



Amélioration de la teneur en fer et en zinc du riz pour l'alimentation humaine

Parmi les populations les plus pauvres, le déficit alimentaire en protéines et en énergie a regressé pendant ces trente dernières années. Cependant, cette malnutrition existe encore sous une forme plus insidieuse pour les vitamines et les éléments minéraux. Qualifiée de « faim cachée », elle touche plus spécialement les femmes et les enfants.

Introduction

Les variétés de riz, de maïs et de blé à haut rendement, et les autres produits alimentaires de base, sont aujourd'hui cultivés à grande échelle dans les pays en développement. Au cours de ces trois dernières décennies, la production céréalière a augmenté plus vite que la demande, et la chute des prix en résultant, ainsi que l'amélioration des revenus agricoles ont contribué à réduire la malnutrition protéino-énergétique touchant les populations démunies. Les produits de base constituent des ressources caloriques et protéiques peu coûteuses, mais ils sont relativement pauvres en vitamines et en minéraux essentiels.

Les nutritionnistes s'interrogent aujourd'hui sur les problèmes de malnutrition liés à la mauvaise qualité des régimes alimentaires. Globalement, les carences en minéraux et en vitamines, connues aujourd'hui sous l'appellation de « faim cachée », concernent beau-

coup plus d'hommes dans le monde que la malnutrition protéino-énergétique.

L'anémie nutritionnelle, due essentiellement aux carences en fer, est fréquente dans les pays en développement. La qualité médiocre de la ration alimentaire, la faible biodisponibilité en fer, les problèmes sanguins dus aux parasites, et l'insatisfaction de la demande qui accompagne la rapidité de la croissance des enfants et les grossesses, sont à l'origine des carences en fer.

Des graves problèmes d'anémie

D'après l'Organisation mondiale de la santé (Oms), près de 3,7 milliards de personnes souffriraient de carences en fer avec de graves problèmes d'anémie pour 2 milliards d'entre elles, dont 40 % seraient des femmes non enceintes, et 50 % des femmes enceintes. Dans les pays du Sud, 58 % des femmes enceintes seraient anémiées et vraisemblable-

G. B. GREGORIO
D. SENADHIRA
T. HTUT

Plant Breeding, Genetics and Biochemistry
Division, Irri, MCPO Box 3127,
1271 Makati City, Philippines

R. D. GRAHAM

Department of Plant Science, University of
Adelaide, Glen Osmond 5064,
South Australia, Australie

Remerciements

Le Dr D. Senadhira a été responsable du projet mené par l'Irri sur l'amélioration de la teneur en fer du riz jusqu'à l'accident d'automobile qui l'a emporté le 7 juillet 1998, au Bangladesh. Ses collaborateurs ont rassemblé de nombreux écrits qu'il avait réalisés à d'autres fins pour rédiger le présent article et manifester ainsi leur reconnaissance pour l'importance de sa contribution. Les auteurs remercient également le Dr H. Bouis, directeur de projet Cgjar sur les oligoéléments. Danida et Usaid ont financé le projet.

ment appelées à mettre au monde des enfants de faible poids et démunis de réserves en fer. L'Oms estime, par ailleurs, que 31 % des enfants âgés de moins de cinq ans sont également anémiés, principalement en raison d'une carence en fer (WHO, 1999).

D'une façon générale, cette carence en fer et l'anémie ont de graves conséquences sur la santé et le développement, notamment sur les capacités d'apprentissage pendant l'enfance, sur les fonctions immunitaires et sur la capacité de travail. Il devient de plus en plus évident que la carence en zinc entraîne des complications au cours de la grossesse et pour l'accouchement, et se traduit par un poids insuffisant à la naissance et un développement difficile chez l'enfant, outre des risques de diarrhée, de défense immunitaire moindre et de mortalité.

Amélioration de la valeur nutritive des plantes cultivées

La production de ressources alimentaires en quantités suffisantes ne permet pas, à elle seule, de répondre aux besoins de la population mondiale. Même si les besoins énergétiques sont satisfaits, des millions de personnes démunies et souffrant de malnutrition, continueront à être victimes de problèmes de santé et de mauvaises conditions de vie, limitant leur capacité de travail. Il faut produire des aliments répondant aux besoins nutritifs quotidiens minimum. Les compléments alimentaires, l'enrichissement des produits alimentaires et l'éducation ont permis de réduire la carence en iode, et les programmes de ce type doivent se poursuivre et être étendus à la carence en vitamine A. Pour d'autres oligoéléments, de tels programmes sont coûteux et peu susceptibles d'atteindre toutes les populations à risques. Une autre politique permettant de réduire la carence en iode consiste à limiter les facteurs étiologiques tels que les parasites. Il est également possible d'améliorer la

ration alimentaire, en équilibrant les régimes à base de céréales par des apports de légumes verts et de produits d'origine animale ; mais les résultats sont peu encourageants. Les légumes et les produits animaux sont onéreux, saisonniers, périssables et difficiles à stocker et à transporter. De plus, certains pays ne produisent même pas le quart des quantités requises pour couvrir les besoins de leur population. Des solutions à long terme et peu onéreuses doivent être élaborées pour compléter toute intervention menée dans ce domaine. L'amélioration de la valeur nutritive des produits alimentaires de base semble constituer une réponse à ce besoin.

Il est possible d'améliorer la valeur nutritive des cultures par la sélection variétale. Il ne s'agit pas, en fait, d'une approche nouvelle. Cette politique s'est développée et elle a été favorablement acceptée. Toutefois, elle implique nécessairement que les caractères nutritifs des variétés sélectionnées dans cette optique soient compatibles avec les critères agronomiques des exploitants. Lorsque l'on cherche à augmenter la teneur des grains en oligoéléments tels que le fer et le zinc, il faut améliorer en même temps les critères nutritifs et les critères agronomiques. Une teneur élevée en oligoéléments s'accompagne d'avantages significatifs tels que l'implantation rapide de la culture, notamment en sols peu fertiles ou déficients en éléments nutritifs. Les semences sont la principale source d'éléments nutritifs pour les plantules, et leur teneur en fer est élevée dans les plantes adaptées aux sols pauvres en fer assimilable.

