

Papiers de recherche

Auteurs

Françoise Gerard,
François Affholder,
Ndeye Fatou Mane
et Moussa Sall

Coordination

Philippe Roudier

Impact de différentes politiques publiques sur l'intensification agroécologique et les inégalités de revenu dans le Bassin arachidier du Sénégal

SEPTEMBRE 2020
N° 149



Agence française de développement

Papiers de recherche

Les *Papiers de Recherche de l'AFD* ont pour but de diffuser rapidement les résultats de travaux en cours. Ils s'adressent principalement aux chercheurs, aux étudiants et au monde académique. Ils couvrent l'ensemble des sujets de travail de l'AFD : analyse économique, théorie économique, analyse des politiques publiques, sciences de l'ingénieur, sociologie, géographie et anthropologie. Une publication dans les Papiers de Recherche de l'AFD n'en exclut aucune autre.

Les opinions exprimées dans ce papier sont celles de son (ses) auteur(s) et ne reflètent pas nécessairement celles de l'AFD. Ce document est publié sous l'entière responsabilité de son (ses) auteur(s).

AFD Research Papers

AFD Research Papers are intended to rapidly disseminate findings of ongoing work and mainly target researchers, students and the wider academic community. They cover the full range of AFD work, including: economic analysis, economic theory, policy analysis, engineering sciences, sociology, geography and anthropology. AFD Research Papers and other publications are not mutually exclusive.

The opinions expressed in this paper are those of the author(s) and do not necessarily reflect the position of AFD. It is therefore published under the sole responsibility of its author(s).

Impact de différentes politiques publiques sur l'intensification agroécologique et les inégalités de revenu dans le Bassin arachidier du Sénégal

Françoise Gerard
CIRAD, UR GREEN

François Affholder
CIRAD, UR AIDA

Ndeye Fatou Mane
ISRA, BAME

Moussa Sall
ISRA, BAME

Résumé

Ce papier analyse l'impact de différentes politiques publiques sur l'intensification écologique et les inégalités de revenu dans le Bassin arachidier du Sénégal, principale région d'agriculture pluviale du pays. Il s'appuie sur un modèle bioéconomique simulant dans le détail la situation des différents types de ménages agricoles. L'évaluation multicritère d'itinéraires techniques basés sur la gestion intégrée de la fertilité indique que l'intensification écologique est possible avec un usage raisonné des fertilisants minéraux. Les caractéristiques du climat et des sols, le paysage de parc agroforestier et la pratique d'une rotation céréale-légumineuse sont des atouts majeurs contre les risques environnementaux de l'intensification. Les réponses des exploitations simulées aux scénarios politiques testés sont très variables selon le type d'exploitation et la zone agroécologique :

Dans le nord du bassin, l'aridité limite trop l'efficacité de la fertilisation pour qu'il soit pertinent d'intensifier les céréales et il est plus légitime de soutenir la filière arachide, voire de développer les filières d'autres légumineuses à cycle plus court (niébé).

Dans le reste du bassin, pour les plus pauvres, il vaut mieux cibler des subventions aux engrais minéraux et, pour les moins pauvres, l'accès au crédit combiné à des assurances.

- Les politiques de soutien à l'intensification écologique mériteront aussi d'être accompagnées de mesures de soutien à la réduction des pertes en nutriments dans les relations agriculture-élevage, passant par des investissements à plus long terme (équipement de stockage du fumier, de compostage), ou à l'entretien des parcs arborés.

Les politiques testées permettent une augmentation des revenus surtout pour les plus pauvres, luttant ainsi contre les inégalités. Elles permettent ainsi l'accroissement de la production de céréales et renforcent la souveraineté alimentaire du Sénégal sans dégrader l'environnement.

Mots-clés

Sénégal, agroécologie, intensification, inégalités, agriculture

Remerciements

Les auteurs remercient l'AFD et l'Union Européenne pour leur appui technique et financier.

Classification JEL

N57, O13, Q12, I32

Version originale

Français

Acceptée

Août 2020

Abstract

This paper analyzes the impact of different public policies on ecological intensification and income inequality in the Senegal Groundnut Basin, the country's main rain-fed farming region. It is based on a bioeconomic model simulating the situation of different types of agricultural households in detail. The multi-criterion evaluation of technical itineraries based on integrated fertility management indicates that ecological intensification is possible with the rational use of mineral fertilizers. The characteristics of the climate and the soil, the landscape of the agroforestry park, and the practice of a cereal-legume crop rotation are major assets against the environmental risks of intensification. The responses of the simulated farms to the political scenarios tested vary widely depending on the type of farm and the agroecological area:

In the North of the basin, the aridity limits the efficiency of fertilization too much for intensifying grains to be relevant. It is more legitimate to support the groundnut

sector, or even to develop other shorter-cycle legumes (cowpeas).

In the rest of the basin, for the poorest, it is better to target subsidies for mineral fertilizers and, for the less poor, access to credit combined with insurance.

Policies to support ecological intensification should also be accompanied by measures to support the reduction of nutrient losses in the livestock/farming relationship, which involve longer-term investments (manure storage equipment, composting, or the maintenance of the wooded parks).

The policies tested allow an increase in income especially for the poorest, thus fighting inequalities. They hence allow an increase in grain production and strengthen Senegal's food sovereignty without degrading the environment.

Keywords

Senegal, agroecology, intensification, inequalities, agriculture

Original version

French

Introduction

Au Sénégal, malgré de nombreux programmes d'intervention publique visant à la diminution de la pauvreté et à l'amélioration de la souveraineté alimentaire, plus de la moitié de la population rurale vit toujours en dessous du seuil de pauvreté et les importations demeurent prépondérantes dans la consommation nationale de céréales. Avec le changement climatique, il est probable que la situation, déjà difficile, empire et qu'il faille faire face à de nombreux problèmes sociaux (chômage, migration, insécurité...). Il est maintenant largement reconnu que le développement du secteur agricole a un rôle majeur à jouer pour promouvoir une croissance favorable aux pauvres (World Bank, 2007). Ceci est notablement vrai pour le Sénégal où le potentiel de gain de productivité du travail dans le secteur agricole est particulièrement élevé, vu la faiblesse des rendements actuels. Cependant, il est fondamental d'éviter les externalités environnementales négatives causées par une révolution verte classique sur le modèle asiatique (pollution de l'eau par les pesticides, émissions de carbone élevées, érosion des sols). L'alternative logique est d'envisager une intensification écologique, où les fonctions écologiques clés sont mobilisées pour améliorer l'efficacité de l'utilisation des ressources naturelles. Pour autant, de nombreuses études soulignent le rôle majeur du risque et de la contrainte de liquidité dans l'absence d'intensification, de telle sorte qu'il ne paraît pas possible de s'engager dans cette voie sans politiques visant à réduire ces contraintes. Le caractère écologique de l'intensification doit permettre de réduire les risques et de

rendre aussi parcimonieux que possible l'usage d'intrants exogènes à l'écosystème.

Afin de définir les leviers à même de promouvoir l'intensification écologique et de les traduire en politiques d'accompagnement, il est nécessaire d'étudier en détail la situation des producteurs (dotations en facteurs de production, caractéristiques du milieu, besoins économiques des familles). En effet, les opportunités et contraintes (agronomiques, alimentaires, financières, sur le travail, etc...) auxquelles les différents types de producteurs font face déterminent leur comportement et seules des mesures basées sur une telle compréhension seront efficaces pour induire une modification des pratiques. De plus, il est nécessaire de vérifier que les mesures choisies permettent de répondre aux différents objectifs de la politique agricole : non seulement accroître les revenus de la majorité des agriculteurs, sans exclure les plus pauvres afin de lutter contre la pauvreté, mais aussi accroître la production, afin de répondre à l'objectif national de souveraineté alimentaire.

En effet, certaines politiques, en négligeant les inégalités de départ, excluent les plus pauvres, car ils ne peuvent pas investir les liquidités initiales nécessaires à leur participation, soit faute de moyens, soit car leur situation économique globale ne leur permet pas de prendre les risques nécessaires. Ces politiques, en excluant les plus vulnérables, accroissent les inégalités et n'atteignent ainsi pas leur objectif (Daw *et al.* 2011 ; Brockhaus *et al.* 2013)

C'est pourquoi afin d'évaluer les mesures les plus efficaces pour promouvoir l'intensification agroécologique tout en diminuant les inégalités, cette étude se base sur des modèles de simulations bioéconomiques, décrivant dans le détail la situation des différents types de producteurs. De premiers travaux, menés depuis 2011, nous permettent de disposer de modèles biophysiques reproduisant la croissance des plantes, d'enquêtes décrivant la situation socio-économique des producteurs agricoles et de modèles socio-économiques représentant leur processus de décision et ses résultats en termes d'allocation (i) du travail familial et des liquidités entre les différentes activités et la consommation ; (ii) des terres entre les cultures et techniques de production. On peut ainsi calculer le niveau de production et de revenu et évaluer le recours aux techniques agroécologiquement intensives. Nous avons adaptés ces modèles ici afin d'évaluer, sur six (6) types d'exploitant, l'impact sur les revenus et les inégalités comme sur le niveau de production de différentes mesures de politique économique destinées à favoriser l'intensification écologique.

Le « vieux bassin arachidier », considéré comme le grenier du Sénégal, atteint à peine le quart du niveau moyen mondial des rendements céréaliers, ce qui laisse une large marge d'amélioration. Il fait figure d'emblème de la situation de l'agriculture pluviale de la bande soudano-sahélienne de l'Afrique de l'Ouest, où la grande majorité des paysans se trouve coincée dans un piège à pauvreté lié au très faible niveau de rendement des cultures par rapport au potentiel permis par le climat. Les rendements céréaliers sont de l'ordre de 400 à 800 kg/ha, alors que le potentiel

permis par le rayonnement, la température et les précipitations est de l'ordre de 3 000 kg/ha avec les cultivars actuels, orientés aussi bien vers la production de fourrage et de fibres que vers celle de céréales, et pourrait atteindre 6 000 à 7 000 kg /ha en moyenne annuelle avec des cultivars plus spécialisés dans la production céréalière. La densité de population est telle que l'espace cultivable est saturé et que les zones utilisables en parcours pour les animaux sont très réduites, avec pour conséquence l'impossibilité d'augmenter significativement les transferts de fertilité depuis ces zones de parcours vers les parcelles cultivées. La croissance démographique reste soutenue, si bien qu'il est impératif d'intensifier au-delà de ce que les producteurs ont su faire jusqu'ici, de la manière la plus agroécologique qui soit, puisque sans utilisation ou presque de ressources exogènes à l'écosystème exploité directement. Il devient nécessaire d'augmenter substantiellement la fertilité du milieu et on ne peut rejeter l'hypothèse de la nécessité de mobiliser à présent de telles ressources et, notamment, les fertilisants minéraux.

La première partie présente succinctement le modèle bioéconomique utilisé. Une seconde partie décrit le bassin arachidier du Sénégal. On s'intéresse d'abord aux conditions biophysiques, puis une analyse socio-économique des différents ménages le peuplant est proposée, avant de présenter ceux sélectionnés pour les simulations. Enfin, les formes que peuvent prendre l'intensification agroécologique dans le contexte particulier du bassin arachidier sont identifiées et les indicateurs et itinéraires techniques retenus pour l'analyse sont décrits. Une troisième partie présente les politiques testées et

leurs résultats sur le revenu des différents types d'exploitant agricole, les inégalités, la production, l'évolution des surfaces où des techniques d'intensification écologique sont déployées. Une synthèse permet de mettre en évidence la difficulté des compromis nécessaires

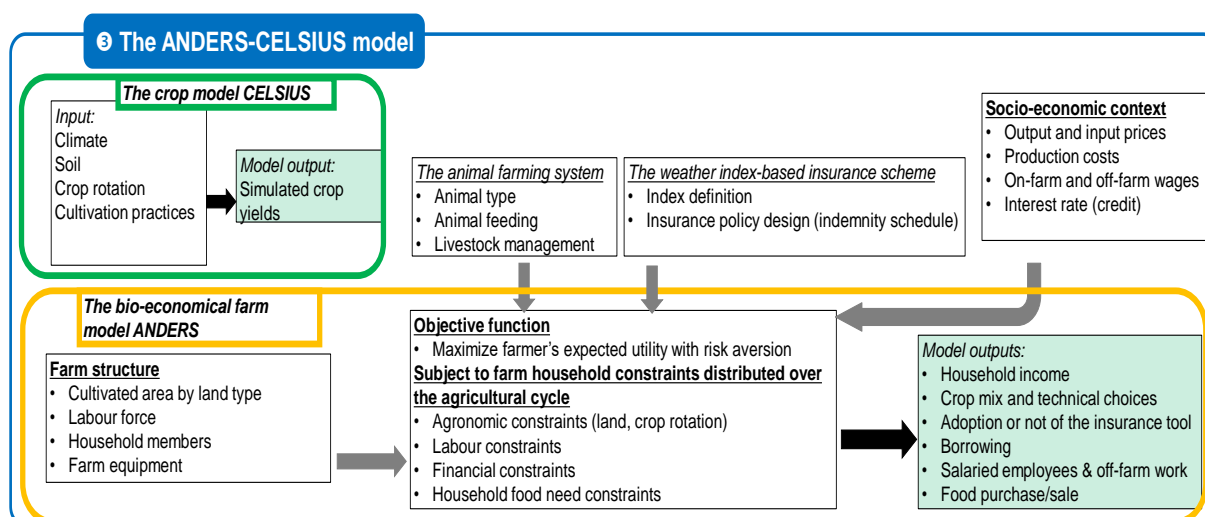
entre les différents objectifs de la politique agricole, l'intérêt des différentes régions constituant le bassin arachidier et des différents types de ménages. Une brève discussion de l'ensemble de ces résultats conclut le document.

1. Anders-Celsius : un modèle bioéconomique pour représenter les décisions des producteurs et leurs résultats en fonction du milieu

Nous nous appuyons dans cette étude sur un modèle mathématique simulant des ménages d'exploitants agricoles ruraux. D'une manière générale, un tel modèle reproduit l'essentiel de la complexité des décisions des agriculteurs en vue d'étudier l'impact que pourraient avoir, sur les exploitations, des changements substantiels de leur environnement naturel, des techniques de production disponibles et connues des producteurs, et de leur environnement économique. Il s'agit d'une approche relativement classique de l'évaluation ex ante de l'impact de politiques publiques ou d'innovations techniques sur les exploitations et une abondante littérature ancienne existe à ce sujet. On pourra se reporter à Janssen et van Ittersum (2007) pour une étude critique de la littérature, fondant plus précisément notre emploi de cette approche pour l'évaluation intégrée de la durabilité des systèmes de production agricole (voir aussi van Ittersum et Brouwers 2009). Dans le cas de cette étude, nous employons ANDERS-CELSIUS, modèle spécifiquement développé pour simuler les exploitations de polyculture-élevage du vieux bassin arachidier sénégalais, avec une représentation sophistiquée des risques résultant de la variabilité interannuelle du climat et du prix des produits agricoles pour quatre types contrastés d'exploitation les plus communs dans la région (Ricôme *et al.*, 2017). Les détails de ce modèle sont décrits de manière exhaustive dans les annexes de cette publication. Nous ne les reproduisons pas ici, mais en résumons les caractéristiques nécessaires à la compréhension de l'analyse.

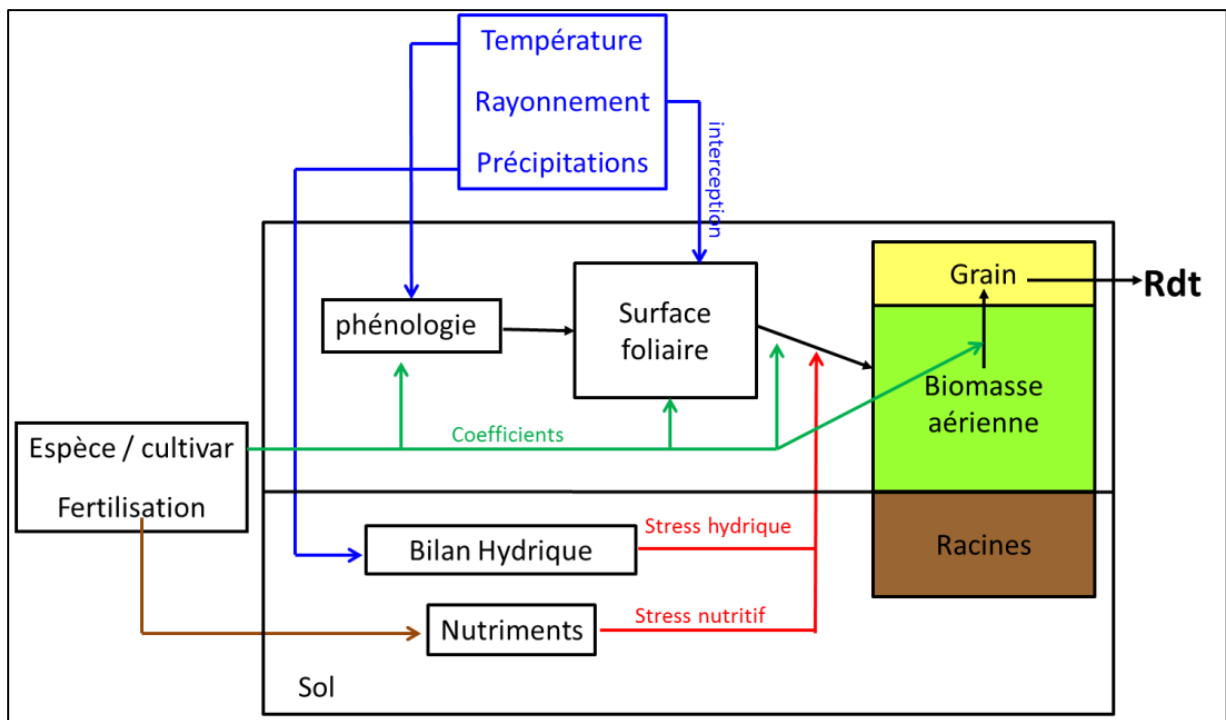
En réalité, il s'agit du couplage de deux modèles (figure 1) : un modèle de culture dynamique nommé CELSIUS (CEreal and Legume crops Simulator Under changing Sahelian environment) et un modèle de ménage agricole simulant la stratégie de la ferme sur l'année agricole, nommé ANDERS (Agricultural aNd Development Economics model for the gRoundnut basin in Senegal).

Figure 1 : Organigramme général du modèle couplé ANDERS (« modèle bioéconomique ») CELSIUS (« modèle biophysique »)



CELSIUS (figure 2) prend comme paramètres d'entrée des séries de données climatiques journalières de vingt ans représentant le climat de l'exploitation, les paramètres caractéristiques de fertilité des sols de l'exploitation, de leur capacité de stockage de l'eau de pluie et de leurs propension au ruissellement et à l'évaporation. Le modèle simule le développement, la croissance et le rendement en biomasse et grains de céréales et de légumineuses pour des hypothèses variées de gestion technique couvrant la pratique actuelle des agriculteurs et un ensemble d'options contrastées d'intensification « conventionnelle » et écologique. Pour ce faire, il tient compte du bilan hydrique journalier de la culture et donc des pertes en eau par ruissellement, évaporation et drainage pour estimer l'impact du stress hydrique sur la croissance et le rendement des cultures, ainsi que des indicateurs de risques d'érosion et de pollution des eaux par ruissellement et drainage. CELSIUS simule aussi l'effet de disponibilité insuffisante de l'azote du sol selon les stocks d'azote organique et de la fertilisation organique ou minérale éventuelle. Il a été conçu particulièrement pour représenter la façon dont les deux types de stress – hydrique et azoté – interagissent de telle sorte que l'intensification des cultures amplifie en général les variations interannuelles de rendement. Il tient également compte des réponses différentes du mil et du maïs, ainsi que de ces céréales et d'une légumineuse typique comme l'arachide, concernant la sensibilité au stress hydrique et à la fertilisation ou plus généralement à une intensification sans recours aux pesticides. Les simulations de rendement réalisées avec Celsius sont utilisées comme données d'entrée du modèle ANDERS où des séries de 20 ans de rendements obtenues pour 20 années climatiques représentent, pour chaque modalité technique appliquée à chaque type de sol considéré dans l'analyse, 20 « états de nature » qui pourraient se produire pendant l'année agricole avec une probabilité égale.

