est généralement cultivé seul, de nombreux exploitants agricoles ont commencé à l'associer à des cultures intercalaires de pommes de terre et de légumes à maturation précoce, tels que l'amarante rouge, l'épinard, le radis, la coriandre et le haricot vert. Le pois est aussi associé au maïs en cultures intercalaires, car il ne lui fait pas concurrence pour la lumière, les éléments nutritifs ou l'espace<sup>3</sup>.

Les agriculteurs emploient en général des maïs hybrides à haut rendement, qui ont besoin de quantités importantes d'éléments nutritifs. Le coût de production du maïs est aujourd'hui plus élevé

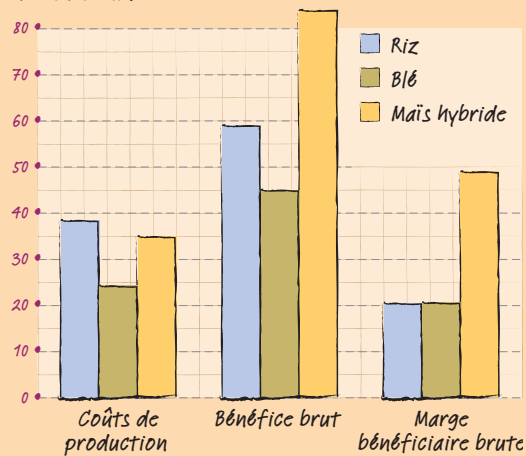
### 5 premiers pays producteurs de maïs en 2013

(millions de tonnes)

Chine	217,7
Inde	23,3
Indonésie	18,5
Philippines	7,4
Viet Nam	5,2

Source: FAOSTAT

**Figure 3.11** Données économiques relatives aux cultures de riz, de blé et de maïs hybride en saison sèche au Bangladesh (en milliers de Taka/ha)



Source: Adapté du tableau 2, p.41<sup>3</sup>

que celui des autres céréales d'hiver traditionnelles et, de ce fait, les exploitants les plus démunis ne plantent du maïs que sur une petite partie de leurs terres. Cependant, la marge bénéficiaire brute par hectare de la vente du maïs est 2,4 fois supérieure à celle du blé ou du riz [FIGURE 3.11]. En outre, le maïs a moins de problèmes de ravageurs et de maladies<sup>3</sup>.

Une diversification conduisant à intégrer le maïs pourrait également être une bonne stratégie d'adaptation au changement climatique, car le maïs est plus tolérant aux températures élevées, qui constituent un problème croissant s'agissant du blé, et est moins gourmand en eau – au Bangladesh, 850 litres d'eau produisent un kilogramme de grains de maïs, contre 1 000 litres pour le blé et plus de 3 000 litres pour le riz. En limitant les prélèvements d'eau souterraine à des fins d'irrigation, la production de maïs concourt à la réduction de la contamination du sol par l'arsenic, un problème grave dans de nombreuses zones du Bangladesh<sup>3</sup>.

Les producteurs et les agronomes du Bangladesh ont noté que les rendements des céréales tendaient à fléchir dans les champs où le maïs avait été produit comme culture de saison sèche pendant

cinq ans ou plus. Pour garantir la durabilité des systèmes riz-maïs, les agriculteurs doivent planifier soigneusement les périodes de semis et de récolte de chaque culture, améliorer les pratiques de gestion du sol et de l'eau et employer des semences de qualité<sup>3</sup>.

**Les besoins du riz et du maïs en ce qui concerne le sol sont très différents**, ce qui fait qu'il est difficile de choisir le moment où le maïs doit être planté. Le riz de Aman repiqué est généralement cultivé sur des sols argileux humides bien mis en boue, tandis que le maïs privilégie les sols de terreau convenablement aérés<sup>3</sup>. C'est pourquoi, après la récolte du riz, le mode de préparation conventionnel des champs avant le semis du maïs consiste souvent à faire passer de trois à cinq fois un rotoculteur derrière



**LES PLATES-BANDES PERMANENTES NON TRAVAILLÉES PERMETTENT D'OBTENIR DE MEILLEURS RENDEMENTS DU RIZ ET DU MAÏS QUE LES TERRES LABOURÉES**

un motoculteur. Le labour demande des investissements considérables en temps, en carburant et en main-d'œuvre, et les producteurs doivent attendre jusqu'à trois semaines avant que le sol des rizières soit suffisamment sec pour être travaillé<sup>4</sup>. Ensuite, le semis tardif du maïs est susceptible de faire baisser les rendements, parfois de 22 pour cent<sup>3</sup>.

Les pratiques de l'agriculture de conservation réduisent la nécessité de labourer et, partant, le temps à attendre avant de pouvoir semer le maïs. La plantation du riz et du maïs sur des plates-bandes permanentes non travaillées et recouvertes d'une couche de paille a permis d'obtenir avec moins d'intrants des rendements plus élevés que ceux des cultures semées sur des terres labourées. L'accroissement de la productivité a été attribué à l'augmentation de la teneur



■ Zones jugées adaptées à la production de maïs au Bangladesh

du sol en azote et, plus généralement, à l'amélioration des conditions du sol. En Inde, des recherches ont montré que l'aménagement de plates-bandes permanentes permettait non seulement d'obtenir des rendements plus élevés que ceux obtenus sur des terres labourées, mais aussi de parvenir à ce résultat en utilisant jusqu'à 38 pour cent d'eau d'irrigation en moins<sup>4</sup>. Au Bangladesh, les économies d'eau sont cruciales pendant les mois de la période sèche allant de février à mai, quand les puits tubulaires peu profonds sont souvent taris<sup>3</sup>.

L'Institut de recherche agronomique du Bangladesh et le CIMMYT ont adapté et promu des semoirs initialement mis au point pour le blé, afin qu'ils puissent être utilisés pour semer le maïs et le riz sans travail préalable du sol. Dans le nord-ouest du Bangladesh, les agriculteurs utilisant ces semoirs ont obtenu des rendements du riz identiques à ceux du riz repiqué mais avec moins d'eau et moins de main-d'œuvre et ont pu récolter le riz deux semaines plus tôt<sup>3</sup>.

Une étude comparative a été menée au Bangladesh sur les rendements et la rentabilité de la production sur sol labouré et de la production selon la technique du labour zéro. Avec la plan-



tation du maïs sur des plates-bandes permanentes, la productivité totale du riz et du maïs était de 13,8 tonnes par ha, contre 12,5 tonnes sur des terres labourées. Les coûts de production annuels du système riz-maïs sur plates-bandes permanentes étaient de 1 532 USD par ha, contre 1 684 USD dans le cas du travail du sol conventionnel<sup>4</sup>.

**Le maïs hybride a besoin de grandes quantités d'azote pour produire des rendements élevés.** Mais les réserves du Bangladesh en gaz naturel, utilisé pour fabriquer l'engrais azoté, ne sont ni infinies ni renouvelables. Une solution prometteuse au problème de l'épuisement du sol en éléments nutritifs est l'apport de fumier de volaille, qui devient disponible en abondance – aujourd'hui, le secteur de l'élevage de volaille au Bangladesh produit environ 1,6 million de tonnes de fumier chaque année<sup>3</sup>.

On a obtenu de bons rendements du maïs en remplaçant par du fumier de volaille 25 pour cent de l'engrais minéral habituellement employé. On peut aussi reconstituer en partie les réserves d'azote du sol en cultivant des légumineuses telles que le haricot mungo, après la récolte du maïs<sup>3</sup>. Dans le contexte des climats tropicaux à mousson, une culture estivale de haricot mungo contribue aussi à éponger l'azote résiduel et à éviter la pollution des nappes aquifères par les nitrates<sup>5</sup>.

La plantation de variétés de riz à cycle court permettrait aux agriculteurs de semer le maïs plus tôt. Cependant, ces variétés de riz ont des rendements plus faibles et les agriculteurs répugnent généralement à sacrifier la production de leur principale culture vivrière. C'est pourquoi, l'Institut de recherche sur le riz du Bangladesh travaille à la mise au point de variétés de riz de *Aman* à haut rendement et à cycle court. La durabilité future du système agricole riz-maïs en Asie du Sud repose aussi sur la mise au point d'hybrides de maïs à haut rendement, qui mûrissent rapidement et

tolèrent à la fois la saturation en eau et la sécheresse<sup>3</sup>.

Au Bangladesh, la culture du maïs fait encore figure de territoire inconnu pour de nombreux producteurs et il faudra du temps avant qu'ils ne l'intègrent pleinement dans des systèmes de culture qui optimisent la production et contribuent à améliorer la santé du sol. Si l'on veut favoriser l'adoption rapide et généralisée d'un mode de culture durable du maïs, il est fondamental de former les agriculteurs sur le choix du moment propice au semis et sur la gestion efficace de l'irrigation et des engrais minéraux<sup>6,7</sup>.

La production de maïs nationale a permis au Bangladesh de réduire sa dépendance à l'égard des importations. Le passage à la culture du maïs a aussi donné aux exploitants agricoles un moyen de diversifier leurs sources de revenus et leur alimentation. Nombreux sont les producteurs qui ne vendent pas la totalité de leur récolte de maïs – ils en gardent un peu pour nourrir leur propre volaille, dont ils vendent les œufs et la viande sur les marchés locaux. De plus en plus fréquemment, le maïs est consommé comme un aliment et n'est pas seulement réservé à la volaille. Avec la hausse du prix de la farine de blé, un grand nombre de familles la mélangent avec de la farine de maïs pour confectonner les chapatis<sup>8</sup>.

L'ADOPTION RAPIDE  
ET GÉNÉRALISÉE  
D'UN MODE DE  
PRODUCTION  
DURABLE DU MAÏS  
PASSE PAR LA  
FORMATION DES  
AGRICULTEURS



Chapitre 4

## La voie à suivre

*L'adoption du modèle Produire plus avec moins par les petits exploitants agricoles passe par une action concertée à tous les niveaux, menée avec la participation des pouvoirs publics, des organisations internationales, du secteur privé et de la société civile.*





**L**es profils Produire plus avec moins dans la pratique que nous avons examinés au *chapitre 3* montrent que les systèmes agricoles intégrés, qui préservent les ressources naturelles, offrent des avantages sociaux, économiques et environnementaux considérables lorsqu'ils sont adaptés aux spécificités des contextes agroécologique et socioéconomique. Les petits exploitants agricoles ont fait progresser la production et le rendement de leurs cultures céréalières et amélioré leurs moyens d'existence et leurs revenus, tout en préservant les ressources naturelles, en renforçant les services écosystémiques, en s'adaptant aux effets du changement climatique et en atténuant l'incidence de ces derniers. C'est souvent dans des conditions de production difficiles (pénuries d'eau, épuisement des sols et variations climatiques extrêmes) que les systèmes agricoles Produire plus avec moins sont les plus efficaces.

Il est urgent maintenant de porter à plus grande échelle l'intensification durable des cultures à l'aide du modèle Produire plus avec moins, afin de faire face à la «série sans précédent de pressions convergentes» qui menacent l'environnement, le développement socioéconomique et la sécurité alimentaire à long terme dans le monde.

**Aujourd'hui, près de 800 millions de personnes** souffrent de faim chronique<sup>1</sup> et 2 milliards de personnes présentent des carences en micronutriments<sup>2</sup>. Les activités agricoles épuisent précisément les ressources naturelles dont dépendent nos systèmes alimentaires. À l'échelle mondiale, un tiers des terres cultivées sont plus ou moins fortement dégradées du fait de la perte de matière organique, du défrichement, de l'épuisement des éléments nutritifs et de l'érosion<sup>3</sup>. La part des prélèvements mondiaux d'eau douce dévolue à l'agriculture est soumise à une concurrence intense: d'ici à 2025, les deux tiers de la population mondiale pourraient vivre dans des zones en situation de stress hydrique<sup>4</sup>. On estime à 75 pour cent la perte de biodiversité des cultures, et le quart restant est menacé, tandis que le patrimoine génétique de plus en plus pauvre des principales variétés végétales utilisées accroît leur vulnérabilité aux effets du changement climatique<sup>5</sup>.

La «série de pressions convergentes» ne se manifeste pas partout de manière uniforme. Certains pays et certaines communautés sont plus particulièrement touchés, notamment les zones rurales des pays en développement, où résident au moins 70 pour cent de la population mondiale très pauvre<sup>6</sup>. Il a été démontré que la pauvreté en soi était l'une des causes majeures de dégradation des ressources naturelles. L'asymétrie dans la répartition des terres cultivables défavorise en outre les pays qui ont le plus besoin de produire davantage<sup>3</sup>.

Le défi que nous devons relever aujourd'hui consiste à satisfaire une demande de produits alimentaires et d'autres produits agricoles d'une ampleur sans précédent dans l'histoire, et ce d'une façon qui préserve les ressources naturelles et ne compromette pas l'aptitude des générations futures à répondre à leurs propres besoins. Ce n'est pas seulement la sécurité alimentaire mondiale qui est en jeu, ce sont aussi les perspectives de paix et de stabilité dans le monde.

La transition vers la durabilité – nécessaire pour instaurer la sécurité alimentaire mondiale, ouvrir des possibilités économiques et sociales, freiner le changement climatique et protéger les ressources naturelles et les services écosystémiques – appelle des changements en profondeur en matière de gouvernance de l'alimentation et de l'agriculture<sup>7</sup>. Elle passe par un équilibre à trouver entre les besoins des systèmes tant humains que naturels, entre les multiples objectifs de l'agriculture, et entre l'agriculture et les autres secteurs.

Cela suppose que l'on évalue de façon réaliste le coût global des transitions, y compris la nécessité d'élaborer des politiques et des institutions qui faciliteront leur mise en œuvre. Il faut également cibler avec soin des systèmes agricoles intégrés adaptés aux conditions des sites. La durabilité n'est possible que dans un cadre d'action et un environnement juridique et institutionnel favorables qui permettent d'établir l'équilibre souhaitable entre les initiatives du secteur privé et du secteur public et garantissent la reddition de comptes, l'équité, la transparence et le respect de la légalité<sup>8</sup>.

## Quelques enseignements

**N**ous allons commencer par examiner certains des «enseignements» tirés des systèmes agricoles Produire plus avec moins présentés au *chapitre 3*. Il s'agit de déterminer les acteurs et les politiques et mesures institutionnelles qui ont permis et soutenu l'adoption d'une production céréalière respectueuse des écosystèmes, et les contraintes qui ont entravé le processus.

*Les organisations nationales et internationales* ont joué un rôle important dans l'élaboration de systèmes agricoles durables. La FAO, par exemple, a encouragé l'introduction de l'agriculture de conservation au Kazakhstan et a aidé à former les agriculteurs aux pratiques d'intensification rizicole durable au Viet Nam. L'agriculture de conservation dans les plaines indo-gangétiques a bénéficié de l'appui d'un programme écorégional à l'initiative du Consortium du CGIAR et d'instituts nationaux de recherche de quatre pays. Des partenariats à long terme similaires ont fourni des financements, assuré des travaux de recherche et prodigué des conseils techniques pour l'élaboration de systèmes agroforestiers associés au maïs en Amérique centrale et en Afrique australe.

*Les agriculteurs et les organisations d'agriculteurs* ont souvent été les premiers à innover en matière de production respectueuse des écosystèmes. Au Honduras, de petits exploitants agricoles ont ouvert la voie de la culture du maïs selon un système de production défrichépaillis, qui a depuis été adopté dans les pays voisins. Des agriculteurs ont mis en œuvre des pratiques d'agriculture de conservation, telles que le labour zéro, dans le Système de riziculture intensive. En Inde, ils ont sé pour le blé un outil de gestion de l'azote qui avait été élaboré à l'origine pour le riz, et au Kenya, c'est le système «push-pull» de protection intégrée qui a été utilisé pour cultiver des haricots et produire des aliments pour animaux.

*L'appui des pouvoirs publics*, à tous les niveaux, a joué un rôle décisif dans la transposition à grande échelle des initiatives de production végétale durable. Le Kazakhstan est l'un des premiers pays du monde à avoir adopté la pratique du labour zéro, à la faveur d'une politique nationale de promotion de l'agriculture de conservation. Avec le soutien de la FAO, le Gouvernement indonésien a lancé un programme de mise en œuvre du système de production riz-poisson sur 1 million d'hectares, qui apportera une contribution importante à la nutrition et au développement rural. Des États fédérés ont financé la diffusion de systèmes de labour zéro pour les cultures de maïs au Brésil et ont contribué à la fourniture de matériel agricole adapté à cette technique à des cultivateurs de blé en Inde.

*Le secteur privé* a également contribué de façon essentielle à l'adoption d'une agriculture plus durable et plus productive dans certains pays. En Inde, des usines locales fabriquent des semoirs en ligne adaptés au labour zéro et des entrepreneurs privés proposent des services de nivellement au laser. Au Kazakhstan, les exploitants peuvent se procurer du matériel adapté à l'agriculture de conserva-

tion, tel que des semoirs en ligne tractés, directement auprès de fournisseurs de machines agricoles. Des partenariats public-privé améliorent l'approvisionnement en semences au Brésil, en Chine et en Inde.

**Parallèlement, des contraintes** limitant l'adoption de systèmes d'intensification durable des cultures ont été mises en évidence. L'agriculture de conservation permettrait d'accroître la production céréalière en Asie centrale, par exemple, mais la plupart des gouvernements de la région n'ont pas élaboré de politiques pour la promouvoir, le matériel approprié fait en général défaut et les agriculteurs sont peu incités à accroître la productivité de l'eau.

Malgré l'incidence bénéfique des systèmes «push-pull» de protection intégrée sur la production, les revenus et la durabilité en Afrique de l'Est, leur adoption est entravée par des régimes fonciers précaires, qui dissuadent les agriculteurs d'investir. L'introduction de cultures de légumineuses améliorerait les rendements du maïs et la santé des sols en Afrique subsaharienne, mais les agriculteurs ont un accès insuffisant aux semences et manquent de débouchés rentables.

De nombreux gouvernements continuent de subventionner le prix des pesticides et des engrais minéraux, leur donnant ainsi un avantage économique sur des systèmes plus durables, comme les systèmes intégrés de rizi-aquaculture, qui utilisent des poissons pour lutter contre les adventices et les insectes nuisibles, et les systèmes associant céréales et légumineuses, qui tirent profit de sources naturelles d'azote. De manière générale, le secteur privé n'a pas assez investi dans le développement de technologies durables, et s'est souvent activement opposé aux mesures visant à encourager la protection intégrée.

L'une des conditions importantes préalables à l'adoption des pratiques du modèle Produire plus avec moins est de veiller à ce que ces pratiques soient adaptées aux conditions agroécologiques et socioéconomiques locales (disponibilité de main-d'œuvre, notamment). Le coût de la main-d'œuvre, par exemple, est apparu comme un facteur limitant une adoption plus large du Système de riziculture intensive dans certaines zones.

Le temps nécessaire pour bénéficier des avantages d'un passage à des pratiques de production durables et d'une restauration des services écosystémiques constitue une autre contrainte majeure. Au Kazakhstan, les problèmes liés aux adventices dans les champs de blé s'atténuent sur une période de quatre à cinq ans après l'adoption des pratiques de labour zéro et de maintien des résidus de culture. En Zambie, les agriculteurs ont dû attendre jusqu'à six ans pour voir les avantages apportés par la culture du maïs en association avec *Faidherbia albida*. Ces exemples soulignent la nécessité d'un engagement institutionnel fort – notamment, mais pas seulement, sur le plan financier – pour appuyer le passage au modèle Produire plus avec moins, et ce, sur une durée prolongée<sup>9,10</sup>.

## Passage au modèle Produire plus avec moins: dix recommandations

Les dix recommandations ci-après ont été formulées à l'attention des pays qui opèrent la transition vers une intensification durable des cultures de maïs, de riz et de blé. Elles s'appuient sur les enseignements tirés des systèmes agricoles Produire plus avec moins présentés au *chapitre 3* et sur d'autres approches écosystémiques mises en pratique dans le monde en développement.

