

Les assurances agricoles basées sur des indices météorologiques : bilan des connaissances et agenda de recherche

Antoine Leblois, Centre International de Recherches sur l'Environnement et le Développement (CIRED), 94736 Nogent-sur-Marne Cedex, leblois@centre-cired.fr

Philippe Quirion, CIRED, Laboratoire de météorologie dynamique (LMD), 75005 Paris, quirion@centre-cired.fr

Résumé

Les agriculteurs des pays en développement n'ont en général pas accès aux assurances traditionnelles contre le risque de mauvaise récolte. Les assurances basées sur des indices météorologiques constituent une innovation récente potentiellement à même de limiter les conséquences d'événements météorologiques néfastes pour les récoltes, comme une mauvaise saison des pluies. Toutefois, la mise en œuvre d'une telle innovation, dont la simplicité conceptuelle est un réel avantage, se heurte à de nombreux obstacles tant méthodologiques qu'empiriques. Nous recensons d'abord dans cet article les différentes expériences d'assurances agricoles basées sur des indices météorologiques pour ensuite étudier la méthodologie sous-jacente à l'étude de tels projets et les enjeux de leur mise en œuvre et de leur évaluation.

Mots-clés : assurances agricoles, risque climatique, trappe à pauvreté.

Codes JEL : G21, Q18, Q54.

Introduction

Les assurances agricoles dites « traditionnelles », c'est-à-dire fondées sur la constatation et l'évaluation d'un dommage aux récoltes, existent depuis les années 1930 aux États-Unis. Elles se sont récemment développées plus spécifiquement sous la forme d'assurances multirisques (grêle, gel, sécheresse) et d'assurances contre les catastrophes naturelles. Pour des raisons que nous présentons au cours de cette introduction, ces assurances ne se sont développées largement que là où elles sont massivement subventionnées. Ainsi, aux États-Unis, l'État fédéral paye environ la moitié des primes d'assurance (Hartell *et al.*, 2006).

En parallèle, depuis les années 1990 sont apparus les « dérivés climatiques », des produits financiers permettant à certaines entreprises de se protéger contre les aléas du climat. Le présent article est consacré à un nouveau produit, intermédiaire entre ces deux marchés et potentiellement intéressant pour l'agriculture dans les pays du Sud : ce sont les assurances agricoles basées sur les indices météorologiques (AABIM). Initiées par des travaux académiques (Halcrow, 1948 ; Dandekar, 1977), les AABIM ont fait l'objet de nombreux projets pilotes et d'un développement à grande échelle dans quelques pays (Tableau 1, cf. DeJanvry *et al.*, 2011 pour une revue plus récente). Le principe des AABIM consiste à indemniser les agriculteurs si un indice défini à partir de variables météorologiques passe un certain seuil, en échange d'une prime d'assurance annuelle. Dans la plupart des cas, il s'agit d'assurances contre la sécheresse, qui constitue l'un des principaux risques pour les cultures dans les zones de mousson comme l'Afrique de l'Ouest ou de l'Est, ou encore l'Inde. Dans ces régions, où l'irrigation est généralement peu développée¹, les rendements agricoles dépendent en effet de la saison des pluies, très variable d'une année sur l'autre.

Par rapport aux assurances agricoles traditionnelles, les AABIM présentent un avantage majeur et un inconvénient qui ne l'est pas moins. Le principal avantage d'une AABIM est d'éviter l'asymétrie d'information

¹ Ainsi, en Afrique subsaharienne, seulement 4% des terres agricoles sont irriguées (Banque mondiale, 2007).

entre assureur et assuré, fréquente dans les assurances traditionnelles (Quiggin *et al.*, 1994). En effet, si les stations météorologiques qui fournissent les données entrant dans le calcul de l'indice sont suffisamment sécurisées, les deux parties bénéficient de la même information sur l'indice. Au contraire, les assurances traditionnelles indemnisent les agriculteurs en fonction d'un dommage aux récoltes dont l'estimation présente un coût important, répercuté dans les primes d'assurance. Le principal (l'assureur) doit en effet vérifier les revendications de l'agent (l'assuré).

Par ailleurs, cette asymétrie d'information ouvre la possibilité de phénomènes d'aléa moral (les agriculteurs limitant leur travail ou l'application d'intrants agricoles sur certaines parcelles sachant qu'ils seront indemnisés si la récolte est mauvaise) et d'anti-sélection (les agriculteurs les plus susceptibles d'avoir des mauvaises récoltes ont davantage intérêt à s'assurer). Limiter les conséquences de ces asymétries d'information passe par une analyse de la cause des mauvaises récoltes, ce qui accroît encore les coûts et les délais de paiement et réduit la transparence des indemnités. Une AABIM peut au contraire fournir une indemnité transparente, très rapide (dès la fin de la saison des pluies) et à un coût d'administration faible, d'autant que les indices sont généralement construits sur la base de données provenant de stations météorologiques préexistantes, gérées par les services météorologiques nationaux.

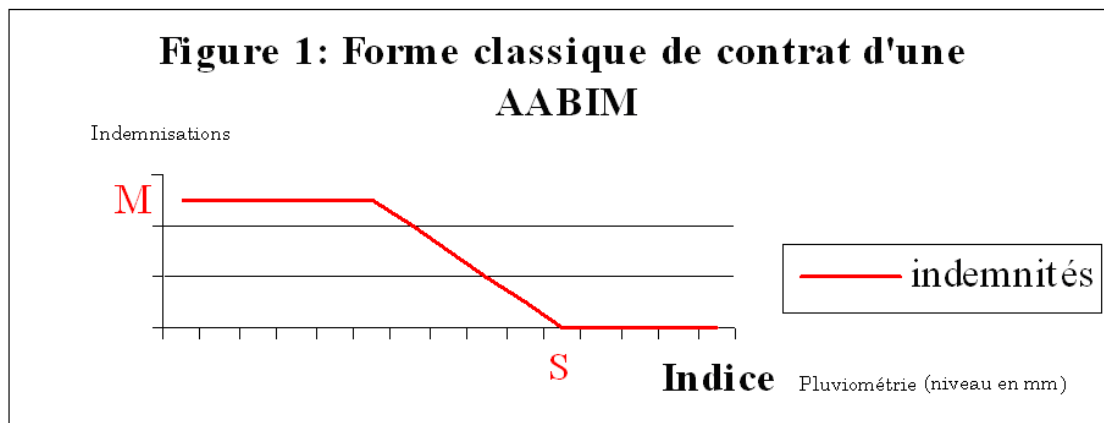
Le principal inconvénient des AABIM, toujours par rapport aux assurances agricoles traditionnelles, est le risque de base (*basis risk*), c'est-à-dire l'imparfaite corrélation entre l'indice et le rendement agricole (ou entre l'indice et le revenu des agriculteurs ; Skees, 2003). Ce risque de base peut provenir de l'hétérogénéité de la météorologie au sein de la zone couverte par une même station météorologique. Une autre source du risque de base réside dans les conséquences différentes d'un même événement météorologique pour deux agriculteurs. Cette hétérogénéité peut provenir d'une multitude de facteurs : différences dans les pratiques culturales, dans le type de sol, etc.

Dans cet article, nous présentons dans un premier temps les principales AABIM en fonctionnement et en projet, ainsi que les méthodes utilisées pour élaborer de tels contrats d'assurance. Dans une seconde partie, nous discutons les pistes de recherche ouvertes par le développement de ces assurances.

