

INTENSIFICATION DURABLE DE LA PRODUCTION AGRICOLE DANS LES ZONES A FORTE DENSITÉ DE POPULATION ET PRODUCTIVITÉ ÉLEVÉE D'ASIE

par Guy **Treuil**¹

RÉSUMÉ

La communication rappelle quelles sont les méga-tendances qui détermineront largement les transformations à venir des agricultures à haute productivité dans les régions très peuplées d'Asie : la nécessité de consolider la sécurité alimentaire globale, surtout en Asie du Sud, l'urbanisation galopante, les diminutions des surfaces agricoles disponibles, de l'eau agricole, du nombre de travailleurs, ainsi que la consommation des intrants chimiques externes aux exploitations agricoles. Les problèmes actuels et émergents auxquels ces agricultures sont ou seront confrontées sont ensuite présentés. Le plafonnement des rendements potentiels et le nécessaire partage de l'eau, la durabilité de l'exploitation intensive des milieux, la diversification agricole marchande et l'attractivité de la profession agricole ainsi que le déplacement des avantages comparatifs sont discutés. Puis l'auteur présente les orientations actuelles de la recherche agronomique pour tenter d'y faire face en surpassant les potentiels de rendement de la révolution verte, en assurant la durabilité de l'exploitation intensive du milieu par une meilleure efficacité des intrants, en s'adaptant au changement climatique, et en intégrant les connaissances pour l'aide à la décision. Enfin, des inflexions ou nouvelles orientations de la recherche agricole qui semblent souhaitables afin de mieux relever les imposants défis posés par des systèmes de plus en plus complexes lors des trois prochaines décennies sont proposées. L'accent est mis sur l'importance de démarches plus intégrées et concertées pour la gestion des ressources renouvelables s'appuyant notamment sur les avancées récentes dans le domaine de la modélisation dynamique des systèmes adaptatifs et de leur utilisation concrète avec les parties prenantes sur le terrain. Le propos est illustré au moyen de plusieurs exemples pris dans les zones à riziculture irriguée intensive en Asie.

INTRODUCTION

La population asiatique croît encore au taux moyen de 1,7% par an et devrait passer de 3,7 à 4,6 milliards de personnes entre l'an 2000 et 2025. Il est à craindre que la plupart des pays du continent ne pourront nourrir leurs multitudes de plus en plus urbanisées sans dégrader les ressources renouvelables sur lesquelles reposent leurs agricultures, y compris là où de forts apports d'intrants externes sont utilisés.

Cette communication rappelle tout d'abord quelles sont les « méga-tendances » en cours qui détermineront largement les transformations à venir des agricultures à productivité physique élevée

¹ Géo-agronome, Directeur de recherches, unité de recherche Gestion des ressources renouvelables et environnement (GREEN), Département TERA, CIRAD. Courriel : guy.treuil@cirad.fr , Guy.T@chula.ac.th

dans les régions très peuplées d'Asie. Les problèmes actuels et émergents auxquels elles sont ou seront confrontées sont ensuite présentés, ainsi que les orientations actuelles de la recherche agronomique internationale pour tenter d'y faire face. Enfin, j'aborderai les inflexions ou nouvelles orientations de la recherche qui me semblent souhaitables afin de mieux relever les imposants défis des trois décennies à venir.

J'illustrerai mon propos au moyen d'exemples rizicoles, puisque cette céréale joue toujours un rôle stratégique majeur en Asie où elle couvre plus de la moitié des terres arables dans la plupart des pays. Je les prendrai dans le crucial écosystème irrigué à haute productivité qui couvre 79 millions d'hectares produisant 75% de la récolte mondiale de riz sur 55% des surfaces rizicoles (152 millions d'hectares au total dont 136 en Asie) cultivées par plus de 200 millions de minuscules exploitations familiales, leur taille moyenne variant de 0,4 ha en Chine à 3,5 ha en Thaïlande (15). C'est ici le domaine des variétés *indicas* semi-naines à fort potentiel de rendement issues de la révolution verte ainsi que des riz hybrides en Chine. Plus précisément, nous nous intéresserons à la situation des 24 millions d'ha exploités en double ou triple culture annuelle (49 millions d'ha récoltés par an) produisant 60% du riz irrigué et 40% de la production mondiale. Les rendements y varient de 3 à 12 tonnes de paddy par hectare et par cycle cultural, avec une moyenne de 5 tonnes par hectare en conditions tropicales et de 6,5 tonnes par hectare en zone tempérée aux conditions plus favorables à la culture. Dans cet écosystème rizicole, les riziculteurs peuvent recourir largement, à moindres risques climatiques comme économiques qu'ailleurs, aux intrants d'origine industrielle ainsi qu'aux équipements moto-mécanisés pour la production de très importants surplus commercialisés. Mais je montrerai aussi la nécessité d'assurer la diversification agricole marchande de telles agricultures afin d'améliorer la durabilité écologique et le bien-être économique et social des populations.

I. MÉGA-TENDANCES DANS LES RÉGIONS D'ASIE TRÈS PEUPLÉES ET AUX ÉCOSYSTÈMES TRÈS ARTIFICIALISÉS

Une sécurité alimentaire globale à consolider

Au lendemain de la révolution verte (1966-1990) l'Asie disposait en moyenne de 20% de riz en plus par habitant d'Asie par rapport à 1960 : la production mondiale est passée de 260 à 600 millions de tonnes ces quarante dernières années et l'Asie est globalement autosuffisante en riz malgré l'explosion démographique dont le poids reste écrasant. Ce résultat est redevable à 80% au bond des rendements moyens, ce qui a notamment permis de limiter la mise en culture de plusieurs dizaines de millions d'hectares en zones écologiquement fragiles. Sur cette longue période, les riziculteurs ont globalement réussi à accroître en moyenne de 3% par an le volume de la production de riz alors que la population asiatique passait de 1,9 à 3,5 milliards d'habitants, permettant aux courbes de croissance de la population et de la production de riz de ne pas diverger dangereusement et à la consommation moyenne par tête d'augmenter. Le producteur récolte dorénavant couramment 8 à 10 t/ha de paddy par an, soit quatre à cinq fois plus qu'avant la révolution verte. Ceux qui visent des rendements très élevés à chaque cycle rizicole sur de très petites exploitations, dans le delta du Fleuve Rouge ou en Chine méridionale atteignent même des niveaux de productivité physique de 17 à 18 t/ha de paddy récoltées par an en trois cultures. Dans les rizières irriguées chinoises, vietnamiennes, de Java, ou de Luzon aux Philippines, les riziculteurs approchent maintenant les potentiels de rendement des variétés semi-naines permis sous climat tropical humide. La productivité du sol ne peut plus s'élever rapidement malgré des consommations croissantes d'intrants par unité de surface qui rendent les gains marginaux de production de plus en plus coûteux, tandis que leurs effets négatifs sur l'environnement augmentent.

La très forte baisse de 80% du prix mondial du riz durant le dernier quart de siècle qui accompagna ce mouvement de croissance de la productivité pesa sur les niveaux de salaires et

contribua très significativement à accélérer la croissance économique dans les pays d'Extrême-Orient (dès l'après-guerre), puis dans le Sud-est asiatique et maintenant en Inde. Il s'agit de l'impact indirect le plus important que la recherche agronomique ait jamais accompli sur ce continent. C'est le cas en Chine où durant les quarante dernières années, les rendements en riz irrigué ont bondi de 2,1 à 6,3 t/ha, la production de riz augmentant au rythme moyen annuel de 2,7%. Avec un taux de croissance démographique de 1,7% sur la période, la disponibilité en grains de base par habitant est passée de 300 à 400 kg par an. Cette performance étonnante permet à l'Empire du milieu de supporter 22% de la population mondiale sur seulement 9% de ses terres arables. Cependant, selon l'IFPRI, l'abaissement récent des taux d'investissement dans la recherche rizicole et les infrastructures d'irrigation pourrait effacer l'actuel petit surplus de production de riz chinois face à l'évolution de la demande à l'horizon 2020. Mais ce déficit rizicole potentiel sera sans commune mesure avec celui, impressionnant, qui va se creuser dans le cas du maïs et des autres cultures fournissant les matières premières de l'industrie des aliments du bétail.

Peu d'autres pays ont été capables de faire aussi bien. Alors que le taux de croissance démographique varie encore entre 1,4 et 2,4% selon les pays, que les revenus des ménages augmentent plus vite que par le passé stimulant la demande (l'élasticité de la demande en riz devrait se maintenir à 0,15-0,20 durant la prochaine décennie), le rythme de croissance annuelle moyenne de la production rizicole s'est ralenti lors des deux dernières décennies à cause de l'érosion progressive des gains de rendements annuels moyens qui passèrent de 2,3% par an entre 1967 et 1985 à seulement 1,35% durant la décennie 1985-1995. La stagnation de la production de riz par habitant observée lors des dernières années, accompagnée d'une baisse des stocks, montre que le défi rizicole asiatique est encore loin d'être remporté.

C'est en Asie du Sud, où la croissance de la demande en céréales va demeurer forte durant les toutes prochaines décennies, que se présentent les perspectives les plus inquiétantes car ici le déficit en céréales pourrait atteindre 255 millions de tonnes. La population devrait croître de quelques 730 millions d'individus entre 1995 et 2025 (contre 670 millions entre 1965 et 1995) et la grande majorité demande à consommer plus de riz au quotidien. Bien que les exportations de produits manufacturés augmenteront, notamment en Inde, l'Asie du Sud (dont la population pauvre dépasse de loin celle de l'Afrique sub-saharienne) risque de ne pas pouvoir affecter assez de devises pour acheter de tels volumes de céréales et les distribuer efficacement, encore faut-il que de tels surplus soient disponibles sur les marchés. Ici, une nouvelle augmentation moyenne des rendements en paddy de 2 à 3 % par an est requise, sans plus de dégradation des terres ni de superficies afin d'autoriser la diversification agricole.