### **1 Promouvoir le modèle Produire plus avec moins dans le contexte de la transformation structurelle**

L'un des principaux défis que doivent relever les responsables politiques dans leur gestion du passage à une agriculture durable – et, plus généralement, dans la transformation structurelle des économies et des sociétés – est la mise en place et le renforcement des institutions et des partenariats ainsi que la coordination de leurs actions. Il faut établir un cadre politique multisectoriel qui envisage l'agriculture et la croissance agricole dans le contexte de la gestion des ressources naturelles, des politiques d'urbanisation, des choix d'investissement public, de la réduction des gaspillages alimentaires, de la transition vers des régimes alimentaires plus durables et de la création d'emplois non agricoles en milieu rural.

Dans cette vision de la durabilité, le modèle Produire plus avec moins devient partie intégrante de la transition vers des «économies vertes» qui s'opère à l'échelle mondiale, et qui vise à améliorer le bien-être humain et l'équité sociale tout en réduisant de manière notable les risques pour l'environnement, les pénuries écologiques et le rythme du changement climatique. Le passage à une agriculture plus respectueuse de l'environnement devrait accroître les rendements et les revenus des agriculteurs, tout en créant des retombées favorables et des effets de synergie dans les domaines social, économique et environnemental, comme une amélioration de la nutrition, une réduction de la dépendance à l'égard des importations de produits alimentaires et une diminution de la pollution environnementale<sup>11</sup>. Une approche de ce type nécessitera une coopération et une intégration de l'action des ministères, de façon à garantir la compatibilité des politiques et programmes sectoriels<sup>12, 13</sup>.

Dans de nombreux pays en développement, les institutions nécessaires pour passer à des systèmes Produire plus avec moins – dans le domaine de l'enseignement agricole, de la recherche, de la vulgarisation, de l'élaboration de politiques et de la production et de la certification de semences – sont soit insuffisantes, soit inexistantes. Elles doivent être créées ou renforcées. Le plus souvent, les ministères et les institutions nationales ne coordonnent pas les mesures qui influent sur la productivité et la durabilité agricoles. De fait, il n'est pas rare que les pays mènent des politiques et des actions contradictoires.

Les ministères dont l'action est primordiale pour la promotion d'une production végétale durable – ministères chargés de l'agriculture, de l'élevage, de l'environnement, des ressources naturelles, des forêts, de la pêche, de la transformation et de la commercialisation des produits alimentaires et du travail – doivent harmoniser leurs stratégies et leurs actions en vue d'en maximiser les avantages et les effets. Les décideurs publics doivent également créer et renforcer les capacités d'analyse et de recherche de compromis entre les différents secteurs agricoles, et souvent au sein même du sous-secteur des cultures végétales.

De nombreux organismes non gouvernementaux interviennent aussi dans la production, la transformation et la commercialisation des céréales. Des organisa-

tions de la société civile représentent différentes parties prenantes, notamment les agriculteurs, les travailleurs agricoles, les paysans sans terre, les femmes, les jeunes et les peuples autochtones. Elles touchent les groupes les plus vulnérables de la société et font entendre les préoccupations de ces populations lors des concertations sur les politiques et de la conception des programmes et des projets. Les organisations de la société civile, notamment les mouvements sociaux de petits exploitants agricoles, ont réussi à établir un dialogue avec les pouvoirs publics et d'autres acteurs aux niveaux régional et mondial et ont contribué à l'élaboration de nouveaux modèles de gouvernance. Elles doivent participer aux concertations multipartites nationales et être pleinement associées à la planification et à la mise en œuvre des politiques publiques.

Le secteur privé, y compris les organisations d'agriculteurs, les petites et moyennes entreprises, les entreprises internationales et les fondations privées, est également un partenaire important. L'agriculture étant une activité de base du secteur privé, celui-ci peut appuyer des initiatives en faveur des petites exploitations agricoles et contribuer à assurer la sécurité alimentaire par des investissements productifs et responsables et par la création d'emplois.

Les partenariats entre les organisations de la société civile et le secteur privé et entre ces acteurs et les institutions nationales, doivent être renforcés et leurs actions doivent être harmonisées afin de favoriser une mise en œuvre efficiente du modèle Produire plus avec moins. Pour générer le maximum d'avantages, les plans nationaux de développement devront être formulés en consultation avec les principales parties prenantes, dans le cadre de processus participatifs, ce qui permettra de s'assurer du soutien et de l'engagement de ces parties et de coordonner plus facilement les actions.

## **2 Promouvoir des politiques visant à faciliter l'adoption du modèle Produire plus avec moins par les agriculteurs**

Les décideurs ont un rôle clé à jouer dans la création d'un environnement porteur, propice à l'intensification durable des cultures. Ils doivent appuyer les activités de recherche et de vulgarisation nécessaires, l'accès au crédit et aux marchés des intrants/extrants et le renforcement des capacités des parties prenantes dans l'ensemble des chaînes de valeur du maïs, du riz et du blé. Ils doivent inciter les agriculteurs à diversifier leurs systèmes de production en renforçant les marchés des cultures produites en rotation et des produits issus de l'élevage et de la foresterie<sup>5</sup>. On constate régulièrement que l'accès en temps utile aux engrais a un effet favorable majeur sur les rendements des cultures, tandis que la disponibilité de semences de qualité de variétés adaptées et l'accès à ces semences facilitent la diversification<sup>14, 15</sup>.

Des politiques et des investissements appropriés peuvent réduire les risques auxquels les agriculteurs sont susceptibles d'être exposés lors du passage au modèle Produire plus avec moins<sup>16</sup>. Ces mesures peuvent notamment prendre la forme d'allègements fiscaux pour les institutions financières qui proposent des services en faveur de l'agriculture durable dans les zones rurales; de politiques d'assurance agricole; d'une protection sociale visant à atténuer les risques et renforcer la résilience; d'une rémunération des services environnementaux et d'un financement public de la recherche, du développement et de la vulgarisation agricoles<sup>17</sup>.

L'adoption du modèle Produire plus avec moins aura sur l'environnement des effets bénéfiques qui devront être reconnus et donner lieu à une compensation. La rémunération des services environnementaux de l'agriculture est quelque

chose de relativement nouveau, mais des travaux considérables ont été menés dans ce domaine ces dernières années. La Chine, par exemple, lie les systèmes agricoles qui préservent les ressources naturelles aux financements pour l'atténuation du changement climatique. Avec l'appui de la FAO, le Viet Nam élabore des stratégies de financement en vue d'assurer une rémunération des services environnementaux<sup>13</sup>.

Les pouvoirs publics peuvent, au moyen de programmes d'achats institutionnels, améliorer la sécurité alimentaire et nutritionnelle des groupes vulnérables et intégrer les petits exploitants aux marchés en tant que fournisseurs. Grâce à une formation à la gestion, à des achats groupés d'intrants et à la commercialisation collective, des organisations de petits exploitants agricoles au Kenya sont en mesure de rivaliser avec de grandes entreprises lors des appels d'offres émis par le Programme alimentaire mondial pour ses achats de maïs<sup>18</sup>. Des programmes de protection sociale bien conçus peuvent stimuler la production agroalimentaire des petits exploitants, créant une situation «gagnant-gagnant» tant pour les consommateurs que pour les producteurs<sup>19, 20</sup>. Le Brésil, par exemple, a acheté en 2013 quelque 270 000 tonnes de produits alimentaires auprès de 95 000 exploitants familiaux, en vue d'assurer des distributions gratuites de vivres aux personnes en situation d'insécurité alimentaire et au réseau d'aide sociale du pays<sup>21</sup>.

Il peut aussi être nécessaire d'élaborer des politiques pour remédier aux pénuries de main-d'œuvre dans les zones rurales. Pour faire sortir des personnes de la pauvreté au moyen de l'agriculture, il faut accroître la rémunération du travail, et pas seulement les rendements. Il y a peu de chances que les agriculteurs adoptent les pratiques du modèle Produire plus avec moins si celles-ci n'offrent pas une rentabilité soutenant la comparaison avec celle des autres secteurs. La réussite du passage à ce modèle dépendra de l'adoption de technologies et de mesures susceptibles de renforcer les piliers environnementaux, économiques et sociaux de la durabilité, de réduire les risques et de permettre des économies de main-d'œuvre<sup>13</sup>.

Les pays devront peut-être aussi revoir leurs programmes actuels de soutien à l'agriculture en vue d'éliminer les «subventions perverses» qui encouragent des pratiques préjudiciables – telles que l'utilisation excessive d'engrais, de pesticides et d'eau, ou la déforestation, qui entraîne une perte supplémentaire de biodiversité – et de les remplacer par des mesures incitant à adopter des pratiques durables.

### **3 Investir davantage dans l'agriculture**

L'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture a appelé à une nouvelle stratégie d'investissement agricole, qui recentre les ressources publiques, à tous les niveaux, sur la fourniture de biens publics et encourage les agriculteurs à investir dans l'intensification durable des cultures. Les agriculteurs sont déjà les plus gros investisseurs du secteur. Cependant, en l'absence d'une bonne gouvernance, d'incitations appropriées et de biens publics essentiels, ils n'investissent pas suffisamment et, souvent, n'investissent pas dans des systèmes de production durable<sup>17, 22</sup>.

Les investissements effectués par les pouvoirs publics et les partenaires de développement, lorsqu'ils sont dûment orientés vers l'amélioration durable de la productivité agricole et des revenus des agriculteurs, représentent un bon moyen de favoriser la croissance économique et la réduction de la pauvreté, la sécurité alimentaire et nutritionnelle et la durabilité environnementale. Les

investissements dans les infrastructures rurales, dans les services de crédit, dans l'éducation, la vulgarisation et la formation et dans une recherche-développement spécifiquement axée sur la petite agriculture peuvent contribuer à accroître les disponibilités alimentaires et à améliorer l'efficacité des marchés agricoles<sup>17</sup>.

Des investissements sont notamment nécessaires dans les routes, les chaînes du froid, la transformation, le conditionnement, le stockage et la commercialisation, afin de diminuer les pertes et gaspillages de produits alimentaires, lesquels représentent d'après les estimations un tiers de la production mondiale. À long terme, ces investissements auraient des retombées bien plus importantes – en matière de productivité et de croissance économique – que les autres dépenses, telles que les subventions aux intrants<sup>17</sup>.

Le passage au modèle Produire plus avec moins peut nécessiter des investissements non négligeables de la part des pays, pour créer un environnement porteur, et de la part des agriculteurs, pour adopter des pratiques qui pourraient ne porter leurs fruits qu'après plusieurs années. Devant l'accélération du changement climatique, la nécessité de remédier de manière efficace à l'exposition accrue des agriculteurs appelle des stratégies d'investissement qui accordent une plus grande priorité à la gestion des risques<sup>9, 10, 14</sup>.

## 4 Définir et protéger les droits des agriculteurs sur les ressources naturelles

Le passage au modèle Produire plus avec moins requiert également des mesures de protection et de renforcement de l'accès des petits exploitants aux ressources naturelles, notamment la terre, l'eau et la biodiversité agricole. Des régimes fonciers précaires et inégaux continuent d'exister dans une grande partie du monde et peuvent déboucher sur des expropriations, des déplacements et des expulsions<sup>23</sup>. Or, une définition claire des droits fonciers est nécessaire pour favoriser un accès équitable aux ressources productives et une gestion durable de celles-ci. Les agriculteurs n'adopteront les pratiques du modèle Produire plus avec moins que s'ils peuvent bénéficier pendant une période suffisamment longue de l'augmentation de valeur du capital naturel<sup>7</sup>.

Souvent, les droits des agriculteurs sont mal définis, se recoupent ou ne sont pas établis en bonne et due forme. L'amélioration des droits sur les terres et les eaux – notamment ceux des femmes, qui sont de plus en plus souvent celles qui prennent les décisions de production – est une mesure incitative fondamentale pour l'adoption d'un modèle de production végétale durable. Dans de nombreux pays en développement, les programmes ayant trait au régime foncier se sont principalement concentrés sur la formalisation et la privatisation des droits fonciers, sans vraiment tenir compte des modes coutumiers et collectifs de faire-valoir. Le gouvernement devrait mieux reconnaître ces modes, car il apparaîtrait de plus en plus clairement que là où ils assurent un certain degré de sécurité, ils peuvent également stimuler efficacement les investissements<sup>5</sup>.

Dans leurs politiques et stratégies visant à encourager une production végétale durable, les gouvernements et leurs partenaires de développement devront utiliser, en tant que de besoin, les *Directives volontaires pour une gouvernance responsable des régimes fonciers applicables aux terres, aux pêches et aux forêts dans le contexte de la sécurité alimentaire nationale*<sup>24</sup> du Comité de la sécurité alimentaire mondiale (CSA). Ces directives constituent une référence qui fait autorité pour l'élaboration de lois et de politiques en matière de droits d'accès et de droits fonciers. Elles donnent aux investisseurs et aux promoteurs des indications claires sur les pratiques optimales et fournissent aux organisations de

la société civile des données de référence que ces organisations peuvent utiliser dans les travaux qu'elles entreprennent pour le compte des communautés rurales.

Les autres directives utiles comprennent les *Principes du CSA pour un investissement responsable dans l'agriculture et les systèmes alimentaires*<sup>22</sup>, ainsi que les *Principes pour un investissement agricole responsable qui respecte les droits, les moyens d'existence et les ressources*<sup>25</sup>, élaborés en 2009 par la FAO, le Fonds international de développement agricole (FIDA), la Conférence des Nations Unies sur le commerce et le développement (CNUCED) et la Banque mondiale.

L'accès à la biodiversité et l'utilisation durable de celle-ci sont également des aspects essentiels du modèle Produire plus avec moins. Les agriculteurs ont besoin d'un accès non seulement à différentes espèces permettant de diversifier leurs systèmes agricoles, mais aussi à des ressources génétiques améliorées au sein de ces espèces, afin de produire plus avec moins et de relever les défis du changement climatique. Les pays doivent renforcer leurs programmes en faveur de la conservation et de l'utilisation durable de la biodiversité, devenir parties à des instruments internationaux tels que la Convention sur la diversité biologique, le Traité international sur les ressources phytogénétiques pour l'alimentation et l'agriculture et la Commission des ressources génétiques pour l'alimentation et l'agriculture et travailler en étroite collaboration avec les centres du Consortium du CGIAR.

## 5 Promouvoir des chaînes de valeur et des marchés plus efficaces

L'efficacité des chaînes de valeur est d'une importance vitale pour la sécurité alimentaire, la réduction de la pauvreté et la durabilité des systèmes alimentaires et agricoles. Pour être durables sur le plan économique, social et environnemental, les chaînes de valeur doivent créer de la valeur ajoutée et accroître les revenus, favoriser une répartition plus équitable des avantages et réduire l'empreinte écologique à tous les stades<sup>26</sup>.

Les chaînes de valeur alimentaires durables sont le fruit d'une collaboration de toutes les parties prenantes, notamment les petits exploitants agricoles, les entreprises du secteur agroalimentaire, les pouvoirs publics et la société civile. Dans un premier temps, le développement des chaînes de valeur alimentaires doit essentiellement porter sur l'amélioration de l'efficacité – notamment la réduction des pertes après récolte –, amélioration qui entraîne une baisse des prix des produits alimentaires et une augmentation des disponibilités alimentaires, ce qui permet aux ménages d'acheter davantage de nourriture. L'évolution de la demande des consommateurs devient ensuite un facteur déterminant d'innovation et de création de valeur, entraînant une amélioration continue de l'offre alimentaire et accroissant les avantages pour les consommateurs<sup>26</sup>.

Les pouvoirs publics peuvent favoriser des «modèles d'activité où chacun ait sa place» au moyen de cadres juridiques établissant, par exemple, les bonnes pratiques en matière d'agriculture contractuelle. En République-Unie de Tanzanie, où la demande de riz explose, les petits exploitants et les grands riziculteurs privés collaborent dans le cadre de mécanismes de sous-traitance<sup>27</sup>. Cependant, réduire la dépendance de l'Afrique subsaharienne à l'égard des importations de riz exige des améliorations à la fois qualitatives et quantitatives. Une récente étude a montré que les consommateurs urbains africains étaient «prêts à payer» pour un riz produit dans leur pays qui soit de meilleure qualité (grâce à une amélioration variétale et à des progrès dans la transformation)<sup>28</sup>.



Un environnement juridique et institutionnel favorisant et soutenant la coopération entre petits exploitants agricoles permettrait à ceux-ci de bénéficier d'économies d'échelle dans des activités telles que les achats d'intrants et la transformation, le transport et la vente des produits<sup>7</sup>. La commercialisation de la production des petits exploitants peut également être facilitée par des systèmes de certification octroyant des avantages aux producteurs qui adoptent des modes de production durable.

## **6 Renforcer le soutien de la recherche-développement agricole**

La recherche-développement agricole s'est déplacée du secteur public vers le secteur privé national et multinational. Avec l'augmentation des investissements privés, les investissements publics dans la RD ont été réduits dans presque la moitié des pays à faible revenu<sup>29</sup>. Les entreprises privées ont tendance à se concentrer sur les produits de base et à privilégier les marges bénéficiaires à court terme<sup>30</sup>. Elles ont également tendance, dans de nombreux cas, à promouvoir des technologies – moyens chimiques de lutte phytosanitaire, par exemple – qui dépendent d'intrants externes, sans se soucier de la durabilité<sup>31</sup>.

Le secteur public devra lancer des initiatives à long terme dans le domaine de la gestion des ressources naturelles, notamment des recherches sur les sols, l'eau, les ressources génétiques et la durabilité<sup>30</sup>. De nombreux gouvernements devront maintenir ou renforcer leur aptitude à mener des travaux de recherche. Cela peut consister non seulement à investir dans des installations et du matériel de recherche, mais aussi à s'assurer que les capacités scientifiques en place sont adéquates et suffisantes pour offrir à l'agriculture en général et au secteur des petits exploitants en particulier les mesures et les technologies dont ils ont besoin.

Dans la plupart des pays en développement, les capacités de recherche sont particulièrement insuffisantes dans des domaines tels que la biotechnologie, la modélisation et la prévision. L'utilisation de la télédétection par satellite et des télécommunications modernes est essentielle pour apporter des réponses rapides et efficaces à l'évolution des demandes auxquelles l'agriculture doit faire face et aux effets de plus en plus marqués du changement climatique.

Pour créer des technologies susceptibles de convaincre les agriculteurs, l'innovation scientifique doit puiser dans les connaissances traditionnelles de ces derniers. La recherche doit répondre aux besoins des zones marginales d'exploitation agricole et servir les intérêts des petits exploitants en améliorant la productivité agricole et la conservation des ressources naturelles et en aidant à la diversification des systèmes agricoles dans des produits de plus grande valeur.

La recherche doit être plus étroitement associée à la vulgarisation et à d'autres sources de connaissances. Le renforcement des capacités de déploiement et de mise en œuvre contribuera au développement des systèmes agricoles. Produire plus avec moins et à leur adoption par les petits exploitants. Les instituts internationaux de recherche agronomique, de même que les agences de financement, peuvent jouer un rôle important en soutenant ces actions nationales.

## 7 Promouvoir l'innovation technologique

Les petits producteurs de céréales sont les premiers concernés par les moyens mis en œuvre pour assurer la sécurité alimentaire et nutritionnelle, que ce soit au niveau des ménages ou à l'échelle de la planète. Ils devront avoir accès à toutes les technologies nécessaires à l'intensification durable des cultures. Exemples:

**Mécanisation.** L'agriculture de conservation (ac) nécessite de l'outillage et des machines adaptés à tous les niveaux technologiques. Au Brésil, une industrie nationale florissante produit du matériel d'ac convenant à différents sols, climats et systèmes agricoles<sup>32</sup>. Certaines de ces technologies ont été transférées en Afrique et en Asie, où des fabricants locaux produisent des planteuses labour zéro manuelles ou à traction animale et du matériel de semis direct tracté<sup>33, 34</sup>. Les pouvoirs publics doivent mettre au point des stratégies pour transposer à grande échelle l'agriculture de conservation et d'autres pratiques durables, en définissant clairement les rôles du secteur privé dans la fabrication, la distribution, la maintenance et la réparation, et ceux du secteur public dans la recherche, le renforcement des capacités et l'appui du développement des entreprises<sup>35, 36</sup>.

