Étude originale

Risques de stress hydrique sur les cultures dans les *Cerrados* brésiliens Du zonage régional à l'analyse des risques à l'échelle des exploitations familiales*

François Affholder[1]
Eduardo Delgado Assad[2]
Philippe Bonnal[3]
Fernando Antonio Macena Da Silva[4]
Francis Forest[5]
Jose Madeira Netto[4]
Éric Scopel[1,4]
Marc Corbeels[1,4]

[1] Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad), Unité mixte de recherche (UMR) System, 34398 Montpellier, Agro-M, Bâtiment 27, 2 place Viala, 34060 Montpellier France
<affholder@cirad.fr>
<eric.scopel@cirad.fr>

[2] Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) Agropecuária, Av André Tosello, 209 Barão Geraldo, Caixa Postal 6041, 13083-886 Campinas SP Brésil
<assad@norma.cnptia.embrapa.br>
<macena@cpac.embrapa.br>
<jose.madeira@embrapa.br>
<eric.scopel@cirad.fr>
<marc.corbeels@cirad.fr>

[3] Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad), Unité propre de recherche (UPR) « Politiques et Marchés » 34060 Montpellier France
<philippe.bonnal@cirad.fr>
<francis.forest@cirad.fr>

[4] Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) Cerrados, BR020, Km 18, Caixa Postal 08223, 73310–970, Planaltina DF Brésil

[5] Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad), Unité propre de recherche (UPR) « Systèmes de semis direct sous couverture végétale », TA 74/07, Bat 7, 34398 Montpellier cedex 5

Tirés à part : F. Affholder

Résumé

Cet article retrace les principales étapes d'une recherche franco-brésilienne portant sur la caractérisation des risques de stress hydrique dans les *Cerrados* brésiliens, avec l'objectif de faire des recommandations pour les réduire, à la fois en termes de pratiques culturales et en termes de politique d'assurance agricole. Un zonage agroclimatique à l'échelle régionale a permis d'améliorer le système de crédit de campagne et d'assurance agricole dont bénéficient les grandes exploitations agro-industrielles de la région. Le cas des exploitations familiales a été ensuite étudié en ayant recours à la modélisation des systèmes de culture et des exploitations. L'emploi de ces modèles a montré que les risques auxquels les exploitants sont confrontés sont très variables selon les milieux et peuvent limiter les possibilités d'intensification. Ces modèles pourraient être utilisés pour améliorer le système d'assurance existant et en particulier pour mieux tenir compte des contraintes propres aux divers types d'exploitations familiales.

Mots clés : modèle ; exploitation agricole ; analyse du risque ; pratique culturale ; Brésil.

Thèmes : systèmes agraires ; productions végétales ; économie et développement rural.

Abstract

Risks of crop water stress in the Brazilian *Cerrados*: From regional zoning to risk analysis at smallholders' level

This paper recalls the principal stages of a French-Brazilian research program on the management of farmers' production risks due to water stress in the Brazilian *Cerrados*. The objective was to make recommendations to lower the production risks, in terms of both agricultural management practices and insurance policies. An agro-climatic classification at a regional scale allowed for the creation of more efficient credit systems and agricultural insurance coverage, which were mostly beneficial to the large agro-industrial farmers of the region. Subsequently, the case of the smallholder farms was studied by using cropping systems and farm models. The application of these models showed that the risks with which small-scale farmers are confronted are very variable according to the environmental conditions and that they are a limiting factor for a possible intensification of the production. These models, which take into account the constraints specific to the various types of small-scale farms, might be used as a tool for improving existing agricultural insurance systems, particularly in order to better integrate the constraints specific to small-scale farms.

Key words: models; farms; risk analysis; cultivation; Brazil.

Subjects: farming systems; vegetal productions; economy and rural development.

* En hommage à notre collègue disparu, F.-N. Reyniers, pionnier de l'analyse des risques climatiques dans les *Cerrados*

La région de savane du plateau central Brésilien, les *Cerrados*, occupe près de 2 millions de km^2 *(figure 1)* soit près de 5 fois la superficie de la France. Au début des années 1960, Brasilia y est créée avec un mot d'ordre : faire de ces savanes clairsemées le grenier du Brésil. Ce pari est aujourd'hui gagné : les *Cerrados* fournissent plus du tiers de la production nationale de grains. Mais avant que ne commence cette colonisation agricole, il a fallu comprendre pourquoi le couvert végétal naturel était une savane alors que les précipitations semblaient suffisantes pour l'établissement d'une forêt plus dense. Après une décennie d'étude, les scientifiques ont trouvé la réponse à cette question (Alvim, 1996 ; Goodland et Ferri, 1979) : de nombreux sols acides de la région présentent des carences en calcium ou des teneurs en aluminium échangeable très élevées, toxiques pour les racines de la plupart des plantes cultivées. L'accès des plantes à l'eau stockée en profondeur dans le sol en est sévèrement limité (Ferri, 1980), ce qui les rend plus sensibles aux *veranicos*, épisodes secs qui se produisent durant la saison des pluies. Le chaulage des terres permet d'y remédier en partie, et le calcaire nécessaire pour cela est présent dans de nombreux endroits des *Cerrados* et donc bon marché : le feu vert pour la colonisation a pu être donné. Pour mieux inciter les candidats à cette aventure, un système d'assurance contre les risques de sécheresse a été créé. Cependant, ces risques dépendent non seulement de la variabilité spatiale du climat mais aussi de la nature des sols et du mode de conduite des cultures, en particulier du calage du cycle de la culture par rapport à la pluviosité.