En 2025, la population du continent aura augmenté d'environ un quart et le nombre de consommateurs de riz se situera aux alentours de 3,9 milliards de personnes. D'ici là, la production de riz du continent devra passer de 550 à 700 millions de tonnes pour nourrir quelques 650 millions de nouveaux consommateurs (2). Durant la période 1997-2025, la demande en riz en Asie devrait s'accroître en moyenne d'environ 32%, mais avec de fortes disparités entre ses principales sous-régions : elle se limitera à 11% en Extrême-Orient, dépassera 39% en Asie du Sud-est et atteindra 53% en Asie du Sud. L'augmentation annuelle de la demande en riz en Asie d'ici 2010, devrait être de l'ordre de 1,7%, mais elle sera bien plus élevée dans les pays les plus pauvres et dépassera 2% en Asie du Sud (2,5% dans le cas de l'Inde). Or le puissant mouvement de libéralisation économique et les politiques fiscales plus restrictives actuelles réduisent les efforts d'investissement dans l'irrigation et la recherche agricole, tant au niveau national que multilatéral, alors que d'autres secteurs en croissance très rapide dans l'industrie et les services reçoivent dorénavant toute l'attention des décideurs.

Migrations massives et urbanisation galopante

En 1990, 32% des asiatiques vivaient en milieu urbain, cette proportion devrait atteindre 49% en 2020, la population rurale demeurant stable aux alentours de 2,3 milliards de personnes. La Chine pourrait avoir quinze villes de plus de quinze millions d'habitants dès 2015 et trente de plus

de trente millions d'habitants dès 2030. Le transfert de la force de travail des campagnes vers la ville s'accélère en Chine où déjà environ 100 millions de ruraux sont sur les routes ou aux portes des cités. En mars 2002, un rapport de l'OCDE considérait qu'un excédent de force de travail rural de 200 millions de personnes (sur un total de 500 millions de travailleurs ruraux) existait encore et devrait être transféré dans les autres secteurs de l'économie.

Moins de terres

Face aux besoins de l'urbanisation, de l'industrialisation et des activités de loisirs, les surfaces rizicoles ont commencé à diminuer (140 millions d'hectares en 1999, 136 en 2001), surtout en rizières irriguées hautement productives souvent situées en périphérie de grandes métropoles au cœur de vastes deltas et plaines côtières. Depuis l'an 2000, la grande majorité du supplément de population en Asie habite en milieu urbain et ces consommateurs dépendent de surplus rizicoles qui devront être obtenus sur des surfaces cultivées moyennes par habitant en contraction. Ce ratio devrait passer de 0,15 ha/habitant en 1995 à seulement 0,09 ha/habitant en 2025. Cette situation sera encore plus tendue par la nécessaire diversification de la production agricole afin d'accroître les revenus des ménages agricoles distancés par ceux des citoyens.

Moins d'eau agricole pour irriguer

L'agriculture asiatique utilise actuellement 75% des ressources en eau du continent et les rizicultures y consomment la moitié de l'eau agricole. Par endroits il faut encore de 3 à 5 m³ d'eau pour produire un kilogramme de paddy! En Chine, en 1995, la productivité de l'eau en rizière varie entre 0,15 et 0,70 kilogrammes de paddy par mètre cube consommé, alors qu'une fourchette allant de 0,4 à 1,4 kilogrammes par mètre cube d'eau est observée pour les autres céréales. Les pertes en eau les plus importantes à l'échelle du casier rizicole irrigué sont dues aux phénomènes de percolation, d'infiltration sous les diguettes, ainsi que d'évaporation de la fine lame maintenue en surface durant le plupart du cycle cultural.

Le développement des ressources en eau a joué un rôle clef dans l'augmentation de la production rizicole dans pratiquement tous les pays d'Asie où la terre est un facteur de production rare. Mais dans de nombreuses régions, ce ne pourra plus être le cas dans le futur alors que la disponibilité en eau par habitant a déjà diminué de 40 à 60% selon les pays entre 1950 et 1990, tandis que le volume total utilisé triplait. Le développement économique réduit la part allant à l'agriculture et la tension monte autour des intérêts conflictuels de ses divers usagers. Les politiques gouvernementales tendent actuellement à accorder la priorité à la production d'eau potable, pour les autres utilisations domestiques en milieu urbain, ou encore à l'activité industrielle et non plus à son usage agricole. Une étude récente de l'Institut international pour la gestion de l'eau (IWMI) estime qu'environ un milliard d'asiatiques vivront dans des régions connaissant une raréfaction de la ressource en eau, alors que la demande en eau devrait encore croître de 50% en Asie du Sud-est ou en Inde et de 40% en Chine durant le prochain quart de siècle, contrées où environ la moitié des superficies irriguées sont des rizières. Le volume d'eau disponible par tête d'habitant diminuera encore de 40 à 60% dans la plupart des pays entre 1990 et 2020. Il devrait passer sous la barre critique des 2.000 mètres cubes par habitant à l'horizon 2025 dans des pays tels que la Chine, la Corée du Sud, l'Inde, le Pakistan et le Sri Lanka.

La baisse régulière du prix du riz, la montée du poids de la dette de nombreux pays, la raréfaction des sites favorables augmentant le coût de l'hectare irrigué et la montée des préoccupations environnementales, ont eu pour conséquence un ralentissement important des investissements publics dans les infrastructures d'irrigation au cours des deux dernières décennies. Les prêts des principaux donateurs bilatéraux et multilatéraux soutenant ces investissements étaient divisés par deux ou trois selon les régions. A l'exception de l'Inde (où les subventions annuelles à l'irrigation dépassent 1,3 milliards d'euros), les ressources des budgets nationaux affectées à l'irrigation ont connu une évolution similaire durant les années quatre vingt et ont été divisées par deux en Chine et par trois aux Philippines. Le rythme d'expansion des superficies irriguées a baissé,

il est même devenu négatif dans plusieurs pays. Pour l'ensemble de l'Asie rizicole, il est passé de 2,1% en moyenne sur la période 1961-1980 à seulement 1,3% durant les décennies quatre vingt et quatre vingt dix. Mais souvent les nouvelles superficies irriguées ne sont plus cultivées en riz, mais en cultures à valeur commerciale plus élevée. En Asie du Sud, l'eau servant à l'irrigation de ces surfaces additionnelles provient dans 80% des cas du pompage dans les nappes phréatiques souterraines, technique dont la durabilité est généralement mal connue. L'abaissement régulier du niveau de la nappe phréatique accroît progressivement le coût des opérations de pompage et produit de nombreux conflits autour des autres usages, notamment domestiques, de la ressource.

Moins de travailleurs et un coût du travail plus élevé

Le puissant mouvement général de croissance et de développement économique, qui touche maintenant la quasi-totalité du continent asiatique, continuera à transférer une partie de la force de travail agricole des champs vers les autres secteurs économiques. La force de travail coréenne en agriculture augmenta jusqu'en 1975 pour atteindre 6,1 millions de personnes, avant de commencer à diminuer. En l'an 2000, le pays ne disposait plus que de 2,4 millions de travailleurs agricoles. En Thaïlande, la part de l'emploi agricole dans la force de travail totale a chuté de 80% à 55% durant le dernier quart de siècle. Une telle diminution est une nécessité dans les pays où les campagnes sont surpeuplées : 17 personnes vivent de la production d'un hectare cultivé en Chine, 13 au Bangladesh, 11 au Viêt-Nam, 8 à 10 en Inde, en Indonésie et aux Philippines.

Dans les régions irriguées cultivées de façon intensive, la compétition entre secteurs de l'économie pour l'emploi de la main d'œuvre disponible est de plus en plus vive et les différences de salaires entre l'agriculture et l'industrie augmentent, accélérant souvent la diffusion de la mécanisation intermédiaire sur les exploitations afin d'augmenter la productivité du travail. Les précédentes expériences nippones et formosanes montrent de rapides diminutions des temps de travaux en rizière irriguée : entre 1960 et 1990 ils ont chuté de 1729 à 438 heures de travail par hectare au Japon et de 864 à 238 heures par hectare à Taïwan (6). Des évolutions similaires sont maintenant à l'œuvre en Malaisie, en Thaïlande, dans le delta du Mékong, ou aux Philippines. L'implantation du riz par semis direct de graines pré-germées sur boue y remplace le repiquage tandis que le recours aux petites moissonneuses-batteuses à la récolte se répand rapidement. Les façons culturales de préparation du sol, de pompage et de transport étant déjà totalement réalisées au moyen de motoculteurs multi-usages. Cette évolution contribue à distendre les relations entre systèmes de culture et d'élevage. Les synergies passées disparaissent alors que les ateliers d'élevage se spécialisent, adoptent les techniques de production de masse en hors-sol et connaissent de très sérieux problèmes sanitaires.

Le « grand bond » de la consommation des intrants chimiques

Les variétés de riz *indicas* semi-naines répondant fortement aux engrais azotés et les premières lignées étant sensibles aux attaques de ravageurs et maladies, l'intensification de la riziculture irriguée a été marquée par une rapide augmentation de la consommation d'intrants d'origine industrielle. Entre 1964 et 1988, aidée par de coûteux programmes de subvention, la consommation d'engrais minéraux de synthèse a bondi dans les grandes régions d'Asie à un rythme annuel moyen de plus de 10%. Elle ne s'est ralentie que durant les dernières années de cette période sous les effets combinés de la baisse du prix du riz et de la diminution des subventions publiques. Dès la fin de la décennie quatre vingt, dans certaines régions hautement productives des quantités croissantes d'engrais devaient être utilisées afin de maintenir les rendements élevés. Dans les foyers de la révolution verte, les doses d'engrais épandues atteignent en moyenne 200 kg/ha et surpassent les *optima* économiques. Or la plante n'utilise que 30 à 50% de ces apports (souvent moins lorsqu'ils sont très copieux) et leurs effets négatifs sur l'environnement augmentant rapidement, une meilleure efficacité de la fertilisation azotée devra être trouvée afin d'améliorer les revenus des riziculteurs, de limiter leurs conflits avec les autres usagers de l'eau et de conserver les milieux.