1. Méthodes utilisées dans le développement d'AABIM.

1.2. Forme canonique d'un contrat

La construction des contrats d'AABIM est relativement homogène au sein de la littérature. L'indemnité éventuellement versée par l'assureur à l'assuré dépend d'un indice météorologique, par exemple le cumul des précipitations sur une période donnée. La période de mesure de l'indice est généralement l'ensemble d'un cycle de croissance d'une plante, celui-ci étant souvent divisé en plusieurs phases. Comme le montre la figure 1, l'indemnité est généralement proportionnelle à l'écart entre la valeur constatée de l'indice et un seuil de déclenchement S , mais ne peut dépasser une valeur maximale M . Ces niveaux sont généralement définis de manière spécifique pour une plante, une phase de croissance et pour une région particulière. Ils représentent les paramètres-clés du contrat.



1.3. Choix de l'indice

La minimisation du risque de base revient à chercher une relation solide entre rendements et indice. La réalisation de l'indice au cours du temps est utilisée comme *proxy* des rendements et donc du revenu agricole, ou en tout cas comme *proxy* des mauvais rendements : peu importe en effet que l'indice permette de prévoir les rendements particulièrement bons. Ceci est possible à travers la combinaison de plusieurs variables contingentes. La limitation des données disponibles et la recherche de transparence orientent néanmoins les recherches vers des indices simples et faciles à mesurer. Il y a donc un arbitrage entre simplicité du contrat et optimisation de la relation indice – rendements par la construction de l'indice et le choix des variables sous-jacentes.

La grande majorité des AABIM, qu'elles soient à l'état de réalisation ou de projet, proposant une couverture contre le manque de pluie, nous nous limitons à cette catégorie d'indices dans la suite de cette section présentés par degré de complexité croissante. Signalons cependant que d'autres AABIM proposent une couverture contre l'excès de pluie ou contre le froid.

1.3.1. Le cumul de pluie et ses variantes

L'indice le plus simple, le cumul de pluie sur la saison de culture, n'est jamais retenu en pratique car il néglige la manière dont cette pluie se répartit au cours de la saison. Une première sophistication consiste à écrêter les pluies en ne prenant pas en compte les pluies au-delà d'un plafond journalier. En effet, au mieux cet excès d'eau ne peut être capté par la plante et va être éliminé, essentiellement par ruissellement ; au pire il sera néfaste en réduisant l'éclosion des graines ou en lessivant les nutriments. On dit de ces contrats qu'ils sont capés (*capped contracts*). Ces corrections sont utilisées dans les AABIM opérationnelles en Inde et au Malawi où les pluies sont capées à 60 mm/jour. De même, les pluies quotidiennes inférieures à un seuil (typiquement 0,85 à 1,5 mm/jour ; Odekunle, 2004) sont souvent éliminées, car l'eau s'évapore sans pouvoir être captée par la plante.

Une seconde sophistication consiste à séparer la saison de culture en plusieurs périodes (typiquement trois à cinq) correspondant aux différentes phases de croissance de la plante. En effet, la résistance de la plante au manque de pluie dépend de la phase de croissance. Le problème majeur, pour utiliser cette information dans un contrat d'assurance, est que le calendrier des phases de croissance d'une plante dépend de la date de semis, décidée par l'agriculteur. Pour pallier ce problème, le projet d'AABIM pour les producteurs d'arachides au Sénégal (Ceraas, 2008) simule une date de semis optimale au sein d'une fenêtre définie à l'avance. On peut aussi définir la date de semis de manière arbitraire (comme cela a été fait au Malawi), en considérant que les agriculteurs vont prendre en compte ce paramètre imposé. Cependant, l'hétérogénéité du déclenchement des saisons des pluies ainsi que celle des pratiques agricoles au sein d'un territoire peut rendre complexe l'insertion d'une telle clause dans le contrat.

1.3.2. Le bilan hydrique et les indices de stress hydrique

Les expériences indienne, éthiopienne et malawite d'AABIM utilisent le bilan hydrique. Il est établi par comparaison entre les apports et les pertes en eau, de manière spécifique à une plante et idéalement pour un lieu précis (parcelle, champ ou région). En agriculture pluviale, les apports en eau sont les précipitations, les pertes essentiellement dues à l'évapotranspiration² (ET) et au ruissellement. Si la somme des apports en eau est supérieure à celle des pertes, on est en situation excédentaire et inversement. Le calcul de l'ET (Allen *et al.*, 1998) passe par l'évaluation de l'évapotranspiration potentielle (ETP) qui peut être soit mesurée directement à partir de case lysimétrique soit calculée par des méthodes indirectes en fonction de la radiation solaire, du vent, des températures maximales et minimales de la journée, de l'humidité relative, de la longitude, de la latitude et de l'altitude de la plantation. Elle nécessite donc une grande précision des données de terrain.

Les indices de stress hydrique (à l'instar du WRSI : *Water Requirement Satisfaction Index*) sont fondés sur cette méthodologie, la plupart du temps sur la base de données décennales, une décennie représentant dix jours. L'indice évalue l'apport réel en eau relativement au maximum potentiellement consommé, et assume une relation entre croissance de la plante et cette disponibilité réelle de la ressource eau.

Une telle méthode a été utilisée dans le cadre de l'adaptation au changement climatique par Cooper *et al.* (2008) et dans le cadre de l'expérience d'AABIM en 2006 en Éthiopie, en 2007 au Malawi et en Inde depuis 2003. Cette méthode est plus largement utilisée dans l'ensemble de projets de la Banque mondiale dans ce domaine, sous une forme améliorée de la première de la FAO, nommé UsGC/Fewsnet WRSI ; décrite par Senay et Verdin (2004).

1.3.3. Indices de sécheresse

Il existe deux types de sécheresses : la sécheresse de l'air qui augmente l'ET de la plante et celle du sol qui capture le risque pendant la croissance végétative. La sécheresse de l'air (caractérisée par de longues périodes sans précipitations et des températures élevées, donc une humidité de l'air assez faible) réduit fortement les rendements des plantes. Il en est de même pour le manque d'humidité dans le sol qui réduit le développement des plantes.

Un seul indice de ce type a été utilisé dans le cadre des AABIM, pour un projet pilote en Ukraine en 2005 (cf. Tab. 1). Il s'agit de l'indice SHR (*Selyaninov Hydrothermal Ratio index*), qui quantifie la sécheresse de l'air sur la base des pluies et des degrés-jours (températures) selon un pas de temps quotidien. Son principal défaut est de ne pas prendre en compte l'humidité du sol, plus rarement disponible que la température et la pluviométrie.

1.3.4. Les modèles mécanistes

Les modèles que la littérature agronomique appelle mécanistes, simulent la croissance et le développement des plantes dans le temps, en fonction des paramètres environnementaux disponibles. Ces modèles qui cherchent à représenter le fonctionnement de la plante à l'instar de modèles dynamiques basés sur le bilan hydrique, sont finalement les plus à même d'estimer les rendements avec précision. Cependant, leur utilisation se heurte encore à la nécessité de détenir des données extrêmement précises (au niveau de la parcelle) dont l'existence sous forme de séries temporelles est très limitée, voire inexistante pour des zones étendues, particulièrement dans les pays en développement. Le modèle DSSAT est utilisé dans des analyses préliminaires d'AABIM, par exemple par Osgood *et al.* (2007) ou encore par Diaz Nieto *et al.* (2006) étudiant le cas du Nicaragua. Il n'est toutefois pas recommandé (Osgood *et al.*, 2007) d'utiliser un modèle trop complexe comme

² Quantité d'eau cédée à l'atmosphère par une végétation dense par transpiration de la plante et évaporation du sol, elle mesure l'efficacité thermique du climat.

point de référence pour évaluer la production, en particulier du fait de la trop grande sensibilité aux hypothèses de calibration des paramètres.

1.3.5. Les indices de végétation

On peut déduire d'une simple observation (photographie) par satellite des indices de végétation comme la surface foliaire par unité de sol ou *Leaf Area Index* (LAI). Ce dernier est le ratio de la surface totale recouverte par des feuilles (soit de la végétation) sur la surface totale et est compris entre 0 et 6 (forêt dense).