Cet article retrace les principales étapes d'une recherche franco-brésilienne conduite depuis les années 1980 dans le but de préciser ces risques, avec l'objectif de fournir à la profession agricole des recommandations pour les réduire, en jouant à la fois sur les pratiques culturales et les modalités de la politique d'assurance agricole.

Figure 1. La région des Cerrados.

Figure 1. The Cerrados region.

Zonage régional des potentialités agroclimatiques

À partir du début des années 1980, des outils nouveaux – les modèles de simulation du bilan hydrique (Muchow et Bellamy, 1991) – ont été développés pour caractériser les risques de stress hydrique des cultures. Ceux-ci estiment des indicateurs de stress hydrique pour des cultures hypothétiques dont le seul facteur limitant leur croissance serait l'eau. En évaluant ces indicateurs pour des séries chronologiques de données climatiques fournies par un réseau de stations météorologiques, on peut en déduire les probabilités de stress hydrique en fonction du type de sol, du cultivar et de la date de semis. Ce sont ces calculs de probabilités qui ont permis par la suite d'établir un zonage agroclimatique.

BIPZON (Franquin et Forest, 1977 ; Forest, 1984) est l'un de ces modèles. Son calage et sa validation sur divers terrains d'Afrique et d'Amérique du Sud (Albergel *et al.*, 1991 ; Assad, 1986 ; Poss *et al.*, 1988 ; Freteau *et al.*, 1987), ont permis d'en préciser le domaine de validité et de l'appliquer au zonage des potentialités agroclimatiques des *Cerrados*. Le zonage ainsi réalisé a permis de mieux quantifier l'impact aggravant de la toxicité aluminique des sols sur les risques de stress hydrique (Reyniers *et al.*, 1987). Il a également mis en évidence la nécessité de disposer d'une gamme de cultivars adaptés aux différentes zones identifiées. Enfin, il a conduit à déterminer, par zones homogènes, les périodes de semis pour lesquelles les risques de stress hydrique étaient minimisés (Farias *et al.*, 2001 ; Sans *et al.*, 2001). Dans la plupart des zones étudiées, ces périodes de semis optimales sont très larges - de l'ordre de trois mois - témoignant d'une faible contrainte climatique sur le calendrier agricole.

On a cependant constaté des divergences importantes entre les pratiques de nombre de producteurs et ces périodes optimales de dates de semis. Ces divergences se traduisaient potentiellement (d'après le modèle) par des pertes de production importantes. Après enquêtes auprès des producteurs, il est apparu que deux raisons expliquaient la pratique de semis tardifs exposant la culture à des risques de stress hydrique accrus :

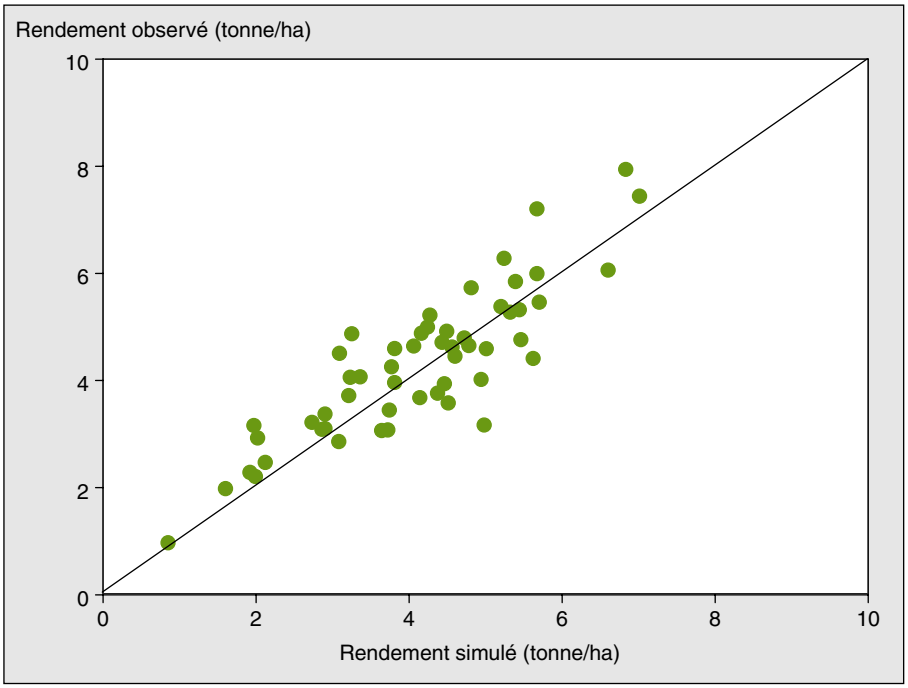

Figure 2. Validation locale de Stics modifié.