Le riz et les oligoéléments

Dans les pays en développement, le riz est l'aliment de base pour 2,4 milliards de personnes. Au cours de ces trois dernières décennies, le nombre de consommateurs de riz a augmenté de 70 %. Toutefois, pendant cette même période, la production rizicole a presque doublé, ce qui a contri-

bué à d'importantes augmentations de la consommation et de l'apport calorique par personne, notamment en Asie. La moitié de la production mondiale est consommée sur place, dans les zones rizicoles — par les agriculteurs à faibles revenus.

Parmi les céréales importantes, le riz est celle dont les rendements en valeur énergétique et en valeur nutritive sont les plus élevés. Il fournit 35 à 59 % de l'énergie consommée par près de 3 milliards de personnes en Asie. Il contribue dans une très large proportion à l'apport de protéines dans les régimes alimentaires : de l'ordre de 69 % pour le sud asiatique, et de 51 % en Asie du Sud-Est. Si sa teneur en provitamine A est nulle, il contient de petites quantités de zinc et de fer qui, compte tenu des grandes quantités de riz consommées, jouent toutefois un rôle important. D'après une étude sur l'alimentation réalisée aux Philippines, environ 50 % des apports de fer, même chez les familles à revenus élevés, proviendraient de céréales, à savoir du riz et du maïs (figure 1). Cette étude a également révélé le problème de la carence en fer (figure 2).

Dans les pays où le riz est l'aliment de base, la consommation par personne est telle — de 87 à 214 kilogrammes par an — que même le recours à des variétés légèrement plus riches en éléments minéraux pourrait avoir une incidence favorable en termes de santé. Toutefois, le riz étant d'abord considéré comme un produit amylicé de base, ses propriétés nutritives suscitent encore peu d'intérêt. A l'exception des travaux réalisés par l'Irri (International Rice Research Institute, Philippines), dans les années 60 et 70, pour améliorer la teneur en protéines du riz, peu de recherches, voire aucune, ont été menées pour en améliorer sa valeur nutritive. Les priorités discutées et retenues lors des conférences internationales concernant la recherche sur le riz, qui se sont tenues en 1985 et en 1990, ne portaient pas sur l'amélioration de la valeur nutritive du riz, mais plutôt sur celle de ses qualités à l'usage, à

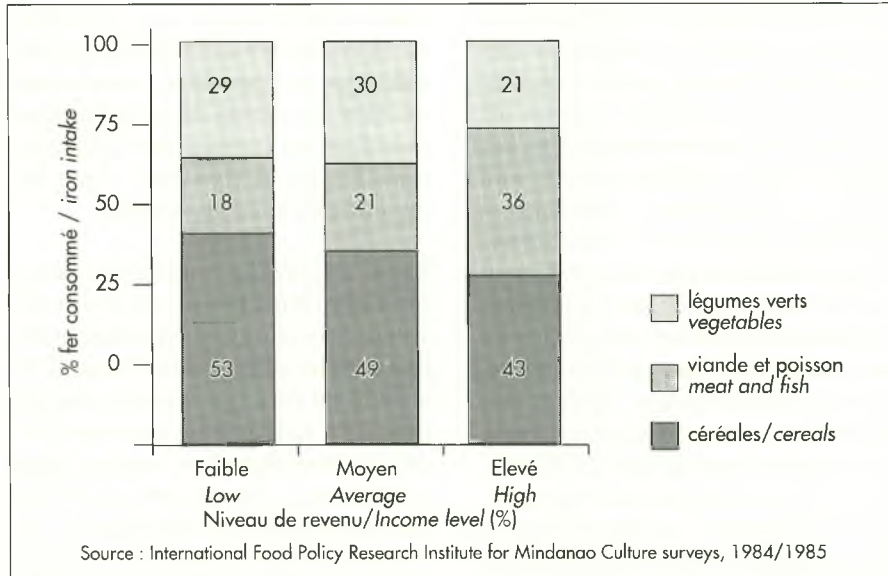


Figure 1. Fer consommé dans différents groupes d'aliments selon le niveau de revenu des familles. *Pattern of iron intake from different food groups by households of varying income levels.*

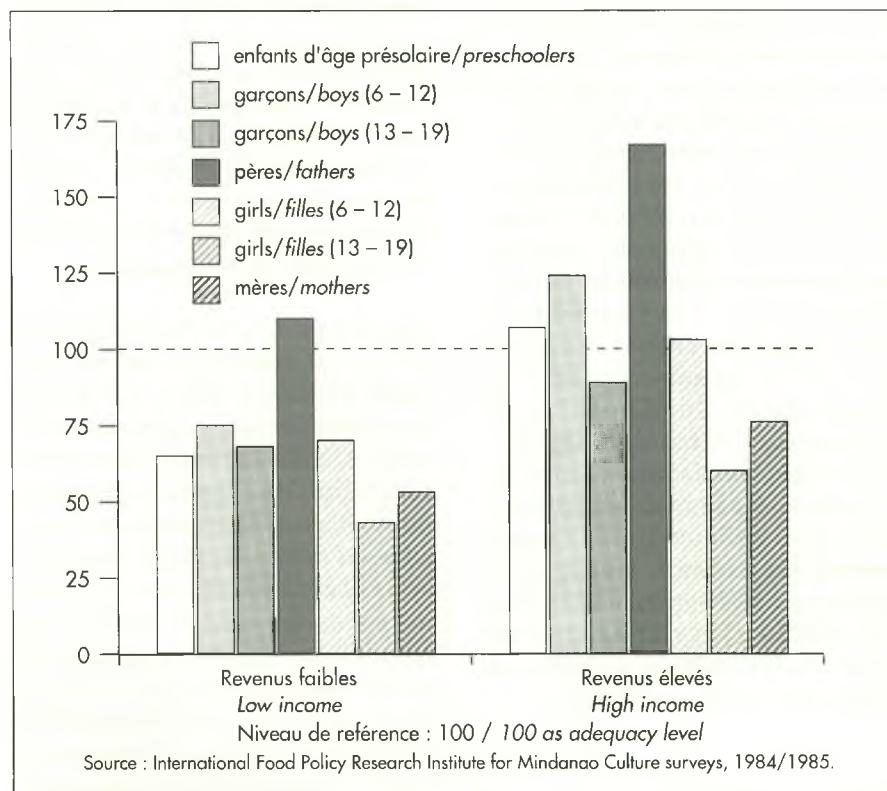


Figure 2. Rapport entre le fer consommé par les familles et la ration journalière recommandée, pour différents niveaux de revenu. *Ratio of households iron consumed to recommended daily allowance at varying income levels.*