Un autre indice est le *Normalised Difference Vegetation Index* (NDVI) qui correspond au rapport de la différence entre les rayons proches infrarouges et rouges, et la somme de ces deux reflets spectraux. Compris entre -1 et 1, le NDVI donne une évaluation de l'absorption de la canopée des plantes évaluée par le biais de leur capacité à réaliser de la photosynthèse, ou plus précisément à absorber les radiations solaires. Cet indice est d'autant plus proche de 1 que cette capacité est élevée. Il a été utilisé dans des expériences d'AABIM, comme en Mongolie pour compenser les dégâts des sécheresses sur les pâtures et les cheptels d'éleveurs, aux États-Unis, au Mexique, en Espagne et enfin en Alberta (cf. Tab. 1). Dès 2005, en Inde, il a servi à l'AIC (Agriculture Insurance Company) pour un projet d'AABIM, pour chercher à valider les prévisions classiques par l'imagerie satellite. Il a aussi été utilisé à une résolution d'un kilomètre carré en Éthiopie, au sein du projet Harita coordonnées par Oxfam America avec l'aide de l'Iri et du Pam.

Finalement, il semble qu'il y ait un arbitrage possible entre la simplicité et la transparence de l'indice utilisé, et le risque de base qu'il comporte. Si la cible d'une telle assurance est une organisation d'assurance ou de réassurance qui cherche à mitiger son risque, le risque de base doit être minimisé. En revanche, s'il s'agit de paysans, il semble plus approprié de favoriser la compréhension du contrat.

1.4. Estimation et validation des contrats : les méthodes HBA et HDA

Pour estimer l'intérêt du contrat et calculer le niveau de la prime d'assurance, il est possible de faire des simulations sur une série de données historiques de l'indice choisi, de laquelle on aura éventuellement retiré une tendance (par exemple si l'indice est basé sur la température, pour isoler l'impact du réchauffement climatique³). On peut soit travailler directement sur cette série de données : *Historical Burn Analysis* (HBA), soit travailler sur une fonction de distribution statistique continue calée sur ces dernières : *Historical Distribution Analysis* (HDA).

1.4.1. Analyse sur données historiques (*Historical Burn Analysis*)

La méthode HBA (ou *burn-rate method*) consiste à calculer la valeur des indemnités directement pour chacune des années de la série historique de données dont on dispose, en fonction de la structure du contrat. L'analyse des moments de la distribution des indemnités permet de donner une idée des futures indemnités et donc de tester la viabilité du contrat d'assurance. Cette méthode a l'avantage d'être simple et de ne nécessiter aucune hypothèse sur la loi de probabilité de l'indice. Elle permet facilement de tester différentes combinaisons des paramètres du contrat d'assurance, et ainsi de trouver les valeurs optimales des paramètres par le biais d'un algorithme. Ce dernier a pour but de minimiser le risque de base, donc de trouver un optimum global qui correspond par exemple au minimum de la différence entre pertes et indemnités.

Elle souffre de deux faiblesses. D'une part, les données disponibles (rendement et indice météorologique) couvrent rarement plus de trente années et l'événement étudié (la réalisation de l'indice donnant lieu à indemnisation) est parfois rare. De ce fait, il est difficile d'estimer avec assez de précision la probabilité d'occurrence de l'indemnisation, pourtant essentielle pour calculer la prime. L'appréhension de la probabilité

³ Jewson *et al.* (2005).

d'occurrence de l'indemnisation demande donc une plage de données d'autant plus large que sa probabilité est faible. D'autre part, si la même plage de données est utilisée pour calculer les paramètres du contrat et pour évaluer les performances de ce dernier, cette évaluation risque de surestimer largement les performances du contrat (*overfitting*). Si la plage de données est assez longue, une solution consiste à la découper en deux, l'une pour calculer les paramètres du contrat et l'autre pour évaluer la performance de ce dernier (Vedvenov et Barnett, 2004), mais cette condition est rarement remplie. Une autre solution, retenue par Berg *et al.* (2008) consiste à utiliser la technique du *leave-one-out* (ou *jackknife*) pour tester et supprimer l'*overfitting*. Les auteurs, qui disposent de 21 années de données, calculent 21 contrats optimaux sur 20 années de données, donc en éliminant à chaque fois l'une des années. La performance de ces contrats est ensuite évaluée sur l'année restante, ce qui élimine le risque d'*overfitting* puisque les données utilisées pour optimiser les paramètres du contrat ne sont pas retenues pour évaluer les performances de ce dernier.

1.4.2. Analyse par simulation de la fonction de distribution de l'indice (*Historical Distribution Analysis*)

La méthode HDA (ou *index modeling*) consiste à caler une loi de distribution statistique continue avec celle des valeurs historiques de l'indice. Ensuite, il est possible de l'utiliser pour prévoir les réalisations futures de cet indice par simulation de Monte-Carlo. Cette seconde méthode permet donc de prendre en compte une distribution de probabilité qui correspond le plus possible à la série de données historiques de l'indice, dont la tendance a été extraite (cf. partie 2), et de mieux appréhender les événements les plus rares. Le *fitting* est en même temps la force de la méthode et sa faiblesse. Elle permet de simuler des séries qui comportent des événements rares et extrêmes n'ayant pas eu lieu sur la période pour laquelle on dispose de données, mais les hypothèses sur les paramètres sont faites *a priori*, c'est-à-dire sans connaître la fonction de distribution sous-jacente à la série indiciaire. Les données simulées sont, bien sûr, très sensibles aux paramètres de la fonction de distribution, il faut donc idéalement avoir une série de données importante pour évaluer ces paramètres de manière adéquate.

La méthode HBA est souvent la seule utilisée dans les analyses préliminaires d'AABIM, sans doute parce qu'elle est plus simple à utiliser, contrairement à d'autres secteurs d'activité comme les dérivés climatiques par exemple. Il peut finalement être intéressant d'utiliser les deux méthodes simultanément : faire une HBA pour optimiser les paramètres du contrat pour les exploitants et tester ce contrat par la méthode HDA pour estimer la solvabilité de l'assureur dans le futur.

1.5. Détermination de la marge des assureurs

Avec l'hypothèse, retenue dans le présent article, selon laquelle l'assurance n'est pas subventionnée, la prime d'assurance doit être supérieure à l'indemnité anticipée afin de rémunérer les frais de gestion du produit d'assurance et la prise de risque par l'assureur. Le coût du risque dépend de la gestion de portefeuille de l'assureur et de sa capacité à mutualiser des risques. Dans le cas d'une AABIM, la mutualisation dépend de deux éléments : la corrélation anticipée des indemnités pour cette AABIM et le portefeuille de risques préalablement détenus par l'assureur.

Concernant le premier élément, plus les indemnités sont positivement corrélées, plus le risque pour l'assureur et donc sa marge seront élevés. Toutes choses égales par ailleurs, plus une AABIM couvre une zone géographique limitée, plus la corrélation spatiale des variables météorologiques, donc des indemnités, est forte parmi les clients potentiels de cette assurance.

Concernant le second élément, le risque d'une AABIM pour l'assureur et donc la marge anticipée de ce dernier seront d'autant plus importants que les indemnités à verser dans le cadre de cette AABIM sont positivement corrélés à son portefeuille préexistant. Techniquement, il existe deux méthodes principales (Henderson, 2002) pour évaluer le coût du risque : le ratio de Sharpe et le rendement de la VaR (*Value at Risk*).

La première consiste à ajouter, dans le calcul de la prime, une marge proportionnelle à l'écart-type du coût pour l'assureur donc de l'indemnisation totale.