**Nouvelles cultures et variétés.** Le développement accéléré de variétés améliorées est crucial, notamment pour les petits exploitants agricoles, pour que l'on relève les défis futurs. La diversité des cultures est à la base de la diversification de leurs systèmes agricoles et contribue à renforcer la résilience face au changement climatique et à d'autres pressions. Les nouvelles approches en matière de sélection végétale, comme les marqueurs moléculaires, pourraient améliorer les rendements céréaliers, la teneur en nutriments et la résistance aux ravageurs et aux maladies et réduire le temps nécessaire pour mettre au point et lancer de nouvelles variétés<sup>37</sup>. Les variétés hybrides de maïs offrant un meilleur rendement prennent de plus en plus d'importance dans les systèmes agricoles des petits exploitants et les hybrides de riz et de blé pourraient devenir plus courants. La sélection végétale doit permettre l'amélioration génétique des composantes des systèmes de cultures intercalaires et de la qualité nutritionnelle des résidus de cultures céréalières utilisés pour nourrir des animaux. Le soutien de la conservation sur le lieu d'exploitation et l'amélioration des variétés utilisées par les agriculteurs sont des aspects cruciaux.

**Amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau.** Les grands producteurs de cultures irriguées de maïs, de riz et de blé n'ont pas ou n'auront bientôt plus accès à suffisamment d'eau pour maintenir la production par habitant. Le recours à des variétés qui utilisent plus efficacement l'eau, l'adoption de pratiques propices à la conservation de cette ressource, telles que le labour zéro et les cultures de couverture et l'augmentation des investissements dans des technologies permettant d'économiser l'eau, comme le nivellement du sol, l'irrigation au goutte-à-goutte et la collecte des eaux pluviales, seront déterminants pour produire dans un contexte de changement climatique. La culture de riz et de blé sur des plates-bandes surélevées irriguées a considérablement amélioré l'efficacité d'utilisation de l'eau et a dopé les rendements en Égypte, en Inde et au Mexique. Les systèmes de plates-bandes surélevées améliorent également la productivité de l'eau, avec une augmentation notable des rendements, dans la production de maïs pluvial. Les technologies d'irrigation améliorée donnent les meilleurs résultats lorsque la valeur de l'eau est appréciée et son prix calculé de manière appropriée<sup>38</sup>. Les droits des petits exploitants sur l'eau, ainsi que sur la terre, doivent être protégés.

**Engrais innovants.** Presque aucun investissement n'a été effectué dans la recherche-développement sur les engrais au cours des cinq dernières décennies.

Si l'on prend comme point de départ la physiologie des plantes et les processus du sol, plutôt que la chimie, l'amélioration de la conception du «conditionnement» des nutriments et des stratégies plus efficaces de «libération» des nutriments peuvent favoriser une assimilation plus rapide des éléments nutritifs par les plantes. Des engrais innovants – conçus pour nourrir les plantes plutôt que le sol – offrirait de multiples avantages, notamment une teneur plus élevée des céréales en plusieurs nutriments, la restauration de la fertilité des sols et une augmentation de la résilience et de la durabilité des systèmes. Des engrais azotés améliorés permettraient de préserver la santé des écosystèmes en réduisant les émissions d'oxyde nitreux dans l'environnement<sup>39</sup>.

**Protection intégrée.** Étant donné que les insectes nuisibles, les adventices et les maladies évoluent et sont facilement transportés d'un endroit à un autre, il est nécessaire de mettre au point en permanence des technologies de protection intégrée si l'on veut pouvoir relever les défis de la production céréalière à mesure que ceux-ci apparaissent. Parmi les innovations récentes, on peut citer la sélection destinée à restaurer la capacité naturelle des systèmes racinaires du maïs à repousser les ravageurs; un biopesticide obtenu à partir de graines de margousier, qui élimine la cicadelle brune du riz; et des champignons et des nématodes extrêmement efficaces contre la cèphe des chaumes<sup>31,40</sup>. L'innovation en matière de protection intégrée doit être soutenue par des politiques fortes et nécessite la participation active des agriculteurs par l'intermédiaire des écoles pratiques d'agriculture.

**Amélioration de la gestion après récolte.** Les pertes après récolte de céréales dues aux organismes nuisibles et aux rongeurs sont considérables dans les systèmes de production à petite échelle. Sous les climats humides, les installations de séchage sont particulièrement importantes pour atténuer le risque de maladies fongiques<sup>41</sup>. L'analyse des systèmes traditionnels de gestion après récolte peut permettre de déterminer les lacunes et d'apporter des solutions appropriées. En Afghanistan, le remplacement des silos en argile par des silos en métal pour le stockage des céréales a aidé quelque 76 000 agriculteurs à ramener les pertes de 20 pour cent à moins de 2 pour cent des récoltes<sup>42</sup>. En Afrique, la FAO a encouragé une gestion du stockage des céréales – y compris par des méthodes simples de mesure de l'humidité et des moyens non chimiques de lutte contre les ravageurs et les maladies – adaptée aux besoins des petits agriculteurs frappés par les sécheresses et les inondations<sup>43</sup>.

**Technologies de nouvelle génération.** Une application pour smartphone de gestion des cultures de riz, développée par l'IRRI, calcule des valeurs recommandées pour la gestion des cultures et des nutriments en fonction des conditions locales et les envoie aux agriculteurs par SMS. Ces recommandations ont permis d'augmenter les rendements par hectare de 0,4 tonne en moyenne, et les revenus de 100 USD<sup>44</sup>. La généralisation des téléphones portables en Afrique subsaharienne offre des occasions similaires de mettre en relation les chercheurs et les agriculteurs, et les agriculteurs et les marchés. D'autres innovations maintenant accessibles aux petits exploitants sont relativement peu coûteuses, notamment lorsqu'elles sont mises à disposition par l'intermédiaire de coopératives ou de services de location. Il s'agit notamment du nivellement du sol au laser, des tableaux de couleurs de feuilles qui aident à effectuer les apports en engrais minéraux aux moments adéquats et des capteurs électroniques qui détectent les carences des plantes en azote et les quantités de nutriments dans les résidus de céréales. Toutefois, avant de recommander ces innovations, il convient d'en évaluer les incidences sociales, économiques et environnementales.

## 8 Améliorer la communication avec les agriculteurs et contribuer à renforcer leurs capacités

On sait bien moins de choses sur les technologies agroécologiques et celles qui préservent les ressources que sur l'utilisation d'intrants externes dans la production intensive<sup>45</sup>. Le manque d'informations sur les approches écosystémiques et sur la nécessité de les adapter à des conditions agroécologiques et socioéconomiques spécifiques constitue un obstacle majeur à la transposition à grande échelle du modèle Produire plus avec moins.

L'intensification durable des cultures demande généralement davantage de connaissances et de gestion. Il est donc important d'aider les agriculteurs à renforcer leurs capacités à comprendre les fonctions des écosystèmes et de s'appuyer sur leurs connaissances traditionnelles pour déterminer les pratiques et les technologies appropriées et les adapter.

La vulgarisation, la formation et l'enseignement agricoles doivent mettre davantage l'accent sur les systèmes de production intégrés. Ce changement doit intervenir à tous les niveaux d'apprentissage, de sorte que toutes les parties prenantes soient mieux informées et plus au fait des principes de la production végétale durable et de son application en pratique au moyen du modèle Produire plus avec moins.

Les services consultatifs destinés à promouvoir le modèle Produire plus avec moins devront travailler en étroite collaboration avec les organisations et les réseaux d'agriculteurs, ainsi que dans le cadre de partenariats public-privé. Les méthodes participatives peuvent aider les producteurs et leurs conseillers à partager des expériences, des connaissances et des compétences en matière de gestion de systèmes agricoles. Les écoles pratiques d'agriculture, par exemple, offrent une plateforme d'expérimentation ainsi que de communication et d'échanges entre agriculteurs. Du fait qu'elles sont le pilier de l'agriculture dans de nombreux pays, les femmes doivent être au centre des actions de formation et de vulgarisation et recevoir le soutien dont elles ont besoin sur des questions plus générales telles que l'équité entre les sexes, les moyens d'existence durables et l'accès aux ressources.

L'appui en matière de renforcement des capacités, d'enseignement et de formation doit être considéré comme faisant partie intégrante d'une action plus large de développement du capital social – c'est-à-dire de la valeur générée par les liens sociaux, les règles, les normes et les sanctions, qui donne aux communautés d'agriculteurs la confiance nécessaire pour investir dans des activités collectives et qui diminue la probabilité que ces mêmes communautés se lancent dans des actions privées non maîtrisées entraînant des conséquences préjudiciables, comme la dégradation des ressources naturelles<sup>46</sup>. Par exemple, du fait des connaissances nécessaires pour mettre en œuvre la protection intégrée, les écoles pratiques d'agriculture et autres formes participatives de partage de connaissances contribuent à constituer un capital social, ainsi qu'un capital humain et naturel<sup>31</sup>.

## 9 Renforcer les systèmes semenciers

Les systèmes agricoles Produire plus avec moins nécessitent des variétés à rendement plus élevé, qui sont plus résistantes et mieux adaptées aux pratiques de production respectueuses des écosystèmes, et utilisent les intrants de manière plus efficiente. Pour que les petits exploitants agricoles aient accès à des semences de qualité de variétés améliorées, il faudra renforcer les systèmes semenciers nationaux.

Dans de nombreux pays en développement, les systèmes semenciers sont soit inexistantes, soit inefficaces, en raison de cadres réglementaires insuffisants, d'un manque de financement et de capacités techniques et de gestion limitées. L'approvisionnement en semences est parfois considéré comme une activité du secteur privé, mais ce dernier ne produit et ne vend souvent que les semences d'espèces et de variétés qui lui permettent de réaliser des profits maximaux et se désintéresse de nombreuses espèces et variétés essentielles pour la sécurité alimentaire et pour la productivité et la durabilité de la petite agriculture.

Il faut renforcer les systèmes semenciers nationaux par le renforcement des capacités, la mise en place d'une procédure accélérée de lancement de variétés, la multiplication également accélérée de semences et le soutien de la conservation sur l'exploitation et des banques de semences communautaires. Il est également nécessaire de renforcer les capacités des pouvoirs publics, d'encourager le secteur privé à investir et d'associer les organisations de la société civile et les agriculteurs à la formulation et à la mise en œuvre de la politique semencière nationale<sup>5, 47</sup>.

Dans le secteur des semences de blé, les mécanismes destinés à accélérer le rythme de production de ces semences pourraient comprendre la multiplication des semences de la première génération préalablement à la mise en circulation et en contre-saison, lorsque cela est faisable. Ces gains d'efficience seront nécessaires pour éviter que la domination des «mégavariétés» vulnérables ne s'aggrave encore<sup>48</sup>. Des approches analogues seraient efficaces pour le riz également.

Les semences d'hybrides de maïs sont normalement produites et commercialisées par le secteur privé, tandis que les semences de variétés à pollinisation libre le sont par des ONG et des organisations locales. Des partenariats public-privé innovants ont été lancés par le Brésil, la Chine et le Centre international d'amélioration du maïs et du blé (CIMMYT). Ils fournissent notamment des lignées de maïs améliorées au secteur privé en vue de la production et de la commercialisation de semences hybrides, en échange de financements ou d'autres formes de soutien de la recherche. Cependant, aucune collaboration efficace n'a été instaurée pour la production et la commercialisation des semences de variétés à pollinisation libre de maïs, pourtant couramment utilisées par les petits exploitants.

Des approches participatives tenant compte du potentiel du secteur semencier non structuré et de l'importance du rôle des femmes dans ce secteur pourraient renforcer les systèmes semenciers des trois cultures. En Afrique subsaharienne, les structures de production de semences communautaires – qui sont pour un grand nombre dirigées par des femmes – assurent la multiplication de semences de qualité de variétés de maïs; en Afrique de l'Ouest, elles produisent jusqu'à 20 tonnes de semences chaque année. La transposition à grande échelle de cette approche marquera une étape importante vers l'autosuffisance dans les zones rurales mal desservies.

## 10 Travailler avec des organisations, des instruments et des mécanismes internationaux

Les pays devraient tirer parti des organisations, des instruments et des mécanismes mondiaux, régionaux et sous-régionaux pour assurer une mise en œuvre efficace du modèle Produire plus avec moins. L'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture dispose de compétences sans équivalent et d'une vaste expérience en matière de soutien apporté aux pays dans la formulation de politiques et de stratégies et le développement de technologies pour l'intensification durable des cultures céréalières. Elle héberge des instruments internationaux, comme le Traité international sur les ressources phytogénétiques pour l'alimentation et l'agriculture, la Convention internationale pour la protection des végétaux, la Convention de Rotterdam et le Comité de la sécurité alimentaire mondiale, qui ouvrent aux pays des possibilités de partage d'expériences et de collaboration.

Parmi les autres organisations mondiales influentes en matière de maïs, de riz et de blé, on peut citer plusieurs centres du CGIAR, l'AIEA, l'OCDE, la CNUCED, le Département des affaires économiques et sociales des Nations Unies, le Programme des Nations Unies pour l'environnement et la Banque mondiale. De nombreuses organisations régionales et sousrégionales\* soutiennent également le développement agricole durable en fournissant des technologies, en renforçant les capacités, en améliorant les échanges d'informations et en facilitant le commerce. Un certain nombre de pays en développement ont acquis une expérience considérable dans la mise en œuvre de modèles alimentaires et agricoles durables, ce qui ouvre des possibilités de coopération Sud-Sud plus poussée.

**On trouve de multiples déclinaisons** du modèle Produire plus avec moins et de son approche écosystémique en matière d'intensification durable des cultures. Il n'existe pas de semences ni de technologies magiques capables d'améliorer le bilan social, économique et environnemental de la production céréalière pour l'ensemble des paysages agricoles, et pour l'ensemble des régions. Le modèle Produire plus avec moins représente une évolution majeure, d'un modèle homogène de production végétale vers des systèmes agricoles fondés sur l'accumulation de savoirs, et souvent propres au contexte local. C'est pourquoi sa mise en œuvre nécessite du temps, un soutien accru aux agriculteurs et une ferme volonté de renforcer les programmes nationaux<sup>9, 10</sup>.

La généralisation de l'adoption du modèle Produire plus avec moins nécessite une action concertée à tous les niveaux, ainsi que la participation active des pouvoirs publics, des organisations internationales, de la société civile et du secteur privé. Le défi est énorme, mais les avantages le seront également. Le modèle Produire plus avec moins aidera le monde à passer à une alimentation et une agriculture durables et à bâtir le monde libéré de la faim que nous souhaitons tous.

\* Par exemple, l'Institut interaméricain de coopération pour l'agriculture (IICA) et le Fonds régional pour la technologie agricole (FONTAGRO) en Amérique latine; l'Association des institutions de recherche agricole de l'Asie et du Pacifique (APAARI); le Nouveau partenariat pour le développement de l'Afrique (NEPAD), l'Association pour le renforcement de la recherche agricole en Afrique orientale et centrale (ASARECA), le Centre de coordination de la recherche agronomique pour l'Afrique australe (SACCAR) et le Conseil ouest et centrafricain pour la recherche et le développement agricole (CORAF).

# Bibliographie

## Chapitre 1. Renouer le lien que nous avons avec les céréales

1. FAO. 2015. FAOSTAT. Base de données statistiques en ligne: Production (<http://faostat.fao.org>).
2. FAO. 2015. FAOSTAT. Base de données statistiques en ligne: Bilans alimentaires (<http://faostat.fao.org>).
3. United States Department of Agriculture. 2015. *World agricultural supply and demand estimates, January 2015*. Washington, DC.
4. Murphy, D. 2007. *People, plants and genes: the story of crops and humanity*. Oxford, UK, Oxford University Press.
5. Molina, J., Sikora, M., Garud, N., Flowers, J., Rubinstein, S., Reynolds, A., Huang, P., Jackson, S., Schaal, B., Bustamante, C., Boyko, A. & Purugganan, M. 2011. Molecular evidence for a single evolutionary origin of domesticated rice. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 108: 8351–8356.
6. Wang, M., Yu, Y., Haberer, G., Marri, P.R., Fan, C., Goicoechea, J.L., Zuccolo, A., Song, X., Kudrna, D., Ammiraju, J.S.S., Cossu, R.M., Maldonado, C., Chen, J., Lee, S., Sisneros, N., de Baynast, K., Golser, W., Wissotski, M., Kim, W., Sanchez, P., Ndjiondjop, M.-N., Sanni, K., Long, M., Carney, J., Panaud, O., Wicker, T., Machado, C.A., Chen, M., Mayer, K.F.X., Rounsley, S. & Wing, R.A. 2014. The genome sequence of African rice (*Oryza glaberrima*) and evidence for independent domestication. *Nature Genetics* 46, 982–988.
7. Landon, A.J. 2008. The 'How' of the Three Sisters: The Origins of Agriculture in Mesoamerica and the Human Niche. *Nebraska Anthropologist* 23. Paper 40. Lincoln (USA), University of Nebraska-Lincoln.
8. Leakey, R. & Lewin, R. 1977. *Origins: the emergence and evolution of our species and its possible future*. London, Macdonald James Publishers.
9. Wolman, M.G. 1993. Population, land use and environment: A long history. In C. Jolly & B. Boyle Torrey, eds. *Population and land use in developing countries: Report of a workshop*. Washington, DC, The National Academies Press.
10. Burns, T.S. 1994. *Barbarians within the gates of Rome*. Indianapolis (USA), Indiana University Press.
11. Brewbaker, J. 1979. Diseases of maize in the wet lowland tropics and the collapse of the Classic Maya civilization. *Economic Botany*, 33 (2): 101–118.
12. Jordan, W. 1996. *The great famine: Northern Europe in the early fourteenth century*. Princeton (USA), Princeton University Press.
13. Pretty J. N. 1991. Farmers' extension practice and technology adaptation: Agricultural revolution in 17–19th century Britain. *Agriculture and Human Values* VIII, 132–148.
14. Apostolides, A., Broadberry, S., Campbell, B., Overton, N. & van Leeuwen, B. 2008. *English agricultural output and labour productivity, 1250–1850: some preliminary estimates*. Coventry (UK), University of Warwick.
15. FAO. 2011. *Produire plus avec moins. Guide à l'intention des décideurs sur l'intensification durable de l'agriculture paysanne*. Rome.
16. FAO. 2005. *La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2005. Le commerce agricole et la pauvreté – le commerce peut-il être au service des pauvres?* Rome.
17. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. 2015. *World Population Prospects: The 2015 Revision* (available at <http://esa.un.org/unpd/wup/DataQuery/>).
18. FAO. 2010. *The Green Revolution in Asia: Lessons for Africa*, by H. Jhamtani. Rome.
19. FAO. 2009. *L'État de l'insécurité alimentaire dans le monde 2009. Crises économiques – répercussions et enseignements*. Rome.
20. Hazell, P.B.R. 2010. Asia's Green Revolution: past achievements and future challenges. In S. Pandey, D. Byerlee, D. Dawe, A. Dobermann, S. Mohanty, S. Rozelle & B. Hardy, eds. *Rice in the global economy: strategic research and policy issues for food security*, pp 61–92. Los Baños, Philippines, International Rice Research Institute.
21. Rosegrant, M., Tokgoz, S., Bhandary, P. & Msangi, S. 2013. Scenarios for the future of food. In 2012 *Global food policy report*. Washington, DC, IFPRI.
22. Shiferaw B., Smale, M., Braun H.-J., Duveiller, E., Reynolds M. & Muricho, G. 2013. Crops that feed the world 10. Past successes and future challenges to the role played by wheat in global food security. *Food Security*, 5: 291–317.
23. Seck, P.A., Diagne, A., Mohanty, S. & Wopereis, M.C.S. 2012. Crops that feed the world 7: Rice. *Food Security*, 4: 7–24.
24. FAO, FIDA et PAM. 2015. *L'État de l'insécurité alimentaire dans le monde 2015. Objectifs internationaux 2015 de réduction de la faim: des progrès inégaux*. Rome.
25. FAO. 2015. World food situation: Food price index (retrieved: 7 September 2015) (available at [http://www.fao.org/fileadmin/templates/worldfood/Reports\\_and\\_docs/Food\\_price\\_indices\\_data.xls](http://www.fao.org/fileadmin/templates/worldfood/Reports_and_docs/Food_price_indices_data.xls)).
26. FAO. 2014. *La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2014. Ouvrir l'agriculture familiale à l'innovation*. Rome.
27. Frison, E.A., Cherfas, J. & Hodgkin, T. 2011. Agricultural biodiversity is essential for a sustainable improvement in food and nutrition security. *Sustainability*, 3: 238–253.
28. Tschardtke, T., Yann Clough, T.C., Wanger, L.J., Motzke, I., Perfecto, I., Vendermeer, J. & Whitbread, A. 2012. Global food security, biodiversity conservation and the future of agricultural intensification. *Biological Conservation*, 151: 53–59.
29. FAO. 2010. *Le deuxième rapport sur l'état des ressources phylogénétiques pour l'alimentation et l'agriculture dans le monde*. Rome.
30. Solh, M., Braun, H.-J. & Tadesse, W. 2014. *Save and Grow: Wheat*. Paper prepared for the FAO Technical Consultation on Save and Grow: Maize, Rice and Wheat, Rome, 15–17 December 2014. Rabat, ICAR-DA. (mimeo).
31. Pretty, J.N. & Bharucha, Z.P. 2014. Sustainable intensification in agricultural systems. Inverted Review. *Annals of Botany*, 114 (8): 1571–1596.
32. Pingali, P., Hossain, M. & Gerpacio, R. 1997 *Asian Rice Bowls – The returning crisis?* In association with IRRRI. Wallingford, UK, CAB International.
33. Heap, I. 2014. Global perspective of herbicide-resistant weeds. *Pest Management Science*. Special issue: Global herbicide resistance challenge. Vol. 70, Issue 9, pp.1306–1315. September 2014.
34. FAO. 2014. *Agriculture, forestry and other land use emissions by sources and removals by sinks. 1990–2011 Analysis*. FAO Statistics Division Working Paper Series, No. 14–02. Rome.
35. Vermeulen, S.J., Campbell, B.M. & Ingram, J.S. 2012. Climate Change and Food Systems. *Annual Review of Environment and Resources*, 2012.37:195–222. DOI: 10.1146/annurev-environ-020411-130608.
36. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2014. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Final draft Report of Working Group III. Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC.
37. FAO. 2013. *Climate-smart agriculture sourcebook*. Rome.
38. Altieri, M. 2002. Agroecology: the science of natural resource management for poor farmers in marginal environments. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 93: 1–24.
39. ILO. 2012. *Global Employment Trends 2012. Preventing a deeper job crisis*. Geneva, Switzerland.
40. FAO. 2012. *Decent rural employment for food security: a case for action*. Rome.
41. FAO. 2014. *L'État de l'insécurité*

alimentaire dans le monde 2014. Créer un environnement plus propice à la sécurité alimentaire et à la nutrition. Rome.