Figure 2 : Le modèle Celsius



Outre ces données de rendement simulées par CELSIUS, le modèle ANDERS (figure 3) a pour principales données d'entrée les paramètres de l'environnement économique des exploitations que sont des séries de vingt ans de données de prix des produits agricoles, les prix actuels des intrants, les caractéristiques des systèmes de crédit de campagne pour l'achat d'intrants agricoles, les caractéristiques des assurances indicielles contre les risques de sécheresse et le prix de la main d'œuvre contractée par les exploitations ou obtenue par les agriculteurs pour des activités hors de leur propre ferme.

Le modèle tient compte également de paramètres spécifiques de la structure des exploitations tels que la superficie des terres pour les différents types de sol, le nombre d'actifs par tranche d'âge et par genre avec les contraintes de disponibilité spécifiques de ces catégories pour le travail agricole (par exemple la disponibilité des plus jeunes uniquement pendant les vacances scolaires). La trésorerie initiale disponible ainsi que les stocks d'animaux et de produits agricoles initiaux, l'aversion au risque des exploitants et les rentrées éventuelles d'argent obtenues d'activités extra-agricoles autres que la vente de main d'œuvre, notamment via la migration à faible ou longue distance de membres de la famille, sont également pris en compte. ANDERS contient une liste d'activités possibles dans les exploitations, c'est-à-dire les différents systèmes techniques de valorisation des ressources de l'exploitation, par les cultures ou l'élevage, en vue d'obtenir des produits consommables ou pouvant être vendus. Chaque activité du système de culture ou d'élevage de cette liste est caractérisée par ses performances de production et ses besoins en main d'œuvre et en intrants (y compris force de traction animale ou motorisée, semences, engrais minéraux et organiques pour les cultures, vaccins et autres frais vétérinaires pour les animaux). Les bilans énergétiques et protéiques sont également inclus pour les animaux (azote digéré et matière sèche). Ils peuvent être nourris avec des

pâturages, des céréales, de la paille et des aliments achetés. Un rendement stochastique par tête est supposé prendre en compte le risque lié aux activités d'élevage. Les interactions entre les systèmes de culture et d'élevage sont prises en compte à travers la force de traction des animaux de trait, l'alimentation des animaux avec des produits végétaux et la production de fumier. Tous les « coefficients techniques des activités » sont fournis en fonction des différentes périodes dont se compose l'année, de façon à représenter les contraintes de mobilisation de ces différentes ressources en termes de compétition et synergies possibles entre différentes activités pour ces ressources à un moment donné. Ces données ont été obtenues soit à l'aide du modèle CELSIUS pour les performances des cultures, soit par le biais de la littérature lorsque l'information y est disponible, soit et surtout par enquêtes détaillées auprès des producteurs. Ces enquêtes ont été conduites lors de la mise au point initiale du modèle en 2012 et 2013, puis réactualisées par une nouvelle enquête en 2019.

Un algorithme d'optimisation recherche la combinaison d'activités d'élevage et de culture qui maximise une fonction mathématique exprimant les objectifs des agriculteurs, en respectant les contraintes du ménage et en prenant en compte les risques liés aux variations de rendement et de prix. Ces contraintes sont d'équilibrer le bilans des ressources (trésorerie, main d'œuvre, équipement, terres, etc...) pour toutes les périodes de l'année et de garantir la satisfaction des besoins élémentaires du ménage, dont sa sécurité alimentaire. L'utilisation des terres cultivables, pâturages et animaux de trait est limitée par la dotation en facteurs de production de l'exploitation, combinée aux possibilités offertes par le marché (par exemple, location d'animaux de trait, de tracteur). L'ensemble des équations est fourni dans l'Annexe 1.

Afin de prendre en compte le risque, la fonction objectif maximisée dans le modèle est l'utilité espérée du revenu (EU, pour Expected Utility), définie mathématiquement comme suit (fonction CARA) :

$$EU = \frac{1}{n} \sum_{e=1}^n 1 - \exp[-r_a(\pi_e + w)]$$

Où e désigne les « états de la nature » équiprobables combinant un état du climat et un état des prix, n le nombre d'états de la nature, r_a l'aversion absolue au risque du ménage exploitant¹, π_e le revenu du ménage pour l'état de nature e , w le niveau de revenu initial du ménage. Le revenu π_e est calculé comme la somme des revenus générés par les activités culturales, d'élevage et extra-agricoles, en y ajoutant la variation des stocks d'animaux ou de céréales à la fin de la période, ainsi que les versements éventuels d'assurance, d'emprunts ou de diverses subventions et en y retranchant la prime d'assurance et les remboursements d'emprunts.

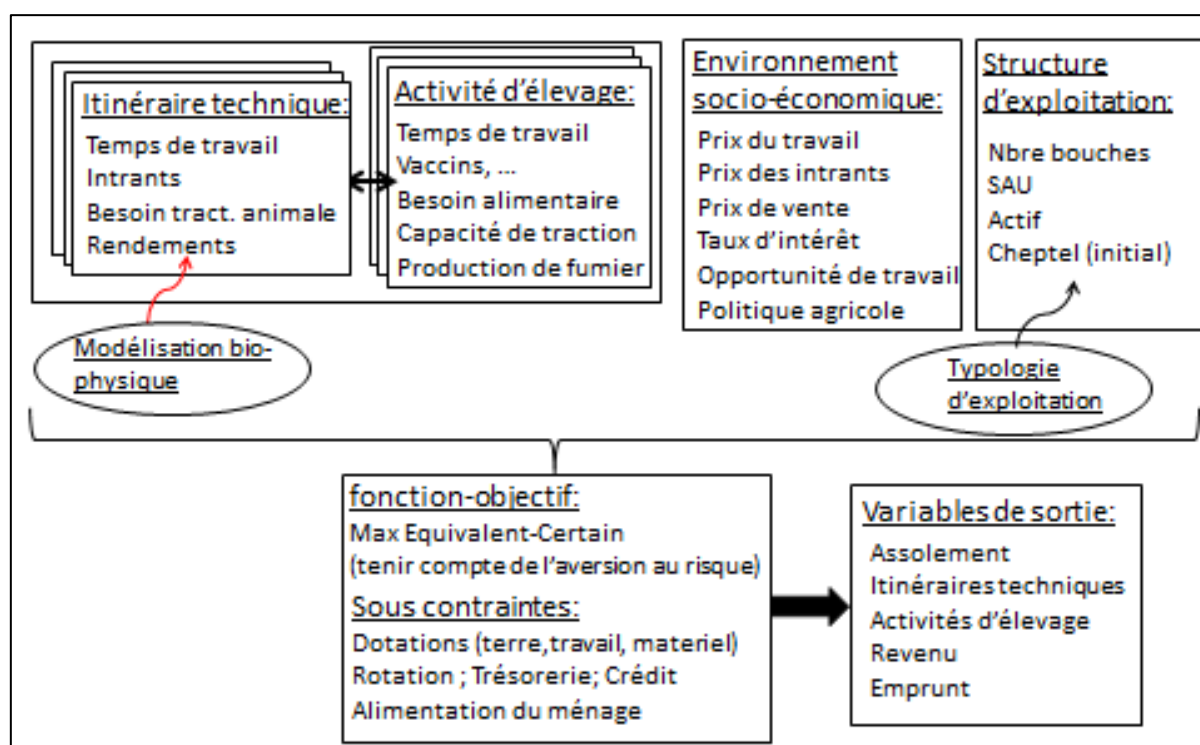
¹ Conformément à la littérature, on définit $r_a = \frac{r_r}{w}$, avec r_r l'aversion pour le risque relative. Ce paramètre extrêmement difficile à observer est utilisé comme paramètre de calibrage en le conservant dans les valeurs habituelles, comprises entre 1 et 4.

Avec cette fonction, l'utilité augmente avec le revenu et diminue avec le risque lié aux fluctuations des prix et du climat, selon l'aversion au risque des ménages. Même si la simulation porte sur le système de production optimal représenté pour une année agricole, le calcul est réalisé pour tous les états de la nature. Ainsi, le résultat final prend bien en compte les variations interannuelles des prix et du climat, assumées comme perçues par les ménages simulés, sur la base d'une expérience des 20 années passées. Des contraintes finales obligent à conserver en fin de simulation, en moyenne sur l'ensemble des états de la nature, un montant de trésorerie et d'énergie contenue dans les stocks de produits alimentaires, égal au montant détenu en début de simulation. En revanche, pour les états de la nature pris individuellement, la moitié du montant initial de trésorerie et de stocks alimentaires est suffisante. Cette contrainte représente la nécessité de ces stocks, pour qu'une nouvelle année agricole puisse commencer ensuite dans des conditions adéquates, tout en assumant que les ménages peuvent être amenés, dans certains cas où ils sont très contraints, à « décapitaliser ». On prend ainsi en compte l'importance des liens sociaux villageois qui fournissent une assurance informelle, permettant de redémarrer l'année suivante en dépit de conditions parfois extrêmes. Celle-ci n'est donc pas simulée explicitement mais prise en compte de manière indirecte et synthétique.

Le modèle simule ainsi non seulement le revenu et sa variation interannuelle résultant des aléas climatiques et économiques, mais aussi l'assolement de l'exploitation, c'est-à-dire la décision des exploitants concernant les cultures utilisées et leurs techniques de gestion. Il simule aussi la façon dont le système de culture est réparti sur les différents types de sols de l'exploitation et mobilise la main d'œuvre, la trésorerie pour les achats d'intrants, et les biomasses fertilisantes disponibles grâce aux différentes activités dont l'élevage (fumier, paille et autres résidus de cultures) au cours des différentes périodes de l'année. Le modèle procède de même pour le système d'élevage et simule notamment la taille d'un éventuel atelier d'embouche intensive de petits ou gros ruminants. Il simule également la production de l'exploitation (au total et par activité), les décisions de consommation du ménage (consommation de produits de l'exploitation et de produits acquis sur le marché), d'achats et de ventes (y compris de main d'œuvre), de recours à l'assurance ou à l'emprunt, les flux et stocks de produits (dont l'intégration entre les cultures et l'élevage), d'intrants et de biens de consommation, le tout par période de l'année. Enfin, sont également simulés des indicateurs synthétiques de sécurité alimentaire et de pauvreté des ménages, et le « revenu équivalent certain » (CEI – pour Certain Equivalent Income) de la simulation, c'est-à-dire le revenu qui fournirait, s'il n'y avait pas de risque, la même utilité que la distribution de probabilité de revenus résultant de l'application des états de nature.

Cependant, le modèle ne simule pas le système d'élevage extensif de manière dynamique et, de ce fait, ne permet pas d'explorer l'impact de politiques sur la croissance des ateliers d'élevage les uns relativement aux autres (exemple atelier d'embouche de petits ruminants versus bovins en conduite extensive) ou relativement aux productions végétales. En effet, il aurait été extrêmement délicat et incertain, en termes de maîtrise de la complexité du modèle, de concilier la représentation des risques climat et prix comme nous l'avons fait, avec celle de la dynamique des élevages extensifs.

Figure 3 : Le modèle ANDERS

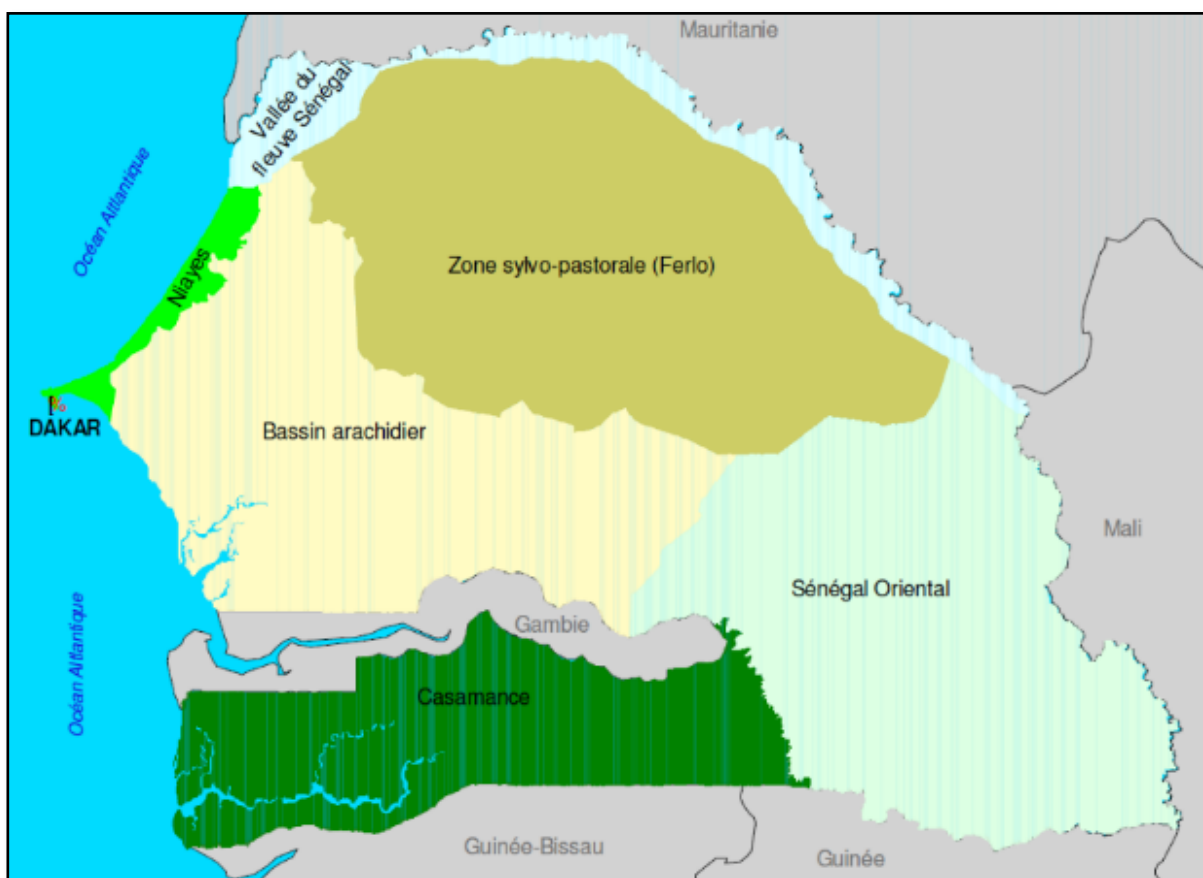


2. Le vieux bassin arachidier : des conditions biophysiques contrastées, mais des systèmes de production et des inégalités entre ménages relativement similaires

Cette partie examine les différents milieux biophysiques appartenant au bassin arachidier (figure 4) et les types d'exploitants existant dans chacun. Pour ce faire, nous mobilisons à la fois les études existantes, les connaissances des experts et plusieurs enquêtes, dont la base de données du Projet d'Appui aux Politiques Agricoles comprenant des informations sur un échantillon représentatif de ménages agricoles du Sénégal.

Figure 4 : Les principales zones éco-géographiques au Sénégal

Source : CSE, 2007



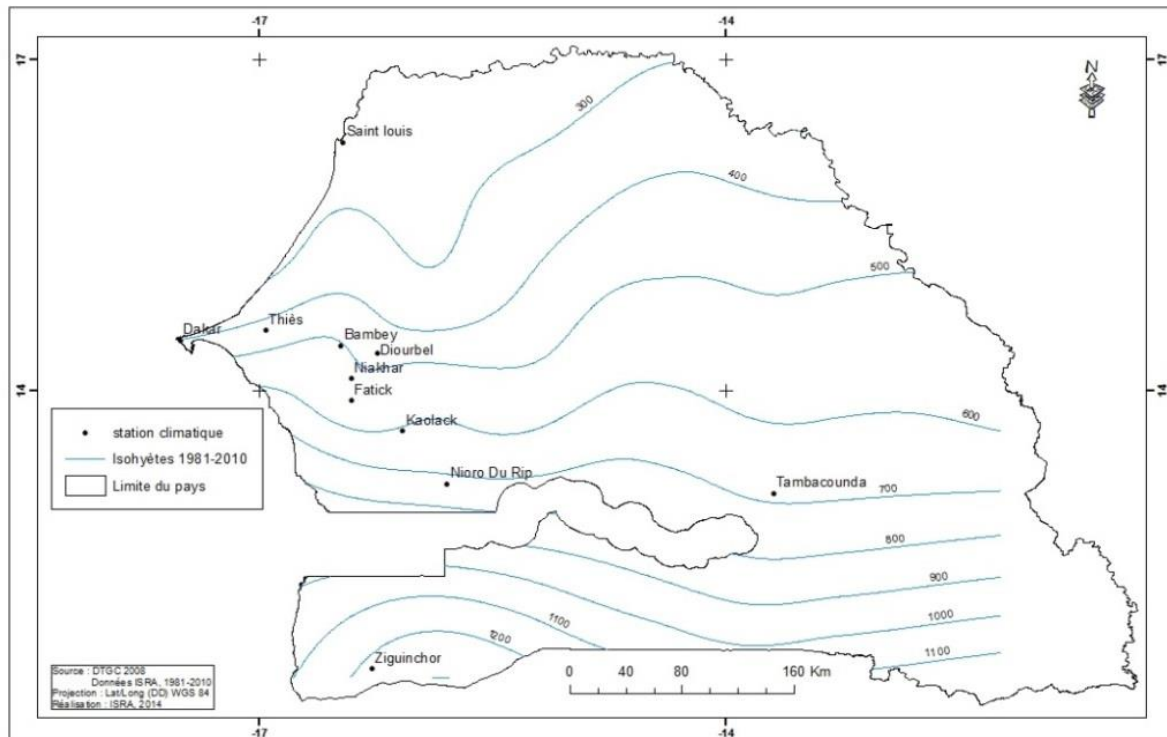
2.1. Le milieu

Le « vieux bassin arachidier » du Sénégal est ainsi nommé en référence à l'importance de cette culture (*Arachis hypogea*) pour le pays depuis la seconde moitié du XX^{ème} siècle, avec un âge d'or de la filière de cette culture culminant dans les années 70. Le Sénégal était alors parmi les tous premiers exportateurs mondiaux de produits de l'arachide. Le rôle de cette culture dans l'économie des ménages ruraux et dans celle du pays a connu un relatif déclin depuis, notamment avec la mise en place, au niveau mondial, de politiques libérales contraignant le Sénégal à réduire ses interventions sur les tarifs douaniers et la filière en général, dont les prix payés aux producteurs (Noba *et al.*, 2014). Il en a résulté une perte de productivité à peu près à toutes les étapes de la filière en aval des exploitations. Pour ces dernières, on relève essentiellement une diminution des surfaces en arachide et, dans une moindre mesure, une baisse des rendements principalement due à la baisse de la qualité de la semence, au retard de l'approvisionnement des agriculteurs en temps utile, au bas prix des semences appropriées, à la demande du marché et à la carte des contraintes climatiques de la zone (Noba *et al.*, 2014). Aujourd'hui, le « vieux bassin arachidier » reste une région agricole d'importance majeure pour le Sénégal, où domine une rotation biennale céréale-arachide en conditions strictement pluviales, c'est-à-dire sans irrigation. À de nombreux points de vue, c'est aussi une région typique de la zone soudano-sahélienne de l'Afrique, avec un niveau de pauvreté élevé, où l'agriculture familiale basée sur les cultures pluviales est prédominante, sous un climat semi-aride avec un fort gradient sud-nord de risque de sécheresse limitant la production agricole (Boulier et Jouve, 1990). La céréale dominante y est le mil (*Pennisetum typhoides*), avec une place croissante pour le maïs (*Zea mays*) entre le centre du bassin et sa limite sud, l'aridité du climat rendant cette espèce, plus sensible au stress hydrique que le mil, particulièrement risquée dans la moitié nord de la région.