Figure 2. Local validation of Stics modified.

– la méconnaissance, par les organismes de crédit, des contraintes du calendrier agricole. Cette méconnaissance était telle que les crédits de campagne destinés à financer l'achat de semences et d'engrais n'étaient, dans certains cas, disponibles qu'après la période de semis optimale, mettant les producteurs devant l'alternative suivante : ou semer durant la bonne période et ainsi réduire les risques de stress hydrique ou retarder leur semis pour bénéficier d'un crédit de campagne ;
– la méconnaissance, également par les organismes en charge de l'assurance contre les risques agricoles, de l'incidence de la date de semis des cultures sur les risques climatiques, ce qui les conduisait à indemniser sans distinction les agriculteurs ayant assuré un bon calage de leurs cultures par rapport à la saison des pluies et ceux qui, en semant plus tard pour attendre le crédit de la banque, ont pris des risques plus élevés.
Face à cette situation, dans le but d'augmenter la production dans les *Cerrados* et d'assainir les comptes du système public d'assurance agricole, chroniquement déficitaire, l'État a instauré un système de primes d'assurance tenant compte de l'évolution des risques en fonction de la date de semis. Le taux des crédits de campagne a été également modifié et rendu dépendant de la date de semis, de manière à inciter les producteurs à adopter les dates de semis les moins risquées, la banque devant, en retour, pratiquer le taux le plus bas en cas d'incapacité de sa part à fournir le crédit en temps utile.
La réalisation de ce zonage à l'aide du modèle BIPZON a, en définitive, conduit à réduire les fluctuations de production dues au climat dans les *Cerrados* (Rossetti, 2001).
Cependant, cette politique de réduction des risques a surtout bénéficié aux très grandes exploitations, pratiquant la culture du maïs et du soja, et qui représentent 30 % de l'ensemble des exploitations et 70 % de l'espace cultivé de la région. Ce sont elles qui ont largement accès au système de crédit et d'assurance agricole, alors que les petits et moyens producteurs qui représentent la majorité des exploitations ont jusqu'ici peu profité de cette politique de réduction de risques, ces petites exploitations étant peu intégrées au marché et bénéficiant peu des mécanismes financiers de soutien à l'agriculture. De ce fait, et compte tenu de leurs systèmes de production plus diversifiés, l'analyse des risques à l'échelle du système de culture était d'ailleurs insuffisante pour rendre compte des risques auxquels elles étaient exposées. En outre, alors que les grandes exploitations capitalistes sont situées sur de vastes plateaux, les exploitations familiales se trouvent plutôt dans des zones au relief plus marqué dont les sols ont été relativement peu étudiés du fait de leur moindre extension spatiale.
Ces sols aggravaient-ils les risques de stress hydrique ? Était-ce par manque d'esprit d'entreprise que ces petits producteurs maintenaient des systèmes de culture extensifs jugés archaïques ? Ou ces systèmes pouvaient-ils s'expliquer par l'existence de risques climatiques objectivement plus élevés ?

Le développement de l'agriculture familiale, limité par le risque de sécheresse ?

Un terrain de référence : Silvânia

Pour répondre à ces questions, le *municipio*[1] de Silvânia, situé à 150 km au sud de Brasilia, est apparu comme un terrain d'étude bien adapté, puisqu'on y rencontrait des exploitations de subsistance, proches du modèle généralement rencontré dans les *Cerrados*, et en même temps des exploitations familiales qui échappaient à ce modèle et s'étaient fortement modernisées. En effet, une véritable révolution agricole a eu lieu dans cette commune (Bainville *et al.*, 2005) qui s'est traduite par une tendance générale à l'intensification agricole et à une spécialisation laitière des exploitations familiales. Néanmoins, sur l'ensemble des exploitations du *municipio*, il existe une grande diversité dans le degré d'intégration au marché, de spécialisation et d'intensification.
Un réseau de fermes de référence, suivi par un projet de recherches Empresa Brasileira de pesquisa agropecuária-Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Embrapa/Cirad) (le « projet Silvânia ») y donnait accès à une connaissance approfondie du fonctionnement de ces divers

[1] Municipalité ou commune, unité administrative de base au Brésil.

Tableau 1. Effet du ruissellement sur les stress hydriques et azotés.

Table 1. Effect of runoff on water and nitrogen stresses.

Profondeur du sol (cm)	50				180			
N engrais (kg N/ha)	0		80		0		80	
Ruissellement simulé	sans	avec	sans	avec	sans	avec	sans	avec
str1	0,96	0,96	0,96	0,96	0,99	0,99	0,99	0,99
str2	0,87	0,87	0,85	0,85	0,99	0,99	0,99	0,99
inn1	0,69	0,70	0,78	0,79	0,75	0,76	0,87	0,88
inn2	0,48	0,48	0,62	0,62	0,55	0,57	0,78	0,8
Qles (kg/ha)	53	50	82	77	27	23	32	26
Rendement (T/ha)	1,52	1,58	2,91	2,86	2,83	3,01	5,45	5,62
CV (%)	42,1	39,8	29,5	29,3	28,9	28,5	24,9	24,9

Date de semis du jour 334 (28 novembre). Moyennes sur 21 ans des valeurs simulées des stress hydriques avant (str1) et après floraison (str2), des stress azotés avant (inn1) et après (inn2) floraison, de la quantité d'azote lessivé sous la zone racinaire maxi (Qles) et des rendements. C.V : coefficient de variation des rendements résultant de la variabilité interannuelle des pluies pour chaque modalité simulée. Cas avec ruissellement : Ruissellement = 0,3 x pluie si pluie > 10 mm.

types d'exploitation. Les systèmes de culture pratiqués étaient eux-mêmes très variables en ce qui concerne le degré de mécanisation et l'utilisation des intrants. Enfin, on y trouvait la plupart des sols exploités par les exploitations familiales des *Cerrados*.