42. Fan, M.S., Zhao, F.J. & Fairweather-Tait, S.J. 2008. Evidence of decreasing mineral density in wheat grain over the last 160 years. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 22:315–324.
43. Mayer, A.M. 1997. Historical changes in the mineral content of fruits and vegetables. *British Food Journal*, 99:207–211.
44. Davis, D.R., Epp, M.D. & Riordan, H.D. 2004. Changes in USDA food composition data for 43 garden crops. *Journal of the American College of Nutrition*, 23:669–682.
45. FAO. 2012. *Sustainable nutrition security: Restoring the bridge between agriculture and health*. Traore, M., Thompson, B. & Thomas, G. Rome.
46. Foresight. 2011. *The future of food and farming: Challenges and choices for global sustainability*. Final Project Report. London, Government Office for Science.
47. OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques) et FAO. 2015. *Perspectives agricoles de l'OCDE et de la FAO 2015-2024*. Paris et Rome.
48. FAO. 2012. *World agriculture towards 2030/2050 - The 2012 revision*. ESA Working Paper No. 12-03, June 2012. Rome.
49. Fischer, G. 2011. How can climate change and the development of bioenergy alter the long-term outlook for food and agriculture? In P. Conforti, ed. *Looking ahead in world food and agriculture: perspectives to 2050*. Rome, FAO.
50. Fischer, R.A., Byerlee, D. & Edmeades, G.O. 2014. *Crop yields and global food security: will yield increase continue to feed the world?* ACIAR Monograph No. 158. Australian Centre for International Agricultural Research, Canberra.
51. FAO. 2013. *Food wastage footprint. Full cost accounting: Final report*. Rome.
52. Lal, R. 2014. Abating climate change and feeding the world through soil carbon sequestration. In D. Dent, ed. *Soil as world heritage*, pp 443–457. Berlin: Springer.
53. FAO. 2011. *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture. Managing systems at risk*. Rome.
54. FAO. 2013. *Guidelines to control water pollution from agriculture in China - Decoupling water pollution from agricultural production*. Rome.
55. Shiferaw, B., Prasanna B.M., Hellin, J. & Bänziger, M. 2011. Crops that feed the world 6. Past successes and future challenges to the role played by maize in global food security. *Food Security*, 3: 307–327.
56. Funk, C.C. & Brown, M.E. 2009. Declining global per capita agricultural production and warming oceans threaten food security. *Food Security*, 1:271–289.
57. CIMMYT (International Maize and Wheat Improvement Center). 2009. *Wheat facts and futures 2009*. Dixon, J., H.-J. Braun, P. Kosina & J. Crouch, eds. Mexico, D.F., CIMMYT.
58. FAO. 2011. *L'État de l'insécurité alimentaire dans le monde 2011. Quelles sont les conséquences de l'instabilité des cours internationaux pour l'économie et la sécurité alimentaire des pays?* Rome.
59. Pardey, P., Alston, J. & Piggott, R. 2006. *Agricultural R&D in the developing world*. Washington, DC, IFPRI.
60. Pardey, P., Alston, J. & Chan-Kang, C. 2013. Public agricultural R&D over the past half century: an emerging new world order. *Agricultural Economics*, 44(1): 103–113.
61. Beintema, N., Stads, G.J., Fuglie K. & Heisey, P. 2012. *ASTI global assessment of agricultural R&D spending: Developing countries accelerate investment*. IFPRI, ASTI & GFAR, Rome. 24pp.
62. Lobell D.B., Schlenker, W.S. & Costa-Roberts, J. 2011. Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, 333:616–620.
63. Padgham, J. 2009. *Agricultural development under a changing climate: opportunities and challenges for adaptation*. Washington D.C., The World Bank.
64. Wiebe, K., Lotze-Campen, H., Sands, R., Tabeau, A., van der Mensbrugge, D., Biewald, A., Bodirsky, B., Islam, S., Kavallari, A., Mason-D'Croz, D., Müller, C., Popp, A., Robertson, R., Robinson, S., van Meijl, H. & Willenbockel, D. 2015. Climate change impacts on agriculture in 2050 under a range of plausible socioeconomic and emissions scenarios. *Environmental Research Letters*, 10 (2015) 085010.
65. Prasanna, B.M. 2014. Maize research-for-development scenario: challenges and opportunities for Asia. In B.M. Prasanna et al., eds. Book of extended summaries, 12th Asian Maize Conference and Expert Consultation on Maize for Food, Feed, Nutrition and Environmental Security. Bangkok, Thailand, 30 October – 1 November 2014. CIMMYT, Mexico D.F. and APAARI, Bangkok, pp.2–11.
66. Tesfaye, K., Bgegbegebe, S., Cairns, J.E., Shiferaw, B., Prasanna, B.M., Sonder, K., Boote, K.J., Makumbi, D., Robertson, R. 2015. Maize systems under climate change in sub-Saharan Africa: potential impacts on production and food security. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, Vol. 7 Issue 3, pp.247–271.
67. Paterson, R. R. M., & Lima, N. 2010. How will climate change affect mycotoxins in food? *Food Research International*, 43(7): 1902–1914.
68. Mackill, D. J., Ismail, A. M., Pampolina, A.M., Sanchez, D.L., Carandang, J.J. & Septiningsih, E.M. 2010. Stress-tolerant rice varieties for adaptation to a changing climate. *Crop Environment and Bioinformatics*. 7: 250–259.
69. Zeigler, R. 2014. *IRRI 2035: Investing in the future*. Based on a presentation by the Director General to the IRRI community, 30 May 2013. Los Baños, Philippines.
70. Ortiz, R., Sayre, K.D., Govaerts, B., Gupta, R., Subbarao, G.V., Ban, T., Hodson, D., Dixon, J.M., Ortiz-Monasterio, J.I. & Reynolds, M. 2008. Climate change: can wheat beat the heat? *Agriculture, Ecosystems & Environment* 126:45–58.
71. Rosegrant, M. R., Ringler, C., Sulser, T. B., Ewing, M., Palazzo, A. & Zhu, T. 2009. *Agriculture and food security under global change: Prospects for 2025/2050*. Washington, D.C., International Food Policy Research Institute.
72. FAO. 2015. Base de données statistiques en ligne: Commerce (<http://faostat.fao.org>).
73. World Bank. 2015. Poverty and Equity Database (available at <http://povertydata.worldbank.org/poverty/home/>).
74. FAO. 2014. *Perspectives alimentaires. Les marchés en bref*. Rome.
75. Pretty, J.N., Noble, A.D., Bossio, D., Dixon, J., Hine, R.E., de Vries, F. & Morrison, J.L.L. 2006. Resource-conserving agriculture increases yields in developing countries. *Environmental science & technology*, 40: 1114–1119.
76. Power, A.G. 2010. Ecosystem services and agriculture: Tradeoffs and synergies. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1554): 2959–2971.
77. Badgley, C., Moghtader, J., Quintero, E., Zakem, E., Chappell, M., Aviles-Vazquez, K., Samulon, A. & Perfecto, I. 2007. Organic agriculture and the global food supply. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 22: 86–108.
78. Garnett, T., Appleby, M.C., Balmford, A., Bateman, I.J., Benton, T.G., Bloomer, P., Burlingame, B., Dawkins, M., Dolan, L., Fraser, D., Herrero, M., Smith, P., Thornton, P.K., Toulmin, C., Vermeulen, S.J. & Godfray, H.C.J. 2013. Sustainable Intensification in agriculture: premises and policies. *Science* 341: 33–34.
79. FAO. 2010. *Sustainable crop production intensification through an ecosystem approach and an enabling environment: Capturing efficiency through ecosystem services and management*. Rome.
80. FAO. 2012. *Soil organic carbon accumulation and greenhouse gas emission reductions from Conservation Agriculture: a literature review*. Integrated Crop Management, Vol.16–2012. Rome.
81. Lal, R. 2004. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science*. 304, 1623 (2004). DOI: 10.1126/science.1097396.
82. Christiaens, L., Demery, L. & Kuhl, J. 2011. The (evolving) role of agriculture in poverty reduction. *Journal of Development Economics*, 96: 239–254.



## Chapitre 2. Rendre la production céréalière durable

1. FAO. 2011. *Produire plus avec moins. Guide à l'intention des décideurs sur l'intensification durable de l'agriculture paysanne*. Rome.
2. FAO. 2014. *Construire une vision commune pour une alimentation et une agriculture durables: Principes et approches*. Rome.
3. Pretty, J.N. & Bharucha, Z.P. 2014. Sustainable intensification in agricultural systems. Invited Review. *Annals of Botany*, 114 (8): 1571–1596.
4. Kassam, A., Friedrich, T., Derpsch, R. & Kienzle, J. 2014. *Worldwide adoption of Conservation Agriculture*. Paper presented at the 6<sup>th</sup> World Congress on Conservation Agriculture, 22–25 June 2014, Winnipeg, Canada.
5. Baker, C.J., Saxton, K.E., Ritchie, W.R., Chamen, W.C., Reicosky, D.C., Ribeiro, M.F.S., Justice, S.E. & Hobbs, P.R. 2007. No-tillage seeding in conservation agriculture (Second Edition). C.J. Baker & K.E. Saxton, eds. Rome, FAO & Cambridge, USA, CAB International.
6. Kassam, A., Friedrich, T., Shaxson, F. & Pretty, J. 2009. The spread of Conservation Agriculture: Justification, sustainability and uptake. *International Journal of Agricultural Sustainability* 7(4) 2009, pp.292–320.
7. Friedrich, T., Derpsch, R. & Kassam, A. 2012. Global overview of the spread of Conservation Agriculture. *Field Actions Science Reports Special Issue (Reconciling Poverty Alleviation and Protection of the Environment)*, 6: 1–7.
8. FAO. 2014. *Managing soils for food security and climate change adaptation and mitigation*. Rome.
9. Sun, L., Chang, S.X., Feng, Y.S., Dyck, M.F. & Puurveen, D. 2015. Nitrogen fertilization and tillage reversal affected water-extractable organic carbon and nitrogen differentially in a Black Chernozem and a Gray Luvisol. *Soil and Tillage Research*, 146: 253–260.
10. Shiferaw, B., Smale, M., Braun, H.-J., Duveiller, E., Reynolds, M. & Muricho, G. 2013. Crops that feed the world 10. Past successes and future challenges to the role played by wheat in global food security. *Food Security*, 5: 291–317.
11. Sayre, K.D., & Govaerts, B. 2009. Conservation agriculture for sustainable wheat production. In: J. Dixon, H. J. Braun, P. Kosina, & J. Crouch, eds. *Wheat facts and futures 2009*. Mexico International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT).
12. Aryal, J.P., Sapkota, T.B., Jat, M.L. & Bishnoi, D. 2015. On-farm economic and environmental impact of zero-tillage wheat: a case of north-west India. *Experimental Agriculture*, 51: 1–16., Cambridge University Press 2014.
13. Moussadek, R. 2012. Impacts de l'agriculture de conservation sur les propriétés et la productivité des vertisols du Maroc Central. *Afrika focus*, 25(2): 147–151.
14. Scopel, E., Triomphe, B., dos Santos Ribeiro, MdeF., Séguy, L., Denardin, J.E. & Kochhann, R.A. 2004. Direct seeding mulch-based cropping systems (DMC) in Latin America. In R.A. Fischer, ed. *New directions for a diverse planet*. Proceedings of the 4th International Crop Science Congress, Brisbane, Australia.
15. Thierfelder, C. & Mupangwa, W. 2014. *Identifying new sustainable intensification pathways for smallholder farmers in Southern Africa*. Paper presented at the World Congress of Conservation Agriculture (WCCA6), June 22–25, 2014, Winnipeg, Canada.
16. Kumar V. & Ladha J.K. 2011. Direct seeding of rice: recent developments and future research needs. *Advances in Agronomy*, 111: 297–413.
17. Yamano, T., Baruah, S., Sharma, R., & Kumar, A. 2013. *Factors affecting the adoption of direct-seeded rice in the northeastern Indo-Gangetic Plain*. CSISA Socioeconomics Policy Brief. New Delhi: International Rice Research Institute.
18. Frison, E.A., Cherfas, J. & Hodgkin, T. 2011. Agricultural biodiversity is essential for a sustainable improvement in food and nutrition security. *Sustainability* 3: 238–253.
19. Mayee, C.D., Monga, D., Dhillon, S.S., Nehra, P.L. & Pundhir, P. 2008. *Cotton-wheat production system in South Asia: a success story*. Asia-Pacific Association of Agricultural Research Institutions, Bangkok, Thailand.
20. Buttar, G.S., Sidhu, H.S., Singh, V., Gupta, N., Gupta, R., Jat, M.L. & Singh, B. 2011. Innovations for relay planting of wheat in cotton: a breakthrough for enhancing productivity and profitability in cotton-wheat systems of South Asia. *Experimental Agriculture* (2013), Vol. 49 (1), pp.19–30 (doi:10.1017/S0014479712001032).
21. Kukul S.S., Singh, Y., Jat, M.L. & Sidhu, H.S. 2014. Improving Water Productivity of Wheat-Based Cropping Systems in South Asia for Sustained Productivity. In Donald L Sparks, ed. *Advances in Agronomy*, (127): 159–230. University of Delaware, USA.
22. He, Ping, Lia, S., Jina, J., Wang, H., Li, C., Wang, Y. & Cuie, R. 2009. Performance of an optimized nutrient management system for double-cropped wheat-maize rotations in North-Central China. *Agronomy Journal* 101(6): 1489–1496.
23. Sepat, S. & Rana, D.S. 2013. Effect of Double No-till and Permanent Raised Beds on Productivity and Profitability of Maize (*Zea mays* L.) –wheat (*Triticum aestivum* L.) Emend. Flori & Paol) Cropping System under Indo-Gangetic Plains of India. *International Journal of Agriculture and Food Science Technology*, 4 (8): 787–790.
24. Bezner-Kerr, R., Snapp, S.S., Chirwa, M., Shumba, L. & Msachi, R. 2007. Participatory research on legume diversification with Malawian smallholder farmers for improved human nutrition and soil fertility. *Experimental Agriculture*, 43: 437–453.
25. Giller, K.E., Murwira, M.S., Dhlwayo, D.K.C., Mafongoya, P.L., & Mpepereki, S. 2011. Soyabean and sustainable agriculture in southern Africa. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 9: 50–58.
26. Kamanga, B.C.G., Kanyama-Phiri, G.Y., Waddington, S.R., Almekinders, C.J.M. & Giller, K.E. 2014. The evaluation and adoption of annual legumes by smallholder maize farmers for soil fertility maintenance and food diversity in central Malawi. *Food Security*, 6(1): 45–59.
27. Wilkins, R.J. 2008. Eco-efficient approaches to land management: a case for increased integration of crop and animal production systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1491): 517–525.
28. Garrity, D.P. 2011. *Making Conservation Agriculture ever green*. Keynote presentation 5th World Congress on Conservation Agriculture and 3rd Farming Systems Design Conference (WCCA5 and FSD3), 26–29 September 2011, Brisbane Australia.
29. Kluthcouski, J., Bocucci, T., Aidar, H., Yokoyama, L.P., Oliveira I.P. de, Costa, J.L. da S., Silva, J.G. da, Vilela, L., Barcellos, A. de O. & Magnobosco, C.de U. 2000. *Sistema Santa Fé - Tecnologia Embrapa: Integração lavoura-pecuária peolo consórcio de culturas anuais com forrageira, em áreas de lavoura, nos sistemas direto e convencional*. Santo Antônio de Goiás, Brazil: Embrapa Arroz e Feijão, 28pp. Embrapa Arroz e Feijão. Circular Técnica 38.
30. Pacheco, A.R., de Queiroz Chaves, R. & Lana Nicoli, C.M. 2013. Integration of crops, livestock, and forestry: A system of production for the Brazilian Cerrados, pp.51–60. In C.H. Hershey & P. Neate, eds. *Eco-efficiency: From vision to reality (Issues in Tropical Agriculture series)* Cali, CO: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), 2013.
31. Vilrla, L., Macedo, M.C.M., Júnior, G.B.M. & Kluthcouski, J. 2003. Crop-livestock integration benefits. In: J. Kluthcouski, L.F. Stone & H. Aidar, eds. *Integração lavoura-pecuária. Embrapa Arroz e Feijão*, Santo Antônio de Goiás, Goiás, Brazil.
32. FAO. 2007. *Tropical crop-livestock systems in conservation agriculture: the Brazilian experience* by Landers, J.N. 2007 Integrated Crop Management 5. Rome. 92pp.
33. Timsina, J., Jat, M.L. & Majumdar, K. 2010. Rice-maize systems of South Asia: current status, future prospects and research priorities for nutrient management. *Plant Soil*, 335:65–82.
34. FAO. 2012. *Farmer Field Schools as a vehicle to help vulnerable smallholder farmers*

develop climate resilient farming systems: experiences based on FAO's work in South and Southeast Asia. Presentation to the Second World Bank-FAO Expert Meeting, 14–16 May 2012, Bangkok, Thailand.