Dans la seconde méthode, cette marge est proportionnelle au coût que l'assureur atteint dans x % des cas (généralement 1 %, on parle alors de VaR₉₉). Elle est donc plus appropriée pour la couverture de risques peu fréquents et de grande intensité. Selon Hartell *et al.* (2006), sur les marchés d'assurance, α est typiquement compris entre 15 et 30 % et β compris entre 5 et 10 %. Dans la littérature sur les AABIM, seule la méthode VaR est utilisée, avec un taux de chargement compris entre 5 et 7 % selon Hess et Syroka (2005) et Osgood *et al.* (2007).

Quelle que soit la méthode retenue, le coût du risque pour l'assureur dépend positivement de la corrélation des indemnités à verser aux clients et donc de la corrélation spatiale de l'indice. La corrélation des risques dans le domaine de l'agriculture est qualifiée d'intermédiaire par Skees *et al.*, 2008 : bien que ces risques soient caractérisés par une corrélation spatiale positive, leur occurrence n'est pas totalement corrélée comme les risques de prix ou de taux.

Le besoin de diversification géographique des risques rend la réassurance nécessaire pour les organisations offrant une telle couverture (Meze-Hausken *et al.*, 2008). Dans les pays où l'agriculture représente une part importante du PIB, la nécessité de réassurance est renforcée par l'existence d'une forte corrélation entre l'activité agricole et nombre de variables macroéconomiques. Une firme étrangère, ne subissant pas les chocs internes au pays, est donc de ce point de vue plus à même qu'une firme locale de compenser les pertes par ses autres activités. Une décomposition du risque peut alors avoir lieu entre l'agriculteur, les assureurs, les réassureurs et/ou le gouvernement, ce qui limite la probabilité de faillite et de manque de liquidités à chaque niveau.

2. Défis au développement des AABIM

2.1. Variance spatiale des précipitations, prédictions des rendements et méthodes d'interpolation

La variance spatiale permet la mutualisation des risques et donc des primes plus faibles (cf. partie précédente) sur une zone géographique fixée. Corollaire : plus la variance spatiale est faible, plus la zone de couverture devra être élevée pour mutualiser les risques, si l'assurance est présente dans une seule région. En revanche, une forte variabilité spatiale des précipitations peut entraîner une faible prédiction des rendements, si la densité des stations est limitée sur le territoire assuré et étudié ; le risque de base en sera donc augmenté⁴. Une plus grande densité de stations permet de surmonter ce problème, mais le coût de l'installation et de la maintenance des stations augmentera les frais de gestion des assurances. Un arbitrage est donc nécessaire entre ces frais et la réduction du risque de base que permet une plus grande densité de stations. Selon Hess et Syroka (2005), l'expérience de l'Inde montre que l'intérêt d'une telle assurance dépend étroitement de la proximité des pluviomètres. En pratique, la distance minimum qui doit séparer les agriculteurs assurés de la station météorologique la plus proche est souvent fixée de manière empirique jusqu'à 30 km, il est toutefois reconnu que la méthode n'a pas de sens à plus de 10 ou 20 km selon le climat.

Plutôt que de baser le contrat sur une station unique, il est possible d'utiliser des techniques d'interpolation (Paulson et Hart, 2006) pour estimer les données météorologiques à l'intérieur d'un champ de points connus. Les méthodes déterministes les plus simples consistent à réaliser une combinaison linéaire des données des

⁴ Même dans ce cas, la calibration des paramètres du contrat peut alors dépendre, par le biais de l'optimisation, de l'hétérogénéité des précipitations sur le territoire, et mener à une validité des paramètres sur une surface limitée ou ayant des caractéristiques spécifiques. La clarté et l'uniformité du contrat d'assurance en pâtiront alors, ainsi que la légitimité de ce dernier sur le terrain.

stations environnantes. Le coefficient de pondération peut être l'inverse de leur distance au point recherché, ou le carré de cette valeur (Bedient et Huber, 1992) selon la méthode appelée IDWA (pour *Inverse Distance Weighted Averaging*). Les méthodes d'interpolations stochastiques comme le « krigage » (Cressie, 1993 ; Venables et Ripley, 2002), basées sur des techniques de géostatistiques, se servent de l'autocorrélation entre les données ponctuelles. Ces techniques n'ont jamais été utilisées à ce jour dans le cadre des AABIM.

2.2. Prise en compte des non-stationnarités

Il est impossible de réaliser une estimation des contrats si les données de l'indice ne sont pas stationnaires (ou rendues stationnaires) dans le temps (Jewson *et al.*, 2005). En effet, il est difficile pour un assureur de s'engager s'il prévoit une tendance croissante des indemnisations. Vice-versa, les agriculteurs n'auront pas intérêt à s'engager s'ils anticipent une baisse tendancielle des indemnisations. Or, les séries climatiques comportent souvent une tendance (pour les températures : Mears *et al.*, 2005 ; Jones *et al.*, 2003) ou une augmentation de leur variabilité du fait du changement climatique (Mills, 2005).

Dans le cas des températures, une tendance à la hausse est prévisible, du fait du changement climatique, mais l'ampleur de cette hausse ainsi que l'évolution de la variance interannuelle ne peut être prévue avec précision dans l'état actuel de la science (Giec, 2007). Dans le cas des précipitations, l'incertitude est plus grande encore puisque pour la plupart des régions du monde, on ne sait pas si les précipitations augmenteront ou diminueront.

Ainsi, au Maroc, un projet d'assurance pour les producteurs d'orge, de tournesol et de blé (dur et tendre) a échoué du fait de la forte tendance à la baisse des précipitations dans la région méditerranéenne (Skees *et al.*, 2001). Malgré l'existence de données de rendements et de pluviométrie sur la période 1979-1999 et les compensations prévues par le Gouvernement, la présence de nombreuses années critiques lors de la simulation a rebuté les assureurs.

Hochrainer *et al.* (2007) tentent de tester la robustesse du contrat malawite (côté offre, c'est-à-dire de la solvabilité de l'assureur) en estimant l'impact du changement de précipitations causé par le changement climatique global. Pour cela, ils utilisent les sorties des modèles climatiques régionaux MM5 et Precis. La variance des précipitations ainsi simulées étant à la hausse pour les dix ans suivant le contrat (2006-2016) et surtout pour la période 2070-2080, du capital additionnel serait nécessaire à la solvabilité du programme.

2.3. Quantification du gain pour l'assuré : l'approche statique

Estimer l'impact d'une AABIM sur le bien-être des assurés requiert des hypothèses sur leur fonction d'utilité et en particulier sur la forme de l'aversion au risque. La fonction CRRA⁵, qui présente une aversion relative pour le risque constante, est la plus utilisée en économie agricole (depuis Myers, 1989), et son utilisation est validée pour formaliser le comportement des agriculteurs selon les tests statistiques de Chavas et Holt (1996) et de Pope et Just (1991). Pour comparer les situations avec et sans assurance, il est nécessaire de calculer leur équivalent certain.

Les défis pour la recherche sont ici nombreux : quantifier le paramètre d'aversion pour le risque, tester la robustesse des résultats au choix de la forme fonctionnelle CRRA, et évaluer l'apport potentiel des modèles d'utilité non espérée (Tallon et Vergnaud, 2007). Par ailleurs, il serait justifié de prendre en compte l'hétérogénéité des attitudes face au risque, qui peut être très élevée (Binswanger et Rosenzweig, 1986), ce que proposent Diaz Nieto *et al.* (2005) en prenant en compte les différents niveaux individuels d'aversion pour le risque. Cependant, cela accroîtrait les frais de gestion, puisque la calibration et la prime seraient calculées

⁵ Pour *Constant Relative Risk Aversion*.

individuellement. Enfin, il serait souhaitable d'estimer l'impact de changements de pratiques agricoles (utilisation d'engrais, de semences améliorées mais plus chères...) endogène à la mise en place d'AABIM.