Risque hydrique à l'échelle des parcelles cultivées chez les petits producteurs

L'analyse des risques de stress hydrique à l'échelle des parcelles cultivées a été limitée au cas du maïs, car cette culture était celle que l'évolution vers la spécialisation laitière conduisait à intensifier, et aussi celle dont les performances avaient l'impact le plus élevé sur l'économie des exploitations. Un diagnostic agronomique a d'abord permis de repérer les principales interactions entre la conduite des systèmes de culture et les risques de stress hydrique. Il a en particulier montré que sur les cambisols sur versants à pierrosité souvent élevée en surface et à topographie locale irrégulière, le semis à l'aide d'un semoir attelé à un tracteur était particulièrement difficile à réussir : on observait fréquemment des peuplements végétaux faibles et donc favorables au développement des mauvaises herbes. Cela était souvent aggravé par le fait que les règles de gestion des tracteurs et semoirs, en propriété collective, ne permettaient pas toujours d'adapter la date d'intervention aux conditions hydriques du sol, ni d'enchaîner immédiatement hersage final et semis, ce qui favorisait encore la concurrence des mauvaises herbes vis-à-vis de la culture (Affholder et Scopel, 2001).

Un modèle de simulation de culture, STICS (Brisson *et al*., 1998), a été modifié pour y incorporer de nouvelles fonctions simulant les effets sur la croissance et le rendement des cultures de la concurrence des adventices, ainsi que de la toxicité

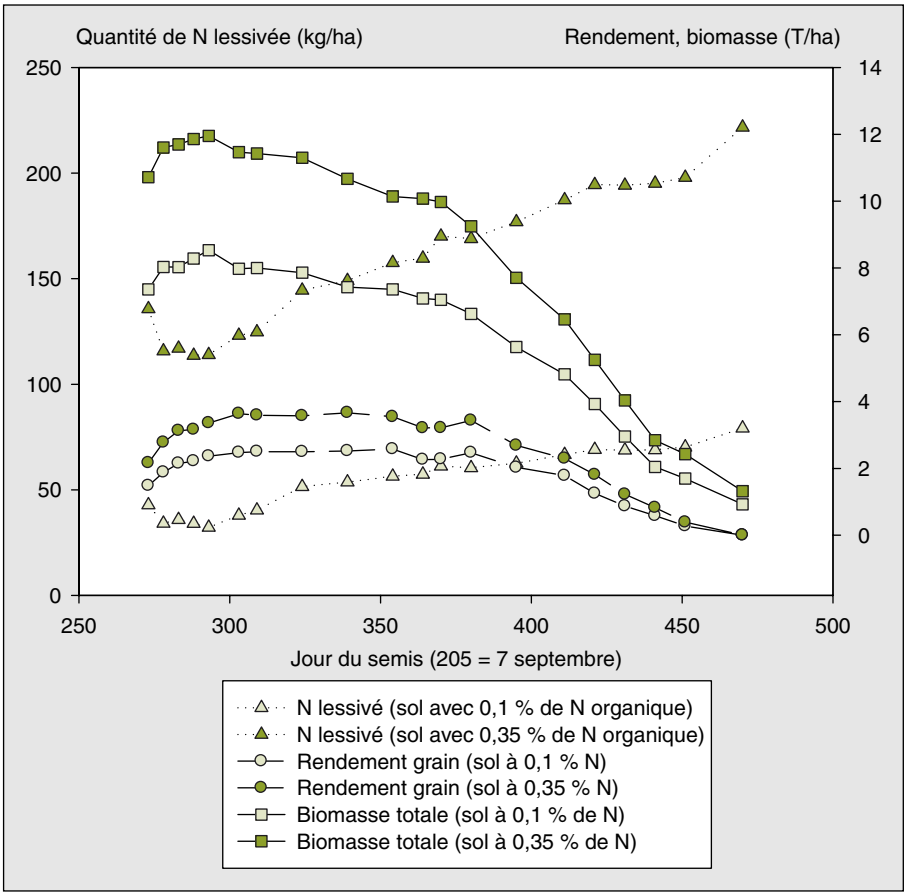

Figure 3. Moyennes sur 21 années des productivités et pertes d'azote par lessivage en fonction de la date de semis.

Figure 3. 21-year average of productivities and nitrogen losses by drainage, as a function of sowing date.

aluminique, facteurs limitants identifiés lors du diagnostic et non pris en compte dans STICS. Le modèle obtenu a été calé et validé localement *(figure 2)* (Affholder *et al*., 2003). Ce modèle a ensuite été appliqué à l'analyse des risques climatiques.