35. Sounkoura, A., Ousmane, C., Eric, S., Urbain, D., Soule, A., Sonia, P. & Joel, H. 2011. Contribution of rice and vegetable value chains to food security and incomes in the inland valleys of southern Benin and Mali: Farmers' Perceptions. In: *Agricultural Innovations for Sustainable Development. Contributions from the Finalists of the 2009/2010 Africa-wide Women and Young Professionals in Science Competitions*. 3(2): 51–56. CTA & FARA.
36. FAO. 2004. *Culture of fish in rice fields*. M. Khalwat & M. Gupta, eds. Rome.
37. Khaleduzzaman, A.B.M., Akbar, M.A. & Shamsuddin, M. 2011. Integration of forage production with high-yielding rice variety cultivation in Bangladesh. In: H.P.S. Makkar, ed. *Successes and failures with animal nutrition practices and technologies in developing countries*. Proceedings of the FAO Electronic Conference, 1–30 September 2010, Rome. FAO Animal Production and Health Proceedings. No. 11. Rome.
38. Doran, J.W. & Zeiss, M.R. 2000. *Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality*. *Agronomy & Horticulture - Faculty Publications, Paper 15*. Lincoln (USA), University of Nebraska.
39. Lal, R. 2010. Eco-efficiency in agro-ecosystems through soil carbon sequestration. *Crop Science*, Vol. 50 no. Supplement\_1. Crop Science Society of America, Madison, WI. DOI: 10.2135/cropsci2010.01.0012.
40. Lal, R. 2015. World water resources and achieving water security. *Agronomy Journal*, 107: 4: pp.1526–1532.
41. Mrabet, R., Moussadek, R., Fadlaoui, A. & van Ranst, E. 2012. Conservation agriculture in dry areas of Morocco. *Field Crops Research*, 132: 84–94.
42. Moussadek, R., Mrabet, R., Dahan, A., Zouahri, M., Mourid, E. & Van Ranst, E. 2014. Tillage System Affects Soil Organic Carbon Storage and Quality in Central Morocco. *Applied and Environmental Soil Science*, 2014. Article ID 654796 doi:10.1155/2014/654796.
43. Jat, M.L., Gathala, M.K., Ladha, J.K., Saharawat, Y.S., Jat, A.S., Kumar, V., Sharma, S.K., Kumar, V. & Gupta, R. 2009. Evaluation of precision land leveling and double zero till systems in the rice–wheat rotation: water use productivity, profitability and soil physical properties. *Soil & Tillage Research*, 105, 112–121.
44. Scopel, E., Findeling, A., Chavez Guerra, E. & Corbeels, M. 2005. Impact of direct sowing mulch-based cropping systems on soil carbon, soil erosion and maize yield. *Sustainable Development*, 25: 425–432 doi: 10.1051/agro:2005041.
45. Hasniati, D. & Shelton, M. 2005. *Sesbania grandiflora*: a successful tree legume in Lombok, Indonesia. *Tropical Grasslands Journal*, Vol. 39. 2005. p. 217.
46. Kaizzi, C.K., Ssali, H., Nansamba, A. & Vlek, P. 2007. The potential benefits of Azolla, Velvet bean (*Mucuna pruriens* var. *utilis*) and N fertilizers in rice production under contrasting systems in eastern Uganda. In A. Bationo, B. Waswa, J. Kihara & J. Kimetu, eds. *Advances in Integrated Soil Fertility Management in Sub-Saharan Africa: Challenges and Opportunities*, pp 423–433.
47. Singh, M., Singh, V.P. & Reddy, K.S. 2001. Effect of integrated use of fertilizer N and FYM or green manure on transformation of NK and S and productivity of rice-wheat system on Vertisols. *Journal of the Indian Society Soil Science*, 49: 430–435.
48. Snapp, S.S., Mafongoya, P.L. & Waddington, S. 1998. Organic matter technologies for integrated nutrient management in smallholder cropping systems of southern Africa. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 71: 185–200.
49. Vanlauwe, B., Bationo, A., Chianu, J., Giller, K.E., Merckx, R., Mokwunye, U., Ohiokpehai, O., Pypers, P., Tabo, R., Shepherd, K.D., Smaling, E.M.A., Woomer, P.L. & Sanginga, N. 2010. Integrated soil fertility management: Operational definition and consequences for implementation and dissemination. *Outlook on Agriculture*, 39(1): 17–24.
50. Nyamangara, J., Nyaradzo Masvaya, E., Tirivavi, R. & Nyengerai, K. 2013. Effect of hand-hoe based conservation agriculture on soil fertility and maize yield in selected smallholder areas in Zimbabwe. *Soil & Tillage Research* 126 (2013) 19–25.
51. Snapp, S., Jayne, T.S., Mhango, W., Benson, T. & Ricker-Gilbert, J. 2014. *Maize yield response to nitrogen in Malawi's smallholder production systems*. Malawi Strategy Support Program Working Paper No. 9. Washington, DC, IFPRI.
52. Buresh, R.J. & Wopereis, M. 2014. *Save and Grow: Rice*. Paper prepared for the FAO Technical Consultation on Save and Grow: Maize, Rice and Wheat, Rome, 15–17 December 2014. Rome, FAO. (mimeo).
53. Pampolino, M.F., Manguiat, J., Ramathan, S., Gines, H.C., Tan, P.S., Chi, T.T.N., Rajendran, R. & Buresh, R.J. 2007. Environmental impact and economic benefits of site-specific nutrient management (SSNM) in irrigated rice systems. *Agricultural Systems*, 93(1): 1–24 doi:10.1016/j.agsy.
54. Biradar D.P., Aladakatti, Y.R., Rao, T.N. & Tiwari, K.N. 2006. Site-Specific Nutrient Management for maximization of crop yields in Northern Karnataka. *Better Crops*, 90(3): 33–35.
55. Bindraban, P.S., Dimkpa, C., Nagarajan, L., Roy, A. & Rabbinge, R. 2015. Revisiting fertilizers and fertilization strategies for improved nutrient uptake by plants. *Biology and Fertility of Soils*.
56. Asaduzzaman, M. 2011. *Technology transfer and diffusion: Simple to talk about not so easy to implement*. A presentation made in WIPO Conference on Innovation and Climate Change, 11–12 July 2011. Geneva.
57. World Bank. 2012. *Agricultural innovation systems: An investment sourcebook*. Washington DC. DOI: 10.1596/978-0-8213-8684-2.
58. Ortiz-Monasterio J. & Raun, W. 2007. *Reduced nitrogen and improved farm income for irrigated spring wheat in the Yaqui Valley, Mexico, using sensor based nitrogen management*. Paper presented at the International Workshop on Increasing Wheat Yield Potential. CIMMYT, Obregon, Mexico, 20–24 March 2006. *Journal of Agricultural Science*, 145: 215–222.
59. Sapkota, T.B., Majumdar, K., Jat, M.L., Kumar, A., Bishnoi, D.K., McDonald, A.J. & Pampolino, M. 2014. Precision nutrient management in conservation agriculture based wheat production of Northwest India: Profitability, nutrient use efficiency and environmental footprint. *Field Crops Research*, 155:233–244.
60. Lobell, D.B., Hammer, G.L., McLean, G., Messina, C., Roberts, M.J. & Schlenker, W. 2013. The critical role of extreme heat for maize production in the United States. *Nature Climate Change*, 3: 397–501.
61. Edmeades, G.O. 2015. *Maize – Improved varieties*. Paper prepared for FAO for Save and Grow: Maize, Rice and Wheat. Rome. (mimeo).
62. Borlaug Institute for South Asia. 2015. *Major Accomplishments 2012–2014*. BISA Report Series 1. New Delhi, India. 38pp.
63. Mackill, D. J., Ismail, A. M., Pampolina, A.M., Sanchez, D.L., Carandang, J.J. & Septiningsih, E.M. 2010. Stress-tolerant rice varieties for adaptation to a changing climate. *Crop, Environment & Bioinformatics*, 7: 250–259.
64. Solh, M., Braun, H-J. & Tadesse, W. 2014. *Save and Grow: Wheat*. Paper prepared for the FAO Technical Consultation on Save and Grow: Maize, Rice and Wheat, Rome, 15–17 December 2014. Rabat, ICARDA. (mimeo).
65. IAEA (International Atomic Energy Agency). 2010. *Mass screening techniques for selecting crops resistant to diseases*. IAEA-TDL-001, Vienna.
66. Cissoko, M., Boissnard, A., Rodenburg, J., Press, M.C. & Scholes, J.D. 2011. New Rice for Africa (NERICA) cultivars exhibit different levels of post-attachment resistance against the parasitic weeds *Striga hermonthica*. *New Phytologist*, 192: 952–963.
67. Jamil, M., Rodenburg, J., Charnikhova, T. & Bouwmeester, H.J. 2011. Pre-attachment *Striga hermonthica* resistance of New Rice for Africa (NERICA) cultivars based on low strigolactone production. *New Phytologist*, 192: 964–975.

68. IRRI (International Rice Research Institute). 2015. Disease and pest resistant rice (available at <http://irri.org/our-work/research/better-rice-varieties/disease-and-pest-resistant-rice>).
69. HarvestPlus. 2014. *Biofortification progress briefs*. August 2014 (available at [http://www.harvestplus.org/sites/default/files/Biofortification\\_Progress\\_Briefs\\_August2014\\_WEB\\_0.pdf](http://www.harvestplus.org/sites/default/files/Biofortification_Progress_Briefs_August2014_WEB_0.pdf)).
70. Atlin, G.N., Palacios, N., Babu, R., Das, B., Twumasi-Afriyie, S., Friesen, D., De Groote, H., Vivek, B. & Pixley, K. 2011. Quality Protein Maize: Progress and Prospects. In J. Janick, ed. *Plant Breeding Reviews*, 34: 83–31. Wiley-Blackwell.
71. Babu, R., Palacios, N. & Prasanna, B.M. 2013. Biofortified maize – a genetic avenue for nutritional security. In R.K. Varshney & R. Tuberosa, eds. *Translational genomics for crop breeding: Abiotic stress, yield, and quality*. John Wiley & Sons, pp.161–176.
72. Mahmood, T. & Trethowan, R. 2015. Crop breeding for conservation agriculture. In M. Farooq & K.H.M. Siddique, eds. *Conservation agriculture*, pp159–179.
73. Lopes, M., El-Basyoni, I., Baenziger, P.S., Singh, S., Royo, C., Ozbek, K., Aktas, H., Ozer, E., Ozdemir, F., Manickavelu, A., Ban, T. & Vikram, P. 2015. Exploiting genetic diversity from landraces in wheat breeding for adaptation to climate change. *Journal of Experimental Botany*, 2015 Jun;66(12):3477–3486. Epub 2015 Mar 28.
74. George, T.S., Hawes, C., Newton, A.C., McKenzie, B.M., Hallett, P.D. & Valentine, T.A. 2014. Field phenotyping and long-term platforms to characterise how crop genotypes interact with soil processes and the environment. *Agronomy* 4, no. 2: 242–278.
75. Brooker, R.W., Bennett, A. E., Cong, W.-F., Daniell, T.J., George, T.S., Hallett, P.D., Hawes, C., Iannetta, P.P.M., Jones, H.G., Karley, A.J., Li, L., McKenzie, B.M., Pake-man, R.J., Paterson, E., Schöb, C., Shen, J., Squire, G., Watson, C.A., Zhang, C., Zhang, F., Zhang, J. & White, P.J. 2015. Improving intercropping: a synthesis of research in agronomy, plant physiology and ecology. *New Phytologist*, 206: 107–117. doi: 10.1111/nph.13132.
76. Hellin, J., Erenstein, O., Beuchelt, T., Camacho, C. & Flores, D. 2013. Maize stover use and sustainable crop production in mixed crop–livestock systems in Mexico. *Field Crops Research*. Volume 153, September 2013, pp.12–21.
77. Tilman D., Cassman K.G., Matson P.A., Naylor R. & Polasky S. 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418: 671–677. doi:10.1038/nature01014.
78. Trethowan, R., Manes, Y. & Chattha, T. 2009. *Breeding for improved adaptation to conservation agriculture improves crop yields*. Paper presented at the 4th World Congress on Conservation Agriculture, February 4–7, 2009, New Delhi, India.
79. Global Rice Science Partnership (GRiSP). 2013. *Rice almanac*, 4<sup>th</sup> edition. IRRI, Los Baños, Philippines, 283pp.
80. Smith, J.S., Jones, E. S., Nelson, B.K., Phillips, D.S. & Wineland, R.A. 2014. Genomic approaches and intellectual property protection for variety release: A perspective from the private sector. *Genomics of Plant Genetic Resources*. Springer Netherlands, 2014. pp.27–47.
81. Prasanna, B.M. 2015. *Climate-resilient maize development and delivery in the tropics through public-private partnerships: CIMMYT's experiences and perspective*. 5th International Workshop on Next Generation Genomics and Integrated Breeding for Crop Improvement (February 18 – 20, 2014), ICRISAT, Patancheru, India.
82. Joshi, A. K., Azab, M., Mosaad, M., Moselhy, M., Osmanzai, M., Gelalcha, S., Bedada, G., Bhatta, M. R., Hakim, A., Malaker, P. K., Haque, M. E., Tiwari, T. P., Majid, A., Jalal Kamali, M. R., Bishaw, Z., Singh, R. P., Payne, T. & Braun, H. J. 2011. Delivering rust resistant wheat to farmers: a step towards increased food security. *Euphytica* 179:187–196.
83. Lewis, V. & Mulvany, P.M. 1997. *A typology of community seed banks*. Natural Resources Institute (NRI), University of Greenwich, Central Avenue and Intermediate Technology Development Group, Myson House, U.K.
84. Gadal, N., Bhandari, D.B., Pandey, A., Dilli Bahadur, K.C. & Dhami, N.B. 2014. Strengthening the local seed systems and disadvantaged communities: success and evolution of the first community-managed seed production company in the hills of Nepal. In B.M. Prasanna et al., eds. *Book of Extended Summaries, 12th Asian Maize Conference and Expert Consultation on Maize for Food, Feed, Nutrition and Environmental Security*. Bangkok, Thailand, October 30 – November 1, 2014. CIMMYT, Mexico D.F. and APAARI, Bangkok, pp.238–242.
85. Lopes, M., Nesbitt, H., Spycykerelle, L., Pauli, N., Clifton, J. & Erskine, W. 2015. Harnessing social capital for maize seed diffusion in Timor-Leste. *Agronomy for Sustainable Development*, 35:847–855.
86. Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture. 2007. *Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*. London: Earthscan, and Colombo: International Water Management Institute.
87. Yadvinder-Singh, Kukal, S.S., Jat, M.L. & Sidhu, H.S. 2014. Improving Water Productivity of Wheat-Based Cropping Systems in South Asia for Sustained Productivity. *Advances in Agronomy*, 127: 157–258.
88. Garg, K.K., Karlberg, L., Barron, J., Wani, S.P. & Rockstrom, J. 2012. Assessing impact of agricultural water interventions at the Kothapally watershed, Southern India. *Hydrological Processes*, 26(3): 387–404.
89. Singh, R., Garg, K.K., Wani, S.P., Tewari, R.K. & Dhyani, S.K. 2014. Impact of water management interventions on hydrology and ecosystem services in Garhkundar-Dabar watershed of Bundelkhand region, Central India. *Journal of Hydrology*, 509:132–149.
90. El-Swaify, S.A., Pathak, P., Rego, T.J. & Singh, S. 1985. Soil management for optimized productivity under rainfed conditions in the semi-arid tropics. *Advances in Soil Science*, 1: 1–64.
91. Molden, D., Oweis T., Steduto, P., Bindraban, P., Hanjra, M. & Kijne, J. 2010. Improving agricultural water productivity: between optimism and caution. *Agricultural Water Management*, 97(4): 528–535.
92. Amberger A. 2006. *Soil fertility and plant nutrition in the tropics and subtropics*. International Fertilizer Industry Association & International Potash Institute, France.
93. Ilbeyi, A., Ustun, H., Oweis T., Pala, M. & Benli, B. 2006. Wheat water productivity in a cool highland environment: Effect of early sowing with supplemental irrigation. *Agricultural Water Management*, 82: 399–410.
94. IAEA. 2012. *Greater agronomic water use efficiency in wheat and rice using carbon isotope discrimination*. IAEA-TEC-DOC-1671, Vienna, Austria.
95. Sharma, P.C., Jat, H.S., Kumar, V., Gathala, M.K., Datta, A., Yaduvanshi, N.P.S., Choudhary, M., Sharma, S., Singh, L.K., Saharawat, Y., Yadav, A.K., Parwal, A., Sharma, D.K., Singh, G., Jat, M.L., Ladha, J.K. & McDonald, A. 2015. *Sustainable intensification opportunities under current and future cereal systems of North-West India*. Technical Bulletin: CSSRI/Karnal/2015/e. Central Soil Salinity Research Institute, Karnal, India.
96. ICARDA (International Center for Agricultural Research in the Dry Areas). 2013. *ICARDA Annual Report*. Beirut, Lebanon.
97. Marino, M. 2013. Raised beds prove their worth. *Partners magazine*. Winter 2013. Australian Center for International Agricultural Research. Canberra.
98. Mandal, K.G., Hati, K.M., Misra, A.K., Bandyopadhyay, K.K. & Tripathi, A.K. 2013. Land surface modification and crop diversification for enhancing productivity of a Vertisol. *International Journal of Plant Production* 7 (3). July 2013.
99. Gupta, R., Jat, R.K., Sidhu, H.S., Singh, U.P., Singh, N.K., Singh, R.G. & Sayre, K.D. 2015. *Conservation Agriculture for sustainable intensification of small farms*. Compendium of Invited Papers presented at the XII Agricultural Science Congress 3–6 February 2015, ICAR-National Dairy Research Institute, Karnal, India. pp.15.
100. Djabga, J.F., Rodenburg, J., Zwart, S.J., Houndagba, C.J. & Kiepe, P. 2014. Failure and success factors of irrigation system de-

velopments: a case study from the Ouémé and Zou valleys in Benin. *Irrigation and Drainage*, 63(3): 328–329.

101. Rodenburg, J., Zwart, S.J., Kiepe, P., Narteh, L.T., Dogbe, W. & Wopereis, M.C.S. 2014. Sustainable rice production in African inland valleys: seizing regional potentials through local approaches. *Agricultural Systems*, 123: 1–11.

102. Richards, M. & Ole Sander, B. 2014. *Alternate wetting and drying in irrigated rice*. Practice brief – Climate-smart agriculture, April 2014 (available at <https://cgispace.cgiar.org/rest/bitstreams/34363/retrieve>).

103. Lampayan, R.M., Rejesus, R.M., Singleton, G.R. & Bouman, B.A.M. 2015. Adoption and economics of alternate wetting and drying water management for irrigated lowland rice. *Field Crops Research*, 170: 95–108.

104. Kreye, C., Bouman, B.A.M., Reversat, G., Fernandez, L., Vera Cruz, C., Elazegui, F., Faronio, J.E. & Llorca, L. 2009. Biotic and abiotic causes of yield failure in tropical aerobic rice. *Field Crops Research*, 112: 97–106.

105. Oerke, E.C. 2006. Crop losses to pests. *Journal of Agricultural Science*, 144: 31–43.

106. Pretty, J.N. & Bharucha, Z.P. 2015. Integrated Pest Management for Sustainable intensification of agriculture in Asia and Africa. *Insects* 2015, 6(1), 152–182; doi:10.3390/insects6010152.

107. Gould, F., Kennedy, G.G. & Johnson, M.T. 1991. Effects of natural enemies on the rate of herbivore adaptation to resistant host plants. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 58: 1–14.

108. Gallagher, K.D., Kenmore, P.E. & Sogawa, K. 1994. Judicial use of insecticides deter planthopper outbreaks and extend the life of resistant varieties in southeast Asian rice. pp 599–614. In R.F. Denno & T.J. Perfect, eds., *Planthoppers-their ecology and management*. New York, Chapman and Hall.

109. Heong, K.L., Escalada, M.M., Huan, N.H., Chien, H.V. & Quynh, P.V. 2010. Scaling out communication to rural farmers: lessons from the “Three Reductions, Three Gains” campaign in Vietnam. In F.G. Palis, G.R. Singleton, M.C. Casimero & B. Hardy, eds. *Research to impact: case studies for natural resource management for irrigated rice in Asia*, pp.207–220. Los Baños (Philippines), International Rice Research Institute. 370pp.

110. Gallagher, K.D. 1998. *Farmer Field Schools for Integrated Pest Management in Africa with Special Reference to East Africa*. Proceedings of the National Pre-Season Planning Workshop on the Implementation of Field School Groups for Integrated Production and Pest Management. 31 August–1 September, 1998, ZIPAM, Darwendale. Government of Zimbabwe and FAO Global IPM Facility. Rome.

111. FAO. 2004b. *IPM Farmer Field Schools: A synthesis of 25 impact evaluations*. Rome, Global IPM Facility.

112. Hruska, A.J. & Corriols, M. 2002. The impact of training in integrated pest management among Nicaraguan maize farmers: increased net returns and reduced health risk. *International Journal of Occupational and Environmental Health*. Vol. 8, Issue 3 (01 July 2002), pp.191–200.