2.4. Quantification du gain pour l'assuré dans les modèles dynamiques : les trappes à pauvreté

La formalisation de ce concept (dont la traduction rigoureuse du terme anglais serait plutôt « piège de pauvreté ») consiste à rendre possible l'existence d'équilibres multiples dans un modèle d'accumulation, pouvant mener à une accumulation sous-optimale de capital en cas de faible dotation initiale (Azariadis et Drazen, 1990). Ce cadre d'analyse permet d'expliquer l'impact de la sous-accumulation en capital productif et la persistance de la pauvreté par les faibles stocks d'infrastructures dans les PED. Cet argument est récurrent dans la littérature sur le secteur primaire et le risque dans les pays en développement (Alderman et Haque, 2006 ; Dercon, 1996 ; Fafchamps, 1998, 2003 ; Hansen *et al.*, 2007 ; cf. Elbers *et al.*, 2007 pour une formalisation plus générale). Barnett et Mahul (2007) insistent aussi sur les conséquences d'années sèches, qui créent un manque de ressource pouvant être à l'origine de trappes à pauvreté. Barnett *et al.* (2008) réalisent une revue de la littérature sur le sujet et exposent l'importance de la littérature sur les trappes à pauvreté dans le contexte des AABIM.

Dans le cas d'une AABIM, ce raisonnement appliqué à une ferme familiale mène à penser que la double contrainte budgétaire (accès limité au marché du crédit) et de subsistance du ménage/producteur, peut être la cause d'un sous-investissement en capital productif (comme le montrent Dercon et Christiaensen en 2007 pour les engrais en Éthiopie). Le besoin d'accéder aux moyens de subsistance, généralisé par la corrélation spatiale des pertes en cas de choc climatique, fait monter leur prix et est renforcé par le manque d'infrastructures de transport et de communication. Ces besoins peuvent pousser les agents à réaliser des stocks en moyens de subsistance non productifs (Zimmerman et Carter, 2003 ; Kazianga et Udry, 2006) pour faire face à de tels risques.

En revanche, s'il y a assurance, il est probable que l'intensification de la fonction de production et/ou l'utilisation d'intrants soient permises par la diminution du risque encouru par l'agriculteur. Alors tout processus coûteux (innovation agricole, capital productif, graines certifiées, etc.) augmentant la production en cas de bonne saison, pourra être utilisé malgré la prégnance de la contrainte budgétaire qui pèse sur les agents. Rosenzweig et Binswanger évaluent en 1993 à 30 % la perte moyenne d'un agriculteur indien dont les choix productifs à faible risque et faibles rendements sont dus à une forte aversion pour le risque.

Un dernier risque covariant (ou systémique vs. idiosyncratique) est le risque de prix, soit de baisse des cours mondiaux du bien produit. C'est pourquoi Molini *et al.* (2008) proposent, dans le cas du Ghana, d'indexer les revenus de l'assurance sur un indice des cours mondiaux des principaux produits agricoles exportés par le pays en plus de l'indexation sur une variable pluviométrique.

2.5. Contraintes humaines et institutionnelles

2.5.1. Adoption de l'innovation, accompagnement et contraintes institutionnelles

La question de l'incitation face aux potentielles réticences à adopter une telle technologie innovante a été posée au sein de nombreuses études récentes (entre autres : Duflo et Kremer, 2007 pour l'usage d'engrais au Kenya ; Hyman *et al.*, 2008 pour les variétés résistantes à la sécheresse ; Abdoulaye et Sanders, 2006 ; Mendola, 2007). On a vu (cf. partie 1) que la simplification du contrat peut permettre une plus grande adhésion des acheteurs potentiels, en effet l'incompréhension du produit est la première raison de rejet de l'innovation en Inde (Giné *et al.*, 2008).

L'avantage de fournir des assurances obligatoires sur des produits comme des crédits aux intrants, ou tout autre produit financier, est tout d'abord d'éliminer tout problème d'anti-sélection. Les clients achetant des

crédits n'ont pas particulièrement choisi de souscrire à une assurance contre le risque climatique, et ne font donc pas partie des agents les plus risqués. Ensuite les institutions de microfinance ayant une clientèle nombreuse peuvent mutualiser le risque aisément.

De même, il semble que fournir des informations sur les prévisions climatiques — comme cela a été le cas par diffusion radio dans des pays est-africains et dans le cadre d'une AABIM en Inde — puisse être complémentaire avec de telles assurances. Une revue de la littérature sur la valeur économique de telles prévisions pour les agriculteurs, réalisée par Meza *et al.* en 2008, aborde ce point.

Nous nous devons de rappeler les potentielles contraintes institutionnelles et pratiques allant à l'encontre de l'instauration d'un système d'assurance. L'environnement légal de nombreux pays pauvres ou à revenus intermédiaires est peu adapté à l'offre d'assurance. Seuls l'Afrique du Sud, l'Inde et le Pérou disposent aujourd'hui d'une législation explicite sur la micro-assurance⁶. Il existe par exemple dans de nombreux pays en développement (PED) des barrières législatives et de régulation du secteur de l'assurance ou sur la détention de plus ou moins larges réserves de capitaux. Les systèmes de réassurance peuvent permettre de pallier ce type d'obstacle.

2.5.2. Influence sur les pratiques préexistantes de gestion du risque

Il est toujours important de prendre en compte les potentielles évolutions de l'environnement que peut induire la mise en œuvre d'un projet de développement. Par exemple la prise en compte des évolutions comme l'utilisation plus intensive de la terre, le développement rapide de l'agriculture de rente au détriment de l'agriculture vivrière mène à une meilleure compréhension des relations acteur-environnement. Par ailleurs, la prise en charge du risque en dernier ressort par une instance publique rend possible une éviction des moyens privés et/ou informels de gestion du risque, comme la diversification des cultures, l'accumulation de stocks comme épargne de précaution, l'utilisation de variétés robustes quoique peu productives, la vente du bétail en cas de mauvaise récolte, etc. Des initiatives visant à assurer les agriculteurs peuvent aussi casser les réseaux d'entraide locaux et toutes les autres manières de gérer le risque (Arnott et Stiglitz, 1991 ; Bloch *et al.*, 2008).

Il y a cependant deux limites à ce type de raisonnement. Tout d'abord, la littérature tend à montrer qu'il y a peu de transferts au sein des ménages (en tout cas en ce qui concerne les communautés pastorales d'Afrique de l'Est : Lybbert *et al.*, 2004 ; Lentz et Barrett, 2005 et Unruh, 2008) et qu'il est difficile de montrer que le bétail joue un rôle de matelas à conjoncture (Fafchamps *et al.*, 1998) ; ceci limite l'effet potentiel d'éviction. Ensuite, ces modes de gestion informels limitent les investissements productifs des ménages et leur imposent des coûts sociaux importants (Hess *et al.*, 2005 ; Hazell *et al.*, 1986 ; Morduch, 1995 ; Hoff et Sen, 2005). C'est pourquoi la complémentarité avec les AABIM ne remet pas forcément en question l'efficacité de ces dernières et n'annule pas leurs gains potentiels. Un des défis de la recherche future sera, en revanche, la réalisation de l'analyse coûts/bénéfices qui découle de ces complémentarités.