Les simulations ont montré le faible impact du ruissellement sur les risques de stress hydrique. En effet, les précipitations sont en général largement excédentaires pendant la phase de croissance de la culture, de telle sorte qu'au début de la période où peuvent se produire les *veranicos*, la réserve utile du sol est presque toujours remplie (et cela est d'autant plus vrai que la réserve utile du sol est faible), même avec des ruissellements de l'ordre de 30 % du total des précipitations antérieures. En revanche, les risques augmentent nettement lorsque la réserve utile diminue *(tableau 1)*. Ils sont particulièrement élevés pour les faibles réserves utiles des sols peu profonds et pierreux sur versants.

L'emploi du modèle STICS modifié a également permis de tester l'influence des dates de semis sur le risque de stress hydrique, en tenant compte d'un certain nombre de facteurs tels que les propriétés hydriques du sol, la densité de semis, les adventices et leur contrôle, le statut organique du sol et la fertilisation azotée. Du strict point de vue du risque exprimé par la variabilité des rendements, la période de semis optimale se réduit lorsque la réserve utile du sol diminue, et lorsqu'augmentent la dose d'azote apportée, le stock de N organique du sol ou la densité de peuplement. La présence d'adventices, favorisée par de mauvaises techniques d'installation de la culture et de sarclage, réduit également la période optimale de semis. Ainsi, plus le milieu et les conditions d'accès des producteurs aux machines agricoles sont contraignants, plus étroite est la période de semis favorable à une moindre prise de risque. En outre, lorsque cette période se réduit, c'est plutôt par sa fin, la date de début de période favorable restant remarquablement stable. À l'intérieur de cette période, et pour les niveaux de fertilisation azotée testés, les pertes d'azote par lessivage augmentent lorsque la date de semis est plus tardive, mais sans que cela ait des conséquences notables sur le rendement en grain *(figure 3)*. En revanche, la biomasse totale produite diminue lorsque la date de semis est retardée, de telle sorte que pour une économie d'azote à long terme, et dans la mesure où les résidus sont incorporés au sol ou valorisés par l'élevage, il est intéressant de chercher à effectuer un semis le plus précoce possible dans cette période.

Enfin et plus généralement, les simulations ont permis de comparer les risques climatiques, associés à différents niveaux d'intensification de la culture de maïs en fonction des grands types de sols du *municipio*. Il en résulte clairement que les gains de productivité permis par l'intensification sont très variables selon les sols. Ils sont particulièrement réduits dans les milieux les plus contraignants, du fait des difficultés de mise en culture dues aux règles de gestion collective du matériel *(figure 4)* (Affholder et Scopel, 2001). Les associations de producteurs ont ainsi pris conscience de l'importance de l'amélioration ces règles pour mieux adapter les séquences de mise en culture aux conditions de sol de leurs membres.

Le risque à l'échelle des exploitations

Ainsi, les risques associés à la culture de maïs sont très variables selon les milieux, rendant plus ou moins difficile l'intensification de la culture de maïs, Mais est-ce suffisant pour expliquer que certaines exploitations soient restées à l'écart du mouvement d'intensification ? Sans prétendre apporter une réponse générale à cette question, l'étude de deux exploitations très contrastées apporte un certain nombre d'éléments de réponse. Cette étude a été conduite à l'aide d'un modèle en programmation linéaire simulant les choix stratégiques d'activités des exploitations agricoles (Bonnal *et al*., 2001). Ce modèle avait été construit à l'aide de données acquises par le suivi du réseau de fermes de référence. Le modèle STICS modifié a permis d'établir pour ce modèle