113. Tejada, T. 1990. Uso de aceite en el control de *Heliothis zea* y *Euxesta* sp. en el cultivo de maiz. *Memorias de la XIV Reunion de Maiceros de la Zona Andina y la I Reunion Suramericana de los Maiceros*. Maracay, Venezuela. 7pp.

114. Abanto, W., Narro, L. & Chavez, A. 1998. Control del gusano mazorquero (*Heliothis zea*, Boddie) en maiz amiláceo mediante la aplicación de aceite de consume humano. p. 530–538. In C. De Leon, L. Narro & S. Reza, eds. *Memorias IV Reunión Latinoamericana y XVII Reunión de la Zona Andina de Investigadores en Maíz*. Agosto 10–17, 1997. CORPOICA, Ceres, Colombia.

115. Tapia, I., Bermeo, D.B., Silva, E. & Racines, M. 1999. Evaluación de cuatro métodos de aplicación de aceite comestible vegetal en el control de *Heliothis zea* y *Euxesta* sp. en la sierra del Ecuador. Proc. XVIII Reunión Latinoamericana del Maíz. Sete Lagoas, Brazil. pp.671–675.

116. Valicente, F.H. 2008. Controle biológico da lagarta do cartucho, *Spodoptera frugiperda*, com *Bacillus thuringiensis*. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 105; 9pp.

117. Valicente, F. H., Tuelher, E. De S. & Barros, E.C. 2010. Processo de formulação do *Baculovirus spodoptera* em pó molhável. Embrapa Milho e Sorgo, Circular técnica, 156; 5pp. Sete Lagoas, Brazil.

118. Cruz, I., Figueiredo, M.L.C., Silva, R.B. & Foster, J.E. 2010. Efficiency of chemical pesticides to control *Spodoptera frugiperda* and validation of pheromone trap as a pest management tool in maize crop. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, Vol.9, n.2, p.107–122, 2010.

119. Oswald, A. & Ransom, J. 2001. *Striga* control and improved farm productivity using crop rotation. *Crop Protection*, Vol. 20, Issue 2, March 2001, pp.113–120.

120. Rodenburg, J., Cissoko, M., Kayeke, J., Dieng, I., Khan, Z.R., Midega, C.A.O., Onyuka, E.O. & Scholes, J.D. 2015. Do NERICA rice cultivars express resistance to *Striga hermonthica* (Del.) Benth. and *Striga asiatica* (L.) Kuntze under field conditions? *Field Crops Research*, 170 (2015): 83–94.

121. Conner, R. L., Kuzky, A. D. & Su, H. 2003. Impact of powdery mildew on the yield of soft white spring wheat cultivars. *Canadian Journal of Plant Science*, 83(4): 725–728.

122. Duveiller, E., Singh, R. P. & Nicol, J. M. 2007. The challenges of maintaining wheat

productivity: pests, diseases, and potential epidemics. *Euphytica*, 157(3): 417–430.

123. FAO. 2011. *History of IPM/FFS in Iran*. FAO project GTFS/REM/070/ITA Regional Integrated Pest Management (IPM) Programme in the Near East. Rome.

### Chapitre 3. Des systèmes agricoles qui produisent plus avec moins

#### Le système «push-pull» permet de stimuler la production laitière

1. Khan, Z. & Pickett, J. 2009. *Push-pull strategy for insect pest management*. Nairobi. ICIPE.
2. Midega, C.A.O., Khan, Z.R., Van den Berg, J., Ogol, C.K., Bruce, T.J. & Pickett, J.A. 2009. Non-target effects of the ‘push-pull’ habitat management strategy: Parasitoid activity and soil fauna abundance. *Crop Protection* 28 (2009) 1045–1051.
3. International Centre of Insect Physiology and Ecology (ICIPE). 2010. *Impact assessment of push-pull technology developed and promoted by ICIPE and partners in eastern Africa*. Nairobi.
4. Khan, Z., Midega, C., Pittchar, J., Murage, A., Birkett, M., Bruce, T. & Pickett, J. 2012. Achieving food security for one million sub-Saharan African poor through push-pull innovation by 2020. *Philosophical Transactions of the Royal Society London B: Biological Sciences* 2014 Apr 5; 369(1639).
5. ICIPE. 2013. *Climate-smart push-pull: resilient, adaptable conservation agriculture for the future*. Nairobi.
6. Murage, A.W., Midega, C.A.O., Pittchar, J.O., Pickett, J.A. & Khan, Z.R. 2015. Determinants of adoption of climate-smart push-pull technology for enhanced food security through integrated pest management in eastern Africa. *Food Security* 7(3), 709–724.

#### De meilleurs rendements par des plantes prospères sur un sol sain

1. Sharma, P.K. & De Datta, S.K. 1986. Physical properties and processes of puddled rice soil. *Advances in Soil Science* 5: 139–178.
2. Africare, Oxfam America, WWF-ICRISAT Project. 2010. *More Rice for People, More Water for the Planet*. WWF-ICRISAT Project, Hyderabad, India.
3. Berkhout, E., Glover, D. & Kuyvenhoven, A. 2015. On-farm impact of the System of Rice Intensification (SRI): Evidence and knowledge gap. *Agricultural Systems* 132: 157–166.
4. Buresh, R.J. 2015. Nutrient and fertilizer management in rice systems with varying supply of water. In P. Drechsel, P. Heffer, H. Magen, R. Mikkelsen & D. Wichelns, eds. *Managing water and fertilizer for sustainable agricultural intensification*. International Fertilizer Industry Association (IFA),

- International Water Management Institute (IWMI), International Plant Nutrition Institute (IPNI), and International Potash Institute (IPI). Paris.
5. FAO. 2015. FAOSTAT. Base de données statistiques en ligne: Production (<http://faostat.fao.org>).
  6. Uphoff, N. 2008. *Farmer innovations improving the System of Rice Intensification (SRI)* (available at [http://www.future-agricultures.org/farmerfirst/files/T1a\\_Uphoff.pdf](http://www.future-agricultures.org/farmerfirst/files/T1a_Uphoff.pdf)).
  7. Thakur, A., Uphoff, N. & Antony, E. 2009. An assessment of physiological effects of System of Rice Intensification (SRI) practices compared with recommended rice cultivation practices in India. *Experimental Agriculture* (2010), Vol. 46 (1), pp.77–98.
  8. Hameed, K., Mosa, A. & Jaber, F. 2011. Irrigation water reduction using System of Rice Intensification compared with conventional cultivation methods in Iraq. *Paddy Water Environment* (2011) 9:121–127.
  9. Ceesay, M., Reid, W., Fernandes, E. & Uphoff, N. 2006. The effects of repeated soil wetting and drying on lowland rice yield with system of Rice Intensification (SRI) methods. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 4:1, 5–14.
  10. Wu, W., Ma, B.-L. & Uphoff, N. 2015. A review of the system of rice intensification in China. *Plant and Soil, August 2015, Vol. 393, Issue 1, pp.361–381*.
  11. Barah, B. 2009. Economic and ecological benefits of System of Rice Intensification (SRI) in Tamil Nadu. *Agricultural Economics Research Review, Vol. 22, July-December 2009, pp.209–214*.
  12. Zhao, L., Wu, L., Li, Y., Lu, X., Zhu, D. & Uphoff, N. 2009. Influence of the System of Rice Intensification on rice yield and nitrogen and water use efficiency with different n application rates. *Experimental Agriculture* (2009), Vol. 45, pp.275–286.
  13. Zhao, L., Wu, L., Wu, M. & Li, Y. 2011. Nutrient uptake and water use efficiency as affected by modified rice cultivation methods with reduced irrigation. *Paddy Water Environment* (2011) 9:25–32.
  14. Dhital, K. 2011. *Study on System of Rice Intensification in transplanted and direct-seeded versions compared with standard farmer practice in Chitwan, Nepal*. Tribhuvan University Institute of Agriculture and Animal Science, Rampur, Chitwan, Nepal.
  15. Dzung, N.T. 2011. *Simple and effective-SRI and agriculture innovation*. System of Rice Intensification website. (available at [http://sri.ciifad.cornell.edu/countries/vietnam/VN\\_SRI\\_booklet\\_Eng2012.pdf](http://sri.ciifad.cornell.edu/countries/vietnam/VN_SRI_booklet_Eng2012.pdf)).
  16. Nga, N., Rodriguez, D., Son, T. & Buresh, R.J. 2010. Development and impact of site-specific nutrient management in the Red River Delta of Vietnam. pp.317–334. In F.G. Palis, G.R. Singleton, M.C. Casimero & B. Hardy, eds. *Research to impact. case studies for natural resource management for irrigated rice in Asia*. International Rice Research Institute. Los Baños, Philippines.
  17. Choi, J.D., Kim, G.Y., Park, W.J., Shin, M., Choi, Y.H., Lee, S., Kim, S.J. & Yun, D.K. 2014. Effect of SRI water management on water quality and greenhouse gas emissions in Korea. *Irrigation & Drainage*, 63: 266–270.
  18. Tuong, T. & Bouman, B. 2003. Rice production in water-scarce environments. In J.W. Kijne, R. Barker and D. Molden, eds. *Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement*. CAB International.
  19. Gathorne-Hardy, A., Narasimha Reddy, D., Venkatanarayana, M. & Harriss-White, B. 2013. A life-cycle assessment (LCA) of greenhouse gas emissions from SRI and flooded rice production in S.E. India. *Taiwan Water Conservancy*, 61:110–125.
  20. Wassmann, R., Hosen, Y. & Sumfleth, K. 2009. *Reducing methane emissions from irrigated rice*. Focus 16(3). Washington, DC, IFPRI.
  21. Yan, X., Akiyama, H., Kazuyuki, Y. & Akimoto, H. 2009. Global estimations of the inventory and mitigation potential of methane emissions from rice cultivation conducted using the 2006 Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines. *Global Biogeochemical Cycles*, Vol. 23, Issue 2, June 2009.
  22. Anas, I., Rupela, O.P., Thiyagarajan, T.M. & Uphoff, N. 2011. A review of studies on SRI effects on beneficial organisms in rice soil rhizospheres. *Paddy Water Environment*, 9:53–64.
  23. Lin, Xianqing, Zhu, D. & Lin, Xinjun. 2011. Effects of water management and organic fertilization with SRI crop practices on hybrid rice performance and rhizosphere dynamics. *Paddy Water Environment* (2011) 9:33–39.
  24. Uphoff, N., Kassam, A. & Thakur, A. 2013. Challenges of Increasing Water Saving and Water Productivity in the Rice Sector: Introduction to the System of Rice Intensification (SRI) and this issue. 2013. *Taiwan Water Conservancy* Vol. 61, No. 4.
  25. Borlaug Institute for South Asia. 2015. *Major accomplishments 2012–2014*. BISA Report Series 1, pp.13. New Delhi.
  26. Lu, S.H., Dong, Y.J., Yuan, J., Lee, H. & Padilla, H. 2013. A high-yielding, water-saving innovation combining SRI with plastic cover on no-till raised beds in Sichuan, China. *Taiwan Water Conservancy*, 61: 4, 94–109.
- 
- Plus de maïs et moins d'érosion sur les coteaux tropicaux**
1. Ayarza, M. & Welchez, L. 2004. Drivers Affecting the Development and Sustainability of the Quesungual Slash and Mulch Agroforestry System (QSMAS) on Hillsides of Honduras. In A. Noble, ed. *Comprehensive assessment "bright spots" project final report*. Cali, Colombia. CIAT.
  2. CIAT. 2009. *Quesungual slash and mulch agroforestry system (QSMAS): Improving crop water productivity, food security and resource quality in the subhumid tropics*. CPWF Project Report. Cali, Colombia.
  3. Gangloff, G., Marohn, C., Tellez, O. & Cadisch, G. 2015. *Land use change: Identifying biophysical and socio-economic factors determining adoption of the Quesungual agroforestry system*. Paper prepared for the Tropentag Conference 2015, Management of land use systems for enhanced food security: conflicts, controversies and resolution. Humboldt-Universität, Berlin.
  4. CIAT. 2009. *Quesungual slash and mulch agroforestry system: an eco-efficient option for the rural poor*. Cali, Colombia.
- 
- Les avantages supplémentaires des légumineuses cultivées avant le blé**
1. Dong, Z., Wu, L., Kettlewell, B., Caldwell, C. & Layzell, D. 2003. Hydrogen fertilization of soils – is this a benefit of legumes in rotation? *Plant, Cell and Environment* (2003) 26, 1875–1879.
  2. Pulse Australia. 2008. *Australian Pulse Bulletin*. PA 2008 (4). 5pp. Melbourne, Australia.
  3. Evans J., McNeill A.M., Unkovich M. J., Fettel N.A. & Heenan D.P. 2001. Net nitrogen balances for cool-season grain legume crops and contributions to wheat nitrogen uptake: a review. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 41: 347–359.
  4. Peoples, M.B., Brockwell, J., Herridge, D.F., Rochester, I.J., Alves, B.J.R., Urquiaga, S., Boddey, R.M., Dacko, F.D., Bhattarai, S., Maskey, S.L., Sampet, C., Rerkasem, B., Khan, D.F., Hauggaard-Nielsen, H. & Jensen, E.S. 2009. The contributions of nitrogen-fixing crop legumes to the productivity of agricultural systems. *Symbiosis* 48: 1–17.
  5. Griffiths, J. 2009. Legumes – benefits beyond nitrogen. *Farming Ahead*, 211:57–58.
  6. Pala, M., Van Duivenbooden, N., Studer, C. & Bilders, C.L. 1999. Cropping systems and crop complementarity in dryland agriculture. In N. Van Duivenbooden, M. Pala, C. Studer & C.L. Bilders, eds. *Efficient soil water use: the key to sustainable development in the dry areas of West Asia, and North and Sub-Saharan Africa*. Proceedings of the 1998 (Niger) and 1999 (Jordan) workshops of the Optimizing Soil Water Use (OSWU) Consortium. ICARDA, Aleppo and ICRISAT, Patancheru, pp.299–330.
  7. Cooper, P.J.M., Gregory, P.J., Tully, D. & Harris, H.C. 1987. Improving Water use Efficiency of Annual Crops in the Rainfed Farming Systems of West Asia and North Africa. *Experimental Agriculture*, 23: 113–158. doi:10.1017/S001447970001694X.
  8. Ryan, J., Masri, S., Ibricki, H., Singh, M., Pala, M. & Harris, H.C. 2008. Implications of cereal-based crop rotations, nitrogen fertilization, and stubble grazing on soil

organic matter in a Mediterranean-type environment. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 32: 289–297.

9. Fischer R.A., Byerlee D. & Edmeades G.O. 2014. *Crop yields and global food security: will yield increase continue to feed the world?* ACIAR Monograph No. 158. Canberra. Australian Centre for International Agricultural Research: Canberra.

10. Kassam, A. 2014. *Save and Grow: Soil health*. Paper presented at the FAO Technical Consultation on Save and Grow: Maize, Rice and Wheat, Rome 15–17 December 2014. Rome.

11. Tutwiler, R., Haddad, N. & Thomson, E.F. 1997. Crop-livestock integration in the drier areas of west Asia and north Africa. In: N. Haddad, R. Tutwiler & E.F. Thomson, eds. *Improvement of crop-livestock integration systems in west Asia and north Africa*. Proceedings of the Regional Symposium, 6–8 November, 1995, pp.5–22 Amman, Jordan. ICARDA, Aleppo.

12. Pala, M., Ryan, J., Zhang, H., Singh, M. & Harris, H.C. 2007. Water-use efficiency of wheat-based rotation systems in a Mediterranean environment. *Agricultural Water Management* 93(3): 136–144. doi:10.1016/j.agwat.2007.07.001.

13. Gan, Y.T., Liang, C., Chai, Q., Lemke, R.L., Campbell, C.A. & Zentner, R.P. 2014. Improving farming practices reduce the carbon footprint of spring wheat production. *Nature Communications* 5, Article number: 5012.

14. Hailu, G., Tarekegn, A. & Asmare, E. 1989. Beneficial break crops for wheat production. *Ethiopian Journal of Agricultural Science*, 11(1): 15–24.

15. Higgs, R., Arthur, L., Peterson, E. & Paulson, W.H. 1990. Crop rotations: sustainable and profitable. *Journal of Soil and Water Conservation*, 45: 68–70.

16. Amanuel, G., Kühne, R.F., Tanner, D.G. & Vlek, P.L.G. 2000. Biological nitrogen fixation in faba bean (*Vicia faba* L.) in the Ethiopian highlands as affected by P fertilization and inoculation. *Biology and Fertility of Soils*, 32: 353–359.

17. Tanner, D.G., Yilma, Z., Zweig, L. & Gebru, G. 1994. Potential for cereal-based double cropping in Bale Region of Ethiopia. *African Crop Science Journal*, 2:135–143.

18. Asefa T., Tanner, D.G., Kefyalew, G. & Gorf, A. 1997. Grain yield of wheat as affected by cropping sequence and fertilizer application in southeastern Ethiopia. *African Crop Science* 1, 5:147–159.

19. Moradi, H., Noori, M., Sobhkhizi, A., Fahramand, M. & Rigi, K. 2014. Effect of intercropping in agronomy. *Journal of Novel Applied Sciences*, 3 (3): 315–320, 2014.

### Des «pompes à éléments nutritifs» au profit du bétail et du maïs

1. Rao, I., Peters, M., van der Hoek, R., Castro, A., Subbarao, G., Cadisch, G. & Rincón, A. 2014. Tropical forage-based systems for climate-smart livestock production in Latin America. *Rural* 21 04/2014: 12–15.

2. Resende, Á.V., Furtini Neto, A.E., Alves, V.M.C., Curi, N., Muniz, J.A., Faquin, V., & Kinpara, D.I. 2007. Phosphate efficiency for corn following *Brachiaria* grass pasture in the Cerrado Region. *Better Crops*. 91(1): 17–19.

3. CGIAR (Consultative Group for International Agricultural Research). 2013. 'Grassroots action' in livestock feeding to help curb global climate change. Research Program on Livestock and Fish (available at <http://livestockfish.cgiar.org/2013/09/14/bni/>).

4. CIAT. 2010. *Livestock, climate change and Brachiaria*. CIAT Brief No. 12.

5. Holmann, F., Rivas L., Argel, P. & Pérez E. 2004. Impact of the adoption of *Brachiaria* grasses: Central America and Mexico. *Livestock Research for Rural Development* 16 (12) 2004.

6. CIAT. 2013. *The impacts of CIAT's collaborative research*. Cali, Colombia.

7. Klink, C.A. & Moreira, A.G. 2002. Past and current human occupation, and land use. pp.69–88. In P.S. Oliveira & R.J. Marquis, eds. *The cerrados of Brazil: ecology and natural history of a neotropical savanna*. New York, USA. Columbia University Press.

8. Diniz-Filho, J.A.F., de Oliveira, G., Lobo, F., Ferreira, L.G., Bini, L.M. & Rangel, T.F.L.V.B. 2009. Agriculture, habitat loss and spatial patterns of human occupation in a biodiversity hotspot. *Scientia Agricola*, 66(6):764–771.

9. Pacheco, A. R., de Queiroz Chaves, R. & Lana Nicoli, C.M. 2013. Integration of Crops, Livestock, and Forestry: A System of Production for the Brazilian Cerrados. pp.51–60. In C.H. Hershey & P. Neate, eds. *Eco-efficiency: From vision to reality (Issues in Tropical Agriculture series)* Cali, Colombia. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), 2013.

10. Marouelli, R.P. 2003. *O desenvolvimento sustentável da agricultura no cerrado brasileiro*. Ecobusiness School of the Instituto Superior de Administração e Economia – Fundação Getúlio Vargas (ISEA-FGV). Brasília, Brazil. (MBA Thesis).

11. Scopel, E., Triomphe, B., dos Santos Ribeiro, MdeF., Séguy, L., Denardin, J.E. & Kochhann, R.A. 2004. Direct seeding mulch-based cropping systems (DMC) in Latin America. In R.A. Fischer, ed. *New directions for a diverse planet*. Proceedings of the 4th International Crop Science Congress. Brisbane, Australia.

