Création variétale pour la riziculture pluviale d'altitude à Madagascar : bilan de 25 années de sélection

Louis-Marie Raboin[1]
Alain Ramanantsoanirina[2]
Jean-Luc Dzido[3]
Julien Frouin[5]
Tendro Radanielina[2]
Didier Tharreau[4]
Julie Dusserre[1]
Nourollah Ahmadi[5]

[1] Cirad, UPR SCA
BP 230
Antsirabe 110 - Madagascar
<louis-marie.raboin@cirad.fr>
<julie.dusserre@cirad.fr>

[2] FOFIFA, SRR Antsirabe
BP 230
Antsirabe 110 - Madagascar
<ntsoanirina@moov.mg>
<rtendro@yahoo.fr>

[3] Cirad, UMR RPB
CICY
Unidad de Biotecnologia
Calle 43 n° 130
Colonia Chuburna de Hidalgo
Merida
97200 Yucatan - Mexique
<jean-luc.dzido@cirad.fr>

[4] Cirad, UMR BGPI
TA A-54/K
Campus international de Baillarguet
Bâtiment K, Bureau 120
34398 Montpellier cedex 5
France
<didier.tharreau@cirad.fr>

[5] Cirad, UMR AGAP
TA A-108 / 01
Bâtiment 3, Bureau 101
Avenue Agropolis
34398 Montpellier cedex 5
France
<julien.frouin@cirad.fr>
<nourollah.ahmadi@cirad.fr>

Résumé

À Madagascar, le riz est à la fois la culture principale et l'aliment de base de la population. La région des Hautes Terres est densément peuplée et ses agriculteurs cultivent traditionnellement du riz irrigué. Mais il n'y a plus de surfaces disponibles pour l'aménagement de nouvelles rizières. Pour répondre à la demande croissante de riz, le Centre national malgache de recherche appliquée au développement rural (ou FOFIFA) et le Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad) se sont associés au cours des années 1980 pour créer les variétés de riz pluvial adaptées aux conditions d'altitude (au-dessus de 1 300 m). Les premières variétés créées ont été diffusées dès le milieu des années 1990 et ont permis le démarrage de la culture du riz pluvial dans les zones d'altitude du Vakinankaratra. Malheureusement, la pyriculariose a rapidement surmonté la résistance de la plupart de ces premières variétés à base génétique étroite. Il a donc fallu élargir la base génétique utilisée et prendre en compte la résistance à la pyriculariose comme critère prioritaire de sélection. Une quinzaine de variétés de riz pluvial tolérantes au froid ont été sélectionnées et proposées à la diffusion ; elles ont permis de repousser la frontière de la culture du riz pluvial au-delà de 1 800 m d'altitude. Vingt-cinq ans plus tard, le riz pluvial est visible partout dans le paysage. Nous présentons ici un bilan général du programme d'amélioration variétale du riz pluvial d'altitude, les dernières évolutions de ce programme ainsi que les données les plus récentes sur la diffusion de la riziculture pluviale sur les Hautes Terres centrales.

Mots clés : amélioration des plantes ; Madagascar ; région d'altitude ; ressource génétique ; riz pluvial.

Thèmes : amélioration génétique ; pathologie ; productions végétales.

IN PRESS

Abstract

Upland rice varieties for the highlands of Madagascar: Review of a 25-year-long breeding program

In Madagascar, rice is a staple crop and food. The highland region is densely populated. Farmers traditionally grow irrigated rice. However, further expansion of new irrigated rice fields is almost impossible. In order to meet the growing demand for rice, FOFIFA and CIRAD joined efforts in the 80s to create upland rice varieties adapted to high altitudes (above 1,300m). The first varieties bred were released as early as the mid 1990s and allowed the beginning of upland rice cultivation in the high altitude areas of Vakinankaratra. Unfortunately, blast disease rapidly bypassed the resistance of these first varieties of narrow genetic basis. The genetic basis was thus broadened with blast resistance being considered as a major selection trait. Since the beginning, about fifteen cold tolerant varieties have been released, pushing the frontier of upland rice cultivation to beyond 1,800m asl. Twenty five years later, starting from zero, upland rice is everywhere in the landscape. We here present the results of the high altitude upland rice varietal improvement program, the last development of this program and the most recent data on upland rice diffusion in the Vakinankaratra region in the central Highlands of Madagascar.

Key words: genetic resources; highlands; Madagascar; plant breeding; upland rice.

Subjects: genetic improvement; pathology; vegetal productions.

Tirés à part : N. Ahmadi

doi: 10.1684/agr.2013.0624

Pour citer cet article : Raboin LM, Ramanantsoanirina A, Dzido JL, Frouin J, Radanielina T, Tharreau D, Dusserre J, Ahmadi N, 2013. Création variétale pour la riziculture pluviale d'altitude à Madagascar : bilan de 25 années de sélection. *Cah Agric* 22 : 1-9. doi : 10.1684/agr.2013.0624