la cuisson et à la consommation. Cette orientation s'explique peut-être par les travaux de sélection qu'avait réalisés l'Irri pour améliorer la teneur en protéines, et qui n'ont pas abouti. Le riz est la céréale dont

la teneur en fer est la plus faible, souvent ne dépassant pas 5 à 6 milligrammes par kilogramme de riz après usinage. D'autres études montrent qu'il serait possible d'exploiter la variabilité génétique des teneurs

en fer et en autres minéraux des semences, sans que ceci se traduise par les conséquences généralement défavorables sur les rendements, comme on l'observe souvent pour les protéines sur de nombreuses cultures. En effet, pour certains minéraux et lorsque ceux-ci sont peu abondants dans le sol, il est certain qu'une teneur élevée dans la semence peut avoir une incidence favorable sur les rendements. Bien que le riz ne soit pas considéré comme une source majeure d'éléments minéraux, tout accroissement de leur concentration pourrait contribuer de façon significative à résoudre le problème des carences en fer et en zinc.

Variabilité des teneurs en fer et en zinc des grains

En 1992, l'Irri a commencé à examiner l'incidence de certaines propriétés du sol sur la teneur en fer des grains. Ces travaux ont été réalisés sous l'impulsion du gouvernement philippin qui cherchait à résoudre, au niveau national, le problème de la malnutrition en fer en enrichissant artificiellement le riz de table avec du fer. Des variétés ont été testées en conditions de sol normales et en conditions de toxicité en fer. Malgré les nombreuses difficultés liées à la préparation des échantillons, d'importantes différences de teneur en fer des grains ont été observées d'une variété à l'autre. Les problèmes d'échantillonnage ont été résolus et, en 1995, les travaux ont également porté sur le zinc. C'est en collaboration avec l'université d'Adélaïde en Australie qu'a été effectuée l'analyse des minéraux, suivant les normes internationales. Depuis, 7 000 échantillons ont été étudiés et, avec les expérimentations complémentaires menées en Chine et au Bangladesh, les résultats obtenus constituent une base de données intéressante de la

variabilité génétique de la teneur en fer et en zinc des grains de riz.

L'influence de l'environnement (climat et sol) sur la teneur en minéraux des grains n'étant pas connue, les premières variétés testées ont été plantées sur la station de l'Irri dans les mêmes conditions de sol et de conduite de culture. De la récolte à l'analyse, des mesures ont été prises pour éviter tout risque de contamination, notamment par le sol. Plusieurs semis ont été faits, sur différents sites et en différentes saisons. La teneur en éléments minéraux des échantillons de riz complet a été analysée par spectrométrie d'émission atomique au plasma, au Department of Plant Science de l'université d'Adélaïde. Après plusieurs criblages, certains ayant révélé des teneurs en minéraux exceptionnellement élevées, ils ont été réévalués lors de tests ultérieurs. Les données obtenues à

chaque criblage sont résumées dans le tableau 1.

Sur les 1 138 échantillons analysés, la concentration en fer allait de 6,3 à 24,4 mg/kg de riz avec une valeur moyenne de 12,2 mg/kg ; pour le zinc, elle allait de 15,3 à 58,4 mg/kg de riz avec une valeur moyenne de 25,4 milligrammes par kilogramme. Dans le tableau 2, les deux variétés les plus populaires en Asie, IR36 et IR64, sont comparées à des variétés à teneurs élevées en fer et en zinc. La teneur en fer de la variété traditionnelle Jalmagna était presque le double de celle des variétés populaires ; sa teneur en zinc était également élevée et près de 40 % supérieure à celle de la variété IR64. Jalmagna est une variété de riz flottant cultivée dans certaines régions de l'Inde orientale. Pour la variété

Madhukar, la teneur en fer était légèrement plus élevée et celle en zinc très élevée ; il s'agit d'une variété populaire conduite en culture pluviale et en submersion profonde dans certaines régions de l'Inde orientale ; les sols y sont légèrement alcalins et pauvres en zinc, et la variété Madhukar est reconnue pour sa bonne adaptation aux sols pauvres en zinc. Toutefois, d'autres variétés de riz bien adaptées aux sols pauvres en zinc, notamment les Kuantik Putih, Bille Kagga et Getu, n'ont pas révélé de fortes concentrations de zinc. Les grains de la variété traditionnelle Zuchem, de type japonica, cultivée en altitude (à plus de 2 000 mètres d'altitude) dans le Bhoutan, ont exprimé des teneurs élevées tant en fer qu'en zinc, avec toutefois une teneur moindre en fer que la variété

Tableau 1. Teneurs en fer et en zinc du riz complet de variétés produites dans des conditions identiques de culture. *Brown rice Fe and Zn content of rice varieties grown under similar growing conditions.*