Une évolution similaire, heureusement déjà en cours, est impérative dans le domaine de l'usage très peu raisonné des insecticides. La consommation indienne de pesticides est ainsi passée de 8.600 à 76.000 tonnes entre 1960-61 et 1988-89, avant de retomber à 63.270 tonnes en 1994-95. La Chine est devenue le premier pays consommateur de pesticides durant la dernière décennie avec un usage annuel de plus de 500.000 tonnes de produits. En 1998, dans les rizières de la province de Zhejiang, les riziculteurs traitaient leurs riz à huit reprises en moyenne par cycle cultural et consommaient 28 kg/ha de produit commercial, deux fois plus que lors des années soixante dix. La surconsommation de pesticides, largement influencée par la perception erronée des risques de pertes de récolte chez les riziculteurs, atteignait ici 40%, tandis que 22 et 23% des paysans présentaient des troubles du fonctionnement du foie et des reins indiquant de sérieux effets de l'usage intensif de pesticides sur la santé des agriculteurs et leur bien-être (7).

Qualité des produits, segmentation des marchés et organisation des producteurs

La montée en puissance de centaines de millions de représentants des classes moyennes urbaines aux revenus en croissance rapide dans les pays émergents crée de nouvelles exigences quant à la qualité sanitaire et organoleptique des produits agricoles. Les marchés se segmentent et les niches rémunératrices se multiplient (riz aromatiques, produits « biologiques », etc.). Les producteurs s'organisent en conséquence, parfois avec le soutien des pouvoirs publics. C'est le cas en Thaïlande, qui prétend devenir « la cuisine du continent » et qui dispose d'une puissante agro-industrie combinant quelques multinationales et une myriade de PME. La recherche agricole est de plus en plus branchée sur le secteur privé très dynamique, ainsi qu'en prise directe avec les demandes nouvelles émanant des organisations de producteurs ou d'ONG.

II. PRINCIPAUX PROBLÈMES ÉMERGENTS

Plafonnement des rendements potentiels

Les gains de productivité facilement accessibles ont déjà été engrangés durant les trois décennies précédentes, soit par l'extension des superficies irriguées et l'augmentation du nombre de cycles culturaux par an, ou grâce au bond de la productivité physique du sol permis par les technologies de la révolution verte et des riz hybrides en Chine. Les gains de rendement en paddy devenant de plus en plus difficiles à réaliser, ils sont aussi proportionnellement plus coûteux en intrants et tendent à réduire la productivité des facteurs tout en accroissant les risques de dégradation des ressources naturelles renouvelables et de l'environnement. Les très hauts niveaux de productivité physique atteints ont du mal à être maintenus. Pour certains, c'est la preuve de la nécessité d'un nouveau saut qualitatif du potentiel de rendement du matériel végétal cultivé.

Meilleure gestion et partage de l'eau

D'ici 2025, l'IRRI estime que 2 millions d'hectares de casiers irrigués en saison sèche et 13 millions d'hectares de rizières irriguées en saison humide seront affectés par le manque d'eau, tandis qu'environ 22 millions d'hectares seront touchés par son coût trop élevé (16). Face à ce constat, il est nécessaire d'accroître l'efficacité de son utilisation et de limiter la durée de la submersion. La montée en puissance des problèmes de lutte contre les mauvaises herbes (l'eau étant le meilleur herbicide !), déjà accompagnée d'un boom de la consommation de désherbants chimiques, force à des mutations dans les techniques d'installation des cultures, leur fertilisation, voire le choix du type de plante cultivée.

La plupart des gouvernements asiatiques doivent aujourd'hui prendre d'importantes décisions pour planifier l'attribution, la régulation et l'usage des ressources en eau face à la satisfaction prioritaire des besoins domestiques et industriels, au plafonnement de l'exploitation du potentiel d'irrigation écologiquement durable, économiquement viable et socialement acceptable, à

l'expansion des risques de salinisation des terres côtières dus à la réduction du débit des fleuves en saison sèche. Les phénomènes de dégradation des terres irriguées affectent environ un million d'hectares pour les terres engorgées et jusqu'à 30 à 40 millions d'hectares pour les surfaces en cours de salinisation.

De plus en plus fréquemment, les coûts de gestion des ouvrages hydrauliques ne peuvent plus être pris en charge par le secteur public et, en conséquence, l'état des infrastructures de nombreux périmètres irrigués se détériore. Une analyse de 92 périmètres sur l'île principale de Luzon aux Philippines au tout début de la décennie quatre vingt dix concluait qu'un tiers d'entre eux montraient des tendances à la diminution des surfaces irriguées. L'introduction de nouveaux systèmes de gestion des périmètres accordant un plus grand rôle aux associations d'usagers, est en cours et devra être davantage encouragée. Mais la réhabilitation de nombreux périmètres n'est pas économiquement viable alors que les coûts de construction et de remise en état s'envolent.

L'amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau agricole devra être recherchée tant au niveau de la plante, du casier, que de l'exploitation agricole et du périmètre irrigué. Mais ces économies devront garantir le maintien d'une productivité élevée afin de satisfaire les besoins croissants de la demande en produits dans les zones très peuplées. Or une étude de l'IRRI réalisée entre 1996 et 1999 sur 400 exploitations rizicoles de 15 villages du delta du Mékong a mesuré des pertes de production en riz de 25 et 27% respectivement en saisons humide et sèche chez les riziculteurs ne pouvant disposer de suffisamment d'eau pour l'irrigation de leurs casiers. De telles pertes ne sont pas supportables dans les régions très peuplées.

Les combinaisons d'instruments à mettre en œuvre doivent être adaptées au niveau de développement économique de chaque pays et notamment à la capacité des institutions pour les mettre en œuvre. Les économies d'eau agricole seront indispensables pour permettre à ses usages industriels et domestiques de croître au fur et à mesure du développement économique et de l'urbanisation en Asie sans produire de conflits sociaux majeurs avec le monde rural. L'augmentation prévisible du prix de l'eau payé par le producteur devrait encourager le recours aux pratiques économes et limiter l'usage de l'eau en irrigation de complément sur la culture de riz lors de la mousson humide. Elle incitera également les riziculteurs à diversifier leur production au moyen de cultures à plus forte valeur commerciale et moins gourmandes en eau durant le cycle cultural de saison sèche totalement dépendant de l'irrigation. Une telle diversification, déjà observable par endroits, comporte aussi de nombreux avantages pour l'agriculteur (diminutions des risques économiques et d'infestations par les ravageurs ou les maladies), mais aussi pour le milieu (meilleures équilibres entre éléments de la solution du sol, meilleure fourniture des fertilisants aux plantes, moindres risques d'engorgement et de salinisation des sols, etc.).

Mieux raisonner la consommation des intrants d'origine industrielle

Alors que les riziculteurs des régions très densément peuplées devraient encore chercher à accroître la productivité du sol dans l'écosystème irrigué intensivement cultivé, l'efficacité de la forte utilisation des engrais minéraux y demeure faible et doit être améliorée. Cela est indispensable de façon à préserver l'environnement, en limitant les risques de pollution par la nitrification des nappes phréatiques et l'eutrophisation des cours d'eau, ainsi que pour augmenter ou au moins stabiliser la marge bénéficiaire du producteur au moment où les gouvernements réduisent les subventions aux intrants agricoles qui en avaient largement favorisé l'utilisation durant les trois premières décennies de la révolution verte.

L'engrais minéral, surtout azoté, est l'intrant le plus coûteux en riziculture irriguée, mais en milieu irrigué, la très imparfaite synchronisation entre la demande en azote du peuplement de riz et les apports d'engrais se traduit généralement par de fortes pertes d'unités fertilisantes dans le milieu, surtout quand les riziculteurs en épandent deux fois trop comme en Chine (9). Les zones rizicoles à très haute productivité physique du sol, où les meilleurs producteurs approchent les potentiels de rendements permis par le climat, entrent dorénavant dans une phase de nécessaire augmentation de l'efficacité des engrais épandus. Ainsi, aux niveaux actuels d'efficacité de

l'utilisation par la plante de l'azote épandu, une nouvelle augmentation de 25% du rendement du riz irrigué actuellement visée par l'IRRI impliquerait un doublement de la quantité moyenne de cet élément fertilisant majeure épandue en rizière, soit l'apport de plus de 400 kg d'engrais azoté par hectare, scénario tout à fait indéfendable face à la nécessité de préservation de l'environnement et de la qualité de l'eau.

Au début des années quatre vingt dix, plus du quart des pesticides consommés dans le monde l'étaient en Asie où 40% des matières actives allaient aux rizières. En 1993, la valeur marchande de l'ensemble des pesticides appliqués sur le riz, y compris les herbicides dont l'emploi se répand rapidement, était estimée à plus de 3,1 milliards d'euros et semblait plafonner à ce niveau. Les parts des insecticides, herbicides et fongicides étaient respectivement de 36, 38 et 26% (10). Plusieurs études réalisées ces quinze dernières années ont montré la faible efficacité écologique et l'insuffisante rentabilité économique (souvent même négative), ainsi que la nocivité pour la santé des agriculteurs et de leurs familles, de la plupart des applications de pesticides en parcelles irriguées. Dans de nombreuses situations, avec le soutien de subventions publiques, ces pulvérisations de pesticides réduisant également les populations d'organismes prédateurs des ravageurs et pathogènes du riz furent à l'origine de la plupart des pullulations observées (de la cicadelle brune – *Nilaparvata lugens* - ou du virus tungro) occasionnant des dégâts significatifs à la culture sur des superficies étendues et obligeant à de nouvelles pulvérisations de pesticides à un stade plus avancé du cycle cultural. (10). Les ravages de la sur-consommation de pesticides sur l'environnement et la santé des riziculteurs ont été documentés dans le cas des Philippines par Rola et Pingali (11). Très souvent, les agriculteurs déclenchent ces traitements chimiques suite à l'observation de faibles populations de ravageurs ne devant pas occasionner de pertes de récolte significatives. C'est le cas des chenilles qui se nourrissent du feuillage des jeunes plants de riz en début de cycle. Mais la plante est capable de supporter une attaque de ce type affectant jusqu'à 50% des plantes sans perte de production à la récolte. Malgré cela, environ 80% des insecticides utilisés sur le riz visent ce type de ravageur mineur lors du premier mois de la culture. Afin d'encourager la réduction de l'usage des pesticides, ce sont souvent les perceptions erronées des producteurs quant aux effets des pesticides, héritées du contexte de trois décennies précédentes de la révolution verte rizicole, qu'il s'agit de changer.