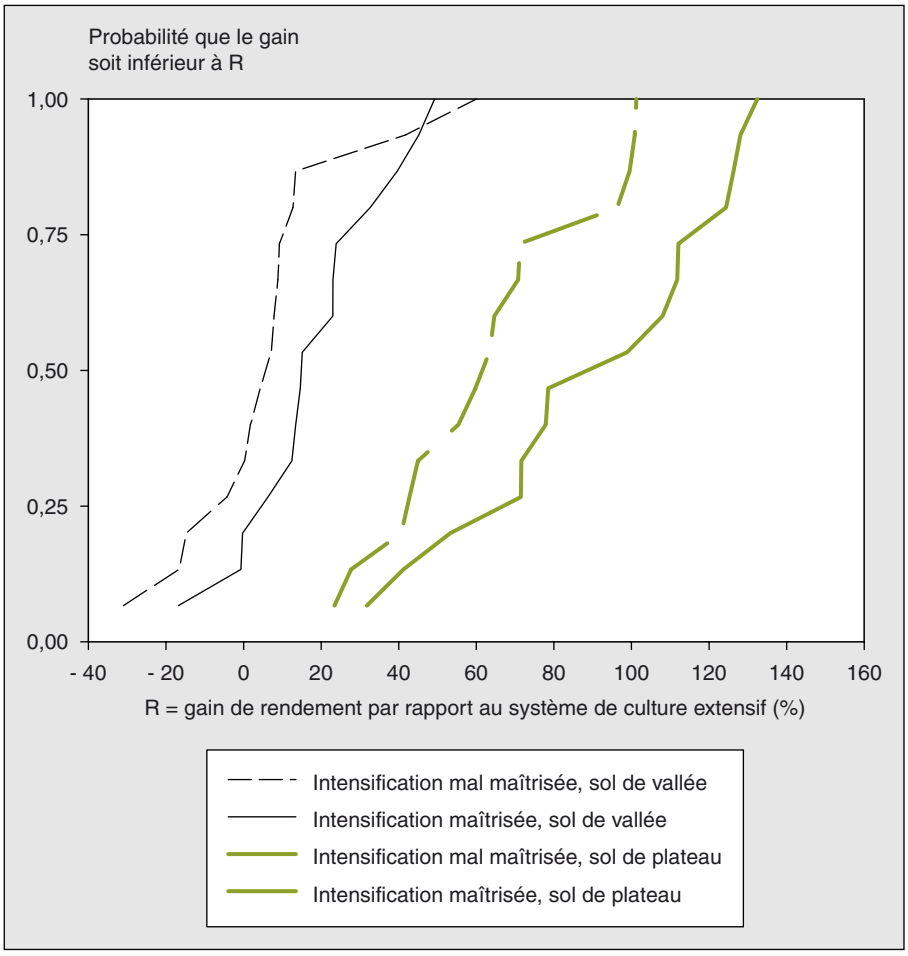

Figure 4. Distributions interannuelles des gains de rendements permis par l'intensification du maïs.

Figure 4. Inter-annual distributions of yield increases allowed by maize intensification.

Traits pointillés: intensification mal maîtrisée en raison de règles contraignantes de gestion des tracteurs collectifs. Traits continus: intensification bien maîtrisée. Traits fins: sols de vallée (sols alluviaux et cambisols), traits épais: sols de plateau (latosols).

d'exploitation, des simulations de rendement en fonction de systèmes de culture de maïs plus ou moins intensifiés, pour des chroniques climatiques. La variabilité interannuelle des prix, également facteur important du risque, était prise en compte en utilisant le modèle d'exploitation durant 6 années consécutives au cours desquelles les prix des produits et des intrants avaient fortement varié, de manière à évaluer l'impact du facteur prix/année sur la solution simulée par le modèle. La cohérence de ce dernier avait été vérifiée en comparant les solutions simulées aux choix réels faits par les agriculteurs du réseau de fermes de référence.

Les deux exploitations étudiées sont situées, l'une (A) sur une zone relativement favorable du point de vue des sols, et l'autre (B) sur une toposéquence contraignante. Les surfaces totales des exploitations sont notablement différentes, mais les surfaces en terre cultivable sont identiques, la différence portant sur la zone utilisable en pâturages naturels ou en forêt, dont les productivités sont considérées comme négligeables dans le modèle. Les ressources en force de travail sont comparables. Le coefficient d'aversion au risque, qui permet de régler la contrainte que l'on impose à la variabilité des revenus, était paramétré à une valeur identique pour les deux exploitations.

Or on constate que, contrairement à celle située en zone favorable, l'exploitation « virtuelle » située en zone défavorable ne dispose pas d'un système de culture de maïs suffisamment efficace dans cette zone pour justifier le choix de la spécialisation laitière *(figure 5A et 5B)*. Ce résultat indique qu'il n'est pas nécessaire d'invoquer un état d'esprit différent des deux producteurs pour justifier des choix contrastés. Par ailleurs, l'évolution des prix au cours du temps, si elle influence le revenu des exploitations, n'a pas de conséquence sur les choix stratégiques d'activités tels qu'ils ressortent de la simulation.

Dans la réalité, l'exploitation B est placée dans un environnement économique plus contraignant que l'exploitation A, du fait de sa plus grande distance au marché, entraînant des prix plus bas pour les produits et des prix plus élevés pour les intrants. Le fait que, dans la simulation, l'exploitation B, à système de prix équivalent à celui de l'exploitation A, ne s'oriente pas vers la spécialisation laitière, indique qu'il n'est pas non plus nécessaire d'invoquer l'environnement