Variétés	Nombre d'échantillons	Fe (mg/kg) Moyenne ± écart-type (Intervalle maximal) <i>Mean ± SE (Range)</i>	Zn (mg/kg) Moyenne ± écart-type (Intervalle maximal) <i>Mean ± SE (Range)</i>
<i>Variety set</i>	<i>Number of samples</i>		
Variétés traditionnelles et améliorées <i>Traditional and improved varieties</i>	140	13,2 ± 2,9 (7,8 — 24,4)	24,2 ± 4,6 (13,5 - 41,6)
Lignées IR <i>IR breeding lines</i>	350	10,7 ± 1,6 (7,5 - 16,8)	25 ± 7,6 (15,9 - 58,4)
Japonicas tropicaux <i>Tropical japonicas</i>	250	12,9 ± 1,5 (8,7 — 23,9)	26,3 ± 3,8 (15 — 40,1)
Variétés populaires et géniteurs <i>Popular varieties and donors</i>	199	13 ± 2,5 (7,7 - 19,2)	25,7 ± 4,6 (15,3 - 37,3)
Lignées prometteuses <i>Promising lines</i>	83	8,8 ± 1,3 (6,3 - 14,5)	25,4 ± 4,2 (17 — 38)
Types nouveaux <i>New plant types</i>	44	16,7 ± 2,1 (11,5 — 24)	29,6 ± 3,2 (23 — 36)
Riz sauvage et dérivés <i>Wild rice and derivatives</i>	21	15,6 ± 2,3 (11,8 — 21)	37,9 ± 8,6 (23 — 52)
Riz aromatiques <i>Aromatic rice</i>	51	14,6 ± 3,2 (10,8 — 23,2)	31,9 ± 6 (23 - 50)



Tableau 2. Teneurs en fer et en zinc du riz complet chez les variétés améliorées.
Brown rice iron and zinc content of some selected varieties.

Variété	Fe (mg/kg)	Zn (mg/kg)
	moyenne \pm écart-type (nombre d'échantillons) <i>Mean \pm SE (samples)</i>	moyenne \pm écart-type (nombre d'échantillons) <i>Mean \pm SE (samples)</i>
Jalmagna	22,4 \pm 1,4 (5)	31,8 \pm 7,7 (4)
Zuchem	20,2 \pm 1,8 (4)	34,2 \pm 5 (3)
Xua Bue Nuo	18,8 \pm 0,8 (2)	24,3 \pm 0,7 (2)
Madhukar	14,4 \pm 0,5 (3)	34,7 \pm 2,8 (3)
IR64*	11,8 \pm 0,5 (3)	23,2 \pm 1,4 (3)
IR36*	11,8 \pm 0,9 (5)	20,9 \pm 1,4 (4)

* variétés populaires en Asie
* *popular varieties in Asia.*

Jalmagna. La teneur en fer de la variété traditionnelle Xua Bue Nuo, originaire de Chine, était également élevée. C'est en raison de son nom, qui évoque dans une certaine mesure la présence de fer, que cette variété a été analysée. Aucune des variétés améliorées n'a présenté des

teneurs en fer ou en zinc exceptionnellement élevées.

Parmi les variétés à teneur en fer élevée figurent un certain nombre de riz aromatiques. Des études comparatives ont donc été réalisées sur des variétés aromatiques et non aromatiques (tableau 3). La concentration

en fer, et souvent aussi en zinc, a toujours été plus élevée dans les grains des variétés aromatiques. Les populations consommant ces variétés bénéficient donc d'un apport en fer supérieur, voire le double de celui des populations consommant d'autres variétés. D'après certains calculs, compte tenu de l'importance de la consommation de riz, l'éventuel surplus de fer ingéré, s'il est aussi assimilable par l'organisme humain que celui des riz normaux, aurait un impact significatif sur la santé des femmes et des enfants souffrant d'anémie.

Influence des conditions de sol sur la teneur en minéraux des grains

Malgré l'absence d'études phénotypiques approfondies sur les riz à teneur en fer élevée, les premières expérimentations effectuées dans ce

Tableau 3. Comparaison de la teneur en fer et en zinc de variétés de riz aromatique et de variétés de riz non aromatiques cultivées à l'Irri, Los Baños, Philippines, en 1996. *Elevated concentrations of iron and zinc in aromatic rice varieties in comparison with non-aromatic types grown at the International Rice Research Institute, Los Baños in 1996.*

Lignée / Line	Aromatique / Aromatic		Lignée / Line	Non aromatique / Non aromatic	
	Fe mg/kg	Zn mg/kg		Fe mg/kg	Zn mg/k
Groupe 1 / Set 1					
Basmati 370	16,3	34,4	IR8	12,3	17,3
Gaok	16	26,4	IR36	11,8	23,1
Azucena	18,2	29,3	IR74	11,2	24
Moyenne / Mean	16,8	30	Moyenne / Mean	11,7	21,5
Groupe 5 / Set 5					
Ganje Roozy	18,1	36,6	Bg 3792	11,3	20,5
CT 7127	17,1	32,4	UPLRi 7	10,8	20,9
Lagrué	19	34,8	Tetep	10,7	24,1
Moyenne / Mean	18,1	34,6	Moyenne / Mean	10,9	21,8

Source : D'après Graham *et al.* (1997)
Source : *adapted from Graham et al. (1997)*

Tableau 4. Teneur en fer et en zinc du riz complet chez quatre variétés cultivées en sol normal et en sol salin. Synthèse des résultats obtenus sur la station de l'Irri (sol normal) et à Pili (sol salin). *Brown rice iron and zinc content of four rice varieties grown under normal and saline soil conditions. Composite of data from IRRI Farm (normal) and Iloilo (saline).*

Variété / Variety	Fe (mg/kg)		Zn (mg/kg)	
	Normal <i>Normal</i>	Salin <i>Saline</i>	Normal <i>Normal</i>	Salin <i>Saline</i>
IR29	15,8	16,5	30,1	23,7
Pokkali	15,4	14,9	31,1	29,5
IR74	13,9	12	26,8	21,3
IR9884	12,8	12,2	24,5	21,5
Moyenne / Mean	14,5	13,9	28,1	24

domaine ont mis en évidence l'effet significatif de l'environnement sur les concentrations en fer des grains de riz. On peut supposer que cet impact provient en grande partie de l'environnement de la rhizosphère par rapport à la nutrition en fer des plantes. Des études réalisées à l'Irri ont montré que les propriétés du sol avaient un effet considérable sur la teneur en fer des grains de riz.