Physiquement, le climat varie donc du sud au nord principalement par une augmentation très sensible de son aridité, les précipitations annuelles cumulées moyennes variant de 800mm à 300mm entre ces deux extrêmes, avec des lignes isohyètes orientées grossièrement comme la latitude (figure 5).

Figure 5 : les précipitations au Sénégal

Source : Ricome et al., 2017



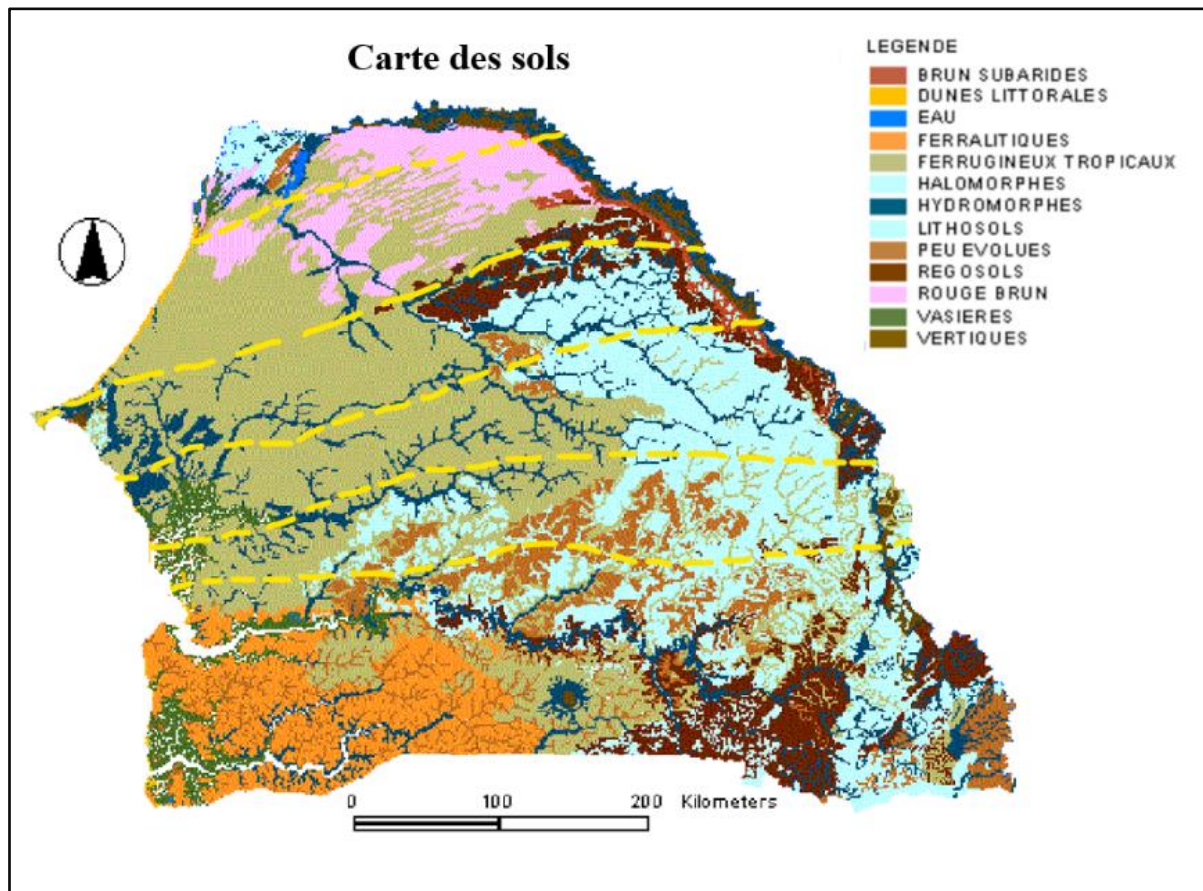
La région est une grande zone sédimentaire aux mouvements de relief remarquablement absents, de telle sorte que l'hétérogénéité des sols (figure 6) est plutôt graduelle, entre :

- au nord, des sols très sableux et peu évolués sur dépôts éoliens quaternaires de sables du Sahara, profonds, ne contraignant pas le système racinaire des plantes, très drainants, mais à la capacité de stockage de l'eau faible par unité de volume de sol (autour de 70 à 90 mm par mètre), exposés à l'érosion éolienne mais relativement peu à l'érosion hydrique ;
- dans la partie centre-ouest du bassin, des ferrugineux peu lessivés, encore très sableux avec cependant davantage d'éléments fins leur conférant une meilleure réserve utile par mètre de sol que les précédents, et tout aussi profonds et drainants. Dans le détail, avec le colluvionnement dans les parties basses de la topographie, les faibles ondulations du relief déterminent des variations de taux d'argile et limon entre les dénominations vernaculaires « dek » et « dior », respectivement pour les sols plus argileux dans les micro-dépressions, à la réserve utile de l'ordre de 110 à 120 mm par mètre, et pour les sols plus sableux entre ces points bas, à la réserve utile de 90 à 100 mm/m ;
- dans le tiers sud du bassin, au sud de la ville de Kaolack, on trouve des toposéquences un peu plus marquées avec de longs versants reliant des interfluvés à des bas-fonds, mais on y retrouve principalement les sols ferrugineux précédents, dans des variantes souvent plus lessivées, avec ces mêmes modalités dior et dek distinguées par les producteurs, mais correspondant à des teneurs en

éléments fins et à des réserves utiles un peu plus élevées que les précédents. Ils sont ainsi plus volontiers battants, se croutent en surface et sont ainsi nettement moins infiltrants en l'absence de travail mécanique ou biologique et, de ce fait, plus sujets au ruissellement et à l'érosion hydrique sans techniques culturales adaptées. On trouve aussi des sols plus franchement ferrallitiques dans cette partie de la région, mais leurs propriétés dans la zone colonisable par les racines restent très proche des précédents, avec peut-être davantage d'acidité ;

- dans le centre-est du bassin, au contact avec des reliefs plus marqués, les sols sur cuirasse latéritique sont fréquents, tandis que les sols précédemment décrits sont plus rares, ce qui se traduit par de fortes contraintes physiques avec un enracinement et une réserve utile limités à la fois par la faible épaisseur de sol et par sa forte pierrosité et charge en cailloux non poreux. Cette région, encore très largement forestière jusqu'au milieu du XXe siècle, a été défrichée plus tardivement que le reste du bassin et les sols conservent encore aujourd'hui une teneur en matière organique sensiblement plus élevée que dans les parties plus occidentales du bassin ;
- dans le centre comme au sud, le long du réseau hydrographique, on trouve des sols hydromorphes, parfois, utilisés de plus en plus fréquemment pour du riz pluvial, céréale présente dans la zone dans un passé ancien qui semble faire un certain retour avec la relative augmentation des précipitations observables depuis une décennie, surtout dans le bassin du fleuve Saloum et des affluents du fleuve Gambie, dans le tiers sud du bassin arachidier. Cependant, dans la zone estuaire de ces fleuves, prédominent des sols salés incultes, les tanns, et des zones de mangrove. Toutefois, lorsqu'ils sont exondés assez longtemps dans l'année pour que les précipitations réduisent leur salinité, ces sols peuvent être utilisés pour du maraîchage et des cultures pérennes telles que l'anacardier. Dans le centre (bassin du fleuve Sine), le débit du fleuve est très faible voire nul en saison sèche et les eaux marines pénètrent abondamment le réseau avec là aussi pour conséquence une forte salinité des sols de bas-fonds et des nappes souterraines. En raison de cette contrainte, ces sols ont été très peu utilisés jusqu'ici pour l'agriculture et sont réservés aux parcours d'élevage.

Figure 6 : Les sols du Sénégal



Le tableau physique de la région doit être complété par la mention du paysage de parc agroforestier qui la recouvre. Il s'agit d'un parc dominé par *Faidherbia albida* au centre, *Acacia senegal* au Nord, karité (*Vitellaria paradoxa*) et néré (*Parkia biglobosa*) au sud. Les services écosystémiques que ces parcs rendent sont assez bien connus. Certains sont valables sur l'ensemble des types de parc et d'autres dépendent de l'espèce arborée dominante. Tous réduisent l'aridité du climat par effet brise-vent et ombrage, protègent le sol contre l'érosion sans la supprimer et contribuent au recyclage de nutriments ayant migré vers le bas avec le flux hydrique hors de la zone du sol explorable par les racines des cultures annuelles. Ce dernier point est un enjeu surtout dans la moitié sud du bassin où le flux de drainage est conséquent. Ces services sont tous contraignants pour la mécanisation des cultures, quoique assez faiblement et plus ou moins selon la densité du couvert arboré, et de façon sans doute assez indépendante des espèces arborées présentes. Ils contrastent surtout entre eux par le degré de compétition pour le rayonnement, l'eau et l'azote qu'ils exercent sur les cultures annuelles et par les services d'approvisionnement qu'ils procurent. La première de ces deux types de caractéristiques est très dépendante des espèces arborées constituant ces parcs. L'acacia, le *Faidherbia* et le néré sont des espèces légumineuses, à l'activité de fixation symbiotique faible, mais qui a priori ont plutôt tendance à apporter de l'azote d'origine atmosphérique au système agraire qu'à en extraire. Ces trois espèces sont donc assez peu en compétition avec les

cultures pour ce nutriment qui est le principal facteur limitant nutritionnel de la région. Le parc à *Faidherbia* se distingue plus nettement des autres par le fait que la présence de l'espèce est liée à l'accès de son système racinaire à l'eau d'une nappe phréatique. Le *Faidherbia albida* a son cycle végétatif pendant la saison sèche et perd ses feuilles au début de la saison des pluies, de telle sorte qu'il n'exerce pas de compétition pour les nutriments et qu'il intercepte assez peu de rayonnement relativement à la taille de sa canopée pendant la saison de culture. Concernant les services d'approvisionnement fournis par les parcs, le contraste entre eux est moins net : toutes les espèces arborées sont utilisées, de manière en général assez peu intensive pour éviter la dégradation du couvert, comme source de bois de feu ou d'œuvre et comme source de condiments et d'éléments de pharmacopée. Dans le cas de l'acacia et du *Faidherbia*, le feuillage est utilisé, par émondage modéré des arbres ou consommation directe des rameaux les plus bas comme fourrage pour les petits ruminants. Le karité, qui est assez bien représenté dans le parc agroforestier du sud du bassin arachidier, produit un fruit qui a un certain potentiel économique du fait de son utilisation dans l'industrie et l'artisanat des cosmétiques, mais qui est relativement peu valorisé par les exploitants sénégalais.

À partir des éléments qui précèdent, on peut distinguer cinq archétypes d'environnement biophysique (ATB) contrastés du point de vue des potentialités et contraintes agronomiques. Plutôt que de les présenter sous forme d'un zonage schématique qui serait trompeur, nous préférons ici donner la localisation approximative qui correspond le plus clairement à chaque archétype, les transitions entre eux à travers l'espace du bassin arachidier étant extrêmement graduelles et continues.

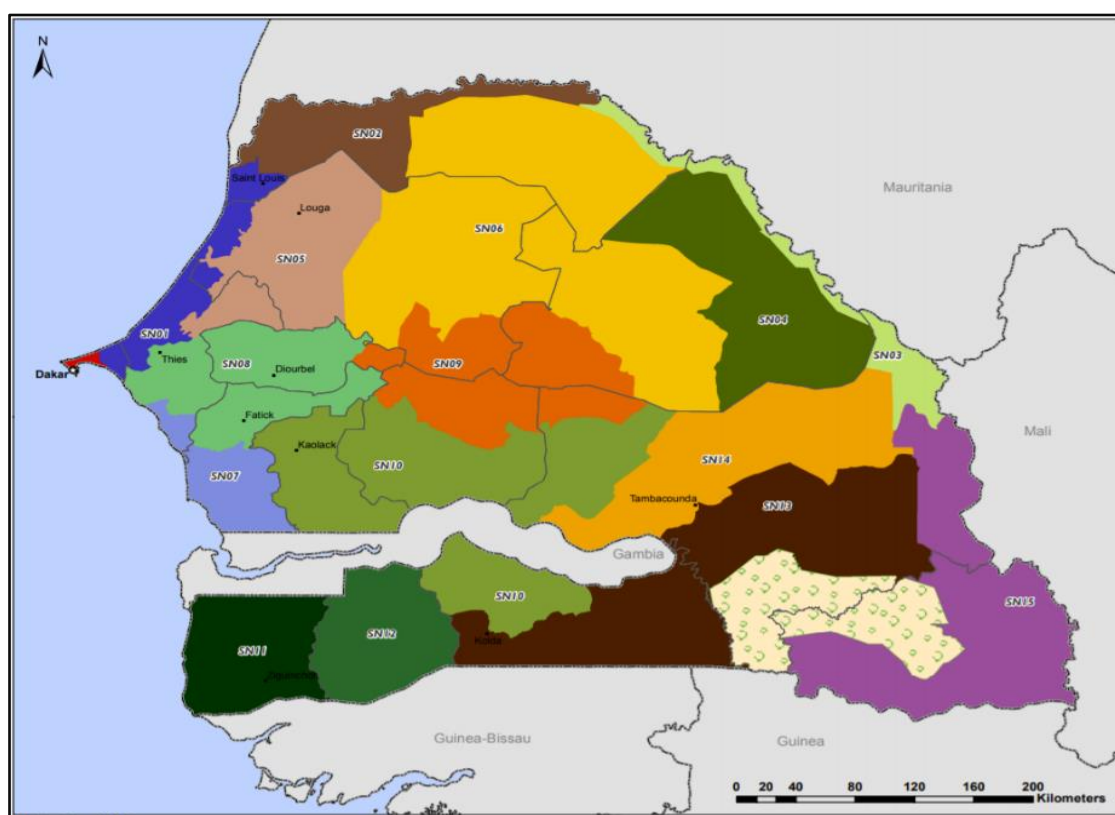
- ATB1 : aridité maximale pour les cultures pluviales, parc à *Acacia senegal*, sols très sableux – Louga,
- ATB2 : aridité intermédiaire, sols dior et dek profonds à réserve utile entre 90 et 110 mm par mètre, peu battants, parc à *Faidherbia* – de Fatick à Diourbel,
- ATB3 : aridité minimale du climat (relativement aux autres), parc à néré et karité, sols dior et dek profonds à réserve utile entre 100 et 120mm par mètre, pente et battance des sols favorables au ruissellement et à l'érosion hydrique – de la frontière avec la Gambie à Nioro et Kaffrine,
- ATB4 : aridité intermédiaire, parc mixte *Faidherbia/acacia*, néré et karité, mais densité faible d'arbres, sols ferrallitiques et ferrugineux par endroits, dominance de lithosols à très faible profondeur et pierrosité élevée, stocks organiques plus élevés – Kounghoul (variante à pluviométrie un peu plus abondante vers le sud-est – Koumpentoum),
- ATB5 : aridité intermédiaire ou minimale, zone des tanns et mangrove avec cultures pérennes et maraîchage sur sols exondés moins salins – Foundiougne.

2.2. Les ménages et leurs moyens d'existence par archétype d'environnement biophysique

Les archétypes d'environnement biophysique décrit ci-dessus sont en concordance avec les zones utilisées par l'approche de l'économie des ménages (AEM) pour sa typologie, réalisée afin de localiser les ménages vulnérables lors des interventions d'urgence. Sur chacune des six (6) zones identifiées comme constituant le bassin arachidier, quatre (4) types de ménages sont retenus (les très pauvres, les pauvres, les moyens, les riches).

Figure 7 : Zone des moyens d'existence du Sénégal

Source : Badji *et al.*, 2016b



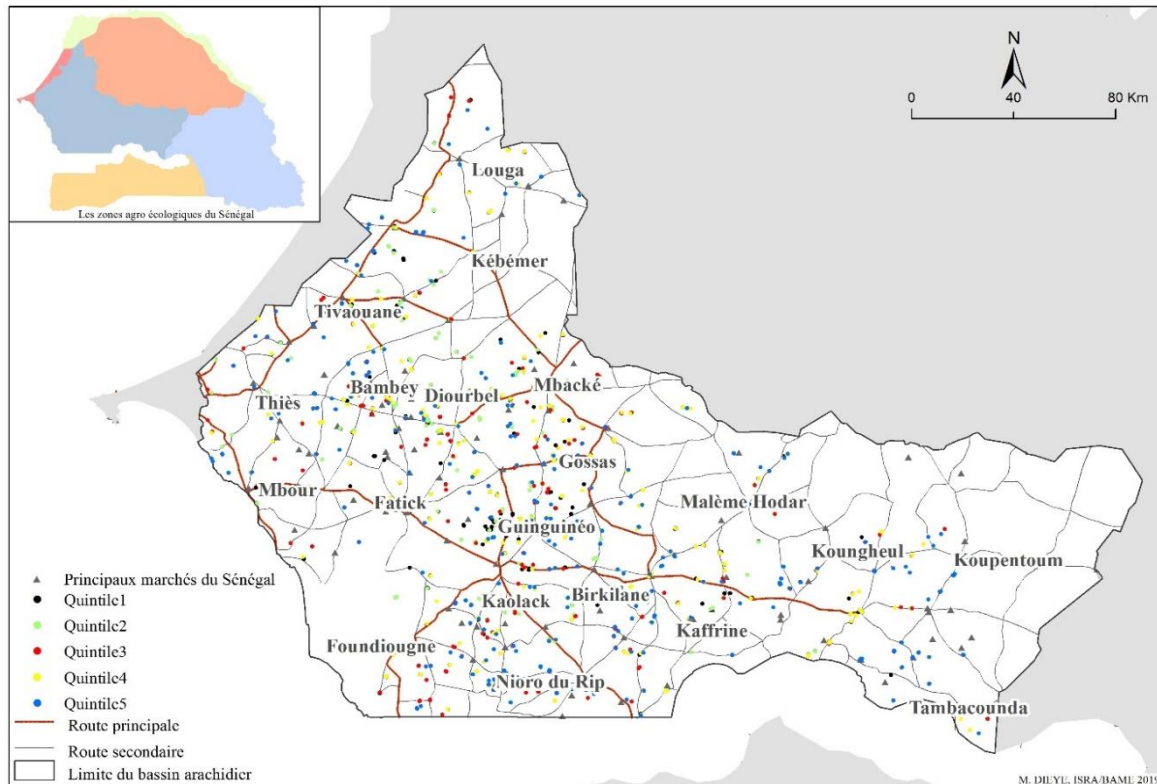
Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé la base de données PAPA afin de déterminer l'homogénéité ou au contraire l'hétérogénéité des caractéristiques des exploitants agricoles présents sur le bassin arachidier.