Madagascar est un pays de tradition rizicole avec une consommation moyenne annuelle de riz par individu estimée à 118 kg en milieu urbain et à 138 kg en milieu rural. Malheureusement, la production n'augmente pas à la même vitesse que la population (UPDR/FAO, 2001). La superficie cultivée en riz est estimée en 2004-2005 à 1 245 000 hectares dont 78,7 % de riz irrigué, 12,9 % de riz de « Tavy » (défriche-brulis) et 8,4 % de riz pluvial (MAEP, 2007). Les Hautes Terres centrales de Madagascar génèrent 36 % de la production rizicole nationale essentiellement dans les rizières aménagées dans les vallées, dans les grandes plaines ou bien sur les versants en terrasse des nombreuses collines qui constituent le paysage (UPDR/FAO, 2001). Dans cette zone, densément peuplée (plus de 100 habitants/km^2 dans la région du Vakinankaratra contre 36 habitants/km^2 au niveau national en 2010), les possibilités d'expansion de la riziculture irriguée sont de plus en plus limitées. Pour répondre à la demande croissante de riz, le développement de la riziculture pluviale sur les flancs des collines et sur les plateaux sommitaux, habituellement réservés aux cultures de maïs, haricot, patate douce et manioc ou aux pâturages, est apparu comme une option à explorer. L'absence de variétés de riz pluvial suffisamment tolérantes au froid pour être cultivées à des altitudes supérieures à 1 300 m, a conduit au lancement d'un programme de création variétale spécifique au milieu des années 1980. Le partenariat qui s'est développé entre le centre de recherche rural malgache (FOFIFA) et le Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad) pour atteindre cet objectif se poursuit encore aujourd'hui. La première phase de ce programme, centrée sur la création variétale, a abouti dès le milieu des années 1990 à l'inscription au catalogue officiel des premières variétés de riz pluvial tolérantes au froid (Déchanet *et al.*, 1997). Malheureusement, la résistance à la pyriculariose (maladie cryptogamique la plus importante en riziculture pluviale) a été rapidement surmontée chez la plupart de ces premières variétés, à base génétique étroite, entraînant des épidémies importantes dès le début des années 2000. La deuxième phase du programme, centrée sur l'évaluation participative, pluriannuelle et multilocale des nouvelles variétés et sur l'appui à la production de semences (Dzido *et al.*, 2004) a contribué à l'adoption de la riziculture pluviale par un grand nombre d'agriculteurs en particulier dans la région du Vakinankaratra (Galtier et Guimera, 2000 ; Radanielina, 2010). La sélection pour la résistance à la pyriculariose s'est progressivement imposée comme un critère prioritaire de sélection au cours de cette période, compte tenu de l'augmentation de la pression des épidémies. Une quinzaine de variétés de riz pluvial tolérantes au froid ont été sélectionnées et proposées à la diffusion. Elles ont permis de repousser la frontière de la culture du riz pluvial au-delà de 1 800 m d'altitude. Grâce à ces variétés, la riziculture pluviale a connu un développement extrêmement rapide, en particulier dans la région de Vakinankaratra, entre les villes d'Antsirabe et d'Ambatolampy (70 km au nord), où les efforts de recherche et de diffusion se sont concentrés. Désormais, le riz pluvial fait partie intégrante du paysage et devient même par endroit dominant dans les systèmes de culture pluviaux (*figure 1*). Le défi est maintenant d'accompagner cet essor à travers l'amélioration des systèmes de culture et l'élargissement de l'éventail des variétés disponibles pour assurer la durabilité de la production du riz pluvial en altitude. Le programme de sélection est donc entré depuis 2004 dans une troisième phase, de nouveau centrée sur la création variétale, qui vise à intégrer différents objectifs : la résistance à la pyriculariose, la diversification de la qualité du grain, la tolérance au froid et l'adaptation aux conditions de l'agriculture de conservation.

Nous présenterons ici, un bilan du programme d'amélioration variétale du riz pluvial d'altitude mené depuis 25 ans, les dernières évolutions de ce programme ainsi que les données les plus récentes sur la diffusion de la riziculture pluviale dans la région de Vakinankaratra.

Figure 1. Paysage des Hautes Terres dans lequel le riz pluvial domine.

Figure 1. Highlands landscape where upland rice is dominant.
Photo J. Dusserre

Contraintes de la riziculture pluviale sur les Hautes Terres

Contraintes climatiques

Les Hautes Terres centrales de Madagascar se caractérisent par l'alternance d'une saison chaude et pluvieuse de novembre à avril et d'une saison froide et sèche de mai à octobre. L'altitude a un effet important sur les températures moyennes qui diminuent de 0,6 °C tous les 100 m. À 1 650 m d'altitude, dans notre station principale de sélection, les températures minimales peuvent descendre en dessous de 10 °C pendant la phase végétative précoce du riz et sont inférieures à 15 °C en moyenne pendant la phase de reproduction et de remplissage du grain. L'amplitude thermique journalière (nuit/jour) est élevée (10 à 12 degrés) durant toute la saison de culture du riz pluvial (octobre-avril) qui, en absence de l'effet tampon de l'eau, subit directement ces variations. Il en résulte une croissance plus lente à tous les stades du développement, se traduisant par l'allongement du cycle semis-floraison et des processus de remplissage et maturation des grains (Chabanne et Razakamiaramanana, 1997). Ainsi, par exemple, le cycle semis-épiaison de la variété FOFIFA 161 passe de 86 jours à 900 m d'altitude à 112 jours à 1 650 m d'altitude (Ramanantsoanirina *et al.*, 2009). Le froid au cours de la phase de

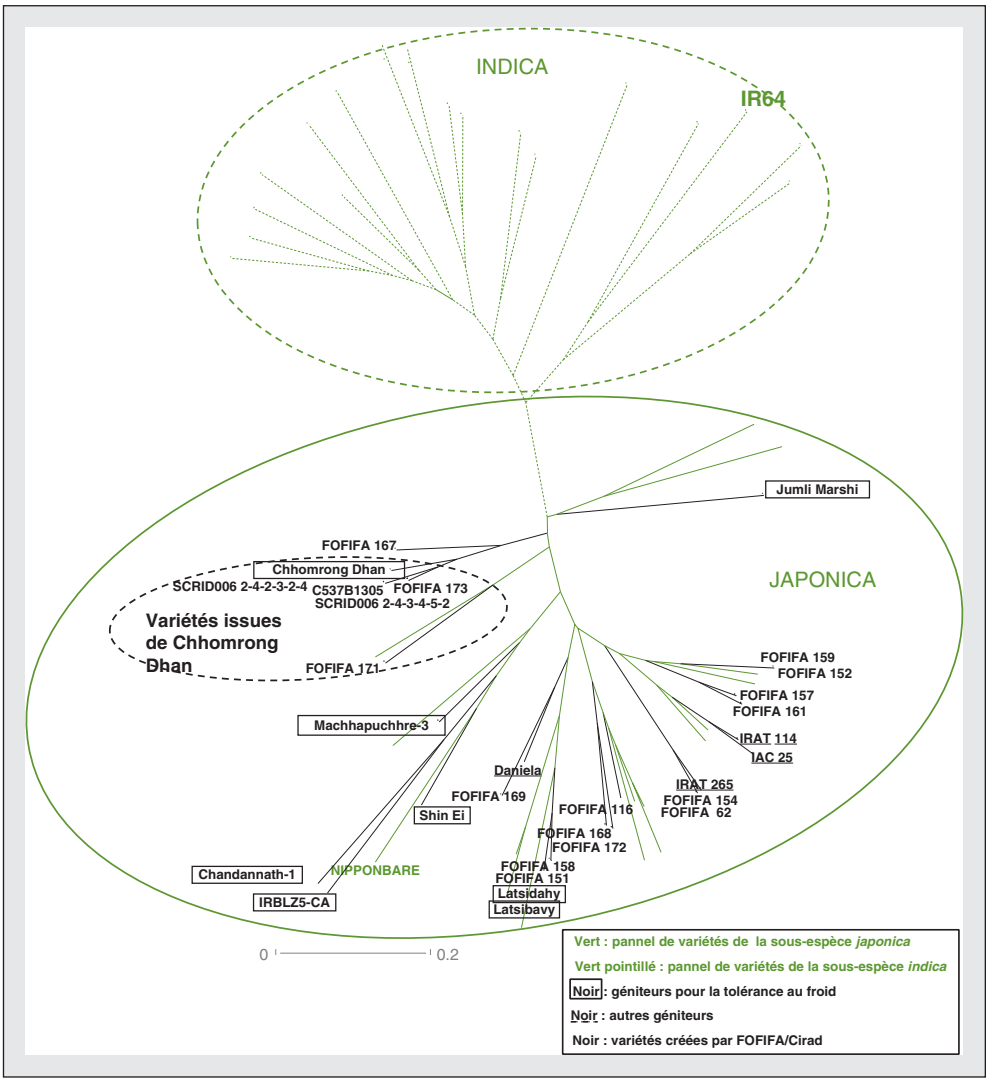

Figure 2. Diversité génétique de 30 variétés représentatives du matériel exploité pour l'amélioration génétique du riz pluvial destiné aux altitudes supérieures à 1 300 m.