Une expérimentation réalisée en sol normal et en sol salin en zone côtière à Pili (Iloilo), aux Philippines, a montré que la teneur en minéraux

des grains de quatre variétés de riz variait en fonction du type de sol (tableau 4).

Lors de cette expérimentation, la teneur en fer de la variété sensible au sel, IR29, a augmenté en sol salin, alors qu'elle a légèrement diminué chez IR74, IR9884, et Pokkali, variétés tolérantes au sel. Indépendamment de la tolérance à la salinité, la teneur en zinc a diminué avec la salinité du sol.

Une expérimentation effectuée sur huit variétés de riz et deux variétés

traditionnelles à haute teneur en fer, à savoir Jalmagna et Madhukar, en sol acide à San Dionisio (Iloilo), aux Philippines, a montré que la teneur en fer des variétés sensibles à la toxicité en fer était supérieure à celle mesurée en sol normal (tableau 5). Toutefois, pour les variétés tolérantes, la teneur en fer était légèrement plus faible. On en a déduit que les variétés tolérantes pouvaient être dotées d'un mécanisme d'exclusion des excès toxiques de fer dans le sol. En conséquence, l'interaction entre le sol et les racines par rapport à la nutrition en fer et en autres éléments nutritifs de la plante a dû modifier la teneur du grain en fer.

Influence de l'usinage sur la teneur en fer des grains

La figure 3 correspond à la comparaison entre des variétés traditionnelles à teneur élevée en fer (péricarpe rouge) et les variétés IR64 et IR68144-3B-2-2-3 à teneur élevée en fer (péricarpe blanc), à différents stades du polissage. Comme le

Tableau 5. Teneur en fer et en zinc du riz complet de variétés cultivées en sol normal et en sol acide. *Brown rice iron and zinc content of rice grown on normal and acid soil.*

Variétés Variety	Sensibilité à l'acidité* Reaction to acidity *	Fe (mg/kg)		Zn (mg/kg)	
		Normal <i>Normal</i>	Acide <i>Acid</i>	Normal <i>Normal</i>	Acide <i>Acid</i>
IR26	S	12,39	13,02	23,36	31,36
Madhukar	S	14,70	16,38	36,86	55,48
IR63262-AC201-1-7-1	S	12,07	15,38	17,62	33,45
IR63262-AC201-1-7-2	S	11,29	14,33	18,01	31,98
IR72	S	10,91	12,29	22,91	31,41
Bg 367-4	S	12,19	16,81	18,62	33,57
IR42	MS	11,00	12,70	19,62	27,54
Jalmagna	MT	20,41	18,24	34,02	38,91
IR74	T	12,80	12,60	24,03	28,92
IR61640-36-14-3-3	T	14,50	11,69	19,81	28,33
Moyenne / Mean		13,23	14,34	23,49	34,10

* S, sensible ; MS, modérément sensible ; MT, modérément tolérant ; T, tolérant

* S, sensitive ; MS, moderately sensitive ; MT, moderately tolerant ; T, tolerant

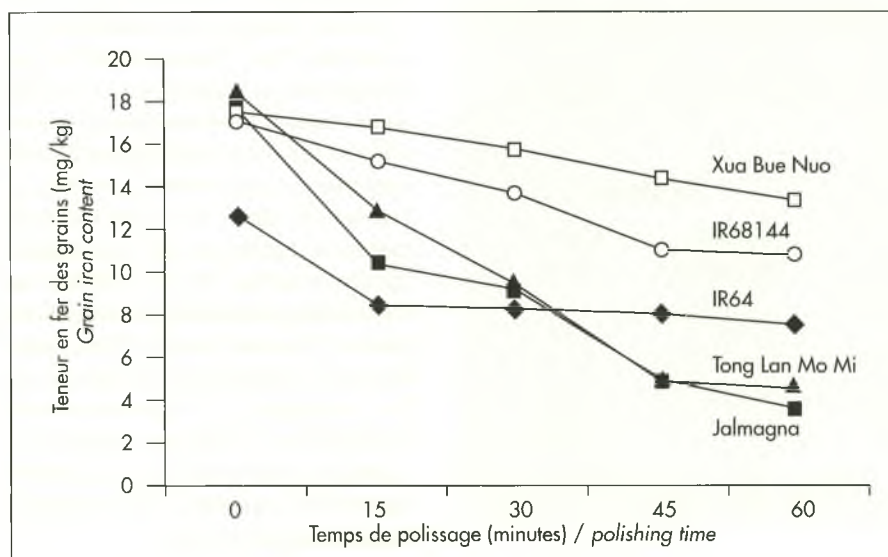


Figure 3. Influence de la durée du polissage sur la couleur des grains de variétés de riz à teneur élevée en fer et de la variété IR64. *Changes in grain color as affected by polishing time of selected high iron rices and IR64.*

montre ce graphique, il existe une étroite corrélation entre la teneur en fer et la durée de l'usinage.

En ce qui concerne la variété populaire IR64, dont la teneur en fer est la plus faible parmi les riz complets, cette teneur s'est abaissée de plus de 33 % au bout de 15 minutes de polissage, et elle est peu modifiée pendant la suite du traitement. Pour les riz traditionnels à teneur élevée en fer — à savoir les variétés Jalmagna et Tong Lan Mo Mi —, le même résultat a été observé après 15 minutes de polissage, mais leur concentration en fer a considérablement diminué avec l'augmentation de la durée du traitement. Ces données confirment les observations suivant lesquelles, dans le riz complet, le fer et autres oligoéléments se retrouvent en forte concentration dans la couche extérieure des grains. Toutefois, la teneur en fer des grains de riz varie en fonction du génotype et des conditions culturales, comme le montrent la variété traditionnelle chinoise Xua Bue Nuo, ainsi que la variété IR68144-3B-2-2-3, sur lesquelles l'incidence de la durée du polissage s'est révélée moindre. Pour une durée de polissage égale au traitement commercial (15 minutes), la variété IR68144-4B-2-2-3 contenait

environ 79 % plus de fer que la variété IR64. Pour les variétés à péricarpe rouge, la couleur semble liée à la teneur en fer du grain (figure 4).