Diversification agricole dans les grands « bols de riz »

Quand les terres demeurent dans la sphère agricole, les rizières converties le sont de façon irréversible en jardins maraîchers, en vergers, voire en pâturages ou en étangs pour l'aquaculture lorsque les riziculteurs saisissent les opportunités fournies par le développement des marchés de fruits et légumes et de protéines animales de plus en plus demandés par les classes urbaines moyennes et aisées en augmentation et par l'exportation. Ce type de diversification de l'agriculture des grandes plaines et deltas en faveur de productions à haute valeur commerciale est déjà largement avancé en Thaïlande centrale. Selon une dynamique similaire, la part des rizières dans la SAU du delta du Mékong au Viêt-Nam aurait décliné de 62 à 57% entre 1985 et 1995. Cet important phénomène de diversification hors de la riziculture ira-t-il jusqu'à provoquer une diminution des surplus rizicoles mis sur le marché mondial par ces deux pays exportateurs majeurs ?

Si l'indice d'intensité de culture est déjà compris entre 2 et 3 en de nombreux endroits où la riziculture irriguée est dominante, une élévation de son niveau sera encore souvent requise pour faire face à la demande des prochaines décennies. C'est ce que tente de réaliser l'Indonésie avec le soutien du programme gouvernemental « *300 percent cropping intensity project* ». Cela devrait entraîner une augmentation des volumes d'engrais de synthèse épandus et donc des risques de pollution des nappes phréatiques et des cours d'eau, portant aussi atteinte à la biodiversité de zones marécageuses de plus en plus souvent classées en aires naturelles protégées.

L'agrandissement de la taille des très petites exploitations au fur et à mesure de l'exode rural afin d'augmenter les revenus agricoles ne se fera pas aussi rapidement et puissamment en Asie

qu'en Amérique du nord ou en Europe. En particulier, les prix très élevés de la terre y limitent considérablement le développement des marchés fonciers.

Une profession peu attractive

A l'heure où les moyens de déplacement ainsi que les médias pénètrent en force les maisonnées rurales les plus isolées et y font miroiter les opportunités d'emplois non agricoles, peu de jeunes asiatiques des grandes plaines et deltas intensivement cultivés voient leur avenir dans le métier de riziculteur, activité sous-rémunérée, épuisante et saisonnière. Une grande part des gains de productivité réalisés en riziculture a en effet surtout bénéficié aux consommateurs sous la forme de prix réels du riz en constante diminution. Sur la période 1975-95, le salaire agricole réel s'est accru de 170% en Asie de l'Est et du Sud-est, où la croissance économique annuelle dépassa 5% en moyenne, et seulement de 50% en Asie du Sud où la croissance fut bien plus modérée. En de nombreux endroits, les rizières des plus petites exploitations sont déjà entretenues par les femmes, les enfants et les personnes âgées, tandis que les hommes adultes et les jeunes de la maisonnée ont migré vers la ville où sont devenus des pluri-actifs combinant les tâches rizicoles avec des emplois industriels ou des services. Une enquête de l'IRRI réalisée au nord-est de l'Inde a montré que la contribution de la main d'œuvre féminine représentait 87% du travail total investi dans la production rizicole et même plus dans le cas des exploitations de basse caste et à bas revenus. Les priorités et les méthodes de travail de la recherche pour le développement devront à l'avenir mieux tenir compte de cette situation et s'attacher à réduire la pénibilité des travaux rizicoles.

Dans ce contexte, les agriculteurs ne sont plus seulement à la recherche de technologies augmentant la productivité physique de leurs lopins, mais accordent plus d'importance à leurs effets sur la productivité du travail. L'accroissement de l'âge moyen des agriculteurs de ces régions et la dépopulation des zones les plus reculées sont des processus déjà bien avancés au Japon, en Corée du Sud et à Taïwan. La Malaisie, la Thaïlande et la Chine devraient très prochainement être affectés par le même phénomène.

La récente croissance rapide des activités non agricoles dans les grandes villes et les agglomérations rurales a creusé le différentiel des rémunérations du travail entre la ville et la campagne, ainsi qu'entre le salaire agricole et non agricole dans les campagnes. Comment augmenter les revenus agricoles et ruraux afin de limiter les migrations de travailleurs vers des cités dont les infrastructures et services ne pourront souvent faire face à leur afflux ? Alors que plus de cent millions de ruraux chinois sont sur les routes et arrivent en ville, c'est là la première préoccupation des autorités de Pékin. L'expérience des pays asiatiques les plus industrialisés a montré que la mécanisation rizicole n'a pas suffi pour atteindre cet objectif et que le recours à la protection du marché interne favorisant la montée des prix intérieurs des produits agricoles a été nécessaire. Mais, dans le contexte de la mise en application des accords de l'Organisation mondiale du commerce (OMC) sur la libéralisation des échanges commerciaux et de la signature d'accords régionaux sur le libre échange, cette option est très difficilement envisageable pour les pays en développement.

Compétition internationale et déplacement des avantages comparatifs

Face à un marché international du riz très étroit, la plupart des pays asiatiques, pauvres ou riches, ont historiquement adopté une stratégie de sécurité alimentaire nationale similaire basée sur la production intérieure de la majeure partie, voire la totalité, de leurs besoins. Le plus souvent, ces stratégies font appel à un monopole du secteur public sur le commerce extérieur du riz et la gestion de stocks afin d'amortir les fluctuations de prix trop marquées, socialement et donc politiquement inacceptables, autant pour les petits producteurs si le mouvement est à la baisse, que pour les classes laborieuses urbaines en cas de hausse brutale du prix du riz. La récente expérience indonésienne suite à la crise économique et politique de 1997 montre que ces politiques de stabilisation peuvent permettre d'amortir des crises sociales et alimentaires majeures. Si avant la crise économique de 1997 certains pays envisageaient de se procurer leur riz chez les voisins disposant d'un meilleur

avantage comparatif pour cette production, il n'en est plus de même aujourd'hui. Le coût politique d'une sécurité alimentaire dégradée est tellement élevé, qu'aucun leader ne semble prêt à courir un tel risque.

Des décennies de protection de leur secteur rizicole ont créé des situations économiques très contrastées entre pays producteurs. A la fin des années quatre vingt dix, il en coûtait vingt cinq fois plus cher au riziculteur japonais (2.290 \$US) pour produire une tonne de paddy qu'à ses homologues thaïlandais (70 \$US) et vietnamiens (79 \$US) et 7 fois plus que sur les grandes fermes rizicoles des États-Unis (331 \$US par tonne de paddy).

Mais les nouvelles règles du commerce international pourraient venir mettre à mal les économies agricoles protégées et forcer leur ouverture, au moins partielle et progressive, au riz importé par exemple. L'avantage comparatif pour la production rizicole passerait alors chez les pays à bas niveaux de revenus comme le Viêt-Nam. Mais une telle évolution a peu de chance de se produire rapidement car les gouvernements concernés offriront sans nul doute tous les types de résistances associés à des cultures nationales pour lesquelles le riz est un mode de vie, la stabilité de son prix intérieur un impératif politique et social afin d'assurer la sécurité alimentaire des segments les plus vulnérables de la population et limiter l'envolée des salaires dans les pays moins développés. Il est cependant possible que l'on assiste progressivement dans plusieurs pays à une réforme structurelle du secteur rizicole ; alors, malgré les prix très élevés de la terre, les plus petites exploitations disparaîtraient et laissant la place à des unités de production entrepreneuriales plus à même de résister à la compétition internationale. Une telle évolution semble être tout juste amorcée au Japon. Pour des productions agricoles moins stratégiques que le riz, les spécialisations nationales et régionales peuvent évoluer plus rapidement. C'est le cas actuellement de l'horticulture fruitière tempérée pour laquelle la rapide croissance de la production chinoise liée à la diversification marchande sur les exploitations rizicoles tend à ruiner les efforts de ses voisins dans ce domaine (13).

Aucune nouvelle révolution technologique n'est en vue à court terme qui permettrait d'enregistrer un nouveau bond de la productivité rizicole en milieu irrigué. Par contre, le contexte actuel y est radicalement différent de celui des trois décennies de la révolution verte. Il est infiniment plus complexe et contraignant pour les riziculteurs amenés à composer avec un nombre croissant de protagonistes aux intérêts différents pour l'accès aux ressources productives. La diversification de la production agricole en cours et celle des modes de consommation alimentaire font que tous les gains de production localement nécessaires devront provenir de nouvelles augmentations des rendements par unité de surface rizicole pour faire face à l'accroissement prévu de la demande et si possible, d'augmenter les disponibilités en riz par habitant là où ils souhaitent encore en consommer plus qu'auparavant. Le défi auquel doit faire face la recherche, les décideurs politiques et les riziculteurs lors des deux prochaines décennies est de taille : aider l'Asie à produire au moins 25% de riz en plus sur moins de terres, sans dégradation supplémentaire des ressources naturelles renouvelables, donc notamment avec moins d'eau, moins de bras et moins d'intrants chimiques en riziculture irriguée afin de pouvoir satisfaire les besoins essentiels des familles de petits producteurs ruraux comme des consommateurs urbains avec des prix stables et à un niveau ne limitant pas l'accès des franges défavorisées de la population à cette céréale essentielle. Si durant les dernières décennies, la recherche rizicole a pu se focaliser sur l'augmentation des rendements en paddy et avoir un impact important par la dissémination rapide d'un « paquet technologique » assez standard et normatif symbolisant la riziculture moderne dans les zones les plus favorables à la production intensive (le « *ying* »), durant la période actuelle elle doit se préoccuper tout autant du « *yang* », c'est-à-dire la conservation des ressources renouvelables et de l'environnement dans les zones à haute productivité au moyen de l'amélioration de l'usage des intrants et de l'accroissement de la productivité du travail tout en diminuant sa pénibilité.