Figure 2. Genetic variability used for high altitude upland rice genetic improvement projected over a panel of cultivars of the *japonica* and *indica* subspecies (Neighbour joining tree).

Le génotypage a été réalisé à l'aide de neuf marqueurs microsatellites non liés génétiquement. Ce matériel a été positionné par rapport à une représentation de la diversité de *Oryza sativa* constituée de 17 variétés de la sous-espèce *indica* et de 17 variétés de la sous-espèce *japonica* préalablement génotypées avec les mêmes marqueurs. L'analyse et la représentation de la diversité génétique a été réalisée avec le logiciel Darwin 5.01 (Perrier et Jacquemoud-Collet, 2006).

reproduction provoque un mauvais développement des grains de pollen induisant la stérilité des épillets chez les variétés non adaptées (Satake et Hayase, 1970).
Les précipitations annuelles sont de 1 400 mm (moyenne 2003-2011). L'installation de la saison des pluies est souvent erratique, empêchant ou mettant en péril la mise en place précoce de la culture. Les mois les plus pluvieux sont décembre et janvier. Les tempêtes de grêle sont fréquentes à cette altitude et peuvent entraîner de lourdes pertes pendant la phase de maturation du riz.

Contraintes biotiques

La riziculture pluviale est confrontée à deux contraintes biotiques majeures : la pyriculariose et les vers blancs. La pression de la pyriculariose est très forte, aussi bien en phase végétative qu'en phase reproductrice. L'incidence et la sévérité de la maladie varient selon les systèmes de culture et les variétés (Sester *et al.*, 2008). Elles peuvent atteindre 100 % avec les variétés les plus sensibles (comme FOFIFA 154, appréciée pour la qualité de son grain) et dans les systèmes de culture les plus favorables à l'apparition de la maladie. Cela a conduit à retirer plusieurs variétés du réseau de diffusion des semences. Les vers blancs constituent aussi une forte contrainte pour la riziculture pluviale à Madagascar. Un grand nombre d'espèces de larves ont été identifiées. Cependant, elles ne sont pas toutes des ravageurs du riz (Randriamanantsoa *et al.*, 2010).

Contraintes agronomiques et socio-économiques

Sur les Hautes Terres, les sols des collines (Tanety) sont de type ferralitique, souvent très acides (pH 4 à 5,5) et à faible teneur en éléments minéraux assimilables. En particulier, l'immobilisation du phosphore limite leur fertilité (Rabeharisoa, 2004). De plus, les flancs des collines présentent des pentes plus ou moins accentuées qui entraînent souvent, faute d'aménagements anti-érosifs, une perte de fertilité par érosion. Dans la région de Vakinankaratra, les petites exploitations (moins de 1,5 hectare de terre), représentent près de 90 % des ménages agricoles (MEFB, INSTAT, USAID, 2006). Ces paysans pratiquent une agriculture vivrière de subsistance et, pour la grande majorité d'entre eux, n'ont pas les moyens d'utiliser des engrais minéraux et des produits phytosanitaires.

Exploitation de la diversité génétique existante pour l'amélioration de la tolérance au froid d'altitude

La population malgache « Latsika » : source historique de tolérance au froid

Pendant la première phase du programme d'amélioration, jusqu'en 1995, des géniteurs pour la tolérance au froid appartenant au groupe *japonica* tempéré, d'origine géographique très variée (Japon, Corée, Chine, Madagascar…) ont été utilisés. Les croisements intra-*japonica* ont été réalisés avec des variétés pluviales adaptées aux conditions de moyenne altitude de Madagascar. Cependant, seuls les croisements impliquant la population locale de riz irrigué d'altitude « Latsika » (représentée par les variétés Latsidahy et Latsibavy sur la *figure 2*) ont abouti à des variétés bien adaptées (Déchanet *et al.*, 1997) : FOFIFA 133, 134, 151, 152, 153, 154, 157 et 168 (*tableau 1*). Deux autres variétés, FOFIFA 161 et 159, sont issues d'un croisement entre les variétés FOFIFA 133 et IRAT 114. Parmi les autres géniteurs, Shin Ei, d'origine japonaise, croisée respectivement avec FOFIFA 62 et CA 148 a permis la création de FOFIFA 158 et 167. Ainsi, bien que partie d'une base génétique assez large, la première phase a abouti à la création de variétés ayant une base génétique relativement étroite, comme l'illustre le regroupement des variétés FOFIFA de cette première phase (à l'exception de FOFIFA 167) dans un même secteur de la représentation de la diversité génétique globale de la sous-espèce *japonica* (*figure 2*).

Élargissement de la base génétique

Un nouvel effort d'élargissement de la base génétique du programme de sélection a été entrepris au milieu des années 1990 avec l'introduction de variétés irriguées d'origine népalaise (Vales et Razafindrakoto, 1997). Parmi elles, Jumli Marshi et Chhomrong Dhan se sont montrées très intéressantes. FOFIFA 172 est issue d'un croisement impliquant Jumli Marshi ; FOFIFA 171 et 173 sont issues de croisements impliquant Chhomrong Dhan (*tableau 1*). De nombreuses autres lignées qui ont Chhomrong Dhan comme parent sont en phase finale de sélection. La diversité génétique des variétés diffusées a ainsi pu être élargie (*figure 2*). En 2007, nous avons introduit 160 variétés provenant de l'*International Rice Research Institute* (IRRI), du Centre international d'agriculture tropicale (CIAT) et de Chine (Yunnan). Parmi elles, seule IRBLZ5-CA s'est montrée fertile à 1 650 m. IRBLZ5-CA est issue du croisement de C101A51 avec Lijiangxintuanheigu, une variété traditionnelle du Yunnan tolérante au froid (Shirasawa *et al.*, 2012). Évaluée en conditions pluviales à 1 650 m en 2008-2009, elle a montré un rendement supérieur au témoin FOFIFA 161, un cycle semis-floraison plus court de huit jours, et une bonne résistance à la pyriculariose (elle possède le gène de résistance *Piz5* = *Pi2*), mais elle est très sensible à la verse. Deux nouvelles variétés népalaises, Chandannath-1 et Machhapuchhre-3 (croisement de Chhomrong Dhan avec la variété japonaise Fuji 102), sélectionnées par approche participative au Népal (Sthapit *et al.*, 1996), ont été introduites en 2009. Évaluées en culture pluviale à 1 650 m d'altitude au cours de la campagne 2010-2011, elles ont montré des taux de fertilité assez élevés : 78 % pour Chandannath-1 et 81 % pour Machhapuchhre-3. Ces trois variétés commencent donc à être exploitées en sélection à travers divers croisements. Ainsi, aujourd'hui, bien que le nombre de géniteurs tolérants aux conditions climatiques des Hautes Terres soit encore limité, leur base génétique a été élargie et leur diversité semble mieux répartie par rapport à la diversité globale de la sous-espèce *japonica* (*figure 2*). Les efforts de diversification doivent néanmoins se poursuivre.