Conclusion

Nous avons vu que les AABIM, caractérisées par une simplicité conceptuelle et de mise en œuvre, se sont développées relativement rapidement. Pourtant, de nombreuses hypothèses dont dépendent leur applicabilité et leur efficacité ne sont pas encore validées. Des évaluations de projets d'AABIM sont en cours en Inde (Gujarat et Andhra Pradesh), où une indemnisation gratuite du prix de la récolte offerte en conjonction avec un crédit (l'emprunteur n'avait pas à rembourser autant si la valeur de sa récolte était faible) n'a pas augmenté le nombre de souscripteurs. Globalement la demande de tels produits financiers est assez faible, ce résultat est très bien illustré par l'évaluation aléatoire de Giné et Yang (2009) au Malawi. Le fait d'ajouter une assurance à un produit de crédit pour des graines certifiées de maïs hybride (censé être plus productif) et d'arachide au Malawi

⁶ « La micro-assurance agricole », Innovations et réseaux pour le développement, <http://www.ired.org>.

a diminué de 13 % la demande pour le produit. Les auteurs mettent en avant l'importance du niveau d'éducation des agriculteurs dans la demande de produits qui peuvent paraître pourtant particulièrement simples au premier abord, mais qui laissent les agriculteurs, ne raisonnant qu'en termes d'épargne, totalement indifférents. Le capital humain, qui évalue en fait ici la maîtrise de la notion de probabilité et l'appréhension de l'incertain, semble primordial et l'exploration de l'impact de tels déterminants de la demande reste à explorer dans des travaux futurs.

Les principaux progrès à attendre de la recherche dans ce domaine concernent cinq points. Premièrement, l'amélioration des indices et des sources de données utilisables. Les satellites, en particulier, présentent de grands avantages potentiels (faible coût, absence de risque de manipulation des données et de données manquantes), mais ils ne mesurent pas directement les variables météorologiques les plus pertinentes, qui doivent être estimées par des algorithmes nécessairement imparfaits. Deuxièmement, la détermination de la zone géographique optimale pour un contrat d'assurance et une station météorologique, et, ce qui est lié, l'optimisation du nombre de stations, en prenant en compte le coût d'installation et de fonctionnement de ces dernières. Troisièmement, le traitement des non-stationnarités dans les séries météorologiques et de rendement, rendu nécessaire par le changement climatique en cours. Quatrièmement, la quantification des gains pour les assurés, ce qui nécessite des études sur les fonctions d'utilité pertinentes, l'hétérogénéité des aversions pour le risque entre les assurés potentiels et l'ampleur des changements de pratiques agricoles suite à l'introduction de ces assurances. Enfin, l'importance des facteurs culturels et institutionnels dans la diffusion de ces produits de couverture du risque. Sur chacun de ces points, les réponses dépendront étroitement des spécificités météorologiques, agronomiques et institutionnelles des différents terrains d'application, nécessitant l'association étroite de partenaires locaux à ces recherches.

Références bibliographiques

Abdoulaye, T., Sanders, J.H., 2006. New technologies, marketing strategies and public policy for traditional food crops: Millet in Niger, *Agricultural Systems*, 90 (1-3), 272-292.

Adamenko, T., 2004. *Agroclimatic Conditions and Assessment of Weather Risks for Growing Winter Wheat in Kherson Oblast*, Ukrainian Hydrometeorological Centre, CRMG, The World Bank.

Alderman, H., Haque, T., 2006. Countercyclical safety nets for the poor and vulnerable, *Food Policy*, 31, 372-383.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. *Crop evapo-transpiration. Guidelines for computing crop water requirements*, FAO.

Ambroise, B., 1999. La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant. Processus, facteurs, modèles, Bucarest.

Arnott, R., Stiglitz, J., 1991. Moral hazard and nonmarket institutions: Dysfunctional crowding out or peer monitoring?, *American Economic Review*, 81 (1), 179-190.

Azariadis, C., Drazen, A., 1990. Threshold externalities in economic development, *The Quarterly Journal of Economics*, 105 (2), 501-526.

Barnett, B.J., Barrett, C.B., Skees, J.R., 2008. *Poverty Traps and Index-Based Transfer Products*, World Development, 36(10), pp. 1766-1785

Barnett, B.J., Mahul, O., 2007. Weather index insurance for agriculture and rural areas in lower-income countries, *American Journal of Agricultural Economics*, 89 (5), 1241-1247.

Bedient, P.B., Huber, W.C., 1992. *Hydrology and Floodplain Analysis*, New York.

Berg, A.P., Quirion, P., Sultan B., 2008. Can weather index drought insurance benefit to least developed countries' farmers? A case study on Burkina Faso, *AFSE Meeting, Frontiers in Environmental Economics and Natural Resources Management*, 9-11 juin, Toulouse.

Binswanger, H.P., Rosenzweig, M.R., 1986. Behavioural and material determinants of production relations in agriculture, *Journal of Development Studies*, 22 (3), 503-539.

Bloch, F., Genicot, G., Debraj, R., 2008. Informal insurance in social networks, *Journal of Economic Theory*, (à paraître).

Ceraas, 2008. *Developing Weather Based Crop Insurance Pilots in Senegal. Preparation for Rainfall Index Pilot Project*, Centre d'étude régional pour l'amélioration et l'adaptation à la sécheresse, Thiès, Sénégal.

- Chavas, J.P., Holt, M., 1996. Economic behavior under uncertainty: A joint analysis of risk preference and technology, *Review of Economics and Statistics*, 78 (2), 329-335.
- Cooper, P.M.J., Dimes, J., Rao, K.P.C., Shapiro, B., Shiferaw, B., Twomlow, S. 2008. Coping better with current climatic variability in the rain-fed farming systems of Sub-Saharan Africa: An essential first step in adapting to future climate change, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 126, 24-35.
- Cressie, N.A.C., 1993. *Statistics for Spatial Data*, John Wiley and Sons, Inc.
- Dandekar, V.M., 1977. *Crop insurance for developing countries*, Teaching and Research Forum Paper n° 10, New York, Agricultural Development Council.
- Janvry A. de, Burke, M., Quintero J. 2011. *Providing indexed agricultural insurance to smallholders: Recent progress and future promise*, ABCDE conference, AFD, Paris.
- Dercon, S., 1996. Risk crop choice, and savings: evidence from Tanzania, *Development and Cultural Change*, 44, 485-513.
- Dercon, S., Christiaensen, L., 2007. *Consumption Risk, Technology Adoption and Poverty Traps: Evidence from Ethiopia*, World Economy & Finance Research Program, Working Paper n° 0035.
- Diaz Nieto, J., Cook, S., Lundy, M., Fisher, M., Sanchez, D., Guevara, E., 2005. *A System of Drought Insurance for Poverty Alleviation in Rural Areas*, BMZ, GTZ, CRS.
- Duflo, E., Kremer, M., Robinson J., 2007. *Why Don't Farmers Use Fertilizer? Experimental Evidence from Kenya*, MIT and Harvard.
- Elbers, C., Gunning, J.W., Kinsey, B., 2007. Growth and risk: Methodology and micro evidence, *World Bank Economic Review*, 21 (1), 1-20.
- Fafchamps, M., 1993. Sequential labor decisions under uncertainty: An estimable household model of West-African farmers, *Econometrica*, 61 (5), 1173-1197.
- Fafchamps, M., Lund, S., 2003. Risk-sharing networks in rural Philippines, *Journal of Development Economics*, 71, 261-287.
- Fafchamps, M., Udry, C., Czukas, K., 1998. Drought and saving in West-Africa: Are livestock a buffer stock?, *Journal of Development Economics*, 55, 273-305.
- Giec, 2007. *Changements climatiques : Rapport de synthèse. Bilan 2007 des changements climatiques*, in Équipe de rédaction principale Giec, Pachauri R.K. et Reisinger A., Contribution des groupes de travail I, II et III au 4^e Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.
- Giné, X., Townsend, M.R., Vickery, I.J., 2008. Patterns of rainfall insurance participation in rural India, *World Bank Economic Review*, (à paraître).
- Giné, X., Yang, D., 2009. Insurance, credit, and technology adoption: Field experimental evidence from Malawi, *Journal of Development Economics*, (à paraître).
- Halcrow, H.G., 1948. *The theory of crop insurance*, Ph.D. diss., Chicago, University of Chicago.
- Hansen, J.W., Baethgen, W., Osgood, D., Ceccato, P., Ngugi, R.K., 2007. Innovations in climate risk management: Protecting and building rural livelihoods in a variable and changing climate, *Journal of Semi-Arid tropical Agricultural Research*, Icrisat, (à paraître).
- Hartell, J., Ibarra, H., Skees, J., Syroka, J., 2006. *Risk Management in Agriculture for Natural Hazards*, Ismea.
- Hazell, P., Pomareda, C., Valdés, A., 1986. *Crop Insurance for Agricultural Development: Issues and Experience*, Baltimore, Maryland, Johns Hopkins University Press.
- Hazell, P.B.R., 1992. The appropriate role of agricultural insurance in developing countries, *Journal of International Development*, 4, 567-581.
- Hazell, P., Anderson, J., Balzer, N., Hastrup Clemmensen, A., Hess, U., Rispoli, F., 2010. *Potential for Scale and Sustainability in Weather Index Insurance for Agriculture and Rural Livelihoods*, International Fund for Agricultural Development and World Food Programme, Rome.
- Henderson, R., 2002. *Weather Risk Management: Markets, Products and Applications. Legal and Regulatory Issues*, New York, Palgrave.
- Hess, U., Skees, J., Stoppa, A., Nash, J., 2005. *Managing Agricultural Production Risk: Innovations in Developing Countries*, The World Bank, Agriculture and Rural Development Department.
- Hess, U., Syroka, J., 2005. *Weather-Based Insurance in Southern Africa: The Case of Malawi*, ARD, The World Bank.