III. ORIENTATIONS ACTUELLES DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Les recherches en cours sur les systèmes à haute productivité demeurent dominées par la création de connaissances, technologies et pratiques culturales permettant d'augmenter encore les rendements du riz irrigué.

Surpasser le potentiel de rendement de la révolution verte

L'IRRI considère qu'une nouvelle augmentation des rendements moyens en riz irrigué jusqu'à 8 t/ha de paddy par cycle est nécessaire lors des trois prochaines décennies, afin de compenser les pertes des surfaces rizicoles irriguées et pour répondre à l'augmentation de la demande. Augmenter de 25% le potentiel de rendement du riz irrigué dans les conditions tropicales humides, au-delà du plafond de 10 tonnes de paddy par hectare établi par l'IR8 dès le milieu des années soixante, est un objectif jugé incontournable et réalisable. Des projets stratégiques visent à accélérer l'amélioration de la productivité physique qui ne progressait plus qu'au rythme moyen d'1% par an par l'amélioration variétale conventionnelle.

Les riz hybrides se répandent hors de Chine

Depuis le début des années quatre vingt dix, la moitié des rizières du pays, soit 15 millions d'hectares, sont ensemencées avec des riz hybrides produisant environ 60% du volume total de la récolte nationale. Mais leur adoption commence aussi à se répandre en Asie tropicale où lors de la campagne 2001 elles auraient été cultivées sur quelques 701.000 hectares de rizières en Inde, au Bangladesh, au Viêt-Nam, aux Philippines, etc. Grâce au phénomène d'hétérosis, ces hybrides tropicaux entre lignées d'*indicas* peuvent atteindre des rendements supérieurs d'environ 15 à 20% à ceux fournis par les variétés semi-naines classiques, soit un gain d'environ une tonne à une tonne et demie de paddy par hectare et par cycle cultural. Dans le cas de la Chine, avec environ 22 millions de tonnes de paddy le surplus de production procuré chaque année par l'adoption des riz hybrides ce qui permet de libérer environ quatre millions d'hectares de terres arables pour d'autres productions. Les surfaces rizicoles cultivées en Asie tropicale avec ces riz hybrides devraient atteindre environ 2 millions d'hectares dans quelques années et leur contribution sera significative dès la prochaine décennie.

La nécessité d'acheter de nouvelles semences à pris fort à chaque cycle cultural limite la diffusion de ces riz hybrides aux régions à forts potentiels de production et très intégrées au marché. D'autres contraintes limitant la diffusion des riz hybrides en Asie tropicale : une rentabilité inférieure de leur culture là où la qualité du grain et le prix de marché pour les riz hybrides sont faibles ; des échanges de matériel végétal de plus en plus difficiles entre les pays participant à cet effort ; des difficultés techniques rencontrées dans la production des semences, qui en accroissent le coût, ainsi que dans leur distribution aux producteurs, des problèmes de sensibilité à certains ravageurs de la culture.

Depuis 1998 un programme chinois vise à créer des variétés de « super riz hybrides », capables de produire plus de 100 kilogrammes de grain par hectare et par jour, en utilisant à la fois des modifications morphologiques de la plante et surtout l'hétérosis entre sous-espèces. Le nouveau seuil de rendement visé pour les super hybrides chinois est maintenant porté à 15 t/ha de paddy et par cycle cultural. D'autres hybrides de riz irrigué faisant appel à des variétés sauvages ou à certaines lignées du nouveau type de plante de riz en cours de mise au point à l'IRRI sont aussi en cours d'évaluation.

Un nouveau type de plante à l'IRRI

Dès la fin des années quatre vingt, l'IRRI considéra que l'architecture même de la plante de riz devait à nouveau être fondamentalement reconstruite pour que sa productivité puisse être portée à

12 t/ha de paddy dans les conditions tropicales humides : c'est l'objectif du projet de création d'un nouveau type de plant de riz (NPT pour "New Plant Type") qui exploite les caractéristiques morphologiques des riz japonicas tropicaux rendant la plante plus adaptée à une production irriguée par semis direct à très forte densité de peuplement.

Chez le nouveau type de riz irrigué toutes les talles, en nombre réduit, devraient produire une panicule avec 150 à 200 épillets, contre une centaine pour les variétés modernes semi-naines d'*indicas*. Ses feuilles seront aussi plus érigées, plus vertes et plus épaisses, afin d'augmenter leur efficacité photosynthétique de 10 à 15% et ses tiges plus robustes reliées à un système racinaire plus vigoureux. La très forte densité des plants de NPT au mètre carré devrait aussi permettre de limiter la croissance et la compétition des mauvaises herbes pour réaliser des économies en eau, en travail et en herbicides.

Certaines lignées de NPT ont une teneur en fer et en zinc augmentée de 50%. Des lignées de NPT ont déjà servi à créer deux nouvelles variétés chinoises présentant un potentiel de rendement en paddy de 12 tonnes par hectares. Elles étaient cultivées sur environ 5.000 hectares en 2002. Ailleurs, les premiers NPT devaient pouvoir être testés en conditions paysannes en 2004 dans les pays à bas niveaux de revenus où les producteurs visent un rendement en paddy maximal sur leurs faibles surfaces irriguées.

Deux décennies après le début des travaux dans ce domaine, et alors que le séquençage du « petit » génome du riz a été achevé en 2002, aucune avancée marquante due aux biotechnologies rizicoles ne pointe encore à l'horizon si ce n'est la production de riz « biofortifiés » en Vitamine A, fer, etc.

Mais les travaux de recherche doivent préserver un équilibre entre les nouveaux gains de productivité et la conservation des acquis passés pouvant être érodés au fil du temps. Dans ce contexte, afin de maîtriser l'évolution des interactions entre la population de riz et son milieu, une approche systémique des problèmes de la riziculture irriguée s'impose.

Assurer la durabilité de l'exploitation intensive en rizières irriguées

De plus en plus, les recherches en amélioration variétale et en gestion des ressources naturelles à l'échelle du champ cultivé avancent parallèlement, afin d'éviter que toute nouvelle augmentation nécessaire de la productivité du sol par le progrès génétique n'accroissent en retour le risque de dégradation de l'environnement de la culture.

C'est hélas le constat qui peut être fait dans le cas des systèmes de production à succession riz - blé des zones subtropicales d'Asie, qui nourrissent plus de 350 millions de personnes, mais sont aujourd'hui entrés en crise. Véritables greniers à grains occupant quelques 26 millions d'hectares répartis à parts égales entre l'Asie du Sud et la Chine, ils jouent un rôle crucial dans la sécurité alimentaire de ces régions fragiles et très peuplées (14). Dans les plaines indo-gangétiques d'Asie du Sud, ces systèmes sont ainsi devenus la principale source de surplus céréaliers servant à alimenter les populations urbaines. Mais depuis la dernière décennie, ces brillants progrès passés sont remis en question par une stagnation des rendements pour les deux céréales et une diminution de la productivité totale des facteurs utilisés dans ces rotations. La dégradation du statut organique des sols, l'allongement de la liste de leurs déficiences minérales, l'élévation du niveau des nappes phréatiques accroissant les risques de salinisation des terres, ainsi que l'augmentation de la pression des ravageurs et des maladies sur les cultures sont les principaux symptômes de la dégradation en cours de ces agro-écosystèmes essentiels.

La recherche de voies adaptées permettant de favoriser la diversification de ces systèmes riz - blé et de promouvoir des pratiques culturales renversant la tendance à la dégradation des terres est maintenant explorée dans le cadre international du « Consortium Riz - Blé » qui rassemble les SNRA des pays producteurs d'Asie du Sud et de la Chine, en association avec le CIMMYT et l'IRRI. Il a pour objectif central l'amélioration de la durabilité de la production dans ces greniers à céréales au rôle crucial. Les thèmes les plus prometteurs portent sur l'amélioration de l'interaction entre le sol et l'eau au moyen de techniques comme la suppression de la mise en boue du sol pour la

culture de riz, opération qui détruit sa structure, et la pratique du travail minimum du sol et du semis direct sur billons. Là où cela est possible au niveau de l'exploitation agricole, en fonction des pratiques locales en matière d'association agriculture – élevage, un usage plus important de la fumure organique et l'introduction d'une légumineuse dans les rotations sont aussi à l'étude.

Le possible plafonnement, voire le déclin, des rendements du riz irrigué, associé à un abaissement de la productivité totale des facteurs de production, était aussi une grande crainte du début des années quatre vingt dix sur les millions d'hectares de rizières irriguées exploitées en double ou triple culture annuelle. Ce thème de recherche fut érigé par l'IRRI au rang de priorité pour ses travaux en agronomie durant la précédente décennie sur la base de données trop ponctuelles pour en démontrer de façon indiscutable la pertinence sur de vastes étendues. L'IRRI faisait alors d'un problème de quelques casiers expérimentaux un enjeu très surestimé et la recherche acharnée d'une cause unique du phénomène était vaine. Les exercices de diagnostics sur l'élaboration du rendement des cultures, pratiqués au cours des deux dernières décennies, ont toujours montré que les évolutions des performances de la culture constatées étaient liées à des interactions multiples et interdépendantes entre le fonctionnement du peuplement végétal et l'évolution des conditions environnementales de sa culture lors d'un cycle unique et donc *a fortiori* dans le cas des successions culturales sur de longues périodes.