IN PRESS

Tableau 1. Variétés de riz pluvial inscrites au catalogue FOFIFA pour les régions des Hautes Terres de Madagascar, 1994-2011.

Table 1. Table 1 Upland rice varieties released by FOFIFA for highlands regions of Madagascar, 1994-2011.

Nom	Nomination	Pyriculariose	Type de grain[a]	Couleur péricarpe	Parent femelle	Parent mâle
FOFIFA 133	1994	Très sensible	**2,5** (8,7/3,5)	Blanc	Latsidahy	FOFIFA 62
FOFIFA 134	1994	Très sensible	**2,9** (10,3/3,5)	Blanc	Latsidahy	FOFIFA 62
FOFIFA 151	1995	Tolérant	**2,5** (7,6/3,1)	Blanc	Latsidahy	Shin Ei
FOFIFA 152	1995	Très sensible	**3,0** (9,0/3,0)	Blanc	Latsidahy	FOFIFA 62
FOFIFA 153	1995	Très sensible	**3,3** (9,8/3,0)	Blanc	Latsibavy	Daniela
FOFIFA 154	1995	très sensible	**3,8** (10,5/2,8)	Blanc	Latsibavy	FOFIFA 62
FOFIFA 157	2000	Sensible	**2,6** (9,5/3,5)	Blanc	Latsidahy	FOFIFA 62
FOFIFA 158	2000	Très sensible	**3,1** (8,8/2,8)	Blanc	FOFIFA 62	Shin Ei
FOFIFA 159	2000	Sensible	**2,7** (8,3/3,1)	Blanc	IRAT 114	FOFIFA 133
FOFIFA 161	2003	Sensible	**2,3** (7,8/3,4)	Blanc	IRAT 114	FOFIFA 133
FOFIFA 167	2005	Tolérant	**2,7** (8,3/3,1)	Blanc	CA 148	Shin Ei
FOFIFA 168	2005	Sensible	**2,5** (8,7/3,5)	Blanc	Latsidahy	FOFIFA 62
FOFIFA 169	2005	Très sensible	**3,1** (9,7/3,1)	Blanc	Pratao Precoce	Daniela
Chhomrong Dhan	2006	Tolérant	**2,4** (7,6/3,2)	Rouge	Variété irriguée traditionnelle du Népal	
FOFIFA 171	2006	Tolérant	**2,9** (8,8/3,0)	Rouge	Chhomrong Dhan	SLIP 48-M-1
FOFIFA 172	2006	Résistant	**2,3** (7,5/3,2)	Rouge	IRAT 265	Jumli Marshi
FOFIFA 173	2011	Tolérant	**2,7** (8,7/3,2)	Rouge	Chhomrong Dhan	-?-

[a] Rapport longueur sur largeur du grain vêtu (en gras) et entre parenthèses (longueur du grain/largeur du grain).

IN PRESS

Amélioration variétale du riz pluvial sur les Hautes Terres

Schéma de sélection

La *figure 3* présente le schéma de sélection généalogique qui est classique pour une plante autogame comme le riz. Chaque année, une vingtaine de croisements manuels sont réalisés en serre. Pendant la saison pluvieuse, les plantes F_1 sont cultivées en rizière à 1 500 m d'altitude. En fin de saison (mai), après la récolte des graines F_2, les plantes F_1 sont transférées (multiplication végétative par éclat de souche) dans une rizière à 900 m d'altitude pour une culture de contre-saison. Cela permet d'augmenter la quantité de semences F_2 produites et donne la possibilité d'évaluer l'adaptation en altitude avec des effectifs faibles, avant de mettre en place des effectifs plus importants l'année suivante. Chaque année, environ 50 000 plantes F_2 sont évaluées en station, à 1 650 m d'altitude. Dès le stade F_4, le rendement des lignées les plus intéressantes est évalué en station sous différentes conditions de culture (deux répétitions, parcelles élémentaires de 4 à 6 m^2). Deux témoins (Chhomrong Dhan et FOFIFA 161) sont répétés toutes les cinq à sept lignées. Depuis 2011, ces évaluations sont réalisées à 1 500 et à 1 650 m d'altitude, avec et sans apport de fertilisants minéraux. Les meilleures lignées sont ensuite évaluées dans des essais variétaux (trois à cinq répétitions, parcelles élémentaires de 10 à 25 m^2). Un de ces essais permet de comparer chaque année neuf lignées sur un dispositif en *split-plot* combinant deux systèmes de culture (labour sans restitution des résidus de récolte et semis direct, sans travail du sol, sur résidus de la culture précédente de maïs associé au haricot) et deux niveaux de fumure (fumier seul et fumier + fertilisation minérale). Enfin, un site d'essai à 1 800 m permet de vérifier le niveau de tolérance au froid, dans des conditions plus rigoureuses. Les performances des meilleures lignées sont ensuite testées de façon participative dans le réseau d'essais en milieu paysan, mis en place en collaboration avec des institutions intervenant dans le développement agricole. Étant donné l'importance de la pyriculariose, la totalité du processus de