La répartition géographique des quintiles de revenu témoigne d'une relative homogénéité des ménages classés selon ce critère, avec toutefois une certaine prédominance des ménages les plus nantis vers le sud-est du bassin arachidier. En effet, dans cette zone proche du Sénégal oriental, il est fréquent de trouver des exploitations dotées de très grandes superficies. On constate plus d'hétérogénéité des quintiles dans les autres parties du bassin arachidier. Le département de Diourbel compte relativement plus de ménages très pauvres que tous les autres (76% des ménages enquêtés répartis entre les quintiles 1 et 2). Le département de Koumpentoum compte quant à lui la plus grande proportion de

ménages riches (63% des ménages enquêtés répartis entre les quintiles 4 et 5). C'est un département avec de grandes disponibilités foncières (le département fait partie des terres neuves citées par ISRA/BAME, 2019) et une pluviométrie plus importante que le centre-nord du bassin arachidier.

Figure 8 : Localisation des ménages par quintile de revenu à partir de l'Enquête PAPA

Source : Faye et al., 2019



Ce sont aussi des zones à fortes production de maïs qui est commercialisé pour la nourriture humaine mais aussi l'alimentation du bétail. Il est suivi par le département de Nioro qui a certes moins de disponibilités foncières, mais une pluviométrie plus importante que le centre-nord.

Nous avons établi une typologie basée sur les facteurs de production, conformément à l'approche par les moyens d'existence, afin de déterminer les ménages types à considérer pour représenter l'ensemble du bassin et pour vérifier s'il existe un effet spatial significatif au niveau statistique. Les ménages ont été regroupés par type avec la méthode de classification ascendante hiérarchique. Nous avons d'abord effectué une analyse en composantes principales (ACP), avec le critère de Ward comme algorithme de classification. Comme toujours, de multiples tentatives ont été réalisées pour trouver les variables les plus discriminantes et les groupes les plus homogènes. Finalement, les variables utilisées (en logarithme) sont la superficie totale exploitée, le nombre d'équipements agricoles, la taille du ménage, le ratio main-d'œuvre familiale/main-d'œuvre salariée, les revenus tirés des ventes des produits agricoles, les revenus de l'élevage, les revenus non agricoles et les transferts. A la suite de l'ACP, nous avons utilisé

une classification hiérarchique pour créer les groupes de ménages (les types). C'est une classification pas à pas des différents ménages en groupes disjoints (Alvarez *et al.*, 2014). D'abord, chaque ménage est considéré comme un groupe, ensuite à chaque étape supplémentaire, les ménages qui se ressemblent le plus sont regroupés jusqu'à arriver à un seul groupe comprenant tous les ménages agricoles.

Nous avons identifié trois types de ménages à la suite de cette classification (BA1, BA2 et BA3). Ce sont les superficies cultivées qui distinguent essentiellement les BA1 des BA2 et BA3, ces deux derniers cultivant plus de deux (2) fois et demie la surface des BA1. Entre ces deux derniers types, c'est l'importance de l'élevage chez les BA3 qui fait la spécificité de ce type, tandis que les BA2 complètent les revenus agricoles par les activités extra-agricoles. Les BA3 ont des revenus légèrement plus importants que les BA2 (+10% pour le revenu par tête). Les BA3 et les BA2 ont un revenu par tête moyen deux fois plus élevé que celui des BA1 (Tableau 1). Les ménages du type BA3 possèdent relativement plus de matériels agricoles que les deux autres groupes.

Il est important de souligner que même pour le groupe des exploitants les plus aisés, le revenu par actif se situe largement en dessous du seuil de pauvreté de 225 000 CFA (343 € ; BCEAO, 2012). Les activités agricoles (au sens strict) sont la principale source de revenu et représentent plus de 75% des revenus totaux, quel que soit leur type. Les systèmes de production sont similaires ; les céréales (mil, maïs, sorgho) représentent environ 50% des superficies emblavées (figure 9). Le reste est occupé par des légumineuses, essentiellement l'arachide qui demeure la principale culture de rente, mais aussi le niébé, souvent destiné à l'autoconsommation. Même si l'essentiel des revenus provient des activités agricoles, l'incertitude pluviométrique fait que les revenus extra-agricoles ont une grande importance dans les exploitations : ils permettent de sécuriser les revenus totaux et ainsi, pour les exploitations qui y ont accès, de prendre plus de risques au niveau des activités agricoles, ce qui permet d'en tirer plus de revenus. Ce sont en effet les cultures les plus risquée qui sont les plus rentables. L'accès aux activités extra-agricoles, très hétérogène au sein des populations rurales, est ainsi un facteur explicatif majeur des inégalités.

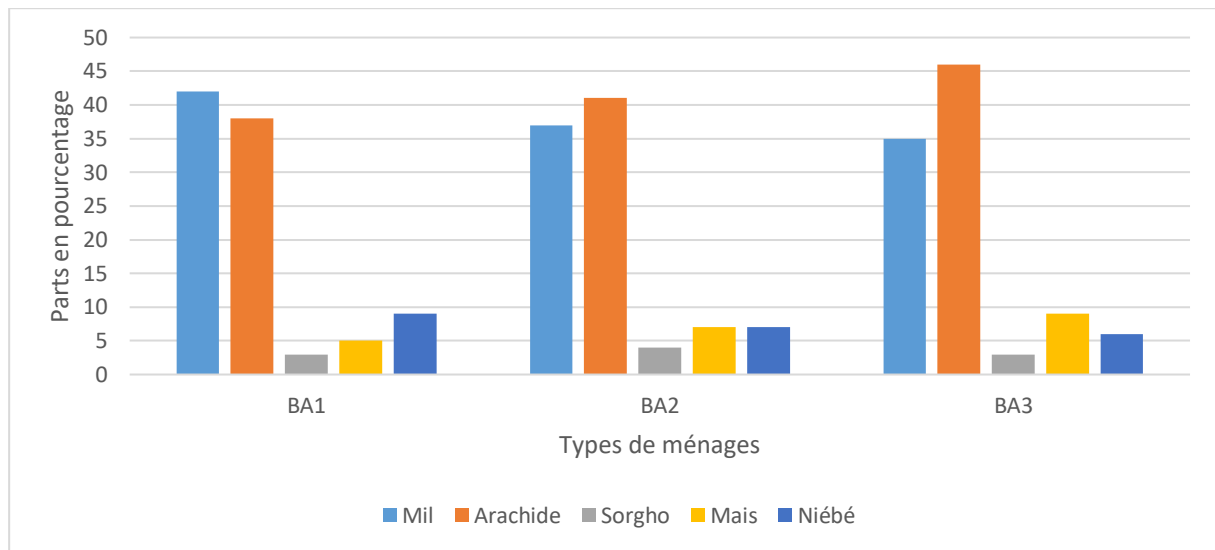
Tableau 1 : Caractéristiques socio-économiques du type de ménage (moyennes).Source : Faye *et al.*, 2019

Variables	BA1	BA2	BA3	Ensemble
Superficie totale exploitée en 2016 (ha)	3	8	8	6,0
Taille du ménage (personnes)	8	12	13	10
Nombre d'actifs agricoles (personnes)	5	7	8	6
Revenus totaux du ménage (milliers FCFA/an)	362,2	1137,4	1311,9	771,9
Revenus agricoles (milliers FCFA/an)	293,4	824,2	1048,4	595,0
Revenus de l'élevage (milliers FCFA/an)	25,4	84,0	121,0	61,2
Revenus non agricoles (milliers FCFA/an)	31,7	151,1	57,3	70,4
Transferts (milliers FCFA/an)	11,7	78,2	85,1	45,2
Revenu/tête (milliers FCFA/an)	45,5	93,7	101,4	70,4
Revenu/actif (milliers FCFA/an)	75,2	163,3	160,1	117,1

Les BA1 sont surtout orientés vers l'autoconsommation : ils cherchent avant tout à assurer leur sécurité alimentaire, tandis que les BA2 et les BA3, plus aisés, sont plus orientés vers le marché.

Figure 9 : Part des principales spéculations dans les superficies totales exploitées, par type de ménage.

Source : Faye *et al.*, 2019

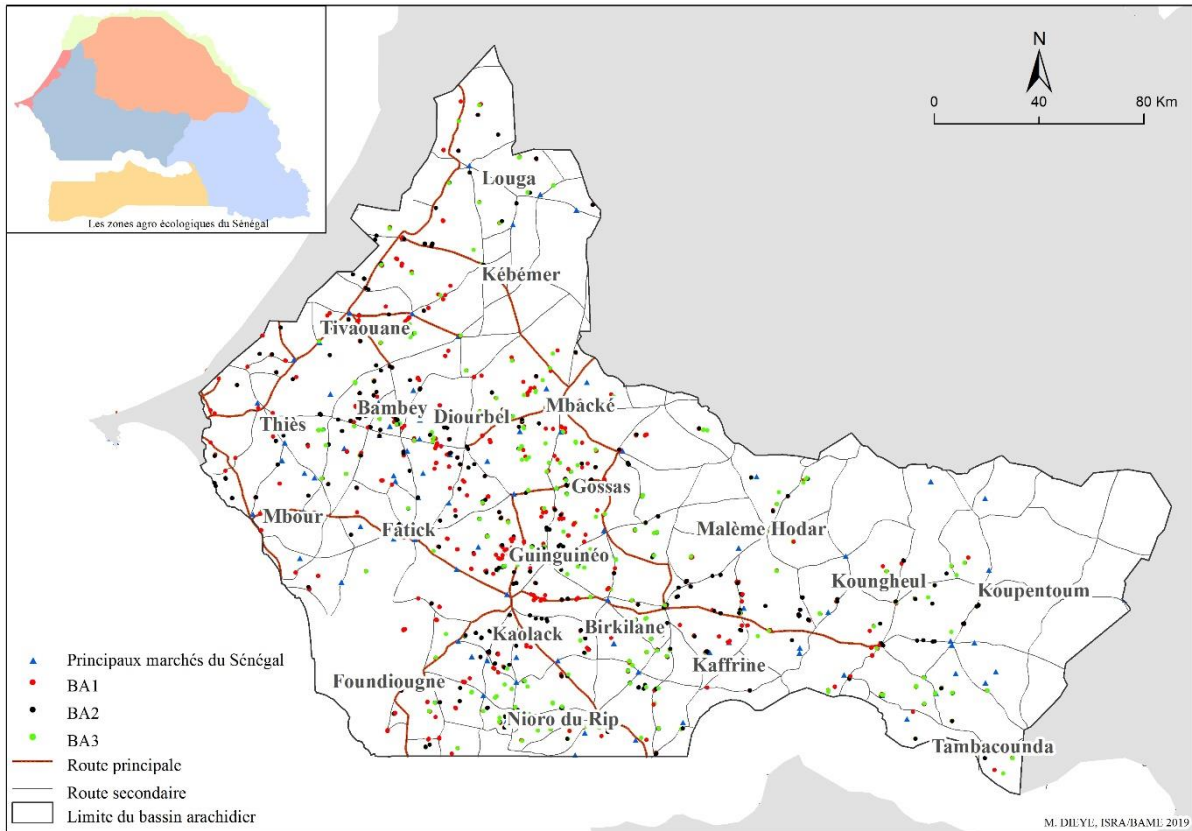


Aucun effet spatial n'est apparu significatif lors de la réalisation de la typologie, que cela soit à l'échelle des villages, des départements ou de la région. La proximité à une route a également été testée, mais n'apparaît pas comme un facteur discriminant permettant d'expliquer des niveaux de revenus différents. On note toutefois, comme pour l'analyse de la figure 8, que les exploitations BA3 sont plus nombreuses à l'est du bassin où l'on voit très peu de BA1.

Dans ce contexte, nous représenterons malgré tout les exploitations en fonction des archétypes d'environnement biophysique définis plus haut, car ceux-ci déterminent les itinéraires techniques et leurs performances, en termes de rendement moyen comme de variabilité. La typologie indique cependant une certaine homogénéité des types d'exploitation et de leur système de production sur l'ensemble du bassin.

Figure 10 : Spatialisation des exploitations de la typologie sur les données PAPA.

Source : Faye et al., 2019



Le modèle ANDERS–CELSIUS a été mis au point initialement pour les exploitations du type BA1 et BA2 des zones TBA2 (équivalente à SN08 de l'AEM) et TBA3 (SN10 de l'AEM), qui formaient la très grande majorité des ménages agricoles du bassin arachidier (Ricome et al. 2017). Il a été possible de représenter de la même manière les types d'exploitation BA1 et BA2 pour les zones SN05-TBA1(SN05) et TBA4(SN09) moyennant un investissement raisonnable dans l'adaptation de CELSIUS et ANDERS avec les enquêtes agronomiques et de ménage que cela impliquait. Cependant, pour chaque exploitant représenté, le calibrage et les analyses de sensibilité, qui reposent sur le test de l'impact sur le système de production (part des différentes cultures et techniques dans les surfaces exploitées, nombre d'animaux d'embouche, destination de la production vers le marché, autoconsommation immédiate ou stocks de sécurité) de différentes valeurs pour les paramètres non observables (aversion pour le risque, richesse initiale, trésorerie disponible, coûts de transaction), sont une étape clé, afin de s'assurer de la validité du modèle et de la pertinence de ses résultats, même si elle prend beaucoup de temps. Dans le cadre de cette étude, les contraintes de temps n'ont malheureusement pas permis de réaliser cette étape pour la zone TBA4 qui a donc dû être écartée de l'analyse.

Par ailleurs, le cas de la zone TBA5(SN07 dans la typologie de l'AEM) a été écarté de ce travail, car la représentation des cultures pérennes aurait nécessité le développement d'un modèle spécifique. De plus, des enquêtes approfondies sur les performances des cultures pérennes et maraîchères de cette région, ainsi qu'une étude spécifique du marché particulier de cette zone et de sa dépendance au secteur du tourisme, auraient été nécessaires. De même, les exploitations de type BA3 dans l'ensemble du bassin arachidier sont écartées de l'analyse. En effet, s'agissant d'exploitations dont le système d'élevage extensif est prépondérant dans l'économie du ménage par rapport aux cultures, un modèle pluriannuel dynamique aurait été nécessaire, comme cela a été mentionné lors de la description du modèle, pour représenter correctement les décisions des exploitants et la dynamique du troupeau. Pour inclure ces exploitations, des entretiens détaillés devront être effectués pour identifier les processus de décisions des exploitants en particulier pour la vente des animaux. Cette forte orientation vers l'élevage de cette catégorie d'exploitation peut suggérer que les enjeux de l'intensification écologique des cultures sont d'ailleurs moins prégnants pour elles que pour les autres catégories. Cependant elles constituent une source possible de fertilisants organiques pour les autres exploitations, avec un rôle potentiellement favorable à la réduction des inégalités entre exploitants d'une même région. A l'inverse, leur développement peut aussi être générateur d'inégalités si à travers leur accès à la vaine pâture dans les champs des plus pauvres, elles concentrent progressivement la fertilité à leur seul profit. Il serait donc pertinent de les modéliser dans un développement futur de cette étude.

Finalement dans le cadre de cette étude, les trois zones TBA2 (Sine), TBA3 (Saloum), TBA1 (Louga) les plus caractéristiques des systèmes de production de polyculture-élevage pluviaux du bassin arachidier sont représentées, et dans chaque zone les comportements de deux (2) types d'exploitants (les plus pauvres, correspondant aux BA1 et les moins pauvres avec peu d'élevage extensif, correspondant aux BA2) sont simulés en détail afin de pouvoir évaluer ex ante l'impact de différentes mesures de politique économique sur l'intensification agroécologique. Leurs principales caractéristiques sont décrites dans le tableau 2.

Tableau 2 : Principales caractéristiques des exploitations simulées

Zones	Sine		Saloum		Louga	
Fermes	NiakharE1	NiakharE2	NioroEA1	NioroEA2	LougaEA1	LougaEA2
% dans la zone	62	13	83	13	-	-
Superficie (ha)	3,5	10,5	6,5	15,2	5	10
Nombre d'actifs	7	8	6	8	8	8
Nombre de personnes	13	17	15	20	10	10
Élevage extensif						
- Bovins	1	1	1	1		1
- Ovins/caprins	12	20	6	9		4
Embouche						
- Bovins		1	1	2	4	0
- Ovins		4	-	3	4	2
Revenus totaux	650 000	1 650 000	870 000	2 000 000	7 535 000	2 056 000
Dont Revenus off-farm	70 000	240 000	90 000	120 000	6 600 000	1 192 000

Le Bassin arachidier est caractérisé par la saturation du foncier disponible et par une densité démographique élevée. Le foncier disponible par actif est de plus en plus faible avec la croissance démographique, ce qui souligne l'importance de développer des technologies pour améliorer la productivité par hectare. Dans la plupart des zones, les petites exploitations sont les plus nombreuses et leurs revenus essentiellement issus des activités agricoles sur des surfaces trop petites pour que le revenu par actif atteigne le seuil de pauvreté. C'est le cas des exploitations de type 1 dans le Sine (Niakhar EA1), où les conditions agro-climatiques et la faiblesse des surfaces cultivées (3,5 ha pour 7 actifs) se traduisent par un revenu par actif d'environ 40% du seuil de pauvreté. La situation est légèrement meilleure dans le Saloum, avec une meilleure pluviométrie permettant la culture du maïs et des surfaces un peu plus grandes (6,5ha) pour le type 1 (NioroEA1) ; le revenu par actif (en réintégrant l'autoconsommation) représente environ 60% du seuil de pauvreté. En dépit de la faiblesse de ces revenus, chaque actif doit satisfaire les besoins d'environ un membre de la famille inactif en plus de lui-même. Dans ces conditions, on comprend qu'il soit difficile d'investir dans des intrants agricoles et l'essentiel des cultures est pratiqué en extensif ou sur les champs de case qui bénéficient de fumier et du recyclage des déchets organiques. Quelques ovins ou bovins permettent de compléter le revenu agricole ; l'accès aux activités extra-agricoles est faible, environ 10% du revenu total. Ces exploitants ne recourent que peu à l'embouche, qui est risquée et nécessite un capital de départ pour acheter les animaux à engraisser. Ces petites exploitations sont orientées vers la production d'aliments de base pour l'autoconsommation permettant de subvenir

aux besoins alimentaires essentiels de la famille. De petites surfaces d'arachide permettent d'accéder aux revenus monétaires nécessaires à la satisfaction des besoins incompressibles (vêtements, fournitures scolaires).