La couleur du grain des variétés à péricarpe rouge, telles que Jalmagna, Tong lan Mo Mi, et Xua Bue Nuo, s'est éclaircie au fur et à mesure de l'augmentation de la durée de polissage. Mais, pour les variétés Jalmagna et Tong Lan Mo Mi, c'est entre 15 et 45 minutes de polissage que s'est considérablement modifiée la couleur, ce phénomène étant lié à la diminution de la teneur en fer. Pour la variété Xua Bue Nuo, la couleur et la teneur en fer n'ont que très peu changé (figure 4).

Amélioration variétale des teneurs en fer et en zinc des grains

Afin de répondre aux préoccupations des agriculteurs, la teneur élevée en fer a été combinée avec des caractères de hauts rendements. La teneur en fer a été peu modifiée, comme l'a montré le croisement entre la variété IR72 à haut rende-

ment et la Zawa Bonday, variété indienne traditionnelle de grande taille. A partir de ce croisement, l'Irri a identifié une lignée améliorée IR68144-3B-2-2-3 qui présente une concentration élevée en fer dans le grain, de l'ordre de 21 milligrammes par kilogramme en riz complet. Cette lignée aromatique possède une bonne tolérance à la virose tangro et produit des grains d'excellente qualité. Ses rendements sont d'environ 10 % inférieurs à ceux de la IR72 mais, en compensation, sa maturité est plus précoce et elle présente une bonne tolérance aux sols pauvres en phosphore, en zinc et en fer ; ses semences n'ont pas de période de dormance, mais les plantules sont très robustes, ce qui pourrait favoriser son utilisation en semis direct.

Cartographie des gènes de teneur élevée en fer et en zinc

Des moyens de sélection, rapides et peu onéreux, permettant d'intervenir efficacement sur la teneur en oligoéléments sont nécessaires. C'est surtout la lenteur des criblages des lignées performantes qui retarde les programmes de sélection pour des caractères complexes. L'avènement de la technique des marqueurs moléculaires a ouvert la voie à la sélection précise de ces caractères complexes. Une population de riz, dont le génotype avait préalablement été cartographié, a été utilisée pour marquer les QTL (*Quantitative Trait Loci*) déterminant une teneur élevée en fer du grain. Un total de 175 marqueurs polymorphiques, cartographiés sur des lignées haploïdes doublées issues du croisement de IR64 et d'Azucena, a été analysé pour établir la carte des QTL déterminant la teneur élevée en fer et l'arôme des grains. La population a été caractérisée pour la concentration en fer et en même temps, analysée avec les marqueurs moléculaires disponibles. Trois QTL importants