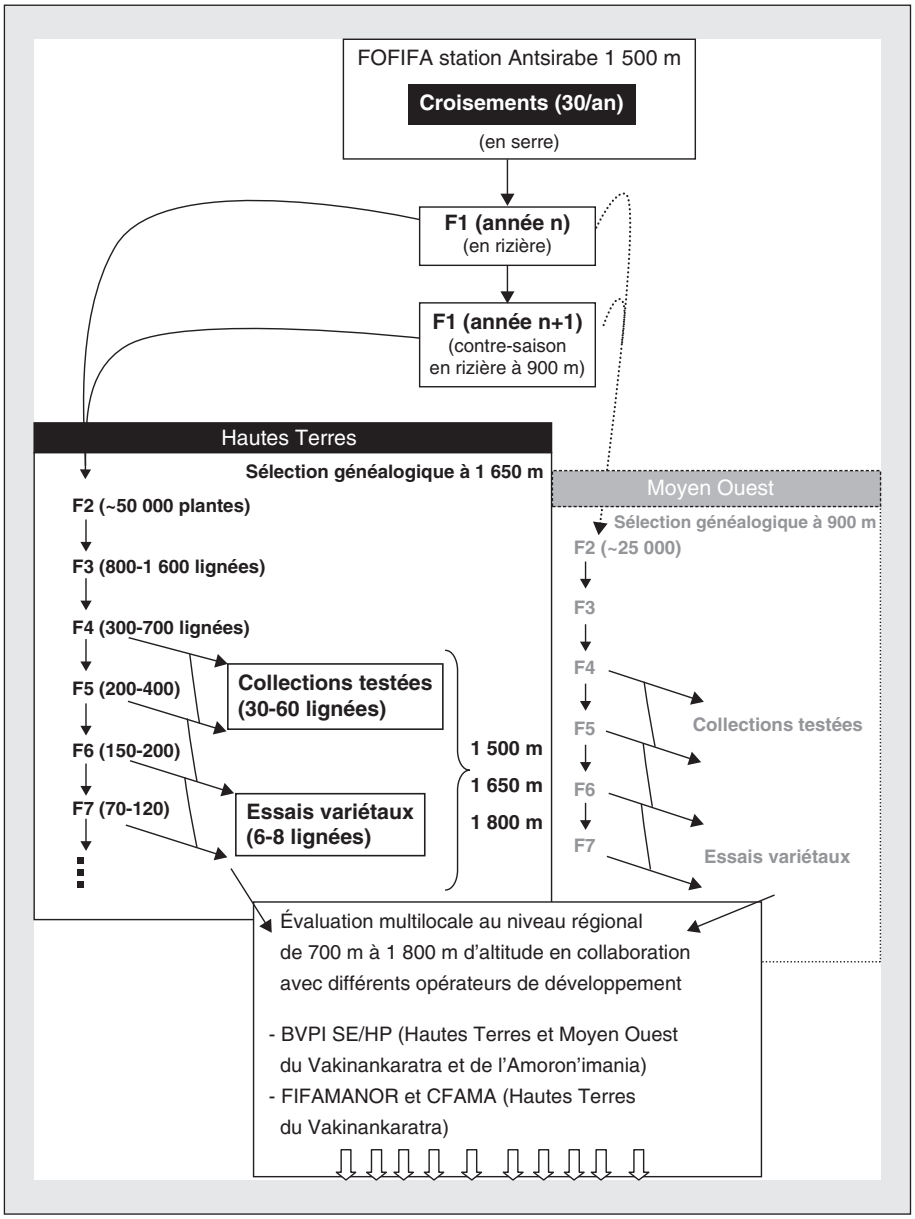

Figure 3. Schéma de sélection généalogique appliqué à l'amélioration génétique du riz pluvial d'altitude.

Figure 3. Pedigree selection scheme applied to high altitude upland rice genetic improvement.

sélection, dès la génération F_2, est effectuée sous une pression forte de pyriculariose créée par une bande infestante (Notteghem *et al.*, 1980) composée de variétés sensibles à la plupart des souches présentes dans la région. Cette sélection sous pression continue est complétée, à partir de la F5, par l'évaluation des lignées dans un dispositif de criblage pour la résistance à la pyriculariose dans lequel on renforce la fertilisation azotée pour augmenter la sensibilité à la pyriculariose (Long *et al.*, 2000).

Variétés de riz pluvial d'altitude inscrites au catalogue national

Dix-sept variétés pluviales d'altitude ont été inscrites au catalogue du FOFIFA depuis 1994 et proposées à la diffusion (*tableau 1*). Les premières ont contribué à l'émergence de la riziculture pluviale au-dessus de 1 300 m. Parmi elles, FOFIFA 133 était adaptée jusqu'à 1 800 m d'altitude. FOFIFA 152 et 154 étaient appréciées pour le format mi-long de leurs grains (ratio longueur sur largeur respectivement de 3,0 et 3,8). Malheureusement, la base génétique étroite de ces variétés a facilité l'adaptation des populations de l'agent de la pyriculariose. La résistance de toutes les variétés inscrites en 1994 et 1995, à l'exception de FOFIFA 151, a été surmontée (*tableau 1*). Parmi les variétés inscrites entre 2000 et 2005, seules FOFIFA 159 et 161, deux lignées sœurs légèrement sensibles à la pyriculariose, ont fait l'objet d'une diffusion significative. Les variétés inscrites au cours des cinq dernières années sont caractérisées par une filiation népalaise. FOFIFA 171 et 173 ont pour parent Chhomrong Dhan ; FOFIFA 172 est issue d'un croisement impliquant Jumli Marshi. Ces trois variétés présentent des grains proches des parents népalais : ronds ou demi-ronds (ratio longueur sur largeur de 2,1 à 2,6) et péricarpe rouge. La variété traditionnelle Chhomrong Dhan, qui s'est révélée très bien adaptée à la riziculture pluviale d'altitude, a aussi été inscrite au catalogue officiel pour être utilisée directement par les agriculteurs auprès desquels elle diffuse largement.

Progrès génétique réalisé

Un nouveau palier d'adaptation aux conditions d'altitude a été franchi avec les variétés inscrites depuis 2006 grâce à l'utilisation des géniteurs d'origine népalaise, en particulier Chhomrong Dhan. Ce progrès est illustré par la comparaison des rendements des principales variétés inscrites aux rendements du témoin FOFIFA 161, dans 13 essais variétaux menés entre 2003 et 2011 (*figure 4*). Une part importante des différences de rendements observés entre les variétés de la première vague et les suivantes est liée à l'extrême sensibilité des premières à la pyriculariose. Mais les essais conduits avec une couverture fongicide des variétés sensibles (F 154T et F 152T sur la *figure 4*) indiquent que des progrès ont bien été réalisés aussi en termes de potentiel de production et de tolérance au froid. La dernière variété inscrite au catalogue, FOFIFA 173, a un rendement bien supérieur à celui du FOFIFA 161 (*figures 4* et *5*). Toutefois, elle présente un cycle long qui peut entraîner une baisse de fertilité