La situation est un peu plus favorable pour les exploitations 2 de ces deux zones. Disposant d'une superficie plus importante (respectivement 10,5 et 15 ha), elles peuvent consacrer une surface plus conséquente aux cultures de rente, investir dans des engrais minéraux sur de petites surfaces et dans l'embouche et ainsi générer plus de revenus monétaires : le revenu par actif (en réintégrant l'autoconsommation) est à peu près équivalent au seuil de pauvreté (91% pour Niakhar EA2 et 111% pour Nioro EA2). Dans le Saloum, les conditions agro-climatiques moins sévères engendrent un risque moindre associé à l'utilisation de faibles doses d'engrais minéraux et le tiers des surfaces est concerné pour NioroEA2, alors que c'est seulement 3% pour NiakharEA1. Le risque, particulièrement important dans le Sine, s'oppose à l'intensification des cultures. Pour compenser la faiblesse du revenu agricole, les exploitations développent des stratégies de diversification et d'investissement dans d'autres activités lorsque c'est possible, mais les opportunités demeurent peu nombreuses. La part des activités extra-agricoles dans le revenu total demeure faible : 14% pour Niakhar EA2 et 6% pour Nioro EA2.

La situation est différente à Louga où la péjoration climatique a poussé les exploitations à développer des stratégies d'émigration. Les transferts monétaires représentent l'essentiel des revenus : 87% pour les petites exploitations (LougaEA1) et 58% pour les plus grandes (LougaEA2). Ce sont ainsi les exploitations les plus petites de cette zone (5ha) qui ont les revenus par actif les plus élevés : environ 4 fois le seuil de pauvreté. Il est possible que les ménages concernés aient eu plus de terre par le passé et l'aient cédée, faute de main d'œuvre disponible pour la mettre en valeur. Le revenu par actif des exploitations les plus grandes (10 ha) est de 1,14 fois le seuil de pauvreté. Elles ont renoncé à la production de mil, préférant acheter leur consommation alimentaire sur le marché et se nourrir de riz, mieux considéré socialement, pour se consacrer aux légumineuses et à l'embouche.

2.3. Les enjeux de l'intensification écologique dans ce contexte

Les rendements de l'agriculture pluviale du vieux bassin arachidier du Sénégal sont de l'ordre de 30% du rendement théoriquement permis par la pluviométrie, le rayonnement et la température (de l'ordre de 800kg/ha de rendement moyen du mil, par exemple, pour un rendement potentiel limité par l'eau de l'ordre de 2 500 kg/ha en moyenne dans la région). A titre de comparaison les rendements des cultures dans les pays industrialisés atteignent entre 70 et 80% de ce potentiel, à l'aide de techniques de production dont l'impact environnemental négatif est considérable.

Nous avons conduit la présente étude en assumant l'hypothèse qu'il existe entre ces deux extrêmes des niveaux de productivité relativement au potentiel permis par le climat sensiblement plus élevés que ceux actuellement obtenus, sans ou avec un faible impact environnemental négatif.

La cause principale de la faiblesse de la productivité dans la zone étudiée est la faiblesse du contenu en nutriments des sols et une pression élevée des mauvaises herbes (Affholder, 1994 ; Affholder *et al.*, 2013). Cette dernière résulte elle-même en grande partie du faible ombrage porté au sol par les cultures dont la croissance est fortement contrainte par la faible fertilité du sol. La faiblesse de la teneur en nutriments des sols résulte de la faiblesse des restitutions organiques par rapport aux exportations de biomasse hors du système agricole et de la quasi-absence d'apports de fertilisants minéraux qui pourraient les compenser. Ces causes sont connues de longue date (voir Pieri, 1989) et se sont probablement aggravées depuis, les systèmes agricoles ayant évolué sous l'effet de la pression démographique croissante dans le sens d'une augmentation du rapport entre biomasse exportée et restitutions organiques, sans croissance notable de l'emploi des engrais minéraux. Depuis trois décennies, les jachères ont régressé jusqu'à disparition totale dans la plupart des villages du bassin arachidier ; les espaces pastoraux se sont fortement réduits et, avec eux, les possibilités de transferts de fertilité entre eux et les espaces cultivés, via le fumier et le parcage nocturne d'animaux dans les parcelles. De petits élevages d'embouche se sont développés dans la plupart des exploitations, en réponse à l'augmentation de la demande en viande dans les grandes villes, notamment au moment des fêtes religieuses, ce qui provoque une augmentation de la demande en fourrage, à laquelle répond une offre de foin collectés sur les espaces non cultivés plus abondants du Sénégal oriental. Ce phénomène pourrait constituer un transfert de fertilité bénéfique aux exploitants du bassin arachidier, mais il est à craindre qu'il soit compensé par le transfert inverse constitué par la vente de fumier du bassin à destination de producteurs maraîchers des régions périurbaines ou spécialisées dans cette activité (zone des Niayes). Une étude récente dans le centre du vieux bassin arachidier confirme la très faible fertilité des sols et sa tendance à la baisse, avec notamment l'apparition de carence en phosphore dans une région où elle n'était pas fréquente autrefois (Toukara *et al.*, 2020)

L'enjeu principal au plan biophysique d'une intensification écologique dans cette région est donc d'augmenter la teneur en nutriments du sol. Les leviers agroécologiques qu'il s'agit de mobiliser à cette fin devront bien entendu permettre de maintenir ou mieux d'augmenter les services de régulation des bio-agresseurs. Les leviers agroécologiques obéissant à ces contraintes, déduits des principes généraux de l'intensification écologique en agriculture familiale du Sud global (Affholder *et al.*, 2014), sont 1) l'augmentation de la diversité des espèces cultivées avec notamment l'augmentation de la biomasse produite et recyclée des espèces fixatrices d'azote atmosphérique, 2) la réduction des actions mécaniques sur le sol et la gestion de la dynamique temporelle de sa couverture par des végétaux vivants ou morts de manière à réduire les pertes de nutriments par érosion et par lessivage, 3) la gestion intégrée de la fertilité visant à maximiser le recyclage des nutriments et à garantir la compensation des exportations par le recours raisonné aux engrais minéraux.

2.3.1. Augmentation de la diversité des espèces cultivées avec notamment l'augmentation de la biomasse produite et recyclée des espèces fixatrices d'azote atmosphérique

- Augmentation de la part des légumineuses annuelles dans le système de production

Le système agraire du vieux bassin arachidier est depuis plus d'un siècle un des rares au monde à reposer sur une rotation biennale céréale-légumineuse, en l'occurrence la rotation mil-arachide. L'absence de bénéfice de cette rotation pour le bilan organique et minéral du sol a longtemps été due à l'exportation de la quasi-totalité de la fane d'arachide, qui constitue un excellent fourrage, à destination soit d'élevage présent dans les exploitations mais sans recyclage des déjections dans les sols cultivés, soit d'élevages intensifs, le plus souvent périurbains, dont les effluents, quand ils sont recyclés le sont pour fertiliser les cultures maraîchères périurbaines. Améliorer le bénéfice de cette rotation pour la fertilité des sols du bassin arachidier peut s'envisager par le développement d'ateliers d'élevage internes aux exploitations, valorisant la fane d'arachide produite et recyclant les déjections des animaux pour la fertilisation des cultures. Le modèle de ferme ANDERS mobilisé dans cette étude représente donc cet aspect essentiel de l'intégration cultures-élevage, qui est d'ailleurs une évolution actuellement observée des exploitations de la région.

De nombreux acteurs, ONG et scientifiques, promeuvent ou étudient l'association culturale mil-niébé (*Vigna unguiculata*), en complément de la rotation avec l'arachide. Cette association est pratiquée de longue date par les agriculteurs de la région, mais avec des densités relativement faibles de niébé, semé en dérobé tardivement dans la culture du mil, de telle manière qu'elle n'exerce aucune compétition pour la lumière vis-à-vis du mil, et lorsque le stock en eau du sol atteint un niveau élevé vers la moitié du cycle du mil, de telle sorte que le risque de compétition entre les deux espèces pour l'eau soit faible. Le niébé profite alors de la part de rayonnement non intercepté par la culture du mil, part qui est d'autant plus élevée que le mil a subi des stress, notamment nutritionnels, et occupe ainsi une niche qui serait sinon occupée par des mauvaises herbes. On peut envisager d'augmenter la densité de peuplement du niébé dans l'association et remplacer la variété traditionnellement utilisée par des variétés plus productives, notamment des variétés fourragères pouvant renforcer l'offre fourragère de l'exploitation pour son atelier d'élevage, dans la même logique que ce qui précède pour l'arachide. De même que pour tout progrès de la place des légumineuses annuelles dans le système de production, et donc tout comme pour la culture d'arachide, l'accès à des semences de qualité sera déterminant pour la croissance de la place du niébé dans le système de culture. La façon dont la fane de niébé sera valorisée par l'élevage et son contenu en nutriments partiellement restitué au sol via le recyclage des déjections animales ou la décomposition sur place des résidus n'est pas fondamentalement différente du cas de l'arachide. Au plan biophysique, on peut donc considérer que le cas du niébé en culture pure n'est pas particulièrement différent du cas d'une arachide de cycle très court, en tant que source d'azote, de fourrage et de grain relativement bien valorisé par le marché.

Dans le cas d'une association du niébé à la culture du mil, ces aspects restent valables, mais s'y ajoute le fait que l'augmentation de la part du niébé dans la canopée de l'association, qu'elle provienne d'un accroissement de sa densité de semis ou du type variétal choisi, ne peut qu'augmenter les risques de compétition pour l'eau et la lumière en défaveur du mil, même si cela peut aussi se traduire par une productivité plus élevée de l'association en moyenne interannuelle. On a donc avec cette option un cas classique d'intensification provoquant une augmentation des risques pour les producteurs, correspondant à ce que le modèle ANDERS-CELSIUS représente de manière stylisée, notamment pour les céréales.

Or, à l'heure actuelle et bien que ce soit l'objet de travaux de recherche en cours, il n'existe pas encore de modèle permettant de quantifier comment évolueraient les performances agronomiques et environnementales de ces associations sous l'effet de modalités modifiées ou du changement climatique, de telle sorte qu'il n'est pas possible de les intégrer explicitement dans un modèle d'évaluation quantitative de leur impact sur les inégalités entre producteurs ou de la façon dont les politiques agricoles peuvent les favoriser.

On s'efforcera donc de mobiliser les éléments qui viennent d'être exposés pour discuter de manière qualitative la façon dont cette option particulière d'intensification écologique pourrait modifier les résultats de l'analyse produite à l'aide du modèle ANDERS-CELSIUS.

- Agroforesterie

Sur le même registre de la diversité des espèces de l'agroécosystème, mais s'agissant d'espèces ligneuses, là aussi le bassin arachidier est remarquable puisqu'il est constitué des parcs agroforestiers décrits plus haut. Les évolutions possibles de ce parc et des services écosystémiques qu'il produit ne peuvent s'envisager que dans le long terme, compte tenu de la lenteur de la dynamique des peuplements arborés (sauf bien sûr cas de déforestation massive, mais qui ne paraît pas être ici une éventualité à considérer), et à ce titre elles se situent aux limites du cadre de cette étude. Le modèle ANDERS-CELSIUS a été calibré dans le contexte du niveau actuel des services écosystémiques du parc agroforestier, dont il tient compte par conséquent. En revanche, il n'est pas capable, et il n'existe à l'heure actuelle aucun modèle qui le soit, de quantifier l'impact d'une éventuelle augmentation de la densité d'arbres ou de variations dans les arrangements d'espèces en vue d'intensifier ces services, ni de prédire comment diverses politiques agricoles pourraient conduire à diminuer ou augmenter la densité d'arbres dans ces parcs. Nous raisonnerons donc là aussi de manière qualitative pour discuter les résultats de nos simulations à l'aune des connaissances disponibles sur les parcs agroforestiers.

Notons dès maintenant qu'il serait catastrophique que ces parcs se dégradent et il semble que l'ensemble des acteurs du développement agricole en soient aujourd'hui conscients, ce qui permet d'espérer que d'éventuels effets néfastes et inattendus, pour ces parcs, de politiques publiques de soutien à l'intensification écologique soient rapidement repérés et corrigés par des mesures de soutien à la plantation et à la protection des jeunes arbres comparables à celles mises en œuvre pendant les années 1990 pour contrecarrer la

dégradation du parc à *Faidherbia* constatée pour la période 1965–1985 (Delaunay *et al.*, 2009) – on ne peut cependant pas exclure que ces dynamiques aient été dues simplement aux oscillations décennales de la pluviométrie ayant conduit à une baisse puis une remontée de la nappe phréatique sur laquelle repose l'alimentation hydrique des *Faidherbia* dont la période de végétation est en saison sèche.

Quant à la perspective d'une croissance de la densité d'arbres, il faut signaler ici que le gain de rendement du mil qu'on pourrait en attendre est de l'ordre de 20%, tandis que la production de fanes d'arachide serait augmentée également de l'ordre de 20%, mais celle de gousses diminuée du même ordre de grandeur (Louppe D., 2016, Peltier R., 1996). On se situe là à des valeurs inférieures aux plus faibles incertitudes des modèles de simulation de culture prenant en compte les facteurs limitants eau et azote et leurs interactions, et très en dessous également du niveau d'accroissement des rendements nécessaire pour assurer la sécurité alimentaire des ménages agricoles de la région étudiée à l'horizon de la prochaine génération.

2.3.2. Réduction des actions mécaniques sur le sol et gestion de la dynamique temporelle de sa couverture par des végétaux vivants ou morts, de manière à réduire les pertes de nutriments par érosion et par lessivage

Ces principes correspondent typiquement au semis direct sur mulch pailleux avec ou sans plante de couverture. Il a été démontré que sous climat semi-aride, il s'agit d'une des rares techniques permettant l'intensification sans augmentation du risque de fluctuation de rendement lié à la variabilité interannuelle. Cependant, sous tous les climats, on sait que cette technique augmente à court terme les risques liés aux bio agresseurs, y compris les mauvaises herbes sauf, pour ces dernières, à mobiliser des quantités supérieures à 6 à 7 t/ha de biomasse pour la constitution du mulch ou sauf emploi accru de pesticides et herbicides dont le coût compense voire excède en général le gain de rendement espéré, les effets environnementaux négatifs amoindrissant considérablement la valeur agroécologique de la technique. De plus, pour des exploitations pauvres ou faiblement capitalisées de polyculture-élevage comme celles de la région étudiée, il a surtout été démontré que la valorisation des résidus de culture par l'alimentation animale est nettement plus avantageuse pour le revenu agricole et la sécurité alimentaire que leur utilisation pour la couverture du sol, au moins à relativement court terme. Il n'y a donc pratiquement aucune chance qu'elle soit adoptée par des agriculteurs en l'absence de politiques incitatives qui compenseraient au moins la perte de revenu de l'élevage correspondant à la valorisation par ce dernier de la quantité de résidus nécessaire à la constitution du mulch, dans l'hypothèse la plus optimiste de son efficacité pour les services qui en sont attendus, soit de l'ordre de 6t/ha. C'est d'ailleurs largement confirmé par l'adoption pratiquement nulle de cette technique dans les agricultures familiales des pays du Sud, malgré les efforts considérables pour les promouvoir consentis au cours des deux dernières décennies. Le modèle CELSIUS et d'autres modèles de culture sont capables en principe de simuler l'effet de cette technique sur le rendement des cultures, mais cela n'a pas été vérifié par confrontation à des données expérimentales appropriées au contexte de cette étude. De plus les adaptations qui seraient nécessaires au modèle de ferme ANDERS pour qu'il en tienne explicitement compte dépassent en complexité ce qu'il nous était possible de faire avec les moyens dont nous disposions. Cependant, avec le modèle

ANDERS dans son état actuel, on peut estimer la part du revenu de l'exploitation provenant de la valorisation des résidus de culture par l'élevage et donc, indirectement, le montant minimal par unité de surface ou par exploitation qu'il faudrait ajouter à des mesures incitatives de l'intensification pour qu'elles rendent économiquement pertinente pour les exploitants la mise en œuvre des techniques de semis direct sur mulch de résidus.

Compte tenu de ce qui précède sur la technique de semis direct sur mulch de résidus, forme la plus simple et la moins pénalisée parmi les techniques à considérer dans la présente rubrique par le rapport entre surcoûts de court terme et effets bénéfiques sur la production résultant de l'amélioration à long terme d'un certain nombre de services écosystémiques, nous discuterons, là aussi, les implications de ces options d'intensification écologique, sans nécessairement les simuler explicitement avec le modèle ANDERS-CELSIUS.

2.3.3. Gestion intégrée de la fertilité visant à maximiser le recyclage des nutriments par voie organique et à garantir la compensation des exportations par le recours raisonné aux engrais minéraux.

Il s'agit du levier le plus efficace à court terme, tout particulièrement dans le contexte de sols extrêmement pauvres en azote organique comme c'est le cas dans l'ensemble du bassin arachidier sénégalais, pour augmenter le rendement des cultures. Les risques environnementaux à considérer pour déterminer les quantités de fertilisants à mobiliser sont, dans le contexte de cette région où les émissions de N₂O devraient rester modestes compte tenu de l'aridité du climat, essentiellement les risque de pollution et d'eutrophisation des eaux liées aux flux de nitrates dans les eaux de ruissellement et de drainage. Rappelons que les émissions de gaz à effet de serre liées à l'industrie des engrais minéraux sont très modestes, notamment s'agissant d'engrais azotés dont la production consomme moins de 1% de la production mondiale d'énergie, avec une efficacité énergétique en progrès à mesure de la modernisation des usines. Les risques d'érosion des sols existent dans le bassin arachidier et ne sauraient être négligés dans cette étude. Ils ne seront pas non plus explicitement simulés dans nos analyses, faute de modèle approprié pour cela, mais estimés comme on le verra à l'aide d'indicateurs basés sur le ruissellement simulé.

Le modèle ANDERS-CELSIUS a été conçu spécifiquement pour quantifier l'impact sur les distributions interannuelles de rendement, de sécurité alimentaire, de revenu et sur les choix stratégiques optimaux du système de production d'une fertilisation organique et minérale avec des niveaux variés d'apports azotés et des apports en phosphore et potassium ciblés sur le maintien du sol au-dessus des seuils de carence. Le modèle tient compte des flux de nutriments entre les cultures et l'élevage et entre l'élevage et les sols, et des coefficients de perte en nutriments par dénitrification et volatilisation associés à ces flux. Il permet de produire des indicateurs de risque de pollution des eaux par les nitrates, ainsi que de risque d'érosion des sols. Aucun des scénarios techniques testés n'implique une augmentation du recours aux pesticides. Les pratiques actuelles de gestion des céréales et légumineuses se limitent à l'emploi de pesticides sous la forme de semences enrobées de fongicides et d'insecticides pour le cas du maïs et de l'arachide. Nous n'avons pas considéré ici l'option de renoncer à cet emploi très modéré des pesticides.

Le modèle ANDERS envisage au total 46 itinéraires techniques plus ou moins intensifs, combinant divers niveaux d'apport d'azote minéral et organique, en distinguant pour ce dernier les apports de fumier et de résidus de culture d'une part et d'autre part ceux résultant de la pratique régulière du parage des animaux, comme c'est le cas notamment dans les champs dits « de case ». Ces apports spécifiques aux champs de case ont été estimés par différence entre le stock d'azote organique des sols dans les champs de case et le stock d'azote organique présent dans les sols pédologiquement similaires, mais ne faisant pas l'objet de ces parages systématiques (champs dits « de brousse », non fumés l'année de l'échantillonnage du sol). On a donc dans notre analyse :

- les systèmes de culture pratiqués actuellement, qui sont extensifs (sans fertilisation ou avec une fertilisation organique très faible) ou semi-intensifs (avec des doses plus élevées de matière organique par unité de surface, éventuellement combinées à de très faibles doses d'engrais minéral),
- des systèmes de culture correspondant à l'intensification écologique par le levier de la fertilisation intégrée, mobilisant la fumure organique sous différentes formes actuellement praticables par les agriculteurs sans investissement de long terme et la combinant avec des doses d'engrais minéral raisonnables pour concilier objectifs de production et maîtrise des risques environnementaux,
- des systèmes de culture « engrais plus » où les doses d'engrais restent raisonnables et peu risquées au plan environnemental par rapport aux pratiques de l'agriculture intensive « conventionnelle » des pays développés, mais sont plus élevées que dans les cas précédents, de telle sorte que leur adoption dans les simulations serait un indicateur de risques qu'une intensification plus conventionnelle et donc peu agroécologique soit favorisée par les politiques testées. Il faudrait alors l'assortir à court terme de mesures spécifiques pour en contrer ces effets indésirables. De manière volontairement caricaturale, ils n'ont pas été qualifiés d'agroécologiques dans la suite du document.