- Hochrainer, S., Mechler, R., Pflug, G., 2007. *Investigating the Impact of Climate Change on the Robustness of Index-Based Micro-Insurance in Malawi*, IIASA, Institutions for Climate Change Adaptation, DEC-Research Group, Infrastructure and Environment Unit, The World Bank.
- Hoff, K., Sen, A., 2005. *The Kin System as a Poverty Trap?*, World Bank Policy Research Working Paper n° 3575.
- Hyman, G., Fujisaka, S., Jones, P., Wood, S., Vicente, M.C.D., Dixon J., 2008. Strategic approaches to targeting technology generation: Assessing the coincidence of poverty and drought-prone crop production, *Agricultural Systems*, 98 (1), 50-61.
- Jewson, S., Brix, A., Ziehmman, C., 2005. *Weather Derivative Valuation: The Meteorological, Statistical, Financial and Mathematical Foundations*, Cambridge University Press.
- Jones, P.D., Moberg, A., 2003. Hemispheric and large-scale surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2001, *Journal of Climate*, 16, 206- 222.
- Kazianga, H., Udry, C., 2006. Consumption smoothing? Livestock, insurance and drought in rural Burkina Faso, *Journal of Development Economics*, 79 (2), 413-446.
- Lentz, E., Barrett, C.B., 2005. *Food Aid Targeting, Shocks and Private Transfers Among East African Pastoralists*. [online] URL: <http://ssrn.com/abstract=601241>.
- Lybbert, T.J., Barrett, C.B., Desta, S., Layne Coppock, D., 2004. Stochastic wealth dynamics and risk management among a poor population, *The Economic Journal*, 114 (498), 750-777.
- Mapfumo, S., 2007. *Weather Index Insurance: The Case for South Africa*, Micro Insurance Agency.
- Mears, C.A., Wentz, F.J., 2005. The effect of diurnal correction on satellite-derived lower tropospheric temperature, *Science*, 309, 1548.
- Mendola, M., 2007. Farm household production theories: A review of 'institutional' and 'behavioural' responses, *Asian Development Review*, 24 (1), 49-68.
- Meza, F.J., Hansen, J.W., Osgood, D., 2008. Economic value of seasonal climate forecasts for agriculture: Review of *ex-ante* assessments and recommendations for future research, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47 (5), 1269-1286.
- Meze-Hausken, E., Patt, A., Fritz, S., 2008. *Reducing Climate Risk for Micro-Insurance Providers in Africa: A case study of Ethiopia*, (à paraître).
- Mills, E., 2005. Insurance in a climate of change, *Science*, 309 (5737), 1040-1044.
- Molini, V., Keyzer, M., van den Boom, B., Zant, W., 2008. Creating safety nets through semi-parametric index-based insurance: A simulation for Northern Ghana, *Agricultural Finance Review*, 68 (1), 223-246.
- Morduch, J., 1995. Income smoothing and consumption smoothing, *The Journal of Economic Perspectives*, 9 (3), 103-114.
- Myers, R.J., 1989. Econometric testing for risk averse behavior in agriculture, *Applied Economics*, 21 (4), 541-552.
- Odekunle, T.O., 2004. Rainfall and the length of the growing season in Nigeria, *International Journal of Climatology*, 24 (4), 467-479.
- Osgood, D., McLaurin, M., Carriquiri, M., Mishra, A., Fiondella, F., Hansen, J., Peterson, N., Ward, N., 2007. *Designing Weather Insurance Contracts for Farmers in Malawi, Tanzania and Kenya*, CRMG, Iri.
- Paulson, N.D., Hart, C.E., 2006. A spatial approach to addressing weather derivate basis risk: A drought insurance example, *American Agricultural Economics Association Annual meeting*, July 23-26, Long Beach, California.
- Pope, R.D., Just, R.E., 1991. On testing the structure of risk preferences in agricultural supply analysis, *American Journal of Agricultural Economics*, 73, 743-748.
- Quiggin, J., Karagiannis, G., Stanton, J., 1994. *Crop Insurance and Crop Production: An Empirical Study of Moral Hazard and Adverse Selection*, Boston, Kluwer.
- Rosenzweig, M.R., Binswanger, H.P., 1993. *Wealth, Weather, Risk and the Composition and Profitability of Agricultural Investments*, *The Economic Journal*, 103 (416), 56-78.
- Senay, G.B., Verdin, J.P., 2004. Developing index maps of water-harvest potential in Africa, *Applied Engineering in Agriculture*, 20 (6), 789-799.
- Skees, J., 2003. Risk management challenges in rural financial markets: Blending risk management innovations with rural insurance, *Paving the Way Forward for Rural Finance: an International Conference on Best Practices*, Washington D.C.

Skees, J., Hazell, P., Miranda, M., 1999. *New Approaches to Crop Yield Insurance in Developing Countries*, International Food Policy Research Institute, Environment and Production Technology Division.

Skees, J., Hazell, P., Miranda, M., 2005. *New Approaches to Public/Private Crop Yield Insurance Study*, The World Bank.

Skees, J., Gober, S., Varangis, P., Lester, Kalavakonda, V., 2001. *Developing Rainfall-Based Index Insurance in Morocco*, The World Bank.

Tallon, J.M., Vergnaud, J.C., 2007. Incertitude et information en économie de l'environnement. Choix privés et attitudes individuelles face à l'incertitude, *Revue Française d'Économie*, 22 (2), 3-56.

Unruh, J.D., 2008. Pastoral livestock marketing in Eastern Africa: Research and policy challenges, John McPeak and Peter Little, *Africa Today*, 55 (1), 141-143.

USAID, 2006. *Index Insurance for Weather Risk in Lower-Income Countries*, GlobalAgRisk, Lexington, Kentucky.

Vedenov, D.V., Barnett, B.J., 2004. Efficiency of weather derivatives as primary crop insurance instruments, *Journal of Agricultural and Resource Economics*, 29 (3), 387-403.

Venables, W.N., Ripley, B.D., 2002. *Modern Applied Statistics with S-Plus*, Springer.

Zimmerman, F.J., Carter, M.R., 2003. Asset smoothing, consumption smoothing and the reproduction of inequalities under risk and subsistence constraints, *Journal of Development Economics*, 71, 233-260.