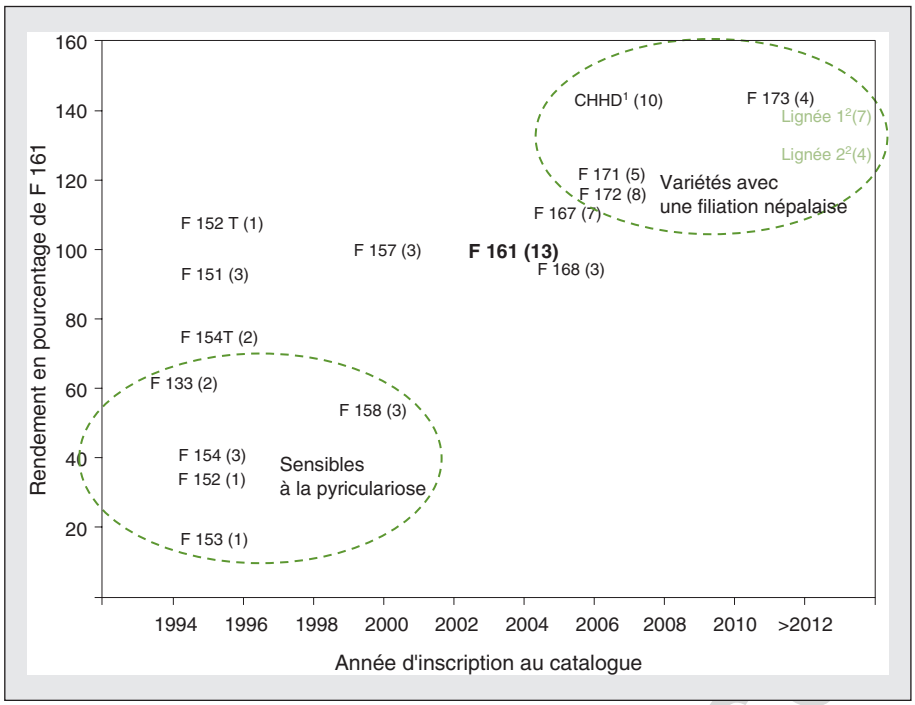

Figure 4. Comparaison du rendement des différentes variétés proposées à la diffusion depuis 15 ans.

Figure 4. Comparison of the yields of varieties released during the last 15 years.

Il s'agit de la compilation de données provenant de 13 essais d'évaluation variétale réalisés depuis 2003 incluant la variété FOFIFA 161. Les rendements présentés sont exprimés en pourcentage de FOFIFA 161 utilisée comme référence et représentent une moyenne sur un nombre variable d'essais selon les variétés. Le chiffre placé entre parenthèses représente le nombre d'essais dans lesquels une variété donnée était présente. Les variétés sont classées en fonction de la date de leur inscription au catalogue FOFIFA. 1 : CHHD : Chhomrong Dhan ; 2 : nouvelles lignées prometteuses (toutes les deux issues de Chhomrong Dhan) ; T : variétés évaluées avec une protection fongicide contre la pyriculariose.

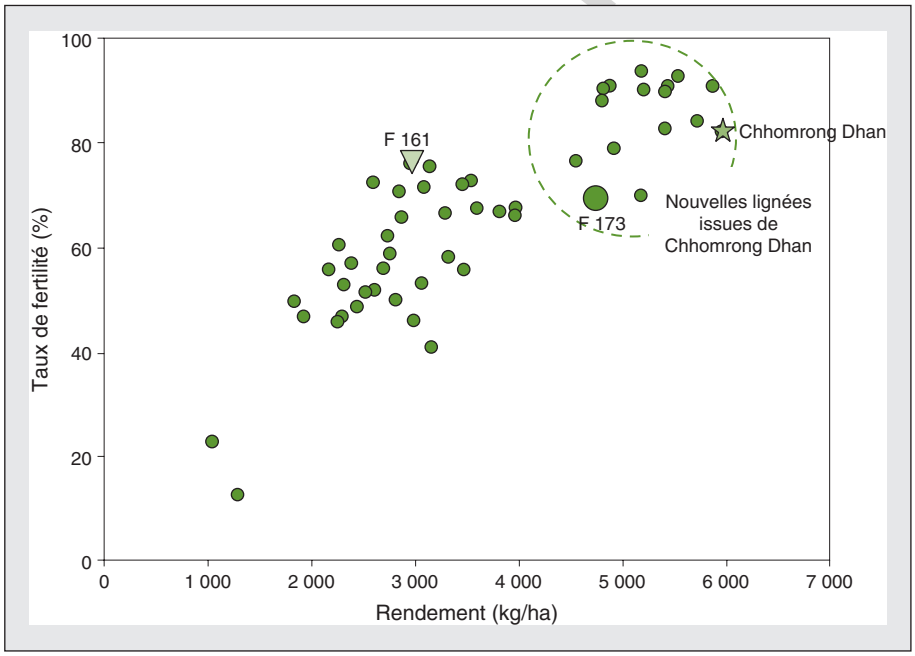

Figure 5. Rendement et taux de fertilité des meilleures lignées en collection testées pendant la campagne 2010-2011 à Andranomanelatra (1 650 m d'altitude).

Figure 5. Yield and fertility rate of the best lines in evaluation in 2010-2011 in Andranomanelatra (1,650 asl).

des épillets, due au froid à 1 650 m certaines années, comme nous l'avons constaté au cours de la campagne 2010-2011 (*figure 5*). Par ailleurs, les lignées avancées issues du croisement entre Chhomrong Dhan et FOFIFA 172 ont des rendements largement supérieurs à FOFIFA 161 et équivalents à ceux de Chhomrong Dhan. Ces lignées conservent un taux de fertilité très élevé à 1 650 m, supérieur à Chhomrong Dhan et FOFIFA 161, grâce en partie à des cycles plus courts de deux à trois semaines (*figure 5*). Il existe une relation forte entre développement du couvert (mesuré par l'indice foliaire) et rendement, particulièrement en conditions de faibles intrants (*figure 6*). Chhomrong Dhan, FOFIFA 173 et certaines nouvelles lignées issues de Chhomrong Dhan (dont la lignée 2) sont particulièrement intéressantes car, même en conditions de faibles intrants, elles conservent un bon développement foliaire qu'elles convertissent en un bon rendement. Ce type de variété devrait être performant en conditions paysannes.