Cette distinction entre systèmes agroécologiques ou non est présentée ici de manière à faciliter le discours, mais il faut garder à l'esprit que l'appartenance ou non à l'agro-écologie, dans notre analyse, n'est pas définie a priori par des pratiques particulières, mais par l'efficacité d'utilisation des ressources et l'impact environnemental qu'on peut estimer qu'elles auront. Les performances agronomiques et environnementales des systèmes de culture étudiés seront présentées et discutées sous cet angle dans la prochaine partie.

Une sélection des itinéraires techniques les plus contrastés envisagés dans les simulations ANDERS-CELSIUS est présentée dans le tableau 3.

Tableau 3 : Itinéraires techniques envisagés dans le modèle

Culture	Itinéraire technique		Densité de semis	Apport d'Azote (kgN/ha)			
	Catégorie simplifiée	Code		Engrais Minéral	Fumier et résidus	Parcage des animaux	Total
Arachide	Extensif	Extensif	10	0	0	0	0
	Engrais	IntMin	15	9	0	0	9
	Fumier	IntMinOrg	15	9	0	40	49
		IntMinOrgPlus	15	9	20	40	69
Maïs	Engrais	SemIntMin	6	60	0	0	60
	Fumier	IntMinOrg	6	60	60	0	120
		IntMinOrgplus	6	60	60	40	160
	Engrais plus	IntMinPlusOrg	6	120	60	0	180
Mil	Extensif	Extensif	1.2	0	0	0	0
	Engrais	SeminIntMin	1.3	60	0	0	60
	Fumier	IntMinOrg	1.7	60	60	0	120
		IntMinOrgPlus	1.7	60	60	40	160

2.4. Indicateurs de durabilité des systèmes de culture favorisés par les politiques testées

Dans cette étude, les systèmes de culture ont été comparés en employant un ensemble de six (6) indicateurs de leurs performances agronomiques et environnementales, calculés à l'aide du modèle CELSIUS.

Ces indicateurs sont définis dans le tableau 4. Ils ont été obtenus sous forme brute à partir des simulations du modèle CELSIUS, puis normalisés de manière à faciliter les comparaisons entre systèmes de culture et régions du point de vue des enjeux de durabilité que ces indicateurs prétendent illustrer. Ainsi, chaque indicateur normalisé est présenté dans les figures 11 à 22 pour chaque localité (et pour le sol dominant de cette localité) selon une échelle commune de 0 à 1. Avant normalisation, la variable utilisée pour un indicateur est multipliée par 1 ou -1 selon que ses valeurs élevées sont favorables ou défavorables à la durabilité, respectivement, de telle sorte que quel que soit l'indicateur, plus sa valeur est proche de 1 sur la figure, plus le système de culture dans la localité peut être considéré comme durable du point de vue de cet indicateur, relativement aux autres systèmes de culture dans les différentes localités.

Tableau 4 : Indicateurs des performances agronomiques et environnementales des systèmes de culture utilisés dans les simulations des exploitations.

Indicateurs	Rendement en biomasse	Rendement en grain	Stabilité interannuelle du rendement	Respect des eaux souterraines et recyclage des nutriments	Protection des sols contre l'érosion et recyclage des nutriments	Bilan d'azote
Nom court	Biomasse	Rendement	Stabilité rendements	Respect eaux souterraines	Protection érosion	Bilan azote
Services écosystémiques concernés	Approvisionnement			Régulation		
	Soutien			Soutien (cycles des nutriments)		
Mode d'estimation à partir des variables simulées	Rendement en biomasse aérienne	Rendement grain	Écart type interannuel du rendement grain simulé	Drainage sous la profondeur maximale de sol colonisable par les racines des cultures	Ruissellement	Apports fertilisants + apports de la matière organique du sol – exportation dans la biomasse totale
Valeur minimale ⁽ⁱ⁾	1 670 kg.ha ⁻¹	500 kg.ha ⁻¹	40 kg.ha ⁻¹	4 mm	11 mm	-171 kg.ha ⁻¹
Valeur maximale ⁽ⁱ⁾	18 190 kg.ha ⁻¹	6 000 kg.ha ⁻¹	690 kg.ha ⁻¹	188 mm	134mm	101 kg.ha ⁻¹
Coefficient multiplicateur avant normalisation	1	1	-1	-1	-1	1

(i) Valeurs maximales et minimales des moyennes interannuelles sur 20 années climatiques pour l'ensemble des localités, sols et itinéraires techniques simulées.

Sans surprise, les valeurs les plus élevées des indicateurs des services écosystémiques d'approvisionnement (rendement en grain et biomasse et stabilité du rendement) sont obtenues, pour un système de culture donné, dans la région du Saloum, à la pluviométrie la plus élevée et les valeurs les plus faibles dans la région de Louga, la plus aride du bassin arachidier (figures 11 à 22). Les indicateurs de durabilité environnementale que sont les indicateurs de limitation de perte de nutriments et de pollution des eaux souterraines et de surface évoluent naturellement à l'inverse, avec leurs valeurs maximales dans la région la plus aride et minimales (signifiant des risques plus élevés de dégradation des sols et de pollution des eaux) dans le Saloum. Le bilan d'azote varie dans le même sens entre les régions, mais il faut noter que les valeurs élevées à Louga résultent indirectement de la très faible production de biomasse et grain par unité d'azote apporté, à cause de l'aridité, et témoignent donc en fait d'une efficacité d'utilisation de l'azote relativement basse dans

cette région par rapport aux autres. C'est sans doute une des raisons justifiant que les exploitations de cette région abandonnent les cultures de céréales lorsqu'elles disposent de revenus extra-agricoles susceptibles de financer leur alimentation et consacrent leur surface agricole aux seules cultures de légumineuses.

- **Zone de Louga**

Figure 11 : Indicateurs de performances agronomiques pour le mil (Louga)

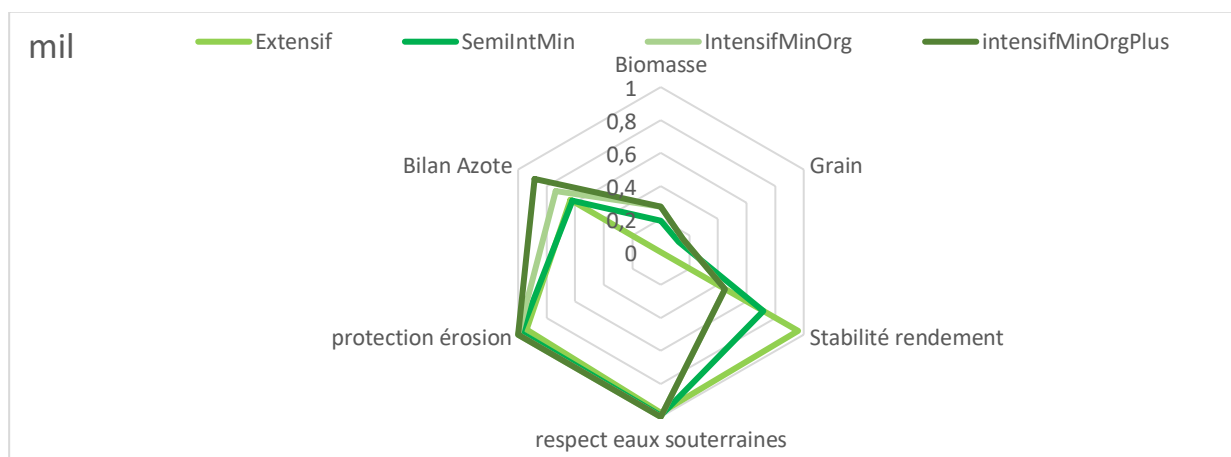


Figure 12 : Indicateurs de performances agronomiques pour le maïs (Louga)

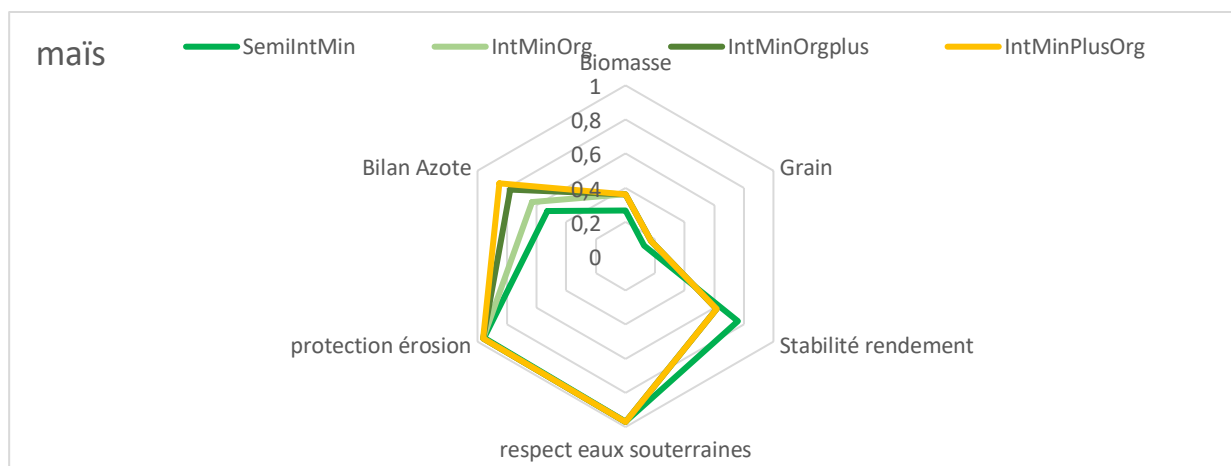
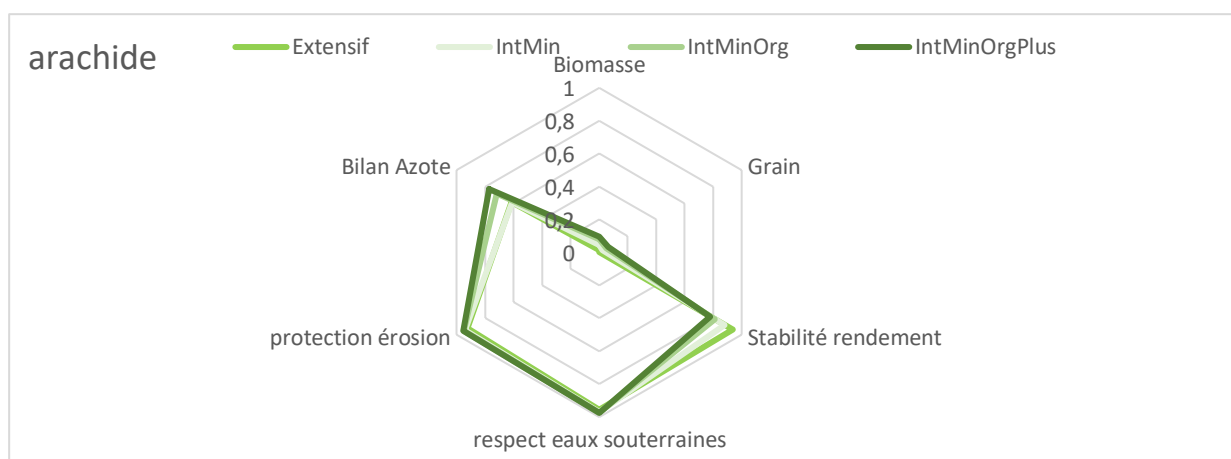


Figure 13 : Indicateurs de performances agronomiques pour l'arachide (Louga)



- **Zone du Sine**

Figure 14 : Indicateurs de performances agronomiques pour le mil (Sine)

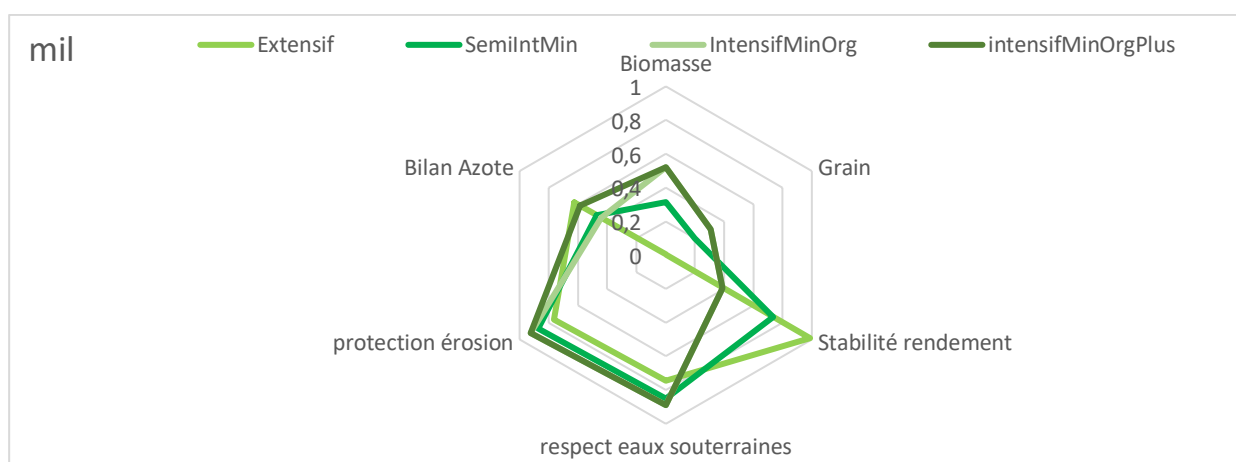


Figure 15 : Indicateurs de performances agronomiques pour le maïs (Sine)

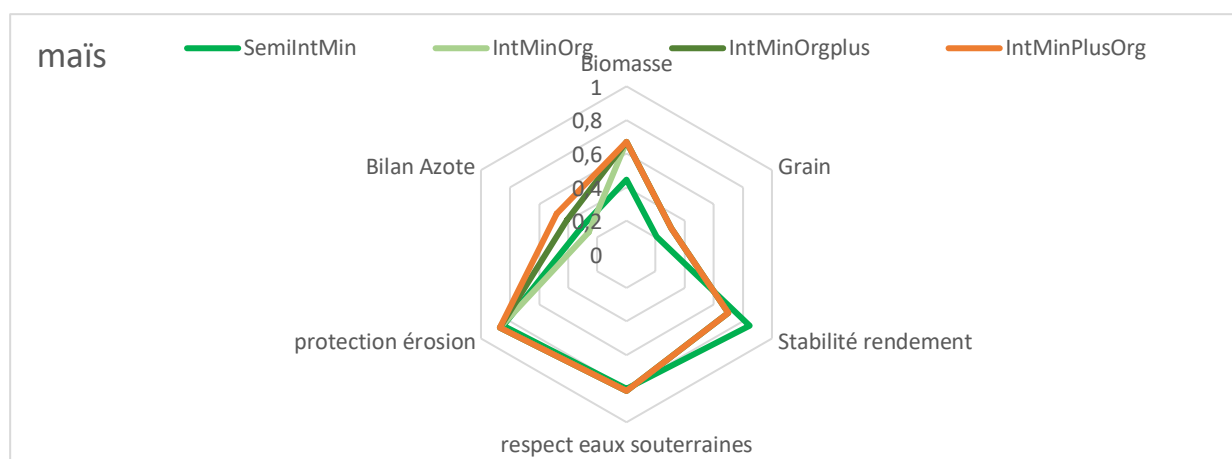
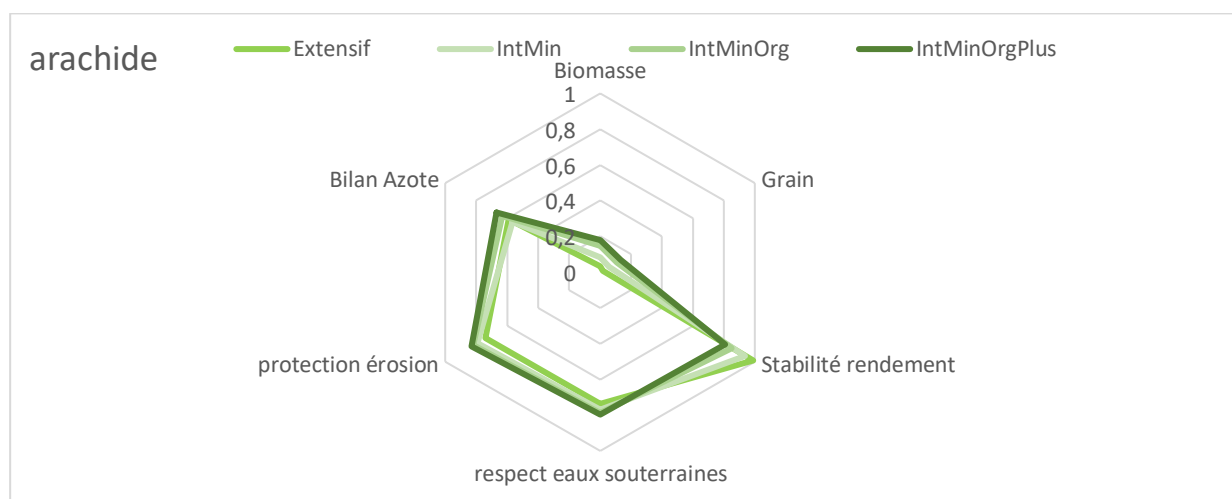


Figure 16 : Indicateurs de performances agronomiques pour l'arachide (Sine)



- **Zone du Saloum**

Figure 17 : Indicateurs de performances agronomiques pour le mil (Saloum)