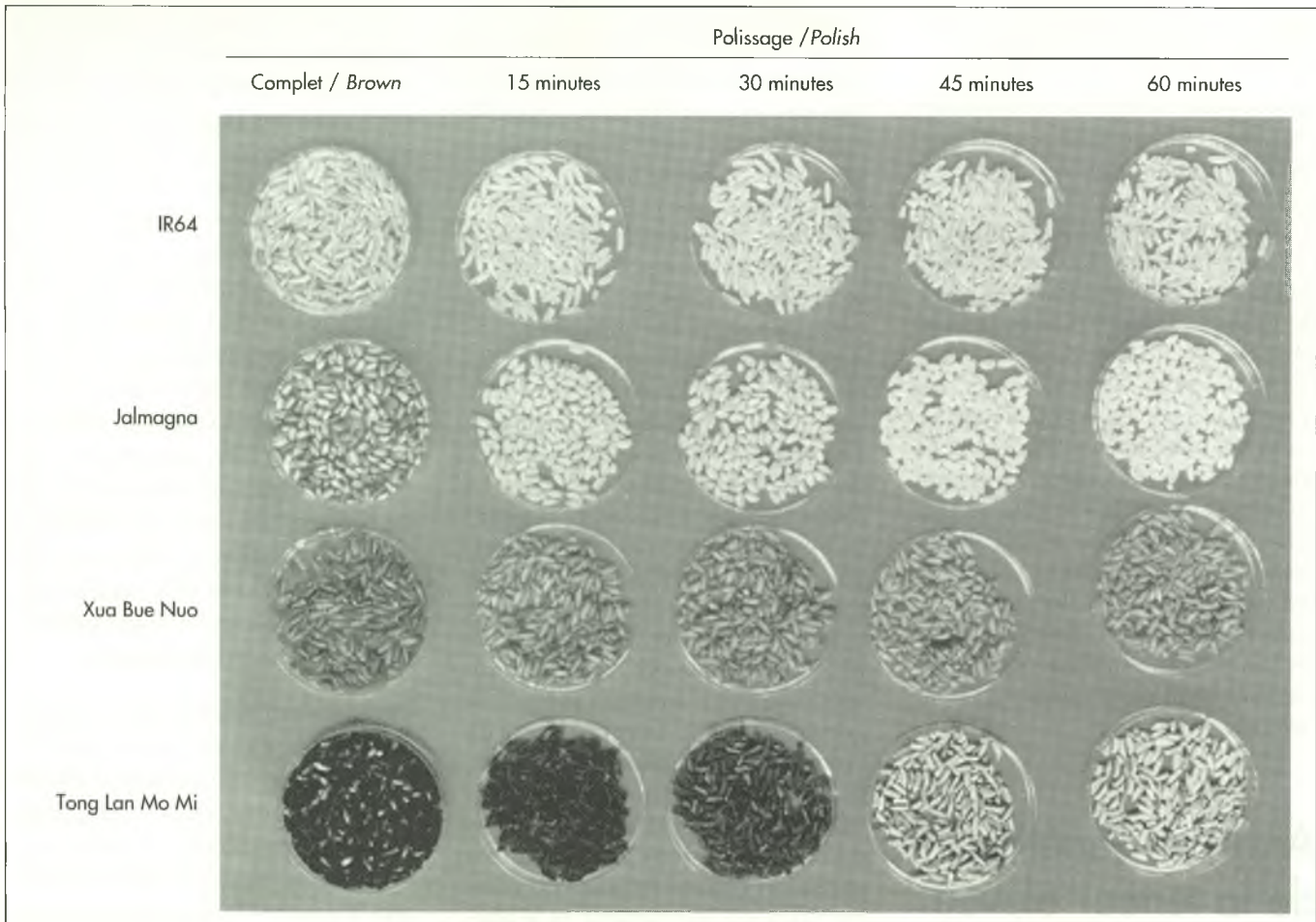


Figure 4. Influence de la durée du polissage sur la couleur des grains de variétés de riz à teneur élevée en fer et de la variété IR64. *Changes in grain color as affected by polishing time of selected high iron rices and IR64.*

ont été détectés pour une teneur élevée en fer, et ils ont été placés sur les chromosomes 7, 8, et 9, expliquant respectivement 30,3 %, 21,3 % et 19,0 % de la variation phénotypique. Trois QTL ont été identifiés pour l'arôme, et ils ont été placés sur les chromosomes 5, 7 et 8, expliquant 16,4 à 38,3 % de la variation. Deux QTL de teneur élevée en fer et pour l'arôme sont situés sur les mêmes chromosomes (7 et 8), mais à deux loci différents avec respectivement 24,8 et 36,4 centimorgans entre les QTL ; ceci indique qu'il existe une certaine liaison entre l'arôme et la teneur élevée en fer.

Des populations de référence de lignées F8 ont été développées pour cartographier les gènes de teneurs élevées en fer et en zinc (tableau 6). Ces populations ont également été utilisées pour cartographier la tolérance à d'autres stress abiotiques tels

Tableau 6. Populations disponibles pour la cartographie des caractères de teneur élevée en fer et en zinc dans les grains de riz. *Mapping populations available for high iron and zinc traits in rice grain.*

Caractère <i>Trait</i>	Croisement <i>Cross</i>	Cartographie <i>Mapping status</i>	Nombre de marqueurs <i>Number of markers</i>
Teneur élevée en fer <i>High iron in the grain</i>	IR64 x Azucena	carte RFLP/RAPD <i>mapped RFLP/RAPD</i>	175
	IR74 x Jalmagna	carte AFLP <i>AFLP map available</i>	201
	IR1552 x Azucena	carte AFLP/RFLP <i>AFLP/RFLP map available</i>	207
Teneur élevée en zinc <i>High zinc in grain</i>	IR26 x Madhukar	cartographie en cours <i>mapping in progress</i>	



que la toxicité aluminique, la carence en zinc et l'excès d'humidité.

La sélection assistée par marqueurs est rapide, très fiable et peu coûteuse. Rapide parce qu'il suffit d'une infime partie de feuille provenant d'un jeune plant pour détecter la présence éventuelle du caractère déterminant une teneur élevée en fer du grain, les résultats pouvant être obtenus en quelques jours ; très fiable parce que le milieu n'a pas d'incidence sur les marqueurs moléculaires ; moins coûteuse que la spectrométrie d'émission atomique au plasma parce qu'elle pourrait être mise en œuvre pour sélectionner deux ou trois caractères en même temps. Cette nouvelle technique constituera un outil précieux pour les travaux de génétique portant sur l'amélioration de la valeur nutritionnelle du riz.

Analyse génétique de la teneur élevée en fer et stratégie de sélection

Un croisement diallèle complet 10 x 10, comprenant quatre variétés traditionnelles de riz à teneur élevée en fer (Azucena, Basmati 370, Xua Bue Nou et Tong lang Mo Mi), trois lignées améliorées (IR61608, PP2462-11 et AT5-15), et trois variétés diffusées par l'Irri (IR36, IR64, et IR72) ont servi à l'étude des gènes de teneur élevée en fer du grain. C'est sur la station expérimentale de l'Irri qu'a été réalisée l'évaluation des dix génotypes parentaux et des 90 F1, avec trois répétitions. On a analysé du riz complet pour en déterminer la teneur en fer. Les résultats ont montré une différence très significative entre les croisements et entre les parents et les F1, ce qui indique clairement qu'il existe un effet génétique sur la concentration en fer du grain, et qu'une sélection parmi les F1 serait possible. L'analyse génétique a

montré la complexité de l'hérédité de la teneur en fer. Les effets de dominance et d'additivité ont contribué de façon significative, ainsi que l'influence de l'environnement mais dans une moindre mesure, à l'expression du caractère. Pour obtenir des grains à concentration élevée en fer, il ne faut donc pas procéder à la sélection dans les générations trop précoces puisque l'effet de dominance (imprévisible ou infixable) est encore présent. La sélection doit être reportée à une génération plus tardive, F5 par exemple, où l'effet de dominance est peu marqué. La méthode bulk pourrait être appliquée aux premières générations pour la sélection d'autres caractères agronomiques, à l'exclusion de la teneur élevée en fer. La sélection par filiation unipare (SSD) peut constituer une autre solution jusqu'à la génération F5. Compte tenu de l'importance des effets réciproques, le choix des parents mâle et femelle est également délicat. Certains parents sont mieux adaptés à leur utilisation comme femelle que comme mâle, ou inversement, et le phénotype de la descendance dépend étroitement du choix qui est fait entre les deux sexes. Compte tenu de l'important effet de dominance, il y a un grand intérêt à exploiter le phénomène d'hétérosis en développant des riz hybrides à teneur en fer renforcée.

Il est conseillé de procéder à la sélection en conditions extrêmement contrôlées avec une population de taille supérieure, en raison de l'influence de l'environnement ou des pratiques culturales sur l'expression du caractère de teneur élevée en fer. Pour améliorer la variabilité génétique du caractère, les plantes doivent être cultivées dans des conditions environnementales optimales.