État de la diffusion du riz pluvial sur les Hautes Terres

Une enquête réalisée en 2000 révélait qu'au moins 10 % des agriculteurs du Vakinankaratra avaient commencé à cultiver le riz pluvial en altitude (Galtier et Guimera, 2000). Une seconde enquête réalisée en 2006 dans 843 exploitations de 26 villages situés au-dessus de 1 250 m d'altitude a montré que 62 % de ces villages et 36 % des exploitations cultivaient le riz pluvial (Radanielina, 2010). Cette même enquête a montré que la variété la plus cultivée était FOFIFA 154 (53 % des exploitations) suivie par FOFIFA 133 (21 %), FOFIFA 134 (10 %) et FOFIFA 152 (7 %). Une enquête réalisée en 2010 dans deux communes proches de la capitale régionale, Antsirabe, indiquait que Chhomrong Dhan représentait 95 % des surfaces cultivées à Antsapanimahazo et 75 % à Andranomanelatra (Rasoavololona, 2010). FOFIFA 159 et 161 ainsi que FOFIFA 152 et 154, qui ont contribué au lancement de la riziculture pluviale d'altitude, n'étaient

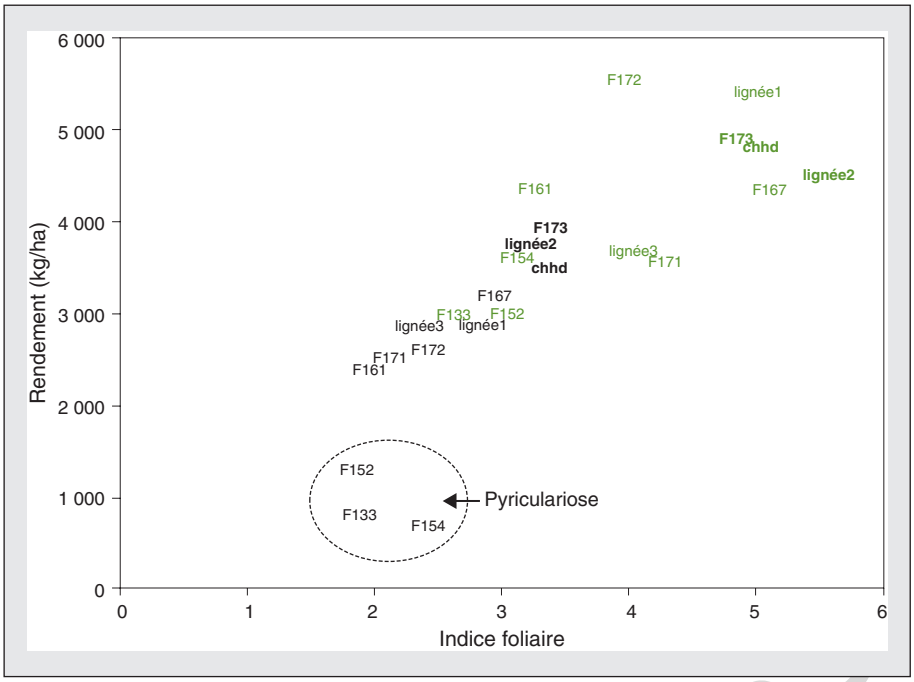

Figure 6. Relation entre l'indice foliaire mesuré en phase de maturation et le rendement pour un échantillon de variétés évaluées au cours de la campagne 2011-2012 à faible et forte fertilisation.

Figure 6. Relationship between Leaf Area Index (LAI) and yield for a panel of varieties at low (black letters) and high (green letters) fertilization levels in 2011-2012.

Lettres noires : faible fertilisation sans protection fongicide (cinq tonnes de fumier par hectare) ; lettres en vert : forte fertilisation avec protection fongicide (cinq tonnes de fumier, 300 kilos de NPK et 80 kilos d'urée par hectare). HHD : Chhomrong Dhan.

plus que faiblement présentes. Enfin, les résultats d'une nouvelle enquête, conduite en 2012 dans 9 des 26 villages étudiés en 2006 (Radanielina, 2010), indiquent que 80 % des parcelles de riz pluvial sont maintenant cultivées avec Chhomrong Dhan. Cette variété semble ainsi en voie de remplacer toutes les variétés diffusées à ce jour. Ce rétrécissement de la diversité variétale et les risques épidémiques qui en résultent constituent un nouveau défi pour le programme de sélection.

Conclusions et perspectives

L'adoption par les paysans des variétés tolérantes au froid créées par le FOFIFA et le Cirad a permis une expansion rapide de la riziculture pluviale sur les Hautes Terres de Madagascar. Cependant, la durabilité de cette riziculture pratiquée souvent par les agriculteurs les plus démunis sur des pentes fragiles, sans engrais ni pesticides, n'est pas assurée. Elle fait face à de nombreuses contraintes, notamment les maladies, les insectes, les mauvaises herbes, l'érosion et la baisse de la fertilité des sols. Seule la mise au point de méthodes de lutte intégrée (Sester *et al.*, 2008) et de systèmes de culture performants sur le plan agronomique et écologique (Rakotoarisoa *et al.*, 2010 ; Giller *et al.*, 2011 ; Dusserre *et al.*, 2012) permettra de sécuriser et de valoriser les progrès génétiques notables déjà obtenus.

L'amélioration variétale doit poursuivre ses efforts pour augmenter le nombre de variétés adaptées aux Hautes Terres. La résistance durable à la pyriculariose reste un de ses objectifs majeurs. La diversité génétique, à travers des variétés ayant des combinaisons de gènes de résistances différents, des cycles différents ou des architectures différentes, contribue à limiter l'impact négatif des stress biotiques ou abiotiques dans les agroécosystèmes (Altiéri, 1999). Ainsi l'effet positif de la culture en mélange de plusieurs variétés dans une même parcelle, sur la limitation des épidémies de pyriculariose a été confirmé sur les Hautes Terres en riziculture pluviale (Raboin *et al.*, 2012). La plupart des nouvelles lignées prometteuses ont des grains ronds à demi-ronds et à péricarpe rouge hérités de leur parent népalais. Il faudrait diversifier le type de grains pour mieux répondre aux demandes qui portent sur le goût et la tenue à la cuisson lorsque le riz est autoconsommé et sur les aspects visuels, dont le format du grain, lorsque le riz est commercialisé (Touzard, 2003). Pour réaliser ces objectifs, il sera nécessaire d'élargir encore la base génétique de nos géniteurs. Des efforts sont également nécessaires pour comprendre les bases génétiques de la tolérance au froid d'altitude, caractérisé par de fortes amplitudes thermiques journalières, peu étudiées ailleurs (Fujino *et al.*, 2008 ; Shirasawa *et al.*, 2012).

Dans un contexte d'agriculture de subsistance, où l'utilisation des engrais chimiques est très limitée, il est aussi important d'améliorer l'efficience de l'utilisation des ressources minérales du sol. Nous avons intégré cette question dans notre programme de sélection avec l'objectif de développer des variétés les plus productives possibles sans recours aux intrants. La stratégie retenue est la sélection génomique (Heffner *et al.*, 2010) pour l'efficience de l'utilisation de l'azote dans des populations synthétiques soumises à la sélection récurrente. ■

Références

Altiéri MA, 1999. The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 74 : 19-31. doi: 10.1016/j.bbr.2011.03.031.

Chabanne A, Razakamiaramanana M, 1997. La climatologie d'altitude à Madagascar. In : Poisson C, Rakotoarisoa J, éds. *Rice for highlands. Proceeding of the international conference on rice for highlands*. 29/03-05/04/1996, Antananarivo (Madagascar) ; Montpellier (France) : Cirad.