Même en milieu contrôlé, les conclusions de l'analyse des résultats d'analyses récentes plus approfondies et mieux documentées se montrent heureusement bien moins alarmistes. Une récente étude réalisée sur cinq années (1994-1998) par l'IRRI et ses « SNRA » partenaires de ce « méga-projet » à partir des résultats de 30 expérimentations à long terme localisées dans 7 pays, montre en effet que le phénomène de « déclin des rendements » dans les périmètres à deux ou trois cultures de riz par an ne serait pas aussi répandu, ni aussi sérieux, que les initiateurs et promoteurs de ce programme l'affirmaient il y a une dizaine d'années. Aucun phénomène de déclin du rendement n'a pu être mis en évidence là où les niveaux de rendements en paddy régulièrement obtenus par les producteurs sont encore inférieurs à 7 tonnes par hectare et par cycle cultural. Il n'y aurait pas eu non plus de baisse évidente de la productivité totale des facteurs de production dans les parcelles paysannes enquêtées sur la période 1994-1998, pourvu que la quantité d'engrais minéraux nécessaire pour atteindre le niveau de rendement visé ait été appliquée.

Ces résultats incitent à renforcer la priorité donnée à la recherche de stratégies concrètes, d'outils techniques et d'aide à la décision pour conserver et améliorer les ressources de l'écosystème à riziculture irriguée intensive en tenant le plus grand compte de la diversité des situations régionales. En effet, compte tenu de la grande complexité des interactions mises en jeu entre les pratiques de l'agriculteur, les états du milieu qu'elles produisent (notamment leurs effets sur le sol et la relation sol - eau, sur les communautés de pathogènes et d'adventices, etc.) et le fonctionnement du peuplement de riz irrigué, il y a fort à parier que les causes des stagnations de rendements dans certaines des zones en culture très intensive soient très variables selon les endroits et les échelles considérées. Ce type de thématique est maintenant abordé dans le cadre décentralisé d'un consortium international pour la recherche sur le riz irrigué dans lequel les principaux pays concernés (Inde, Chine, Indonésie, Philippines, Viêt-Nam, etc.) exécutent la plupart des travaux de recherche de façon plus intégrée que par le passé, au moyen d'activités interdisciplinaires et pluriscolaires. Cet exemple permet d'illustrer l'évolution récente, que nous jugeons très positive, par rapport à certaines pratiques passées, des méthodes de programmation des activités de recherche collaborative entre institutions internationales et SNRAs.

Accroître l'efficacité de l'utilisation des facteurs de production

Les niveaux de consommation d'intrants atteints dans la plupart des rizières irriguées intensivement cultivées dépassent souvent les optima économiques, leur utilisation est généralement médiocre et pèse sur la qualité de l'environnement et les marges brutes des riziculteurs.

Fertilisation azotée

Les récents progrès accomplis en matière de pilotage de la fertilisation azotée au plus près des besoins de la plante sont encourageants. Le fractionnement des apports d'azote (pour les ajuster aux besoins de la plante) guidé par une planchette étalon colorée proposant une gamme de verts permet d'accroître l'efficacité de l'utilisation de l'engrais minéral azoté de 15 à 25 kg de paddy par kilogramme d'azote et de limiter les risques de pollution des nappes souterraines par les nitrates. La réduction, voire la suppression des subventions publiques aux engrais accompagne souvent les pratiques de fractionnement et de limitation des apports en vertu du slogan «la bonne dose, au bon moment et au bon endroit».

Après trois décades de révolution verte, les pratiques variées de fertilisation adoptées par les riziculteurs font que d'importantes hétérogénéités sont aujourd'hui observées dans ces casiers auparavant jugés uniformes. Le statut minéral des sols diffère entre les casiers de différentes catégories d'exploitations la même année et entre ceux de la même exploitation selon les années. Suivant des règles simples, des pratiques adaptées à chaque situation doivent être adoptées pour que l'efficacité de l'engrais azoté appliqués soit améliorée. Sur la base des connaissances actuellement disponibles, des essais de gestion de la fertilisation minérale au plus près des besoins de la plante effectués sur 207 exploitations dans six pays ont récemment permis d'enregistrer des gains de rendement en paddy de 0,5 à 1 tonne par hectare par un meilleur équilibre entre les éléments minéraux majeurs fournis au riz ainsi qu'une amélioration sensible de l'efficacité d'utilisation de l'azote par la plante. En moyenne, celle-ci fut accrue de 26% à 36% (50% au maximum) dans un quart des parcelles d'essais en milieu paysan. Apporter la «dose juste au bon moment » augmenterait les revenus des agriculteurs d'environ 80 à 120 euros par hectare de riz irrigué selon les sites. La moitié du gain provenant de la baisse (d'environ un tiers) des quantités d'engrais apportées et le reste de l'augmentation de rendement ainsi obtenue (4).

Conseiller efficacement, avec des coûts très modérés, plusieurs dizaines de millions de petits riziculteurs au sujet de ce type de pratiques de la fertilisation minérale en les adaptant à leurs conditions locales représente un gigantesque défi pour les systèmes de recherche-développement dans la plupart des pays producteurs. Il est à craindre qu'en de nombreux endroits ces pratiques impliquent un surcroît de travail manuel en rizière qui ne sera pas toujours acceptable par les producteurs dans leur nouvel environnement économique.

Limitation de l'usage des pesticides

La situation évolue favorablement dans ce domaine et la diminution de la consommation de produits pesticides observée à partir du milieu des années quatre vingt dix a suivi la réduction du montant des subventions à l'usage d'insecticides accordés par les gouvernements dans la plupart des pays asiatiques. Dans certains pays, dont l'Indonésie, la mise en place de politiques agricoles adoptant le concept de lutte intégrée pour la protection des cultures permet de retirer des marchés les molécules de pesticides les plus toxiques, tandis que les divers programmes relevant de cette appellation ont tous en commun la formation des agriculteurs à l'écologie des agro-écosystèmes afin d'augmenter l'efficacité de leurs pratiques de lutte et d'en minimiser les effets négatifs sur l'homme et son environnement. Des décrets officiels adoptant cette approche au niveau national ont été passés dans d'autres pays (Inde, Sri Lanka, Malaisie, Viêt-Nam, Philippines, etc.) afin de créer un environnement juridique et économique incitant les producteurs à introduire collectivement les techniques de la lutte intégrée sur leurs exploitations. Dans la province de Long An, entre 1994 et 1997, le nombre de pulvérisations insecticides inutiles contre les chenilles enrouleuses des feuilles moins de 40 jours après semis baissa de 3,4 à 1,6 applications sans perte de rendement en grain et la consommation d'insecticides dans cette zone du delta du Mékong fut réduite de 53%. Dans certains districts, 77% des producteurs stoppèrent toute application d'insecticides durant cette période du cycle. En novembre 1998, les autorités vietnamiennes annoncèrent la fin de l'enregistrement d'insecticides destinés au contrôle des insectes enrouleurs des feuilles. Ce projet a montré l'importance de la traduction de connaissances en mesures de politique agricole afin d'en démultiplier l'impact dans les villages. Si la compréhension des phénomènes écologiques en jeu

progresses au niveau de la recherche, la distillation et la communication de ces connaissances auprès de plusieurs centaines de millions d'agriculteurs reste un défi.

Les « Écoles paysannes au champ » (« *Farmers field schools* ») qui se sont répandues durant la dernière décennie afin de promouvoir l'expérimentation participative des techniques de la lutte intégrée n'ont touché que deux millions d'agriculteurs. Elles tendent maintenant à intégrer aussi la gestion raisonnée de l'eau, des fertilisants et de la lutte contre les adventices maintenant que les achats d'herbicides explosent. A travers l'Asie, le rapport de prix entre l'herbicide et le salaire agricole a récemment évolué très nettement en faveur du contrôle chimique des mauvaises herbes dans les casiers irrigués. Aux Philippines, au sud du Viêt-Nam ou à Java, le contrôle des mauvaises herbes par voie chimique est 3 à 5 fois moins cher que le sarclage manuel, tandis que le bénéfice marginal découlant de l'usage d'herbicides est très élevé. Dans un contexte de très bas prix du riz, la consommation d'herbicides est dopée par l'abandon du repiquage et l'élévation des coûts du travail et de l'irrigation. Or le désherbage chimique pourrait avoir d'importants effets négatifs sur l'emploi saisonnier agricole alors que la crise économique débutée en 1997 a déjà fait bondir les taux de chômage. L'indispensable baisse de la consommation d'intrants chimiques en rizière irriguée vise aussi à limiter la dégradation de l'environnement qui, si elle s'aggravait, pourrait précipiter le « retour de la crise dans les bols de riz ».

Face aux inquiétudes croissantes de la société civile, les travaux sur les effets environnementaux de l'usage des herbicides en rizière irriguée vont être renforcés ainsi que ceux sur la résistance aux herbicides des populations de mauvaises herbes. La recherche de techniques de contrôle intégré des ces espèces adventices, économes en eau et en travail, constituera donc une thématique importante pour la recherche durant les prochaines années. Parallèlement, des riz transgéniques résistants aux herbicides pourraient être disponibles dans peu de temps et l'évaluation du risque de passage de cette résistance aux formes sauvages de la céréale doit être soigneusement mesurée.

En sus de l'apport de nouveaux gènes de résistances puisés chez les riz sauvages, les riz transgéniques pourraient, dans un pays comme la Chine, bientôt venir au secours de la lutte intégrée afin de limiter les dégâts causés par certaines maladies (Bactériose du riz) et ravageurs majeurs (comme les foreurs de la tige). Ailleurs, la protection de telles découvertes par des dizaines de brevets d'une part et le rejet des OGM dans de nombreux pays d'autre part, empêchera sans doute souvent leur utilisation en amélioration variétale.

Par rapport au passé, plus d'intérêt devra également être accordé à la lutte contre certains macro-ravageurs (escargot doré et rongeurs notamment) dont les écologies en milieu rizicole sont encore mal connues et pour le contrôle desquelles des techniques efficaces, donc applicables collectivement sur de vastes aires, ne sont pas encore disponibles.