Tableau 1 : Expériences d'assurances agricoles basées sur des indices météorologiques dans les PED

Pays	Risque	Données sources (indice)	Échelle de mise en œuvre et bénéficiaires	Avancement	Initiateur	Offre (ou réassurance)
Argentine*	Sécheresse	Précipitations basses	Petits exploitants, puis laiteries, éventuellement à venir pour les fournisseurs d'intrants	1999	Aide de la Banque mondiale (BM)	Sancor (produits laitiers)
	Sécheresse	Précipitations	Crédit pour achat de graines fournies par les plus grands fournisseurs en graines	Projet pilote en 2005		
Afrique du Sud†	Gel prématuré	Températures inférieures à zéro	Coopératives de production de pommes	2007		Gensec Bank
Caraïbes **	Ouragans	Données de NOAA de USGS[1]	Caribbean Catastrophe Risk Insurance Facility (CCRIF)	Mis en œuvre en 2007, 16 pays	Gouvernements de la communauté des Caraïbes (Caricom)	
Chine **	Précipitations basses ou rares	Précipitations et décomptes quotidiens de tempêtes	Petit exploitants de pastèques (clients d'une agence de microcrédit)	Mis en œuvre en juin 2007 à Shanghai seulement	International Fund for Agricultural Dev. (Ifad)	Gouvernement
Éthiopie ‡	Sécheresse	Précipitations (bilan hydrique)	Opérations du Pam en Éthiopie	2006	PAM et gouvernement éthiopien, réassurance de ParisRe.	Axa RE comme réassureur du Pam et du Gouvernement
	Sécheresse	Précipitations	Petits exploitants	Pilote en 2006, puis 2007	Nyala Insurance, BM et Pam	Axa RE comme réassureur du Pam et du Gouvernement
	Sécheresse	Imagerie satellite	Village (Adi-Ha)	2010 (projet Harita)	Oxfam/IFRC	
Inde **, §	Pluies	Précipitation	Exploitants de	Projet pilote	Basix:	

insuffisantes	s (pondération par phase, seuil de 80 % de la moyenne sur la période)	soja, province d'Ujjain	en 2003	institution de microfinance / KBS	
Pluies insuffisantes et inondations	Précipitations (cumuls par décades, bilan hydrique)	Producteurs de ricin, de coton et d'arachide (clients de l'institution de microfinance Basix, puis étendu à tous les producteurs en 2004)	Programme pilote en 2003, dans le district de Mehbubnagar en Andhra Pradesh étendu aux districts de Khammam et Anantapur en 2004 : 1 500 contrats vendus, encore distribuée en 2009.	Basix, à travers sa filiale : Krishna Bhima Samruddhi Local Area Bank (KBS LAB)	ICICI-Lombard (réassureur), NAIC (National Agricultural Insurance Company)
Pluies insuffisantes		Exploitants d'orange, Rajasthan. Extension au cumin, coriandre et autres plantes étudié par le gouvernement du Raj.	Projet pilote, 2004	Gouvernement de l'État (Raj.)	ICICI Lombard (réassureur)
Pluies insuffisantes et en excès d'humidité et gel.	Indice de cumul pluviométrique : 140 stations du département météorologique indien	Agriculteurs de 10 États, AIC (Agriculture Insurance Corporation) Varsha Bima Yojana ; Exploitants de café de trois districts de l'État du Karnataka, indice de précipitation de l'AIC ; Exploitants de sorgho, mil, maïs, arachide, soja et haricots au sein de 23 districts du Rajasthan, AIC Sookha Suraksha Kavach	Depuis 2004	AIC (Agriculture Insurance Corporation), assureur public	
Pluies insuffisantes	Indice de cumul pluviométrique	Toutes sortes de petits exploitants en milieu rural	2004, première instance à transférer le risque sur les marchés de dérivés climatiques internationaux	CRMG (BM) / ICICI-Lombard	BSFL (Bharatiya Samruddhi Finance Ltd, filiale de Basix)
Sécheresse et inondations pendant la mousson	Précipitations	Petits exploitants du Gujarat, Maharashtra, d'Andhra Pradesh, et du Karnataka	Projet pilote démarré en 2004, encore distribuée en 2009	Iffco Tokyo	AICI – agence para-étatique
Sécheresse, excès d'humidité et températures propices au développement du mildiou.	Température (10-20 °C), humidité (90 %) et gel	4 500 exploitants de pommes de terre dans 8 États, auxquels des prévisions météo, sont envoyées toutes les 72 heures par SMS	2008, projets pilotes en Uttar Pradesh, Gujarat et au Bihar, 8 États en 2009	PepsiCo	Partenariat PepsiCo India / ICICI-Lombard

	Sécheresse	Sols, humidité, températures, précipitations et imagerie satellite (NDVI)	Producteur de blé du district Patiala du Punjab, extension à certains districts du Tamil Nadu envisagées	2008	ICICI-Lombard	Weather Risk Management Services (WRMS)
Indonésie [⊠]	Inondations		Habitants des bidonvilles	Pilote en 2009	Tata, GTZ et réassurance de MunichRe	Gouvernement malawite, DFID
Jamaïque [⊠]	Ouragan		Fournisseurs d'intrants	Pilote en 2009	JP Foods, assureur privé	Gouvernement malawite, DFID
Malawi *	Sécheresse	Précipitations (bilan hydrique)	Planteurs d'arachide, membres de la NASF-AM, fourni avec crédit aux intrants (graines)	Projet pilote de 2005 à 2010	CRMG (BM) & Nasfam, puis Alliance One	Gouvernement malawite, DFID
Madagascar *	Sécheresse et cyclones	Précipitations	Petits exploitants par le biais d'institutions de microfinance	Projet en 2007		
Mexique **	Catastrophes naturelles touchant les petits exploitants (sécheresse à 80 %)	Précipitations, vitesse du vent, températures (FDCC, Factores Climaticos Dañinos Diarios).	Fonds du gouvernement de l'État pour l'aide aux sinistrés de désastres naturels ; soutien financier du programme Fonden	Projet pilote, 2002	Programme Fonden, Agroasemex	Gouvernement par le biais d'Agrosemex
	Sécheresse affectant le bétail	Satellites (NDVI)	Éleveurs de troupeaux	Lancé en 2007	Faprac	Agrosemex
Nicaragua*	Sécheresse et excès de pluies pendant la plantation et la récolte	Précipitations	Producteurs d'arachide	Lancé en 2006, encore disponible en 2009.	CRMG (BM)	
Philippines [⊠]	Typhons	Distance au typhon	Petits exploitants	Projet pilote réalisé en 2009	MicroEnsure and Malayan Insurance Company	
Rwanda [⊠]	Sécheresse et inondations	Précipitations	Petits exploitants et coopératives	Projet pilote en 2009	MicroEnsure et ministère de l'Agriculture.	
Tanzanie [⊠]	Sécheresse et inondations	Précipitations	Petits exploitants	Projet pilote en 2009	MicroEnsure	
Thaïlande*	Sécheresse	Précipitations	Petits exploitants, intermédiation de banques nationales	Projet pilote réalisé en 2007	CRMG (BM)	
Ukraine+	Sécheresse et gel (hivernal et tardif)	Précipitations (SHR)	Grandes exploitations (blé)	Projet pilote en 2005 dans l'oblast de Kherson mais n'est pas repris par les compagnies d'assurances.	Organisations de la Banque mondiale (IFC Agribusiness Development project & CRMG)	

Sources : * Barnett *et al.* (2008) ; ** Hartell *et al.* (2006) ; † Mapfumo (2007) ; ‡ USAID (2006) ; * Skees *et al.* (2001) ; ** Hess *et al.* (2005) ; [⊠] agroinsurance.com, + Hartell *et al.* (2006), Adamenko (2004) et Shyrakenko (2007), ⊠ Hazell *et al.* (2010).