Déchanet R, Razafindrakoto J, Valès M, 1997. Résultats de l'amélioration variétale du riz d'altitude Malgache. In : Poisson C, Rakotoarisoa J, éds. *Rice for highlands. Proceeding of the international conference on rice for highlands*. 29/03-05/04/1996. Antananarivo (Madagascar) ; Montpellier (France) : Cirad.

Dusserre J, Chopart JL, Douzet JM, Rakotoarisoa J, Scopel E, 2012. Upland rice production under conservation agriculture cropping systems in cold conditions of tropical highlands. *Field Crops Research* 138 : 33-41.

Dzido JL, Vales M, Rakotoarisoa J, Chabanne A, Ahmadi N, 2004. *Upland rice for highlands: New varieties and sustainable cropping systems for food*

security. Promising prospects for the global challenges of rice production. FAO Rice Conference, 12-13/02/2004, Rome, Italy.

Fujino K, Sekiguchi H, Matsuda Y, Sugimoto K, Ono K, Yano M, 2008. Molecular identification of a major quantitative trait locus, qLTG3-1, controlling low-temperature germinability in rice. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 105 : 12623-8.

Galtier A, Guimera P, 2000. *Diffusion de la riziculture pluviale d'altitude et ses perspectives dans la région de Vakinankaratra à Madagascar*. Mémoire de fin d'étude ESITPA, Cirad (Montpellier, France).

Giller KE, Corbeels M, Nyamangara J, Triomphe B, Affholder F, Scopel E, *et al.,* 2011. A research agenda to explore the role of conservation agriculture in African smallholder farming systems. *Field Crops Research* 121 : 468-72.

Heffner EL, Lorenz AJ, Jannink JL, Sorrells M, 2010. Plant breeding with genomic selection: Potential gain per unit time and cost. *Crop Science* 50 : 1681-90.

Long DH, Lee FN, TeBeest DO, 2000. Effect of nitrogen fertilization on disease progress of rice blast on susceptible and resistant cultivars. *Plant Disease* 84 : 403-9.

MEFB, INSTAT, USAID, 2006. *Enquête périodique auprès des ménages 2005*. Antananarivo : Rapport principal MEFB, INSTAT, USAID.

Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et de la Pêche, 2007. *Recensement de l'agriculture. Campagne agricole 2004-2005. Parcelles et superficies de culture*. Vol. III.

Notteghem JL, Andriatompo GM, Chatel M, Déchanet R, 1980. Techniques used to select rice varieties with horizontal resistance to *Pyricularia oryzae*. *Annals of Phytopathology* 12 : 199-226.

Perrier X, Jacquemoud-Collet JP, 2006. *DARwin software.* Montpellier : Cirad. http://darwin.cirad.fr/darwin.

Rabeharisoa RL, 2004. *Gestion de la fertilité et de la fertilisation phosphatée des sols ferralitiques des Hautes Terres de Madagascar*. Thèse de doctorat d'État, université d'Antananarivo.

Raboin LM, Ramanantsoanirina A, Dusserre J, Razasolofonanahary F, Tharreau D, Lannou C, *et al.,* 2012. Two-component cultivar mixtures reduce rice blast epidemics in an upland agrosystem. *Plant Pathology* 61 : 1103-11. doi: 10.1111/j.1365-3059.2012.02602.x.

Radanielina T, 2010. *Diversité génétique du riz (*Oryza sativa *L.) dans la région de Vakinaankaratra, Madagascar. Structuration, distribution éco-géographique et gestion* in situ. Thèse de doctorat, Agro Paris Tech (Paris, France) N° 2010/AGPT/0093.

Rakotoarisoa J, Oliver R, Dusserre J, Muller B, Douzet JM, Michellon R, *et al.,* 2010. Bilan de l'azote minéral au cours du cycle du riz pluvial sous systèmes de culture en semis direct sous couverture végétale en sol ferralitique argileux à Madagascar. *Étude et Gestion des sols* 17 : 169-86.

Ramanantsoanirina A, Dusserre J, Shrestha S, Asch F, 2009. *Temperature effects on the phenology of upland rice grown along an altitude gradient in Madagascar.* Tropentag. Biophysical and socioeconomic frame conditions for the sustainable management of natural resource. 06-08/10/2009, Hamburg, Allemagne.

Randriamanantsoa R, Aberlenc HP, Ralisoa OB, Ratnadass A, Vercambre B, 2010. Les larves des *Scarabaeoidea* (*Insecta*, *Coleoptera*) en riziculture pluviale des régions de haute et moyenne altitudes du Centre de Madagascar. *Zoosystema* 32 : 19-72. doi: 10.5252/z2010n1a2.

Rasoavololona L, 2010. *État des lieux de la diffusion des variétés de riz pluvial : cas de Antsapanimahazo et d'Andranomanelatra*. Mémoire de fin d'étude ASJA, Antsirabe (Madagascar).

Satake T, Hayase H, 1970. Male sterility caused by cooling treatment at the young microspore stage in rice plants, V. Estimation of pollen developmental stage and the most sensitive stage to coolness. *Proceedings Crop Science, Society of Japan* 39 : 468-73.

Sester M, Raboin LM, Ramanantsoanirina A, Tharreau D, 2008. *Toward an integrated strategy to limit blast disease in upland rice.* Diversifying crop protection. Endure international conference, La Grande Motte, France. http://www.endurenetwork.eu/it/content/download/4750/39231/file/FulltextO.36.pdf.

Shirasawa S, Endo T, Nakagomi K, Yamaguchi M, Nishio T, 2012. Delimitation of a QTL region controlling cold tolerance at booting stage of a cultivar, `Lijiangxintuanheigu', in rice, *Oryza sativa* L.. *Theoretical and Applied Genetics* 124 : 937-46. doi: 10.1007/s00122-011-1758-6.

Sthapit BR, Joshia KD, Witcombe JR, 1996. Farmer participatory crop improvement. III. Participatory plant breeding, a case study for rice in Nepal. *Experimental Agriculture* 32 : 479-96. doi: 10.1017/S001447970000154X.

Touzard S, 2003. *La consommation et les critères de qualité du riz dans la commune d'Antsirabe I (Madagascar)*. Mémoire DESS Nutrition et alimentation dans les pays en voie de développement, Cirad.

UPDR/FAO, 2001. *Diagnostic et perspectives de développement de la filière riz à Madagascar.*. Antanarivo : ministère de l'Agriculture–FAO.

Vales M, Razafindrakoto J, 1997. De la précocité népalaise pour le riz d'altitude malgache. In : Poisson C, Rakotoarisoa J, éds. *Rice for highlands. Proceeding of the international conference on rice for highlands*. 29/03-05/04/1996. Antananarivo (Madagascar) ; Montpellier (France) : Cirad.

IN PRESS