Exploitation de la biodiversité

Les recherches conduites dans le domaine de l'exploitation de la biodiversité visent à mieux comprendre les relations clés maintenant la diversité des habitats, ainsi que les distributions spatiales et temporelles de communautés d'organismes contribuant à la viabilité des agroécosystèmes par leur capacité à tamponner des infestations et pullulations d'espèces. Des connaissances sur la façon de gérer de façon intégrée des complexes de ravageurs et de maladies (et non plus une seule espèce) au niveau de l'exploitation agricole et de la petite région manquent encore cruellement pour que cette approche soit largement pratiquée par les riziculteurs. Au niveau du casier rizicole même, des progrès sont attendus d'une meilleure compréhension du fonctionnement des communautés de quelques 500 espèces d'arthropodes et d'insectes, dont seulement quelques unes sont potentiellement dangereuses pour la culture. Ces connaissances serviront à concevoir des systèmes de gestion intégrée et durable de ces populations dans les parcelles cultivées (stratégies de déploiement de nouvelles variétés, d'agents de contrôle biologique, répartition spatiales des habitats rizicoles et non-rizicoles, zones refuges, etc.).

L'expérience récente réussie de l'utilisation de mélanges variétaux de riz pour le contrôle de la redoutable pyriculariose du riz au Yunnan est à cet égard particulièrement encourageante. Le système de culture maintenant largement diffusé associe une variété de riz hybride résistante à cette maladie à des lignes intercalées d'autres variétés de riz glutineux à haute valeur commerciale mais sensible à la pyriculariose. Au total, une diminution de 94% des dégâts dus à la maladie conjuguée avec une augmentation de 89% du rendement en paddy des variétés glutineuses sensibles ont été obtenues, tandis que les applications habituelles de fongicides (trois à huit par cycle cultural) étaient supprimées (18). Le bénéfice net par unité de surface obtenu au moyen de ce système est d'environ 15% par rapport à une culture pure d'hybrides et est accompagné d'une meilleure stabilité des rendements en paddy. Il est probable que ce nouveau mode de contrôle de la maladie puisse prolonger la période d'efficacité des gènes de résistance incorporés dans la variété hybride. En 2001, quelques cent mille hectares de rizières étaient cultivés de la sorte au sud-ouest du Yunnan.

Économiser l'eau d'irrigation

Durant la révolution verte, les gains de précocité du matériel végétal cultivé ont permis de diminuer la quantité d'eau nécessaire à sa culture. Mais de nouvelles pratiques économisant l'eau du casier au périmètre irrigué sont mises au point. Un meilleur planage est une opération importante pour une implantation et une maturité régulière du peuplement de riz semé, ainsi que pour une lutte efficace contre les levées de mauvaises herbes. Le planage par guidage laser fait son entrée dans les rizières d'Asie du Sud-est. Des techniques de travail superficiel du sol durant la courte jachère séparant deux cycles sont mises au point pour diminuer les pertes en eau dues aux fentes de rétraction du sol (estimées à environ un tiers du total consommé). Le semis direct de graines pré-germées sur boue est aujourd'hui de plus en plus pratiqué en milieu irrigué et permet d'économiser jusqu'à 25% du volume d'eau nécessaire à la conduite de la culture.

En Chine, l'irrigation intermittente avec drainage du casier quelques semaines après l'installation de la culture, suivie du maintien de la surface du sol à 80% de la saturation en eau a permis d'obtenir une baisse d'un tiers des pertes par percolation. D'autres essais récents, réalisés en Chine et aux Philippines visant à maintenir une saturation totale de l'horizon de surface mais sans présence de lame d'eau en surface ont permis des économies d'eau de 30 à 60% et une limitation des pertes de rendement en paddy de 4 à 9%. Mais ces pratiques semblent condamnées par l'augmentation du temps de travail qu'elle exige.

A moyen terme, tout particulièrement en Chine du nord-est où une importante crise de l'eau est à craindre, les chercheurs disposeront d'un « riz aérobie » (un riz pluvial moderne bénéficiant d'irrigations d'appoint efficaces) permettant le doublement du ratio poids du grain récolté sur volume d'eau consommé en production intensive. Il s'agirait donc d'une « révolution bleue » si le bond de la productivité de l'eau n'abaisse pas le niveau de rendement en paddy. Les rendements de l'ordre de 6 tonnes de paddy par hectare déjà obtenus en riziculture pluviale, à consommation d'intrants élevée et irrigation d'appoint par aspersion, en plusieurs endroits de la ceinture tropicale laissent penser qu'un tel objectif n'est pas utopique. Les économies d'eau permises par les premières variétés « Han Dao » de « riz aérobie » seraient de l'ordre de 55 à 66%, mais les niveaux de rendements atteints sont en général inférieurs d'un quart à un tiers à ceux récoltés dans les casiers irrigués de façon traditionnelle, de même pour le bénéfice par hectare cultivé. Cependant, les temps de travaux en parcelles de « riz aérobie » sont inférieurs d'environ 50 à 75% à ceux de la riziculture irriguée classique, laissant plus de temps disponible pour les activités économiques non-rizicoles. Dans les régions chinoises où l'eau agricole se raréfie, les paysans n'ont plus le choix, les autorités interdisant la poursuite de la pratique traditionnelle (12).

Dans les plaines d'Asie du Sud où domine le système riz-blé, des expériences similaires débutent avec la culture de riz sur billons irrigués. Les profondes modifications du milieu de culture qui accompagnent le passage d'une culture de riz en conditions anaérobies au régime pluvial avec irrigation d'appoint vont bouleverser les dynamiques des peuplements de mauvaises herbes, des éléments fertilisants, ainsi que des ravageurs et maladies.

Depuis la fin des années quatre vingt, les périmètres irrigués doivent souvent être financièrement autonomes et sont de plus en plus gérés par des groupes d'usagers ou des associations de riziculteurs. Les problèmes classiques suivants posés par l'allocation de la ressource entre les utilisateurs dans le pays en développement sont souvent mentionnés dans les publications : coût élevé du transport et du stockage de l'eau par rapport à sa valeur économique, coûts de transaction importants de l'allocation entre usagers, équité et interdépendances entre les utilisateurs, etc. La recherche se doit de faciliter l'émergence de meilleures coordinations entre les parties concernées par la gestion des systèmes irrigués.

Systèmes intensifs et changement climatique

10 à 20% des émissions de méthane au niveau planétaire proviendraient des rizicultures. Les travaux de recherche ont cependant montré que les émissions de méthane des rizières asiatiques sont bien moins importantes que celles observées aux États-Unis ou en Europe, là où les taux de matière organique des sols, les quantités d'azote apportées à la culture et les rendements obtenus sont plus élevés. Les nouvelles techniques de semis sur boue et d'irrigation tendront à limiter les émissions de méthane (8).

De leur côté, les résultats obtenus sur les effets sur la production de riz des augmentations de la concentration de l'air en gaz carbonique et de la température montrent deux tendances inversées. Si la « fertilisation » en gaz carbonique stimule la croissance des plantes et se traduit par des biomasses et productions de grains accrues, l'augmentation de la température ambiante aurait un effet négatif sur la formation des grains et pourrait réduire, voire dans certaines conditions plus qu'annuler cet effet bénéfique.

Intégration des connaissances et aide à la décision

La centaine de millions de riziculteurs concernée par l'amélioration des rendements de leurs systèmes rizières intensifs tout en améliorant l'efficacité écologique et économique des intrants apportés à la culture doit utiliser une information technique complexe reposant sur des résultats scientifiques rigoureusement validés, alliée à leurs propres connaissances et pratiques, afin qu'ils puissent la substituer à une partie des intrants appliqués. De nouveaux systèmes d'aide à la décision sont aujourd'hui disponibles (« Ricecheck » australien promu par la FAO, kit de diagnostic « Troprice » de l'IRRI, etc.) et devraient se répandre si le coût de l'accès à l'information est inférieur à celui de la quantité d'intrant ainsi économisée. Tout récemment, l'IRRI a mis en place sa « Banque de connaissances sur le riz » sur le réseau Internet (<http://www.knowledgebank.irri.org/usingthekb.doc>), afin d'accroître l'impact des résultats des recherches en améliorant leur diffusion décentralisée en milieu paysan, au niveau des organisations de producteurs, des ONG, etc. au moment où les systèmes d'appui à la paysannerie connaissent de profondes mutations.

IV. INFLEXIONS ET RÉ-ORIENTATIONS NÉCESSAIRES DE L'EFFORT DE RECHERCHE

Une population rurale asiatique proportionnellement plus réduite mais plus efficace pourra nourrir une immense marée urbaine seulement si les incitations politiques et économiques nécessaires sont en place pour faciliter l'adoption élargie des nouvelles technologies et permettre à la production intensive de demeurer compétitive et attractive par rapport à d'autres activités économiques. C'est une condition nécessaire à l'élévation du niveau de vie des riziculteurs ainsi que pour éviter de nouvelles dégradations de la qualité de l'environnement dans ces agroécosystèmes fortement exploités. De nouveaux gains de productivité durables sont requis mais devront être obtenus grâce à une révolution « doublement verte » (3). Elle devra être capable

d'apporter les augmentations de production nécessaires pour nourrir les franges les plus pauvres de la société à des prix acceptables, tout en protégeant la qualité des sols et de l'eau ainsi que la biodiversité. Sa traduction concrète dans les campagnes empruntera des itinéraires bien plus diversifiés que par le passé, en s'adaptant aux conditions locales très différenciées. La recherche doit mieux s'organiser pour accompagner un tel mouvement et permettre d'améliorer l'information en retour des chercheurs et des décideurs politiques sur les conditions concrètes de la production dans les exploitations, ainsi que sur la nature des demandes sociales afin d'accroître la pertinence et l'impact de ses travaux.