Perspectives

Les riz riches en oligoéléments représentent la principale source de

fer et de zinc pour les populations démunies. La politique de sélection consistant à développer des riz contenant des quantités élevées de fer et de zinc dans leurs grains se justifie pleinement par l'importance de la consommation de cette céréale. Mais cette politique implique une meilleure compréhension de la génétique et de l'hérédité de ces caractères, et la poursuite des études sur l'interaction entre le génotype et l'environnement chez ces variétés. Bien que certains aspects de cette question fassent actuellement l'objet de recherches, une collaboration avec les Systèmes nationaux de recherche agricole et le recours aux outils de la biotechnologie permettraient d'accélérer les progrès.

Comme l'ont montré les premières évaluations, il existe des riz dont les grains possèdent une teneur élevée en fer et en zinc, mais il serait intéressant de procéder à d'autres évaluations. La prochaine étape consistera à étudier la génétique de ces caractères, à déterminer quelle est la meilleure technique de sélection, et à procéder à des expérimentations sur la biodisponibilité en fer et en zinc du riz destiné à la consommation humaine.

Les questions-clés en matière de sélection sont les suivantes :

- avantages agronomiques des riz à grains à teneur élevée en minéraux ;
- biodisponibilité d'oligoéléments supplémentaires dans les grains ;
- incidence de l'usinage, de l'étuvage, de la préparation et de la cuisson sur les qualités nutritionnelles, et leur interaction avec les génotypes.

L'Irri a identifié un certain nombre de lignées améliorées présentant des caractéristiques agronomiques satisfaisantes et une teneur élevée en fer. Il ne s'agit là que de premiers résultats, mais ils portent à l'optimisme en ce qui concerne la politique de sélection visant à la mise au point de riz à teneur élevée en oligoéléments.

Bibliographie

BROWN K. M., 1991. The importance of dietary quality versus growth for weanlings in less-developed countries. A framework for discussion. *Food and Nutrition Bull.* 13 : 86-94.

GIBSON R. S., 1994. Zinc nutrition and public health in developing countries. *Nutr. Res. Rev.* 7, 151-173.

GRAHAM R. D., SENADHIRA, D., ORTIZ-MONASTERIO I. 1997. A strategy for breeding staple-food crops with high micronutrient density. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 43, 1153-1157. *Res. Reviews* 7 : 151-173.

HUANG N., PARCO A., MEW T., MAGPANTAY G., MCCOUCH S., GUIDERDONI E., XU J., SUBUDHI P., ANGELES E. R., KHUSH G. S., 1997. RFLP mapping of isozymes, RAPD and QTLs for grain shape, brown planthopper resistance in a double haploid rice population. *Molecular*

breeding 3 : 105-113.

JULIANO B. O., 1993. Rice in human nutrition. *FAO Food and nutrition series*, No. 26, Rome, Italie.

WHO, 1992. National strategies for overcoming micronutrient malnutrition. Document A45/17, World Health Assembly 45th, 1992, Genève, Suisse.

WHO, 1999. <http://www.who.int/nut/malnutrition/worldwide.htm>

Improving iron and zinc value of rice for human nutrition

Introduction

High-yielding varieties of rice, wheat, maize, and other food staples are now grown widely in developing countries. Over the past three decades, cereal production has grown faster than demand and the resulting lower food prices and higher farm incomes have contributed to reduced protein-energy malnutrition (PEM) among the poor.

Food staples are inexpensive sources of calories and protein, but are not rich sources of essential vitamins and minerals.

Nutritionists are now alarmed by malnutrition caused by poor dietary quality. Overall, mineral and vitamin deficiencies, now known as hidden hunger, affect a far greater number of people in the world than PEM.

Nutritional anemia, mostly from iron deficiency, is widespread among developing countries. Low dietary intake and bioavailability of iron, blood loss due to parasites, and unmet demand associated with rapid growth and pregnancy are the causes of iron deficiency.

In general, iron deficiency and anemia have profound negative effects on human health and development, including limited learning capacity in childhood, impaired immune function and reduced labor productivity. Evidence is accumulating that zinc deficiency leads to complications in pregnancy and childbirth, lower birth weight and poor growth in childhood, associated with diarrhea incidence, reduced immunocompetence, and morbidity.

Improving nutritional quality of crop plants

Producing enough food energy to maintain the world's population is not enough. Even if energy requirements are met, billions of malnourished, poor people will continue to live in poor health, with low productivity and an inferior quality of life. Nutritious foods that meet minimum daily nutritional requirements must be produced. Supplementation, fortification and education have been successful in reducing iodine deficiency and such intervention programs must be continued and extended to the Vitamin A problem. For other micronutrients, such programs are expensive, and unlikely to reach all of those at risk. Another strategy in alleviating iron-deficiency anemia is reducing aetiological factors such as parasites. Still another is dietary inta-

G. B. GREGORIO
D. SENADHIRA
T. HTUT

Plant Breeding, Genetics and Biochemistry
Division, IRRI, MCPO Box 3127,
1271 Makati City, Philippines

R. D. GRAHAM
Department of Plant Science, University of
Adelaide, Glen Osmond 5064,
South Australia, Australia

Acknowledgements

Dr Dharmawansa Senadhira led IRRI's high-iron rice project from the beginning until his untimely death in a road accident in Bangladesh on July 7, 1998. He wrote much of what is contained in this paper for various other purposes, and we, his collaborators have gathered these together and completed the manuscript, acknowledging his major contribution. Special appreciation is also expressed to Dr Howarth Bouis, as CGIAR micronutrient project director. DANIDA and USAID funded this project

Severe problem of anemia

WHO estimates that nearly 3.7 billion people are iron-deficient and that the problem is severe enough to cause anemia in 2 billion people. Of this figure, 40% are non-pregnant women and 50% are pregnant women. An estimated 58% of pregnant women in developing countries are anemic and their infants are more likely to be born with low birth weight and depleted iron stores. WHO also estimates that 31% of children under 5 years old are also anemic, most of this being iron deficiency anemia (WHO, 1999).