12. Kluthcouski, J., Cobucci, T., Aida, H., Yokoyama, L.P., Oliveira I.P. de, Costa, J.L. da S., Silva, J.G. da, Vilela, L., Barcellos, A. de O. & Magnobosco, C.de U. 2000. *Sistema*

*Santa Fé – Tecnologia Emprapa: Integração lavoura-pecuária peolo consórcio de culturas anuais com forrageira, em áreas de lavoura, nos sistemas direto e convencional*. Santo Antônio de Goiás: Emprapa Arroz e Feijão. 28pp. (Emprapa Arroz e Feijão. Circular Técnica 38).

13. Séguy, L., Bouzinac, S., Scopel, E. & Ribeiro, M.F.S. 2003. *New concepts for sustainable management of cultivated soils through direct seeding mulch based cropping systems: the CIRAD experience, partnership and networks*. Proceedings of the II World congress on Sustainable Agriculture "Producing in harmony with nature", Iguacu, Brazil, 10–15 August 2003.

14. Séguy, L., Bouzinac, S., Maronezzi, A.C., Belot, J.L. & Martin, J. 2001. *A safrinha de algodão - opção de cultura arriscada ou alternativa lucrativa dos sistemas de plantio direto nos trópicos úmidos – Boletim técnico* 37 da COODETEC CP 301 85806-970 Cascavel – PR / Brazil.

15. Kluthcouski, J. & Pacheco-Yokoyama, L. 2006. Crop-livestock integration options. In J. Kluthcouski, L.F. Stone & H. Aida, eds. *Integração Lavoura-Pecuária* EMBRAPA Arroz e Feijão. Santo Antônio de Goiás, Brazil.

### L'agriculture de conservation est la clé de la sécurité alimentaire

1. Gupta, R. & Sayre, K. 2007. Conservation agriculture in South Asia. Paper presented at the International Workshop on Increasing Wheat Yield Potential, CIMMYT, Obregon, Mexico, 20–24 March 2006. *Journal of Agricultural Science*, 145, 207–214.

2. Sharma, B.R., Amarsinghe, U., Cai, X., de Condappa, D., Shah, T., Mukherji, A., Bharati, L., Ambili, G., Qureshi, A., Pant, D., Xenarios, X., Singh & R. & Smakhtin, V. 2010. The Indus and the Ganges: river basin under extreme pressure. *Water International*, 35, 493–521.

3. Ladha, J., Yadvinder-Singh, Erenstein O. & Hardy B., eds. 2009. *Integrated crop and resource management in the rice-wheat system of South Asia*. Los Baños (Philippines), International Rice Research Institute.

4. FAO. 2015. FAOSTAT. Base de données statistiques en ligne: Production (<http://faostat.fao.org/>).

5. Chauhan, B.S., Mahajan, G., Sardana, V., Timsina, J. & Jat, M.L. 2012. Productivity and Sustainability of the Rice-Wheat Cropping System in the Indo-Gangetic Plains of the Indian subcontinent: Problems, Opportunities, and Strategies. *Advances in Agronomy* 117: 316–355.

6. Gautam, P. 2008. Emerging issues and strategies in the rice-wheat cropping system in the Indo-Gangetic Plains. In Y. Singh, V. Singh, B. Chauhan, A. Orr, A. Mortimer, D. Johnson & B. Hardy, eds. *Direct Seeding of rice and weed management in the irrigated rice-wheat cropping system of the Indo-Gangetic Plains*. Los Baños

- (Philippines), International Rice Research Institute & Pantnagar, India, Directorate of Experiment Station, G.B. Pant University of Agriculture and Technology.
7. Erenstein, O. 2009. Reality on the ground: Integrating germplasm, crop management, and policy for wheat farming system development in the Indo-Gangetic Plains in. 2009. *In* J. Dixon, H. Braun, P. Kosina & J. Crouch, eds. *Wheat facts and futures 2009*. Mexico, D.F., CIMMYT.
  8. Malik, R. K., Singh, S. & Yadav, A. 2007. Effect of sowing time on grain yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) in rice-wheat cropping system. *Haryana Agricultural University Journal of Research*, 37: 103–105.
  9. Singh, S., Sharma, R.K., Gupta, R.K. & Singh, S.S. 2008. Changes in rice-wheat production technologies and how rice-wheat became a success story: lessons from zero-tillage wheat. *In Direct Seeding of rice and weed management in the irrigated rice-wheat cropping system of the Indo-Gangetic Plains*. Y. Singh, V. Singh, B. Chauhan, A. Orr, A. Mortimer, D. Johnson & B. Hardy, eds. Los Baños (Philippines), International Rice Research Institute, and Pantnagar, India, Directorate of Experiment Station, G.B. Pant University of Agriculture and Technology.
  10. Erenstein, O. & Laxmi, V. 2008. Zero tillage impacts in India's rice-wheat systems. *Soil Tillage Research*, 100, 1–14.
  11. Gupta, R., Jat, R.K., Sidhu, H.S., Singh, U.P., Singh, N.K., Singh, R.G. & Sayre, K.D. 2015. *Conservation Agriculture for sustainable intensification of small farms*. Compendium of Invited Papers presented at the XII Agricultural Science Congress 3–6 February 2015, ICAR-National Dairy Research Institute, Karnal, India. pp 15.
  12. ACIAR (Australian Centre for International Agricultural Research). 2008. Permanent beds and rice-residue management for rice-wheat systems in the Indo-Gangetic Plain. *In* E. Humphreys & C.H. Roth eds. Proceedings of a workshop, Ludhiana, India, 7–9 September 2006. Canberra.
  13. Aryal, J.P., Sapkota, T.B., Jat, M.L. & Bishnoi, D. 2015. On-farm economic and environmental impact of zero-tillage wheat: a case of north-west India. *Experimental Agriculture*, 51: 1–16. *Cambridge University Press* 2014. doi:10.1017/S001447971400012X.
  14. IRRI. 2009. *Revitalizing the rice-wheat cropping systems of the Indo-Gangetic Plains: Adaptation and adoption of resource-conserving technologies in India, Bangladesh, and Nepal*. Final report submitted to the United States Agency for International Development. Los Baños (Philippines), International Rice Research Institute.
  15. Jat, M.L. 2006. Land levelling: a precursor technology for resource conservation. *Rice-wheat consortium Technical Bulletin*, Series 7. New Delhi. Rice-wheat Consortium for the Indo-Gangetic plains.
  16. Aryal, J., Bhatia, M., Jat, M.L. & Sidhu, H.S. 2014. Impacts of laser land leveling in rice-wheat rotations of the North-western Indo-Gangetic Plains of India. Paper presented at the World Congress of Environmental and Resource Economists, 28 June–2 July 2014, Istanbul, Turkey.
  17. Hussain, I., Hassnain Shah, M., Khan, A., Akhtar, W., Majid, A. & Mujahid, M. 2012. Productivity in rice-wheat crop rotation of Punjab: an application of typical farm methodology. *Pakistan Journal of Agricultural Research*, Vol. 25, No. 1, pp 1–11.
  18. Singh, R., Erenstein, O., Gattala, M., Alam, M., Regmi, A., Singh, U., Mujeeb ur Rehman, H. & Tripathi, B. 2009. Socioeconomics of integrated crop and resource management technologies in the rice-wheat systems of South Asia: Site contrasts, adoption, and impact using village survey findings. *In* J. Ladha, Yadvinder-Singh, O. Erenstein & B. Hardy, eds. *Integrated crop and resource management in the rice-wheat system of South Asia*. Los Baños (Philippines), International Rice Research Institute.
  19. Fischer, R.A., Byerlee, D. & Edmeades, G.O. 2014. *Crop yields and global food security: Will yield increase continue to feed the world?* ACIAR Monograph No. 158. Canberra, Australian Centre for International Agricultural Research.
  20. Yamano, T., Baruah, S., Sharma, R. & Kumar, A. 2013. *Factors affecting the adoption of direct-seeded rice in the northeastern Indo-Gangetic Plain*. CSISA Socioeconomics Policy Brief. New Delhi: International Rice Research Institute.
  21. Gathala, M.K., Kumar, V., Sharma, P.C., Saharawat, Y.S., Jat, H.S., Singh, M., Kumar, A., Jat, M.L., Humphreys, E., Sharma, D.K., Sharma, S. & Ladha, J.K. 2013. Optimizing intensive cereal-based cropping systems addressing current and future drivers of agricultural change in the north-western Indo-Gangetic Plains of India. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 177: 85–97.
  22. Sidhu, H.S., Singh, Manpreet, Yadvinder-Singh, Blackwell, J., Lohan, S.K., Humphreys, E., Jat, M.L., Singh, V. & Sarabjeet-Singh, 2015. Development and evaluation of the Turbo Happy Seeder for sowing wheat into heavy rice residues in NW India. *Field Crops Research*. In Press.
  23. Sharma, P.C., Jat, H.S., Kumar, V., Gathala, M.K., Datta, A., Yaduvanshi, N.P.S., Choudhary, M., Sharma, S., Singh, L.K., Saharawat, Y., Yadav, A.K., Parwal, A., Sharma, D.K., Singh, G., Jat, M.L., Ladha, J.K. & McDonald, A. 2015. *Sustainable intensification opportunities under current and future cereal systems of North-West India*. Technical Bulletin: CSSRI/Karnal/2015/e. Central Soil Salinity Research Institute, Karnal, India. 46pp.
  24. Jat, M.L., Gupta, R.K., Erenstein, O. & Ortiz, R. 2006. Diversifying the intensive cereal cropping systems of the Indo-Ganges through horticulture. *Chronica Horticulturae* 46 (3), 27–31.
- Le système traditionnel favorise une utilisation plus productive des terres**
1. Cerrate, A. & Camarena, F. 1979. Evaluación de ocho variedades de maíz en sistema asociado con frijol en el Callejón de Huaylas, Perú. pp.151–155. *Informativo del Maíz*. Univ. Nac. Agraria. Numero Extraordinario, Vol. III, Lima, Perú.
  2. Gordon, R., Franco, J., Gonzalez A. & de Garcia, N. 1997. Evaluación de variedades de Vigna (*Vigna unguiculata*) para asociación con el cultivo de maíz en Azuero, Panamá. pp.146–148. *In* J. Bolaños, ed. *Programa Regional de Maíz para Centro América y el Caribe, Síntesis de resultados experimentales 1993–1995*, CIMMYT, PRM, Guatemala.
  3. Francis, C.A. 1981. Development of plant genotypes for multiple cropping systems. *In* K.J. Frey, ed. *Plant Breeding II*. The Iowa State University Press, Ames. 497pp.
  4. Laing, D.R. 1978. *Competencia en los sistemas de cultivos asociados de maíz-frijol*. pp.174–178. Proc. VIII Reunión de Maiceros de la Zona Andina. I Reunión Latinoamericana de Maíz, Lima, Perú.
  5. Mathews, C., Jones, R.B. & Saxena, K.B. 2001. Maize and pigeonpea intercropping systems in Mpumalanga, South Africa. *International Chickpea and Pigeonpea Newsletter*, 8:53.
  6. Marer, S.B., Lingaraju, B.S. & Shashidhara, G.B. 2007. Productivity and economics of maize and pigeonpea intercropping under rainfed condition in northern transitional zone of Karnataka. *Karnataka Journal of Agricultural Science*, 20:1–3.
  7. Ngwira, A., Aune, J. & Mkwinda, S. 2012. On-farm evaluation of yield and economic benefit of short term maize legume intercropping systems under conservation agriculture in Malawi. *Field Crops Research*, 132 (2012) 149–157
  8. Rusinamhodzi, L., Corbeels, M., Nyamangarad, J. & Giller, K. 2012. Maize-grain legume intercropping is an attractive option for ecological intensification that reduces climatic risk for smallholder farmers in central Mozambique. *Field Crops Research*, 136 (2012) 12–22.
  9. Herrera, A.P., Gordon, R., Franco, J., Garcia, N., Martinez, L., Gonzalez, A. & Sain, G. 1993. Análisis económica de la aplicación de nitrógeno en maíz in rotación con leguminosas bajo dos tipos de labranza, Rio Hato, Panama, 1992–93. pp.167–169. *In* J. Bolaños, G. Sain, R. Urbina & H. Barreto, eds. *Programa Regional de Maíz para Centro América y el Caribe, Síntesis de resultados Experimentales 1992*. CIMMYT, PRM, Guatemala.
  10. Marinus, W. 2014. *Cowpea-maize relay cropping. A method for sustainable agricultural intensification in northern Ghana?* Plant production systems. Wageningen University. Wageningen, The Netherlands.

11. Ortiz-Ceballos, A., Aguirre-Rivera, J., Salgado-García, S. & Ortiz-Ceballos, G. 2015. Maize-velvet bean rotation in summer and winter *milpas*: a greener technology. *Agronomy Journal*, 107: 1: 330–336.
12. Mekuria, M., Kassie, M., Nyagumbo, I., Marenya, P. & Wegary, D. 2014. Sustainable intensification of maize-legume based systems: Lessons from SIMLESA. In B.M. Prasanna *et al.*, eds. Book of Extended Summaries, 12th Asian Maize Conference and Expert Consultation on Maize for Food, Feed, Nutrition and Environmental Security. Bangkok, Thailand, October 30 – November 1, 2014. CIMMYT, Mexico D.F. and APAARI, Bangkok, pp.379–386.
13. FAO. 2015. FAOSTAT. Base de données statistiques en ligne: Production (<http://faostat.fao.org>).
14. Sanginga, N., Dashiell K.E., Diels, J., Vanlauwe, B., Lyasse, O., Carsky, R.J., Tarawali, S., Asafa-Adjei, B., Menkir, A., Schulz, S., Singh, B.B., Keatinge, D. & Ortiz, R. 2003. Sustainable resource management coupled to resilient germplasm to provide new intensive cereal-grain-legume-live-stock system in the dry savanna. *Agri-culture, Ecosystem and Environment*, 100: 305–314.
15. Landau, E. C., Cruz, J.C., Hirsch, A. & Guimaraes, D.P. 2012. Expansão potencial do plantio de 2a safra de milho no Brasil no sistema de rotação soja-milho considerando o zoneamento de risco climático. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento*. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo. 36pp.
16. Kerr, R. B., Snapp, S., Chirwa, M., Shumba, L. & Msachi, R. 2007. Participatory research on legume diversification with Malawian smallholder farmers for improved human nutrition and soil fertility. *Experimental Agriculture*, 43:437–453.
17. Thierfelder, C., Cheesman, S. & Rusinamhodzi, L. 2012. Benefits and challenges of crop rotation in maize-based conservation agriculture (CA) cropping system of Southern Africa. *International Journal of Agricultural Sustainability*. DOI:10.1080/14735903.2012.703894:1–17.

### Des rizières plus productives

1. Halwart M. 2013. Valuing aquatic biodiversity in agricultural landscapes. In J. Fanzo, D. Hunter, T. Borelli & F. Mattei, eds. *Diversifying food and diets – using agricultural biodiversity to improve nutrition and health*. Bioversity International, pp.88–108.
2. FAO. 2004. *Culture of fish in rice fields*. M. Halwart & M. Gupta, eds. Rome
3. FAO. 2014. *Aquatic biodiversity in rice-based ecosystems: Studies and reports from Indonesia, LAO PDR and the Philippines*. M. Halwart & D. Bartley, eds. The Asia Regional Rice Initiative: Aquaculture and fisheries in rice-based ecosystems. Rome.
4. FAO. 2014. *Aquaculture and fisheries in*

*rice-based ecosystems*. The Asia Regional Rice Initiative factsheet. Rome.

5. FAO. 2007. Analysis of feeds and fertilizers for sustainable aquaculture development in China. Miao, W.M. & Mengqing, L. 2007. In M. Hasan, T. Hecht & S. De Silva, eds. *Study and analysis of feeds and fertilizers for sustainable aquaculture development*. FAO Fisheries Technical Paper 497. Rome.
6. FAO. 2012. *La situation mondiale des pêches et de l'aquaculture 2012*. Rome.
7. Suryana, A. *Regional Rice Initiative Implementation in Indonesia: Progress and lessons learned*. Presentation at a Side Event of the 149<sup>th</sup> Session of the FAO Council, Rome, 18 June 2014.

### Quand des arbres et des arbustes sont moins onéreux que les engrais

1. Garrity, D., Akinnifesi, F., Ajayi, O., Weldesemayat, S., Mowo, J., Kalinganire, A. Larwanou, M. & Bayala, J. 2010. Evergreen Agriculture: a robust approach to sustainable food security in Africa. *Food Security* (2010) 2:197–214.
2. Haggblade, S. & Tembo, G. 2003. *Early evidence on conservation farming in Zambia*. EPTD Discussion Paper 108. Washington DC: International Food Policy Research Institute.
3. Barnes R. & Fagg, C. 2003. *Faidherbia albida*. Monograph and Annotated Bibliography. Tropical Forestry Papers No 41, Oxford. Forestry Institute, Oxford, UK. 281pp.
4. Spevacek, A.M. 2011. *Acacia (Faidherbia) albida*. KSC Research Series. US Agency for International Development, New York. 15pp.
5. Shitumbanuma, V. 2012. *Analyses of crop trials under Faidherbia albida*. Conservation Farming Unit, Zambia National Farmers Union. Lusaka.
6. Phombeya, H. 1999. Nutrient sourcing and recycling by *Faidherbia albida* trees in Malawi. PhD Dissertation, Wye College, University of London. 219pp.
7. Ajayi, C., Akinnifesi, F., Sileshi, G., Kanjipite, W. 2009. Labour inputs and financial profitability of conventional and agroforestry-based soil fertility management practices in Zambia. *Agrekon* 48:246–292.
8. Adesina, A., Coulibaly, O., Manyong, V., Sanginga, P.C., Mbila, D., Chianu, J. & Kamleu, D.G. 1999. *Policy shifts and adoption of alley farming in West and Central Africa*. International Institute of Tropical Agriculture, Ibadan, Nigeria. 21pp.