Incitée par la diminution de ses moyens financiers, la recherche doit aussi aborder les questions de recherche de façon plus intégrée au niveau des systèmes de culture, comme nous l'avons vu dans le cas de la lutte intégrée d'abord limitée aux ravageurs, puis prenant en compte la fertilisation, l'irrigation et ensuite le contrôle des adventices. Bien que de nouvelles variétés de plus productives, plus résistantes et au grain de meilleure qualité, joueront encore un rôle important durant les prochaines décennies, les progrès futurs dépendront sans doute davantage que par le passé de la mobilisation de connaissances pour une utilisation plus efficace des facteurs de production sur les exploitations, à commencer par le travail. Ces gains ne seront socialement acceptables que s'ils permettent de mieux conserver les ressources renouvelables et l'environnement. L'agenda de la recherche est devenu plus complexe et impose de faire appel à une approche plus systémique et intégrée des problèmes liés à l'accroissement et à la durabilité de la production agricole sur un espace qui a aujourd'hui atteint ses limites d'expansion dans la quasi totalité des situations agraires d'Asie.

L'amélioration des revenus ruraux sur les exploitations minuscules passe par l'encouragement de la diversification marchande, de l'emploi non-agricole et de la pluri-activité. En conséquence, les acteurs de l'amélioration des rizicultures doivent porter leurs regards au-delà des diguettes, afin de mieux prendre en compte les déterminants et tendances lourdes des dynamiques rurales lors du choix des priorités pour leurs recherches. L'intensification rizicole doit dorénavant permettre de libérer des ressources pour la diversification des systèmes d'activités. L'évolution du marché du travail, les migrations, la concurrence entre activités pour l'usage des terres, les problèmes liés à la dégradation des ressources renouvelables, la multifonctionnalité des paysages rizicoles, etc. doivent pouvoir être pris en compte pour trouver les mécanismes les plus efficaces et adaptés capables de relier les franges pauvres de la population rurale aux moteurs du développement agricole et à l'augmentation de la productivité du travail.

L'adoption d'approches globales, intégrées et adaptatives (face à l'innovation permanente, aux ruptures imprévisibles et à l'incertitude croissante) des systèmes de production et agraires semble incontournable pour accompagner leur intégration croissante aux marchés, la nécessaire diversification rapide des systèmes d'activités et la multiplication des parties prenantes du développement rural dans ces régions. L'association étroite et systématique des producteurs à chaque étape du cycle des projets de recherche et de développement agricole est aujourd'hui indispensable et doit se faire sur la base d'un réel partenariat pour la gestion intégrée et concertée des ressources agricoles renouvelables au moyen des démarches ascendantes d'accompagnement des projets collectifs à l'heure de la décentralisation de la gestion des ressources locales dans la plupart des pays.

Dans ce contexte, à l'interface entre écologie et société, le recours aux démarches, méthodes et outils innovants de la modélisation dynamique des systèmes complexes appliquée à la gestion des ressources renouvelables devrait être largement renforcé. Les avancées récentes dans ce domaine (systèmes multi-agents, systèmes d'information géographique, etc.) offrent de nouvelles opportunités pour mieux comprendre les interactions entre phénomènes écologiques, économiques et sociaux à plusieurs échelles et niveaux d'organisation des systèmes hétérogènes et pour identifier les possibles et stimulant phénomènes d'émergence aux niveaux supérieurs. Ici aussi le grain devient plus fin ! Au niveau des communautés villageoises, la simulation de tels systèmes complexes et adaptatifs, menée avec l'ensemble des parties prenantes aux stratégies différenciées, peut dès à

présent faciliter les mécanismes de coordination et de négociation autour des usages multiples de ressources productives ainsi que les processus d'innovation et d'apprentissages collectifs (1).

L'accès dorénavant très répandu aux nouvelles technologies de l'information et de la communication permettra de démultiplier les échanges d'expériences réussies dans ce domaine. Mais les SNRA les plus concernés pourront-ils disposer des moyens suffisants pour conduire de tels programmes de recherche-action basés sur une démarche systémique ? Le moment semble assez mal venu. L'enjeu est pourtant crucial. Engagés dans des processus d'intégration régionale et dotés de moyens importants par leur croissance économique rapide, les pays asiatiques pourraient, grâce à une collaboration internationale améliorée, renforcer les systèmes d'appui à la recherche agricole afin de contrer leur rapide dégradation. Un soutien international serait aussi la meilleure garantie de sécurité alimentaire pour les régions vulnérables où l'instabilité politique guette et où les ressources naturelles sont fragiles. Les situations et événements d'Asie du Sud viennent immédiatement à l'esprit et les efforts de recherche et de coopération régionale et internationale devraient y redoubler en priorité.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) BOUSQUET F., TREBUIL G., BOISSAU S., BARON C., D'AQUINO P. & CASTELLA J.C., 2004. – Knowledge Integration for Participatory Land Management: The use of multi-agent simulations and a companion modelling approach. In: Participatory Approaches for Sustainable Land Use in Southeast Asia, White Lotus Editions, Bangkok, Thailand. 18 p. In press.
- (2) CANTRELL R & HETTEL G., 2004. – New challenges and technological opportunities for rice-based production systems for food security and poverty alleviation in Asia and the Pacific. IRRI, Los Baños, Laguna, Philippines. 15p.
- (3) CONWAY G., 1997. – The Doubly Green Revolution : Food for all in the 21st century. Penguin Books, Londres, Royaume Uni. 335 p.
- (4) DOBERMANN A., WITT C., DAWE D. (éds), 2004. – Increasing productivity of intensive rice systems through site-specific nutrient management. IRRI, Los Baños, Philippines et Enfield, N.H. (USA) : Science Publishers, Inc. 410p.
- (5) FINCKH MR., 2003. – Ecological benefits of diversification. In: Mew TW, Brar DS, Peng S, Dawe D, Hardy B (éds), Rice Science : Innovations and impact for livelihood. Actes conf. int. recherche rizicole, 16-19 septembre 2002, Beijing, Chine. IRRI, Chinese academy of engineering & Chinese academy of agricultural sciences. 549-564.
- (6) FUJIKI H., 1999. – The Structure of Rice Production in Japan and Taiwan. In: Economic Development and Cultural Change, The university of Chicago. 387-400.
- (7) HUANG J., QIAO F., ROSELLE S. & LU F., 2003. – Farm pesticide uses, rice production, and human health. In: Mew TW, Brar DS, Peng S, Dawe D, Hardy B (éds), Rice Science : Innovations and impact for livelihood. Actes conf. int. recherche rizicole, 16-19 septembre 2002, Beijing, Chine. IRRI, Chinese academy of engineering & Chinese academy of agricultural sciences. 901-918.
- (8) MATTHEWS R., 2003. – Rice production, climate change, and methane emissions : adaptation and mitigation options. In: Mew TW, Brar DS, Peng S, Dawe D, Hardy B (éds), Rice Science : Innovations and impact for livelihood. Actes conf. int. recherche rizicole, 16-19 septembre 2002, Beijing, Chine. IRRI, Chinese academy of engineering & Chinese academy of agricultural sciences. 585-598.
- (9) PENG S., BURESH R., HUANG J., YANG J., WANG G., ZHONG X., & Zou Y., 2003. – Principles and practices of real-time nitrogen management : a case study on irrigated rice in China. In: Mew TW, Brar DS, Peng S, Dawe D, Hardy B (éds), Rice Science : Innovations

and impact for livelihood. Actes conf. int. recherche rizicole, 16-19 septembre 2002, Beijing, Chine. IRRI, Chinese academy of engineering & Chinese academy of agricultural sciences. 433-446.

- (10) PINGALI P.L., HOSSAIN M. & GERPACIO R.V. 1997. – Asian rice bowls : The returning crisis ? Wallington, Oxon (England) : CAB International, and Manille (Philippines) : International Rice Research Institute. 341 p.
- (11) ROLA A.C. & PINGALI P.L., 1993. – Pesticides, rice productivity, and farmers' health : an economic assessment. World Resources Institute et International Rice Research Institute, Los Banos, Laguna, Philippines. 100 p.
- (12) ROSEGRANT M.W. & Cai X., 2003. – Market adaptations to increased water prices in China : the effects on water demand and rice production. In : Mew TW, Brar DS, Peng S, Dawe D, Hardy B (éds), Rice Science : Innovations and impact for livelihood. Actes conf. int. recherche rizicole, 16-19 septembre 2002, Beijing, Chine. IRRI, Chinese academy of engineering & Chinese academy of agricultural sciences. 847-867.
- (13) TIMMER C.P., 2003. – Agriculture and poverty. In : Mew TW, Brar DS, Peng S, Dawe D, Hardy B (éds), Rice Science : Innovations and impact for livelihood. Actes conf. int. recherche rizicole, 16-19 septembre 2002, Beijing, Chine. IRRI, Chinese academy of engineering & Chinese academy of agricultural sciences. 37-61.
- (14) TIMSINA J., et CONNOR D.J. 2001. – Productivity and management of rice-wheat cropping systems : issues and challenges. In : Field Crops Research, **69**, 93-132.
- (15) TRÉBUIL G et HOSSAIN M., 2004. – Le riz : enjeux écologiques et économiques. Collection Mappemonde, Editions Belin, Paris. 265 p.
- (16) TUONG T.P. et BAM Bouman, 2002. – Rice production in water scarce environments. In : Kijne J.W., Barker R., Molden D. (éds), Water productivity in agriculture : Limits and opportunities for improvement. The comprehensive assessment of water management in agriculture series, volume 1, CABI Publishing, Wallingford, Royaume Uni. 13-42.
- (17) VIRMANI S.S., MAO C.X. & HARDY B., 2003. – Hybrid rice for food security, poverty alleviation, and environmental protection. IRRI, Los Baños, Laguna, Philippines. 401 p.
- (18) ZHU Y., CHEN H., FAN J., *et al.*, 2000. – Genetic diversity and disease control in rice. In : Nature, **406**, 718-722.