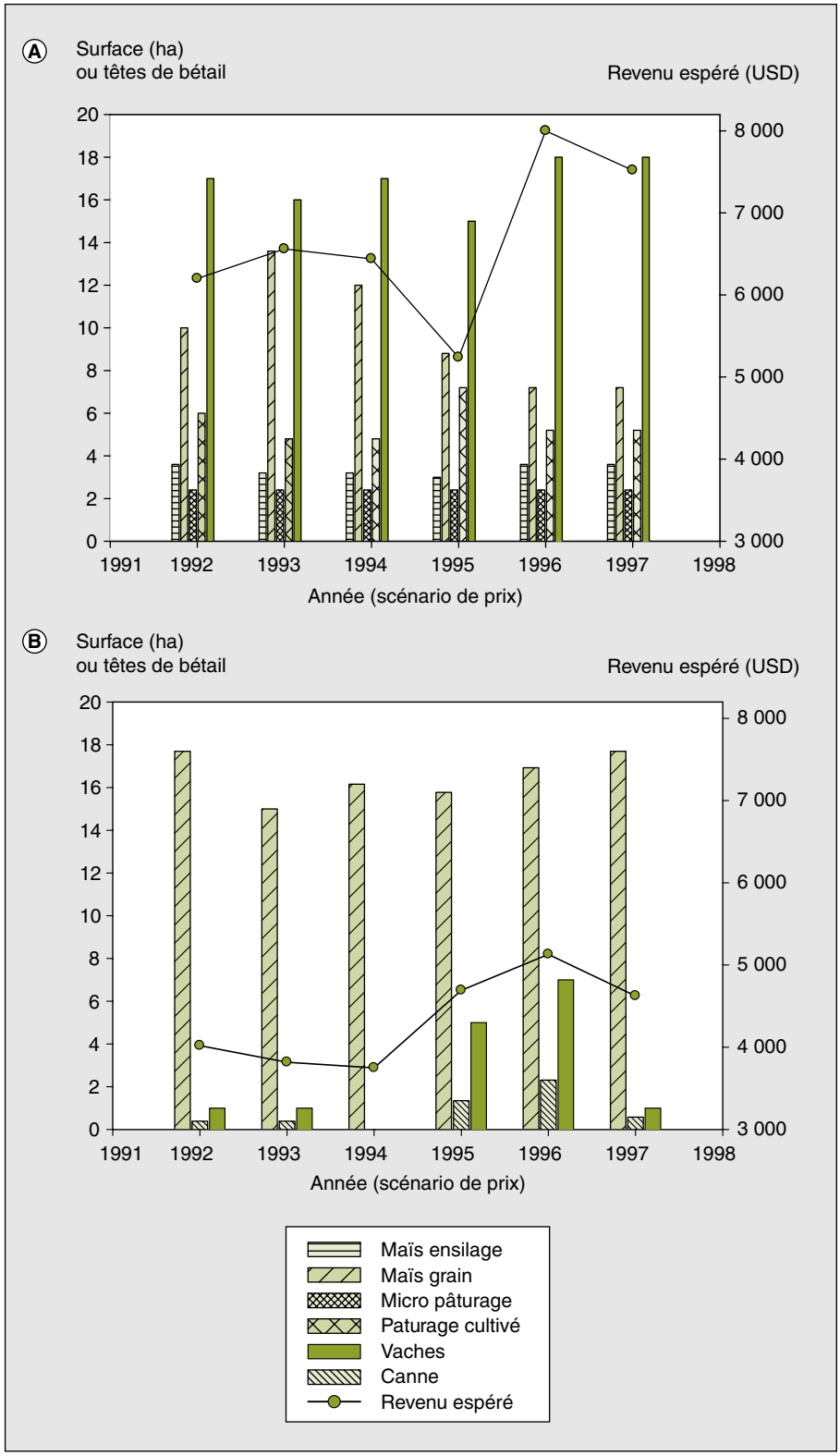

Figure 5. Simulation du choix d'activité et du revenu espéré en fonction de l'évolution des prix de 1992 à 1997 (Bonnal *et al.*, 2001).

Figure 5. Simulated sets of activities and expected income, as a function of prices from 1992 to 1997 (Bonnal *et al.*, 2001).

A) exploitation A de 51 hectares dont 15 sur sols favorables ; B) exploitation B de 20 hectares sur sols peu favorables.

économique pour expliquer ces différences. Les contraintes biophysiques sont suffisantes pour expliquer les différences de système de production entre ces deux exploitations.

Les choix des deux exploitations, à la fin de la période étudiée par simulation, sont conformes à ceux faits dans la réalité. Au début de la période, les deux exploitations pratiquaient des systèmes diversifiés extensifs. Comme cela a été démontré par ailleurs (Bainville, 2000), c'est bien un changement de l'environnement économique de l'ensemble des exploitations (accès au crédit, réduction des coûts de transaction et acquisition d'équipement collectif grâce aux associations de producteurs) qui a permis cette révolution agricole dont l'exploitation A a bénéficié comme beaucoup d'autres dans la région, et qui a entraîné une augmentation spectaculaire de leurs revenus. Mais dans nos simulations nous avons ignoré les charges d'acquisition des machines agricoles et du bétail, et donc placé en fait nos exploitations dans une situation de crédit illimité. Cela explique que dans la simulation de l'exploitation A celle-ci ait choisi la spécialité laitière dès le début de la période. Mais surtout cela indique qu'un système de crédit plus favorable ne suffirait probablement pas à pousser l'exploitation B à s'engager dans la voie de la spécialisation laitière. Notre étude mériterait d'être complétée par une analyse de la sensibilité de l'exploitation virtuelle B à la diminution du risque ainsi qu'à l'obtention de prix plus favorables, de manière à évaluer dans quelle mesure une assurance agricole ou une action en faveur des prix pourraient l'amener à rejoindre la trajectoire des autres exploitations. Elle mériterait aussi d'être affinée pour mieux tenir compte de la diversité des exploitations.