### Les agriculteurs cessent de labourer dans la steppe du Kazakhstan

1. CIMMYT. 2013. Water-saving techniques salvage wheat in drought-stricken Kazakhstan. In: *Wheat research, Asia*. 21 March 2013 (available at <http://www.cimmyt.org/en/what-we-do/wheat-research/item/water-saving-techniques-salvage-wheat-in-drought-stricken-kazakhstan>).
2. FAO. 2015. FAOSTAT. Base de données statistiques en ligne: Production (<http://faostat.fao.org>).
3. Nurbekov, A., Akramkhanov, A., Lamers, J., Kassam, A., Friedrich, T., Gupta, R., Muminjanov, H., Karabayev, M., Sydyk, D., Turok, J. & Malik Bekenov, M. 2014. Conservation agriculture in Central Asia. In R. Jat, K. Sahrawat & A. Kassam, eds. *Conservation agriculture: Global prospects and challenge*. CAB International.
4. Karabayev, M., Morgounov, A., Braun, H.-J., Wall, P., Sayre, K., Zelenskiy, Y., Zhapayev, R., Akhmetova, A., Dvurechenskii, V., Iskandarova, V., Friedrich, T., Filekcia, T. Guadagni, M. 2014. Effective Approaches to Wheat Improvement in Kazakhstan: Breeding and Conservation Agriculture. *Journal of Bahri Dagdas Crop Research* (1–2):50–53, 2014.
5. FAO. 2012. *Conservation agriculture in Central Asia: Status, policy, institutional support, and strategic framework for its promotion*. FAO Sub-Regional Office for Central Asia. December 2012. Ankara.
6. FAO. 2015. FAOSTAT. Base de données statistiques en ligne: Commerce (<http://faostat.fao.org>).
7. Karabayev, M. & Suleimenov, M. 2010. *Adoption of conservation agriculture in Kazakhstan*. In: Lead papers 4<sup>th</sup> World Congress on conservation agriculture: Innovations for improving efficiency, equity and environment. 4–7 February 2009. New Delhi.
8. Derpsch, R. & Friedrich, T. 2009. *Development and current status of no-till adoption in the world*. Rome, FAO.
9. FAO. 2009. *Importance of zero-tillage with high stubble to trap snow and increase wheat yields in Northern Kazakhstan*. FAO Investment Centre, June 2012. Rome.
10. FAO. 2012. *Advancement and impact of conservation agriculture/no-till technology adoption in Kazakhstan*. FAO Investment Centre information note. Rome.
11. Kienzler, K., Lamers, J., McDonald, A., Mirzabaev, A., Ibragimov, N., Egamberdiev, O., Ruzibaev, E. & Akramkhanov, A. 2012. Conservation agriculture in Central Asia – What do we know and where do we go from here? *Field Crops Research* 132 (2012) 95–105
12. Zhapayev, R., Iskandarova, K., Toderich, K., Paramonova, I., Al-Dakheel, A., Ismail, S., Pinnamaneni, S.R., Omarova, A., Nekrasova, N., Balpanov, D., Ten, O., Ramanculov, E., Zelenskiy, Y., Akhmetova,



- A. & Karabayev, M. 2015. Sweet sorghum genotypes testing in the high latitude rainfed steppes of the northern Kazakhstan (for feed and biofuel). *Journal of Environmental Science and Engineering B* 4 (2015) 25–30. doi: 10.17265/2162-5263/2015.01.004.
13. Karabayev, M. 2012. *Conservation agriculture adoption in Kazakhstan*. A presentation made in WIPO Conference on Innovation and Climate Change, 11–12 July 2011. Geneva.
14. Lamers, J., Akramhanov, A., Egamberdiev, A., Mossadegh-Manschadi, A., Tur-sunov, M., Martius, C., Gupta, R., Sayre, K., Eshchanov, R. & Kienzler, S. 2010. *Rationale for conservation agriculture under irrigated production in Central Asia: Lessons learned*. In: Lead papers 4<sup>th</sup> World Congress on conservation agriculture: Innovations for improving efficiency, equity and environment. 4–7 February 2009. New Delhi.
15. FAO. 2014. Conservation agriculture for irrigated areas in Azerbaijan, Kazakhstan, Turkmenistan and Uzbekistan. Project GCP/RER/030/TUR Terminal report, Annex 4. Rome.
16. World Bank. *No-till: A climate smart agriculture solution for Kazakhstan*. Agricultural Competitiveness Project. 8 August 2013 (available at <http://www.worldbank.org/en/results/2013/08/08/no-till-climate-smart-agriculture-solution-for-kazakhstan>).
- 
- Le maïs hybride facilite l'adaptation au changement climatique**
1. Timsina, J., Buresh, R.J., Dobermann, A. & Dixon, J. 2011. *Rice-maize systems in Asia: current situation and potential*. pp.7–26 and 161–171. Los Baños (Philippines): International Rice Research Institute and International Maize and Wheat Improvement Center. 232pp.
2. FAO. 2015. FAOSTAT. Base de données statistiques en ligne: Production (<http://faostat.fao.org>).
3. Ali, M.Y., Waddington, S.R., Hodson, D., Timsina, J. & Dixon, J. 2009. *Maize-rice cropping systems in Bangladesh: Status and research opportunities*. Working Paper, Mexico DF: CIMMYT.
4. Gathala, M.K., Timsina, J., Islam, Md. S., Rahman, Md. M., Hossain, Md. I., Harun-Ar-Rashid, Md., Ghosh, A.K., Krupnik, T. J., Tiwari, T.P. & McDonald, A. 2014. Conservation agriculture based tillage and crop establishment options can maintain farmers' yields and increase profits in South Asia's rice-maize systems: Evidence from Bangladesh. *Field Crops Research*, 172: 85–98.
5. Borlaug Institute for South Asia. 2015. Major Accomplishments 2012–2014. BISA Report Series 1. New Delhi, India. 38pp.
6. Hasan, M.M., Waddington, S.R., Haque, M.E., Khatun F. & Akteruzzaman, M. 2007. Contribution of whole family training to increased production of maize in Bangladesh. *Progressive Agriculture (Bangladesh)* 18(1): 267–281.
7. CIMMYT. 2009. *Maize motorizes the economy in Bangladesh*. CIMMYT E-News, Vol. 6 No. 5, August 2009 (available at <http://www.cimmyt.org/en/what-we-do/socioeconomics/item/maize-motorizes-the-economy-in-bangladesh>).
8. CIMMYT. 2009. *Don't put all your eggs in one basket: Bangladesh tries maize cropping for feed*. CIMMYT E-News, Vol. 6 No. 2, February 2009 (available at <http://www.cimmyt.org/en/what-we-do/socioeconomics/item/dont-put-all-your-eggs-in-one-basket-bangladesh-tries-maize-cropping-for-feed>).

#### Chapitre 4. La voie à suivre

1. FAO, FIDA et PAM. 2015. *L'État de l'insécurité alimentaire dans le monde 2015. Objectifs internationaux 2015 de réduction de la faim: des progrès inégaux*. Rome.
2. FAO. 2010. *L'État de l'insécurité alimentaire dans le monde 2010. Combattre l'insécurité alimentaire lors des crises prolongées*. Rome.
3. FAO. 2011. *The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW) – Managing systems at risk*. FAO, Rome and Earthscan, London.
4. Viala, E. 2008. Water for food, water for life a comprehensive assessment of water management in agriculture. *Irrigation and Drainage Systems*, 22(1), 127–129.
5. FAO. 2011. *Produire plus avec moins. Guide à l'intention des décideurs sur l'intensification durable de l'agriculture paysanne*. Rome.
6. FIDA. 2010. *Rapport sur la pauvreté rurale 2011. Nouvelles réalités, nouveaux défis, de nouvelles chances pour la prochaine génération*. Rome.
7. FAO. 2012. *Towards the future we want. End hunger and make the transition to sustainable agricultural and food systems*. Rome.
8. FAO. 2014. *Construire une vision commune pour une alimentation et une agriculture durables: Principes et approches*. Rome.
9. Arslan, A., McCarthy, N., Lipper, L., Asfaw, S. & Cattaneo, A. 2014. Adoption and intensity of adoption of conservation farming practices in Zambia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Vol. 187, (2014) pp.72–86.
10. FAO. 2014. *Climate variability, adaptation strategies and food security in Malawi*, by Asfaw, S., McCarthy, N., Lipper, L., Arslan, A., Cattaneo, A. & Kachulu, M. ESA Working Paper No. 14–08. Rome.
11. UNEP (United Nations Environmental Programme). 2014. *A guidance manual for green economy policy assessment*. UNEP.
12. FAO. 2012. *Améliorer les systèmes alimentaires pour des régimes nutritionnels*

- soutenables dans une économie verte*. FAO GEA Rio+20 Working Paper 4. Rome.
13. FAO. 2014. *Meeting farmers' aspirations in the context of green development*. Regional Conference for Asia and the Pacific, Thirty-second session. Ulaanbaatar, Mongolia, 10–14 March 2014. Rome
14. FAO. 2015. *Smallholder productivity under climatic variability: Adoption and impact of widely promoted agricultural practices in Tanzania*, by Arslan, A., Belotti, F. & Lipper, L. Rome.
15. FAO. 2011. *Climate-smart agriculture: smallholder adoption and implications for climate change adaptation and mitigation*, by McCarthy, N., Lipper, L. & Branca, G. FAO Working Paper, Mitigation of Climate Change in Agriculture (MICCA) Series 4, Rome.
16. HLPE (Groupe d'experts de haut niveau sur la sécurité alimentaire et la nutrition). 2013. *Paysans et entrepreneurs: Investir dans l'agriculture des petits exploitants pour la sécurité alimentaire*. FAO. Rome.
17. FAO. 2012. *La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2012. Investir dans l'agriculture pour un avenir meilleur*. Rome.
18. FAO. 2014. *Institutional procurement of staples from smallholders. The case of purchase for progress in Kenya*. Rome.
19. HLPE. 2012. *La protection sociale pour la sécurité alimentaire*. FAO. Rome.
20. FAO. 2013. *L'État de l'insécurité alimentaire dans le monde 2013: Les multiples dimensions de la sécurité alimentaire*. Rome.
21. FAO. 2015. *An in-depth review of the evolution of integrated public policies to strengthen family farms in Brazil*, by Del Grossi, M.E. & Vicente, P.M. de Azevedo Marques. ESA Working Paper No. 15–01. Rome.
22. Comité de la sécurité alimentaire mondiale. 2015. *Principes pour un investissement responsable dans l'agriculture et les systèmes alimentaires*. FAO. Rome.
23. HLPE. 2011. *Régimes fonciers et investissements internationaux en agriculture*. HLPE Rapport 2. FAO. Rome.
24. FAO. 2012. *Directives volontaires pour une gouvernance responsable des régimes fonciers applicables aux terres, aux pêches et aux forêts dans le contexte de la sécurité alimentaire nationale*. Rome.
25. FAO, IFAD, UNCTAD & World Bank. 2010. *Principles for responsible agricultural investment that respects rights, livelihoods and resources. Extended version*. Discussion note. (available at [http://siteresources.worldbank.org/INTARD/214574-1111138388661/22453321/Principles\\_Extended.pdf](http://siteresources.worldbank.org/INTARD/214574-1111138388661/22453321/Principles_Extended.pdf)).
26. FAO. 2014. *Developing sustainable food value chains – Guiding principles*. Rome.
27. FAO. 2015. *The rice value chain in Tanzania. A report from the Southern Highlands Food Systems Programme*. Rome.

28. Demont, M. & Ndour, M. 2015. Upgrading rice value chains: Experimental evidence from 11 African markets. *Global Food Security*, Vol. 5, June 2015, pp.70–76.
29. Pardey, P., Alston, J. & Chan-Kang, C. 2013. Public agricultural R&D over the past half century: an emerging new world order. *Agricultural Economics* 44(1): 103–113.
30. Marslen, T. 2014. *Declining Research and Development Investment: A Risk for Australian Agricultural Productivity. Strategic Analysis Paper*. Dalkeith (Australia), Future Directions International.
31. Pretty, J.N. & Bharucha, Z.P. 2015. Integrated Pest Management for Sustainable Intensification of Agriculture in Asia and Africa. *Insects* 2015, 6(1), 152–182.
32. Casão Junior, R., de Araújo, A.G. & Fuentes-Llanillo, R. 2012. *No-till agriculture in southern Brazil: Factors that facilitated the evolution of the system and the development of the mechanization of conservation farming*. Londrina, Brazil. IAPAR and Rome, FAO.
33. Friedrich, T., Derpsch, R. & Kassam, A. 2012. Global overview of the spread of Conservation Agriculture. *Field Actions Science Reports Special Issue (Reconciling Poverty Alleviation and Protection of the Environment)*, 6: 1–7.
34. Sims, B.G., Thierfelder, C., Kienzle, J., Friedrich, T. & Kassam, A. 2012. Development of the conservation agriculture equipment industry in sub-Saharan Africa. *Applied Engineering in Agriculture* 28(6):1–11.
35. FAO. 2013. Mechanization for rural development: a review of patterns and progress from around the world. *Integrated crop management*, Vol. 20–2013. Rome.
36. Mrema G., Soni, P. & Rolle, R. 2014. *A regional strategy for sustainable agricultural mechanization*. FAO. Bangkok.
37. Ortiz, R. 2013. Marker-aided breeding revolutionizes 21<sup>st</sup> century crop improvement. In G.K. Agrawal & R. Rakwal, eds. *Seed development: OMICS technologies toward improvement of seed quality and crop yield*. Springer, New York. pp.435–452.
38. Tilman D., Cassman K.G., Matson P.A., Naylor R. & Polasky S. 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418: 671–677. doi:10.1038/nature01014.
39. Bindraban, P.S., Dimkpa, C., Nagarajan, L., Roy, A. & Rabbinge, R. 2015. Revisiting fertilizers and fertilization strategies for improved nutrient uptake by plants. *Biology and Fertility of Soils*. DOI: 10.1007/s00374-015-1039-7.
40. Tangtrakulwanich, K., Reddy, G., Wu, S., Miller, J.H., Ophus, V.L. & Prewett, J. 2014. Efficacy of entomopathogenic fungi and nematodes, and low risk insecticides against wheat stem sawfly. *Journal of Agricultural Science*, Vol. 6, No. 5, May 2014.
41. FAO & World Bank. 2010. *FAO/World Bank workshop on reducing post-harvest losses in grain supply chains in Africa, FAO Headquarters, 18–19 March 2010 - Lessons learned and practical guidelines*. Rome.
42. FAO. 2012. *Greening the economy with climate-smart agriculture*. Rome.
43. FAO. 2014. *Appropriate seed and grain storage systems for small-scale farmers: key practices for DRR implementers*. Rome.
44. Buresh, R.J., & Wopereis, M. 2014. *Save and Grow: Rice*. Paper prepared for the FAO Technical Consultation on Save and Grow: Maize, Rice and Wheat, Rome, 15–17 December 2014. FAO. (mimeo).
45. FAO. 2003. *World agriculture: towards 2015/2030. An FAO perspective*. J. Bruinsma, ed. London. Earthscan.
46. Pretty, J.N. 2003. Social capital and the collective management of resources. *Science* 302, 1912 (2003). DOI: 10.1126/science.1090847.
47. FAO. 2013. *Draft guide for national seed policy formulation*. Report to the Fourteenth Regular Session of the Commission on Genetic Resources for Food and Agriculture. Rome, 15–19 April 2013.
48. Solh, M., Braun, H-J. & Tadesse, W. 2014. *Save and Grow: Wheat*. Paper prepared for the FAO Technical Consultation on Save and Grow: Maize, Rice and Wheat, Rome, 15–17 December 2014. Rabat, ICAR-DA. (mimeo).

## Abréviations

<b>AIEA</b>	Agence internationale de l'énergie atomique	<b>FAO</b>	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture	<b>IWMI</b>	Institut international de gestion des ressources en eau
<b>BISA</b>	Borlaug Institute for South Asia	<b>ha</b>	hectare	<b>NERICA</b>	Initiative «Nouveau riz pour l'Afrique»
<b>CGIAR</b>	Groupe consultatif pour la recherche agricole internationale	<b>ICAR</b>	Indian Council of Agricultural Research	<b>OCDE</b>	Organisation de coopération et de développement économiques
<b>CIAT</b>	Centre international d'agriculture tropicale	<b>ICARDA</b>	Centre international de recherche agricole dans les zones arides	<b>ONG</b>	Organisation non gouvernementale
<b>CIMMYT</b>	Centre international d'amélioration du maïs et du blé	<b>ICIPE</b>	Centre international sur la physiologie et l'écologie des insectes	<b>QSMAS</b>	système agroforestier défriche-paillis Quesungual
<b>CNUCED</b>	Conférence des Nations Unies sur le commerce et le développement	<b>ICRISAT</b>	Institut international de recherche sur les cultures des zones tropicales semi-arides	<b>R-D</b>	recherche-développement
<b>CSIRO</b>	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation	<b>FIDA</b>	Fonds international de développement agricole	<b>SRI</b>	Système de riziculture intensive
<b>EMBRAPA</b>	Société brésilienne de recherche agricole	<b>IIASA</b>	Institut international pour l'analyse des systèmes appliqués	<b>SSNM</b>	gestion des éléments nutritifs en fonction du site
		<b>IRRI</b>	Institut international de recherche sur le riz	<b>t</b>	tonne

# Glossaire

**Agriculture de conservation.** Mode de gestion des sols qui contribue à protéger la structure, la composition et la biodiversité des sols par les moyens suivants: perturbation minimale des sols, couverture permanente de la surface et rotation des cultures

**Biomasse.** Matériel biologique issu d'organismes vivants, habituellement non employé dans l'alimentation humaine ou animale

**Culture de couverture.** Plante cultivée en période de *jachère* pour protéger le sol, recycler les éléments nutritifs et lutter contre les adventices

**Cultures intercalaires.** Association d'au moins deux cultures dans le même champ au même moment

**Culture relais.** Plantation d'une deuxième culture dans un champ avant que la première ait été récoltée

**École pratique d'agriculture.** Apprentissage en groupe de pratiques respectueuses des écosystèmes, qui permettent de réduire l'emploi de pesticides et de maintenir durablement les rendements culturaux

**Efficienc e de l'utilisation de l'eau.** Rapport de l'eau utilisée par le métabolisme de la plante sur l'eau perdue dans l'atmosphère

**Engrais minéral.** Engrais obtenus par des procédés chimiques ou industriels

**Engrais vert.** Culture (par exemple, graminée) qui produit des résidus servant de *paillis*

**Fixation biologique de l'azote.** Conversion de l'azote atmosphérique (par exemple, sous l'action des bactéries des nodules racinaires des légumineuses) en une forme assimilable par les plantes

**Intensification durable.** Obtention d'une production primaire maximale par unité d'intrant sans compromettre la capacité productive du système

**Intensification durable des cultures.** Mode de production agricole respectueux des écosystèmes permettant de produire davantage sur une zone donnée tout en préservant les ressources naturelles et en renforçant les services écosystémiques

**Jachère.** Étape du cycle de *rotation des cultures* pendant laquelle la terre est volontairement laissée inculte

**Labour zéro.** Pratique de l'*agriculture de conservation* consistant à *semer en ligne* sans préparation préalable du sol

**Légume sec.** *Légumineuse à grains* (par exemple, la lentille) récoltée pour ses semences sèches

**Légumineuse.** Plante de la famille des Fabaceae (ou Leguminosae)

**Légumineuse à grains.** Légumineuse (par exemple, le haricot) qui produit des semences utilisées dans l'alimentation

**Légumineuse fourragère.** Légumineuse herbacée ou ligneuse qui fournit des feuilles et des tiges à pâturer ou à ensiler

**Matière organique du sol.** Ensemble des éléments de la matière organique présente dans le sol

**Mise en boue** (riz). Travail du sol inondé visant à créer une couche de boue avant le repiquage des jeunes plants

**Monoculture.** Pratique consistant à cultiver la même espèce, sur la même parcelle, tous les ans, en recourant à des produits chimiques pour lutter contre les ravageurs et fertiliser le sol

**Nivellement au laser.** Élimination des ondulations de la surface du sol au moyen d'un émetteur laser et d'un récepteur monté sur un tracteur équipé d'une lame niveleuse

**Oxyde nitreux** (ou protoxyde d'azote). Gaz à effet de serre d'importance majeure produit essentiellement par les sols cultivés et lié à l'emploi excessif d'*engrais minéraux*

**Paillis.** Couche de matière organique (par exemple, *résidus de culture*) utilisée pour couvrir le sol afin de conserver l'humidité, supprimer les adventices et recycler les éléments nutritifs du sol

**Plates-bandes surélevées.** Sol aménagé en plates-bandes d'une largeur d'environ 50 cm à 2,5 m, d'une longueur variable et d'une hauteur égale au moins à 15 cm

**Plates-bandes surélevées permanentes.** *Plates-bandes surélevées* ensemencées en ligne à travers un *paillis de résidus de culture*

**Productivité de l'eau.** Rapport de la quantité ou la valeur de la production sur le volume ou la valeur de l'eau puisée ou détournée

**Produire plus avec moins.** Modèle de la FAO pour l'*intensification durable des cultures*

**Protection intégrée** (PI). Stratégie promouvant une lutte contre les ravageurs fondée sur un emploi minimal de produits chimiques

**Résidus de culture.** Parties de plantes restées en place après la récolte

**Riz** (ou *paddy*) **aquatique.** Riz cultivé sur un sol qui est inondé avant d'être *mis en boue*, puis est maintenu inondé jusqu'à la maturité de la culture

**Rotation des cultures** (ou **rotation culturale**). Alternance de différentes espèces ou familles de cultures sur le même champ

**Semis à sec.** Semis sur sol sec

**Semis direct.** Semis sans labour ni travail préalable du lit de semences

**Semis en ligne.** Semis en ligne à une distance et une profondeur optimales, à l'aide d'un *semoir*

**Semoir.** Machine employée dans l'*agriculture de conservation* pour positionner les semences à égale distance et à la profondeur souhaitée, et les recouvrir de terre

**Services écosystémiques.** Avantages des écosystèmes, qui rendent la vie possible

**Stress abiotique.** Effet négatif de facteurs non biologiques (par exemple, des températures extrêmes)

**Stress biotique.** Effet négatif de facteurs biologiques (par exemple, des insectes)

**Structure du sol.** Configuration des particules de sable, de limon et d'argile dans le sol



**«Présente des lignes directrices  
clairement définies pour  
la production durable dans  
les pays en développement.»**

*Sanjay Rajaram*

Lauréat du Prix mondial de l'alimentation  
en 2014

**«Cet ouvrage important vient  
à point nommé. Il contient  
d'excellents exemples et énonce  
clairement les principes.»**

*Jules Pretty*

Université d'Essex (Royaume-Uni)

ISBN 978-92-5-208519-5



9 789252 085195

I4009F/1/03.16