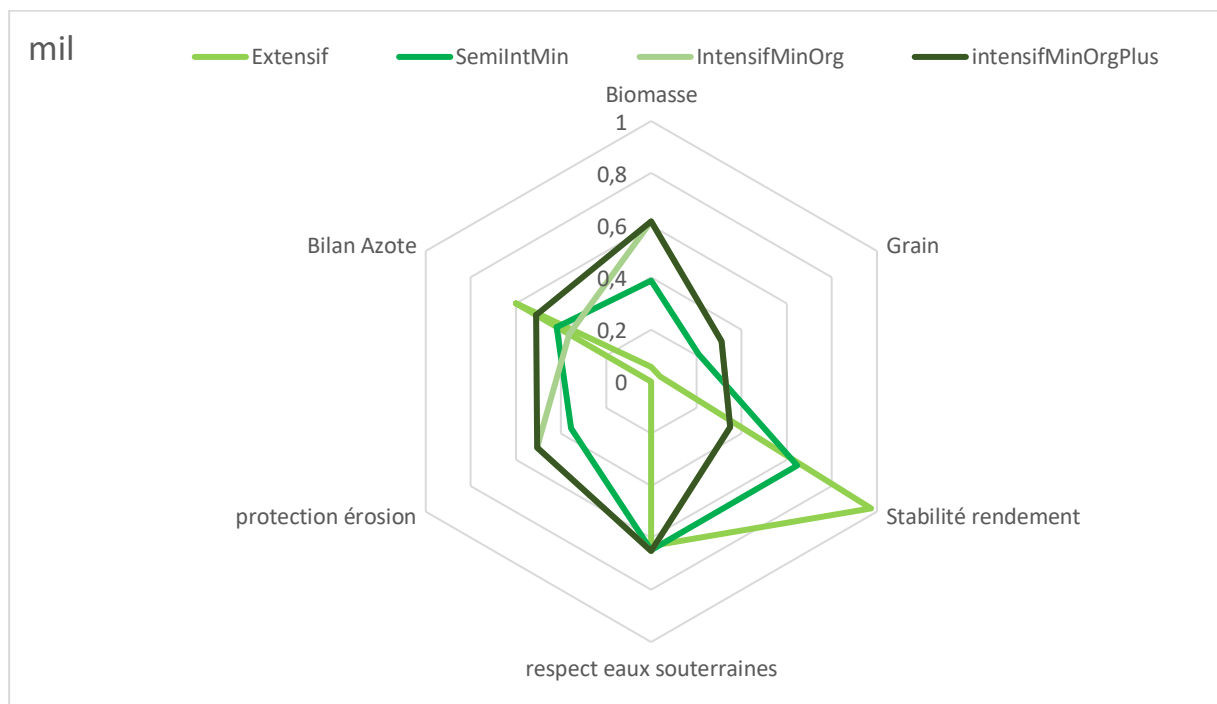


Figure 18 : Indicateurs de performances agronomiques pour le maïs (Nioro)

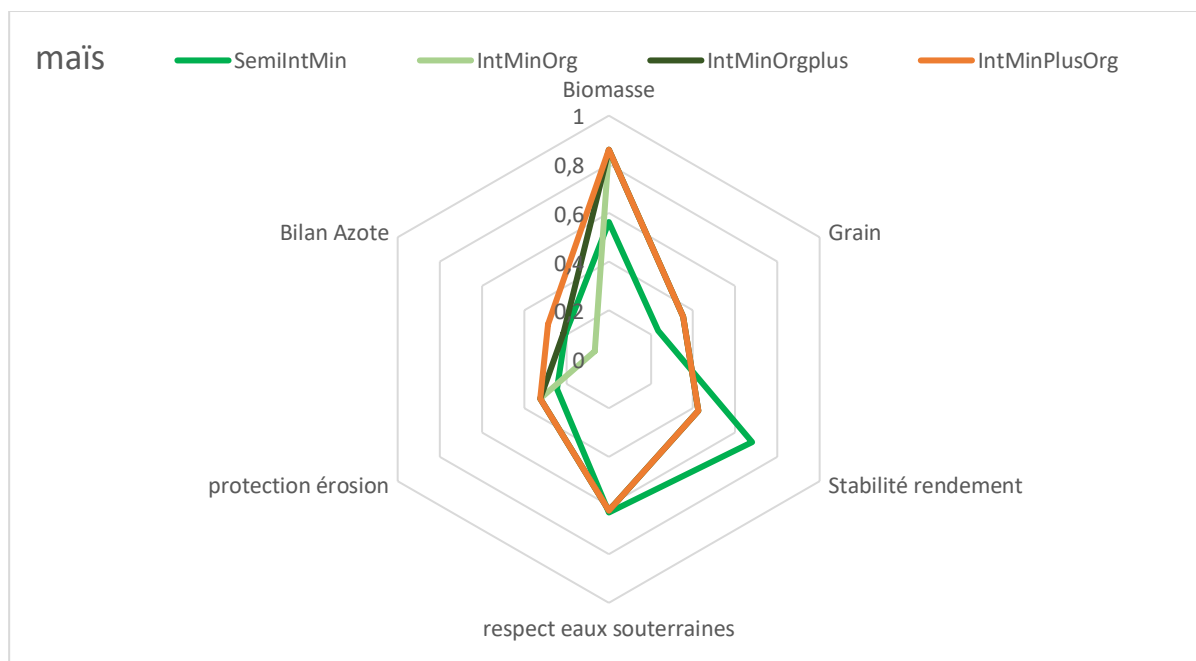
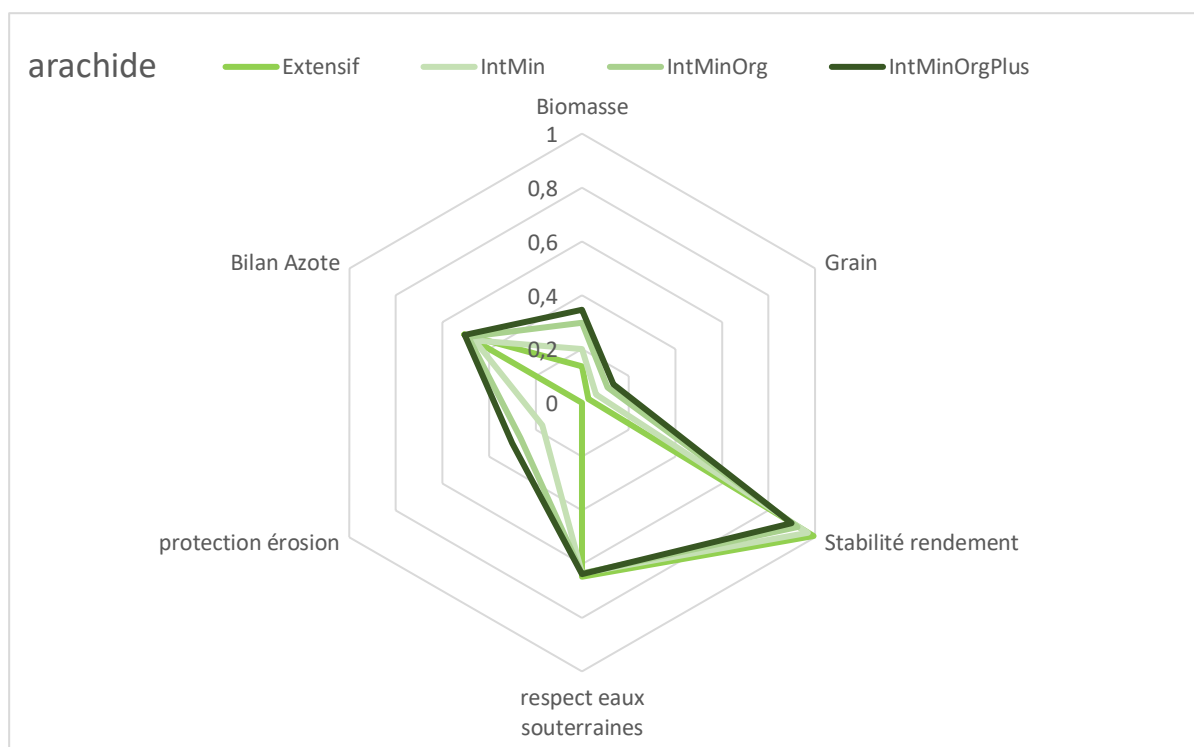


Figure 19 : Indicateurs de performances agronomiques pour l'arachide (Nioro)



- Koungheul**

Figure 20 : Indicateurs de performances agronomiques pour le mil (Koungheul)

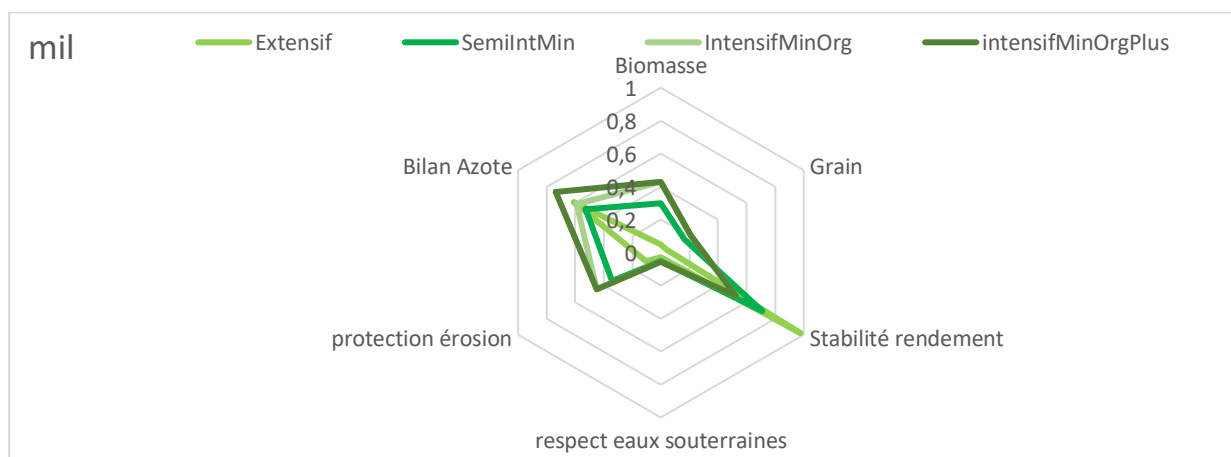


Figure 21 : Indicateurs de performances agronomiques pour le maïs (Koungheul)

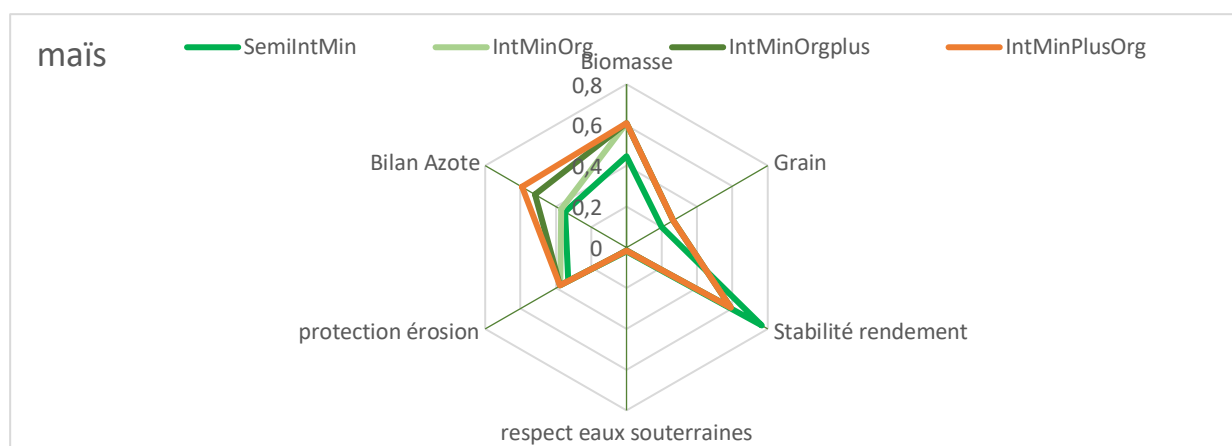
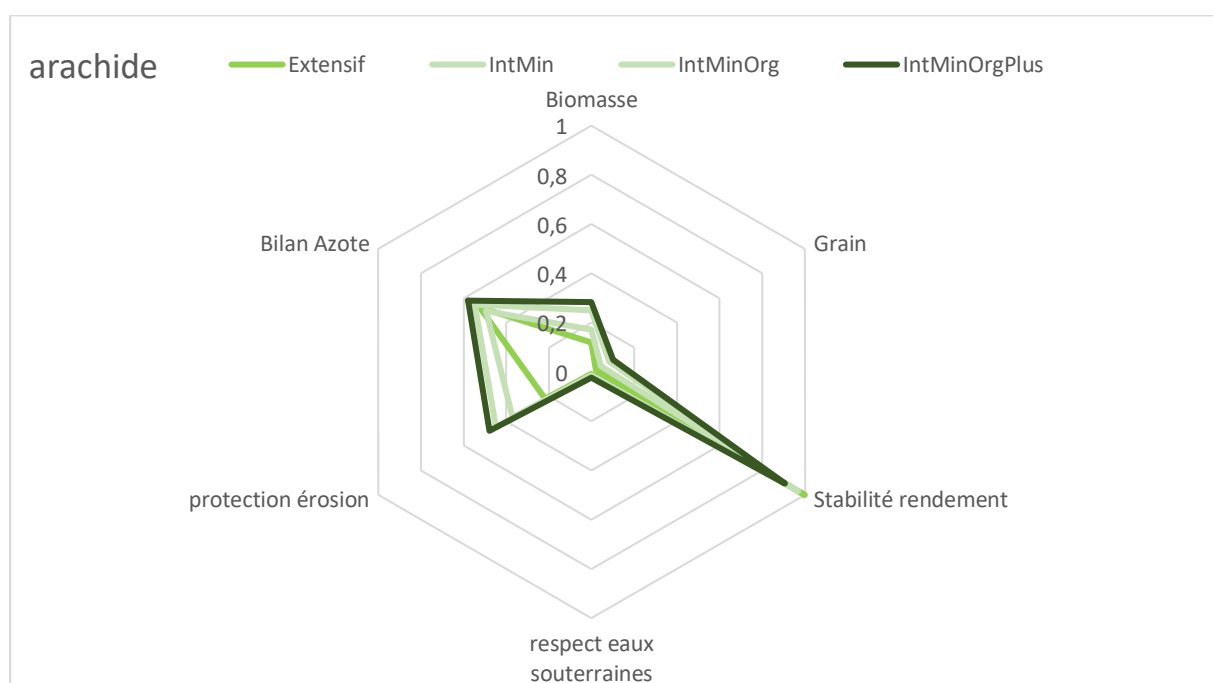


Figure 22 : Indicateurs de performances agronomiques pour l'arachide (Koungheul)



Dans une région donnée, la culture de maïs est plus productive mais plus risquée (faible valeur de l'indicateur de stabilité des rendements), suivie par le mil, puis l'arachide.

Les gains de rendement et l'impact environnemental des techniques d'intensification écologique sont variables selon les cultures et les régions, avec des effets qui augmentent avec la pluviométrie du nord au sud. Les effets sur la stabilité des rendements sont toujours négatifs et beaucoup moins variables selon les régions, de telle sorte que plus l'aridité est importante, moins le gain de production attendu est élevé, tandis que le risque reste très élevé. Il en résulte une très grande inégalité de marge de manœuvre pour l'intensification écologique entre les exploitations du nord de la région, pour lesquelles cette marge de manœuvre est la plus faible, et celles du sud disposant de la marge de manœuvre la plus large.

D'une manière générale, les techniques d'intensification écologique testées en augmentant le taux de couverture du sol par la canopée, la transpiration des cultures (dans les deux cas par augmentation du LAI) et en réduisant l'évaporation permettent clairement de réduire les risques d'érosion et de pertes de nutriments par drainage et, compte tenu de l'accroissement des rendements qu'elles entraînent, d'augmenter l'efficacité d'utilisation de l'eau dans une localité donnée.

Le recours à l'engrais minéral à des doses inférieures à 100 unités de N par ha dans les itinéraires techniques les plus intensifs de la gamme correspondant à l'intensification écologique dans cette étude, combiné à une valorisation maximale du fumier d'élevage et des résidus de culture pour la fertilisation, garantit une croissance très significative de l'efficacité de l'utilisation de toutes les sources d'azote mobilisées par les exploitations. Ce sont donc ces itinéraires, nommés « fumier » ou « engrais » qui ont été retenus dans l'analyse des politiques comme agroécologiquement intensifs.

Notons cependant que l'itinéraire « engrais plus », avec le double d'azote minéral apporté (120 kg/ha contre 60 kg/ha, mais 12,5 % en plus d'azote apporté au total avec 180kg/ha contre 160kg/ha), abaisse peu ou pas les indicateurs environnementaux par rapport aux autres itinéraires techniques intensifs. L'analyse détaillée des résultats des simulations montre que ce phénomène est dû au fait que les gains de croissance des plantes provoqués par la fertilisation, quelle que soit sa source, augmentent l'évapotranspiration potentielle des cultures, leur transpiration réelle, la couverture du sol par la canopée et donc sa protection contre l'érosion, et réduisent ainsi les risques de drainage sous culture, selon une logique déjà bien connue dans les climats semi-arides, dont celui de la région étudiée (Affholder, 1995, Scopel *et al.*, 2004). Les apports minéraux, dès lors qu'ils sont combinés à des apports organiques suffisants comme c'est encore le cas dans ces itinéraires, contribuent également à un bilan d'azote favorable au maintien du stock de matière organique du sol. En revanche, l'indicateur de stabilité du rendement est sensiblement abaissé par cet itinéraire par rapport aux autres moins intensifs, y compris sous le régime pluviométrique plus abondant du Saloum, là aussi sans surprise par rapport aux connaissances sur les interactions entre intensification des cultures et risque climatique (Affholder, 1997). Cet itinéraire est présenté ici pour le cas du maïs, culture pour laquelle la probabilité est la plus élevée que des politiques de soutien à l'intensification se traduisent par une croissance forte des engrais minéraux utilisés, à cause à la fois de la meilleure réponse à l'engrais minéral du rendement grain et, pour les conditions de prix actuelles, de la marge brute de cette culture comparativement aux autres espèces étudiées ici.

3. Les mesures destinées à favoriser l'intensification écologique et leur impact

Comme l'intérêt de l'intensification agroécologique tient à la fois à la possibilité de croissance des revenus des agriculteurs pauvres et des quantités produites, sans dégradation de l'environnement, les politiques seront évaluées en considérant leur impact sur le revenu des exploitations, la production agricole, en distinguant céréales et légumineuses, l'impact environnemental négatif, à travers les indicateurs de risque d'érosion et de pollution des eaux par drainage, et positif, à travers la protection contre l'érosion, le bilan azote et la biomasse produite, comme nous l'avons détaillé dans la partie 2.4 pour le contexte particulier du bassin arachidier. Pour rappel, dans ce contexte caractérisé par une forte baisse de la fertilité liée à la pression démographique et à la diminution des surfaces en jachères comme des parcours utilisés par les troupeaux en élevage extensif, les itinéraires techniques « fumier », c'est-à-dire avec apport de fumier éventuellement combiné à de faibles doses d'engrais azotés (60kg/ha), et « engrais » comprenant uniquement des engrais azotés aux doses de 60 kg /ha sont considérés comme de l'intensification agroécologique.

3.1. Les mesures testées

Les mesures de politique économique testées visent à réduire l'impact des deux contraintes majeures qui s'opposent à l'intensification dans la plupart des systèmes agricoles des pays pauvres : le risque et les liquidités disponibles pour l'achat d'engrais ou de semences améliorées (Gérard, 1991 ; Gérard *et al.*, 1999 ; Sanfo et Gérard, 2012). Comme il est difficile de mobiliser des budgets publics importants, les États faisant face à de multiples contraintes et disposant de peu de ressource, nous avons choisi une dépense publique maximale de 100 000 CFA par ménage (150 €). Comme le dernier recensement (RGPHAE, 2013) estime le nombre de ménages ruraux au Sénégal à 755 559 (dont 61% pratiquant la culture pluviale), le budget nécessaire pour étendre les politiques testées à l'ensemble du Sénégal représenterait environ 75,5 milliards de FCFA (113 millions d'euros).