Conclusion

Le cas des *Cerrados* présenté ici illustre l'intérêt des zonages agroclimatiques lorsqu'ils sont utilisés pour élaborer des mesures financières de compensation des risques de sécheresse, pour adapter les crédits de campagne au calendrier agricole et pour inciter les agriculteurs à améliorer leurs pratiques culturales afin de réduire les risques climatiques. Notre étude a aussi montré que tous les producteurs ne sont pas égaux devant les risques de stress hydrique. Une étude fine des interactions entre ces risques et les systèmes de culture, et l'analyse de leurs conséquences à l'échelle de l'exploitation, démontrent que ces risques ont joué un rôle important dans la différenciation des exploitations familiales au cours d'une révolution agricole locale. Cette étude mérite cependant d'être complétée pour évaluer la possibilité d'adapter les mécanismes financiers de compensation des risques de stress hydrique à la diversité des exploitations agricoles. ■

Références

Affholder F, Scopel E. Apports de la modélisation des cultures pour le diagnostic agronomique régional : application au cas du maïs chez les petits producteurs des Cerrados brésiliens. In : Malézieux E, Trébuil G, Jaeger M, eds. *Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision*. Montpellier : Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad), 2001.

Affholder F, Scopel E, Madeira Neto J, Capillon A. Diagnosis of the productivity gap using a crop model, Methodology and case study of small-scale maize production in central Brazil. *Agronomie* 2003 ; 23 : 305-25.

Albergel J, Perez P, Vaskmann M. *Amélioration des modèles de bilan hydrique sur parcelle par la prise en considération des états de surface*. Presented at Soil water balance in the Sudano-Sahelian zone, Niamey, Niger. 1991.

Alvim PT. *Repensando a teoria da formação dos campos cerrados*. Presented at Simpósio sobre o Cerrado, 8, Biodiversidade e produção sustentável de alimentos e fibras nos Cerrados, Brasilia, DF. 1996.

Assad ED. *Simulation de l'irrigation et du drainage pour les cultures pluviales de riz et de maïs en sols de bas-fonds à Brasilia, Rep. 13*. Montpellier : Institut de recherches agronomiques tropicales et des cultures vivrières (Irat), 1986.

Bainville S. *Le développement de l'agriculture familiale : processus d'interactions entre changements techniques et changements institutionnels. Un "cas d'école" : la commune de Silvânia-Brésil*. Ph. D. thesis. École nationale supérieure agronomique de Montpellier (Ensam), Montpellier, France, 2000.

Bainville S, Affholder F, Figuié M, Madeira Neto J. Les transformations de l'agriculture familiale de la commune de Silvânia : une petite révolution agricole dans les Cerrados brésiliens. *Cah Agric* 2005 ; 14 : 103-10.

Bonnal P, Affholder F, Jourdain D, Scopel E. Un modèle bioéconomique pour l'analyse du risque. In : Malézieux E, Trébuil G, Jaeger M, eds. *Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision*. Montpellier : Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad), 2001.

Brisson N, Mary B, Ripoche D, *et al.* STICS : a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie* 1998 ; 8 : 311-46.

Farias JRB, Assad ED, Almeida IR, *et al.* Characterization of the water deficit for brazilian soybean production region. *Revista Brasileira de Agrometeorologia* 2001 ; 9 : 415-21.

Ferri MG. *Vegetação brasileira*. São Paulo ; Belo Horizonte : EDUSP/Itatiaia, 1980.

Forest F. *Simulation du bilan hydrique des cultures pluviales. Présentation et utilisation du logiciel BIP*. Montpellier : Institut de recherches agronomiques tropicales et des cultures vivrières (Irat) ; Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad), 1984.

Franquin P, Forest F. Des programmes pour l'évaluation et l'analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique. *Agron Trop* 1977 ; 32 : 7-11.

Freteaud JP, Poss R, Saragoni H. Ajustement d'un modèle de bilan hydrique à des mesures tensio-neutroniques *in situ* sous culture de maïs. *Agron Trop* 1987 ; 42 : 94-103.

Goodland RA, Ferri MG. *Ecologia do Cerrado*. Itatiaia : Belo Horizonte, 1979.

Muchow RC, Bellamy JA, eds. *Climatic Risk in Crop Production : Models and Management for Semiarid Tropics and Subtropics*. Proc. Int. Symposium. Brisbane, Australia, july 1990. Wallingford (United Kingdom) : CAB International, 1991.

Poss R, Saragoni H, Imbernon J. Bilan hydrique simulé du maïs au Togo méridional. *Agron Trop* 1988 ; 43 : 18-29.

Reyniers FN, Steinmetz S, Forest F. *Impact de l'enracinement et de la réserve en eau utile sur la productivité du riz pluvial au Brésil. Mémoires et travaux de l'IRAT*. Montpellier : Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad), 1987.

Rossetti LA. Applying agricultural zoning for financing and rural security in Brazil : Agricultural policy and actuarial aspects. *Revista Brasileira de Agrometeorologia* 2001 ; 9 : 378-86.

Sans LM, Assad ED, Guimarães DP, Avellar G. Climatic Risks zonning for maize production in west-center region and Minas Gerais state, Brazil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia* 2001 ; 9 : 520-7.