Tableau 5 : Des mesures contrastées pour une dépense publique maximale de 150€ (100 000 CFA) par ménage

Scénario politique	Description des scénarios
Base	Aucune intervention publique
Assu	Possibilité de souscrire une assurance indicielle agro-climatique non subventionnée
AssuSubPrim	Possibilité de souscrire une assurance indicielle agro-climatique subventionnée (60 % de la prime d'assurance est subventionnée)
AssuSubTauxInt	Subvention à un programme de prêt (diminution du taux d'intérêt de 14 % à 1,4 %) avec la possibilité de souscrire une assurance agro-climatique non subventionnée
SubTauxInt	Subvention à un programme de prêt (diminution de 90% du taux d'intérêt de 14 % à 1,4 % et augmentation de l'accès maximal au crédit)
AssuSubEng	Subvention aux engrais minéraux, type NPK (réduction du prix des engrais de 50 %) avec possibilité de souscrire une assurance agro-climatique non subventionnée
SubEng	Subvention aux engrais minéraux, type NPK (réduction du prix des engrais de 50 %)
AssuCashTrsft	Transferts d'argent (réception sans condition par les agriculteurs simulés d'une somme d'argent) avec possibilité de souscrire une assurance agro-climatique non subventionnée
CashTrsft	Transferts monétaires (réception sans condition par les agriculteurs simulés d'une somme d'argent)

3.2. L'impact des politiques

L'analyse des simulations confirme la grande variété des réponses aux politiques selon le type d'exploitation et la zone agroécologique où elle se situe.

3.2.1. Impact des politiques testées sur le revenu des exploitants et les inégalités

L'impact, souvent important, sur les revenus diffère en fonction des exploitants et des politiques. Les exploitants les plus pauvres de la zone du Sine (NiakharEA1) ont une croissance de plus de 25% de leur revenu avec la subvention aux engrais et le transfert monétaire, avec ou sans assurance, le recours à cette dernière en complément de ces politiques de subventions permettant d'atteindre 30% de croissance de leur revenu (tableau 6). En dépit de cet impact positif, le revenu par actif demeure toujours inférieur au seuil de pauvreté. Pour les plus pauvres de la zone Saloum (NioroEA1), la subvention au taux d'intérêt avec accès au crédit, avec ou sans assurance est celle qui a le plus d'impact sur les revenus (+30%), suivie par le transfert monétaire, avec ou sans assurance (+25%), tandis que la subvention aux engrais, avec ou sans assurance, permet respectivement une

croissance de 22% et 20% des revenus. Là encore, en dépit de cet impact positif, le revenu par actif demeure inférieur au seuil de pauvreté, quelle que soit la politique testée. Pour les moins pauvres de la zone du Sine (NiakharEA2), la subvention au taux d'intérêt avec accès au crédit, avec ou sans assurance, et le transfert monétaire, avec ou sans assurance, sont les politiques les plus favorables aux revenus. Même si l'impact est assez faible (+ 10 à 13%), il est suffisant pour que le revenu par actif dépasse le seuil de pauvreté. Pour les moins pauvres de la zone Saloum (NioroEA2), la subvention au taux d'intérêt avec accès au crédit, avec ou sans assurance, est la plus efficace pour augmenter les revenus (+20%). Ces exploitants ont déjà un revenu par actif supérieur au seuil de pauvreté dans la simulation de référence (base) qui reproduit la situation actuelle. Ces différences reflètent les principales contraintes auxquelles les exploitants font face. Lorsque la contrainte principale est la liquidité, c'est la subvention au taux d'intérêt avec accès au crédit qui crée la meilleure situation (cas des exploitants du Saloum). Au contraire, si c'est surtout le risque qui pose problème, la subvention aux engrais ou le transfert monétaire est plus favorable à la croissance des revenus (Niakhar EA1). La présence d'assurance, combinée à ces politiques, permet un léger gain supplémentaire (de 2 à 4%), la faiblesse de cet impact résultant à la fois des coûts liés à l'assurance, qui viennent accroître les coûts de production alors que la contrainte de liquidité est extrêmement prégnante, et de ses imperfections, le risque de base demeurant le même en sa présence, si bien que les récoltes ne sont que partiellement assurées (Ricome *et al.* 2017).

Tableau 6 : Taux de croissance des revenus par rapport à la base dans les huit (8) politiques pour chaque exploitation type (%)

Source : simulations Anders-Celsius

	Niakhar EA1	Niakhar EA2	Nioro EA1	Nioro EA2	Louga EA1	Louga EA2
Assu	8	-1	0	0	0	0
AssuSubPrim	18	1	1	0	1	3
SubTauxInt	0	10	30	20	0	0
AssuSubTauxInt	11	13	30	20	0	0
SubEng	26	9	20	9	0	3
AssuSubEng	30	8	22	9	0	3
CashTrsft	28	12	25	9	1	5
AssuCashTrsft	30	10	25	9	1	5

Note : les cases en violet indiquent que le revenu par actif des exploitants est au-dessus du seuil de pauvreté.

Dans la région de Louga, aucune politique n'a d'impact sur les revenus, ce qui est la conséquence directe de la faible part des activités agricoles dans les revenus totaux.

Sur le plan des inégalités, au niveau de la région du bassin arachidier considérée dans son ensemble, le ménage le plus riche (LougaEA1) gagne dans la simulation de base 12,3 fois le revenu du ménage le plus pauvre (Niakhar EA1). Toutes les politiques testées permettent de réduire cet écart. **La plus efficace en la matière est la politique de subvention aux engrais avec assurance (9,5 fois)**, suivie de près par le transfert monétaire avec assurance (9,6 fois), puis la subvention aux engrais ou le transfert monétaire (9,8 fois). Viennent ensuite l'assurance avec subvention (10,5) ou sans (11,4), puis la subvention au taux d'intérêt avec accès au crédit avec assurance 11,1 (12,3 sans assurance). On a donc dans l'ensemble un effet de réduction des inégalités par les politiques testées, qui concilient un accroissement substantiel du revenu et une croissance plus importante du revenu des plus démunis. L'impact est particulièrement important pour la subvention aux engrais ou le transfert monétaire, avec un léger impact positif additionnel de la combinaison de l'assurance à ces politiques.

Dans chaque simulation, la baisse des inégalités est le résultat de la croissance du revenu du ménage le plus pauvre et non de la baisse de celui du plus riche (tableau 7). En dépit de l'impact positif important de certaines politiques permettant d'accroître les revenus des plus pauvres de plus de 30%, il faut souligner que, vu la faiblesse des revenus au départ, ceux-ci demeurent largement en dessous du seuil de pauvreté de 225 000 FCFA.

Tableau 7 : Revenu par ménage dans chaque politique (CFA).

Source : simulations Anders-Celsius

	Niakhar EA1	Niakhar EA2	Nioro EA1	Nioro EA2	Louga EA1	Louga EA2
Base	612 502	1 664 018	879 554	1 963 330	7 532 676	1 991 305
Assu	659 284	1 654 911	879 574	1 963 318	7 532 676	1 991 305
AssuSubPrim	721 055	1 675 423	886 552	1 968 389	7 575 966	2 050 243
SubTauxInt	612 339	1 836 374	1 141 592	2 363 680	7 532 676	1 991 305
AssuSubTauxInt	679 425	1 873 963	1 144 935	2 363 680	7 532 676	1 991 305
SubEng	773 690	1 817 821	1 058 867	2 143 404	7 552 864	2 053 806
AssuSubEng	797 835	1 803 302	1 069 148	2 143 275	7 552 864	2 053 806
CashTrsft	781 877	1 860 864	1 098 301	2 143 680	7 632 676	2 091 305
AssuCashTrsft	797 472	1 831 888	1 097 591	2 143 271	7 632 676	2 091 305

Note : un ménage compte en moyenne environ 10 personnes.

* Les cases en violet indiquent que le revenu par actif des exploitants est au-dessus du seuil de pauvreté.

Si l'on se situe maintenant au niveau de chacune des sous-régions du bassin, on notera tout d'abord des écarts de revenus beaucoup moins importants entre les plus pauvres et les moins pauvres de l'échantillon dans le Sine (2,7) et le Saloum² (2,2) que dans la région de Louga (3,8). Ils sont aussi beaucoup plus importants entre les plus riches de la région de Louga et les plus pauvres du Sine (12,3) qu'à l'intérieur de chaque sous-région. Ceci tient essentiellement au fait que les revenus des exploitants représentés à Louga, essentiellement issus de la migration, ont peu de liens avec leurs activités agricoles.

Dans le Sine, les simulations des politiques de subvention au taux d'intérêt avec accès au crédit, avec ou sans assurance, augmentent les inégalités d'écart de revenus entre les plus pauvres et les moins pauvres qui passent à 3, sans assurance, et à 2,8, avec. Au contraire, les politiques de subvention aux engrais, avec ou sans assurance, de transfert monétaire avec assurance ou de subvention à la prime d'assurance permettent de réduire les écarts entre les revenus, le coefficient passant à 2,3. L'impact est moindre avec le transfert monétaire sans assurance (2,4) ou l'assurance non subventionnée (2,5).

Dans le Saloum, aucune des mesures testées n'accroît les inégalités. Celles qui les réduisent le plus sont les politiques de subvention aux engrais ou de transfert monétaire, avec ou sans assurance, puisqu'elles permettent de passer à un indicateur de 2 entre les revenus des moins pauvres et des plus pauvres.

Dans la région de Louga, l'écart initial entre les revenus (3,8) passe à 3,6 avec le transfert monétaire, avec ou sans assurance, et à 3,7 avec les politiques de subvention aux engrais, avec ou sans assurance. Il reste inchangé dans les autres cas.

À nouveau, dans chacune des zones, la réduction des inégalités repose uniquement sur la croissance des revenus des plus pauvres (et non sur la décroissance de ceux des moins pauvres).

Si la subvention aux engrais permet la réduction des inégalités, contrairement à ce qui a pu être observé dans d'autres cas, c'est parce que le prix de l'engrais est largement réduit (50%) et que les doses nécessaires sont faibles dans le cadre des itinéraires techniques agroécologiques. L'effet d'éviction, qui exclut les plus pauvres d'une politique car ils ne peuvent financer leur part de l'investissement, ne joue donc pas ici. Au contraire, les exploitants les moins pauvres peuvent accéder aux engrais en l'absence de cette politique, à nouveau du fait de la faiblesse des doses nécessaires dans les itinéraires agroécologiquement intensifs et parce qu'ils sont moins contraints par les liquidités, mais ces produits sont au-delà des moyens des plus pauvres, qui n'y ont pas du tout recours dans la situation actuelle. Cette politique permet donc une réduction des inégalités en offrant aux plus pauvres la possibilité d'accéder à l'intensification écologique. En l'absence d'un marché du fumier et d'un nombre de têtes de bétail suffisant pour une utilisation plus importante de la fumure organique produite à la ferme, c'est d'ailleurs la seule façon de leur permettre d'y accéder. Cependant, on suppose ici que chaque exploitant peut

² Ces résultats sont proches de ceux de l'AEM en termes d'écart de revenu (1,78 pour la région de Kaolack SN10).

accéder à l'engrais subventionné dans la limite des 100 000 CFA (150€) par exploitation, donc que la mise en place de la politique est parfaitement équitable. Il est clair que ces conditions sont rarement réunies dans la réalité.

Au contraire, l'effet d'éviction est important dans le cas des politiques de subvention au taux d'intérêt avec accès au crédit. En effet, du fait du risque associé au crédit, les exploitations les plus pauvres (Niakhar EAI) ne prennent pas du tout de crédit en l'absence d'assurance et n'utilisent pas la totalité du crédit disponible, même lorsque la politique d'assurance est offerte, celle-ci ne couvrant que partiellement les risques. Au contraire, les exploitants les moins pauvres de la zone du Sine prennent tout le crédit disponible en cas d'assurance et 55% si aucune assurance n'est possible. Cependant, dans la zone du Saloum, où les conditions climatiques rendent le recours aux engrais minéraux moins risqué, tout le crédit disponible est utilisé, avec ou sans assurance, par les plus pauvres comme par les moins pauvres. On a ainsi un double effet d'éviction, partiellement dû à la situation économique des ménages qui discrimine les plus pauvres et partiellement aux conditions climatiques dans lesquelles ils mènent leurs activités, discriminant la région où elles sont les moins favorables. Dans la zone de Louga, aucunes des exploitations modélisées n'ont recours au crédit, la contrainte de liquidité n'étant pas active en raison de l'importance des revenus extra-agricoles.

Certaines politiques testées permettent donc de réduire les inégalités. Encore une fois, l'impact est contrasté en fonction des zones, mais les politiques de subvention aux engrais ou de transfert monétaire, avec ou sans assurance, sont les plus efficaces pour remplir cet objectif. Seules les politiques de subvention au taux d'intérêt avec accès au crédit, avec ou sans assurance, les accroissent dans la zone du Sine. Elles permettent en effet de desserrer la contrainte de liquidité pour les moins pauvres, alors que les plus pauvres ne peuvent en profiter du fait de l'importance de la contrainte de risque qui s'impose à eux et s'oppose au recours au crédit.

3.2.2. Impact sur la production

L'impact sur le revenu découle du changement des systèmes de production et se traduit par des modifications des quantités produites des différentes cultures, avec globalement une intensification marquée sur les céréales (tableau 8). Il est important de noter que cette intensification se fait toujours avec les techniques agroécologiques associant de la manière la plus équilibrée fertilisants organiques et minéraux. En effet, les itinéraires techniques « engrais plus », eux-mêmes pas spécialement abusifs en engrais minéraux, mais utilisés dans nos simulations comme indicateurs de risque de basculement vers l'intensification conventionnelle, ne sont présents dans aucunes des simulations : ils sont trop consommateurs de liquidité et trop risqués, même s'ils sont plus rentables en moyenne interannuelle. Ce sont donc à la fois les risques climatiques, liés à l'intensification sous le climat du Sénégal, et la contrainte de liquidité, extrêmement présente au vu de la pauvreté généralisée des ménages ruraux, qui s'opposent à court terme à ce que les politiques de soutien à l'intensification étudiées ici favorisent une intensification conventionnelle plutôt qu'une intensification agroécologique. Il est cependant possible que des politiques de même type, mais avec un niveau de soutien plus élevé par ménage, conduisent à l'emploi de doses plus élevées d'engrais minéraux. De même, il est possible

que sur le long terme, les effets favorables des politiques testées sur les revenus des agriculteurs s'accumulant avec le temps, conduisant les agriculteurs à une moindre aversion aux risques ou à disposer de moyens financiers pour les gérer, ce qui mènerait progressivement à une augmentation des doses d'engrais minéraux qui pourrait finir par poser des problèmes environnementaux. Il est donc clair qu'une fois réussie la transition vers des systèmes tout aussi agroécologiques qu'aujourd'hui mais plus intensifs, il y aura à concevoir des politiques, probablement assez différentes, permettant de maintenir les systèmes de production dans un espace de sécurité pour l'environnement comme pour le revenu des producteurs.

Dans la zone du Sine, on note un fort accroissement de la production de mil au détriment de celle de l'arachide. C'est particulièrement vrai pour Niakhar EA1 où toutes les politiques sauf la subvention au taux d'intérêt avec accès au crédit sans assurance ont un impact important sur la production de mil : de + 66% avec le transfert monétaire à + 111% avec la subvention au taux d'intérêt avec accès au crédit combiné à l'assurance, tandis que la production d'arachide diminue de 16 à 52%.

Pour NiakharEA2, l'impact est plus variable selon le type de politique : il est très important pour la subvention au taux d'intérêt avec accès au crédit combiné à l'assurance (+103%) et de l'ordre de +50% pour la subvention au taux d'intérêt avec accès au crédit sans assurance, la politique de subvention aux engrais avec ou sans assurance. À part dans le cas de la subvention au taux d'intérêt avec accès au crédit sans assurance où elle reste constante, l'accroissement de la production de mil s'accompagne d'une baisse de celle d'arachide.

La situation est différente dans le Saloum où c'est plutôt la production de maïs qui augmente. Deux niveaux d'augmentation de cette production peuvent être distingués : un niveau moyen, de l'ordre de 50% d'augmentation, et un autre nettement plus élevé, de plus de 200%. Dans le cas de l'exploitation 1, lorsque la politique simulée conduit à une croissance moyenne de la production de maïs (de l'ordre de 50%), elle s'accompagne d'une croissance de la production de mil (+40% environ) : c'est le cas de la politique de subvention aux engrais avec ou sans assurance. Encore une fois, la production d'arachide décroît. Pour l'exploitation 2, en revanche, lorsque la croissance de la production du maïs est de l'ordre de 50% par rapport à la référence (scénario de base), les productions de mil et d'arachide restent à peu près constantes : c'est le cas avec les politiques de subvention aux engrais et de transfert monétaire avec ou sans assurance.

Tableau 8 : Production par exploitation (kg) et taux de croissance (entre parenthèses) par rapport à la situation de référence (base) des principales cultures avec les différentes politiques

		Niakhar EA1	Niakhar EA2	Nioro EA1	Nioro EA2	Louga EA1	Louga EA2
Arachide	Base	760	1 944	1 021	2 248	2 336	3 971
	Assu	456 (-0,40)	1 807 (-0,07)	1 021 (0,00)	2 257 (0,00)	2 336 (0,00)	3 971 (0,00)
	AssuSubPrim	440 (-0,42)	1 015 (-0,48)	479 (-0,53)	965 (-0,57)	2 336 (0,00)	3 907 (-0,02)
	SubTauxInt	760 (0,00)	1 860 (-0,04)	2 103 (1,06)	2 997 (0,33)	2 336 (0,00)	3 971 (0,00)
	AssuSub TauxInt	397 (-0,48)	1 077 (-0,45)	1 017 (0,00)	2 997 (0,33)	2 336 (0,00)	3 971 (0,00)
	SubEng	363 (-0,52)	1 150 (-0,41)	665 (-0,35)	2 257 (0,00)	1 273 (-0,46)	3 172 (-0,20)
	AssuSubEng	394 (-0,48)	975 (-0,50)	528 (-0,48)	2 318 (0,03)	1 273 (-0,46)	3 172 (-0,20)
	CashTrsft	636 (-0,16)	2 342 (0,20)	1 316 (0,29)	2 402 (0,07)	2 336 (0,00)	3 971 (0,00)
	AssuCash Trsft	531 (-0,30)	1 860 (-0,04)	1 204 (0,18)	2 320 (0,03)	2 336 (0,00)	3 971 (0,00)

		NiakharEA1	NiakharEA2	NioroEA1	NioroEA2	LougaEA1	LougaEA2
Maïs	Base	0	0	1 673	3 003	0	0
	Assu	0(nd)	0(nd)	1 673 (0,00)	3 006 (0,00)	0(nd)	0(nd)
	AssuSubPrim	0(nd)	0(nd)	2 138 (0,28)	4 526 (0,51)	0(nd)	0(nd)
	SubTauxInt	0(nd)	0(nd)	5 051 (2,02)	12 566 (3,18)	0(nd)	0(nd)
	AssuSub TauxInt	11(nd)	14(nd)	6 503 (2,89)	12 566 (3,18)	0(nd)	0(nd)
	SubEng	763(nd)	0(nd)	2 593 (0,55)	4 520 (0,51)	0(nd)	0(nd)
	AssuSubEng	34(nd)	0(nd)	2 586 (0,55)	4 538 (0,51)	0(nd)	0(nd)
	CashTrsft	0(nd)	0(nd)	3 038 (0,82)	4 589 (0,53)	0(nd)	0(nd)
	AssuCashTrsft	31(nd)	0(nd)	3 166 (0,89)	4 538 (0,51)	0(nd)	0(nd)

		Niakhar EA1	Niakhar EA2	Nioro EA1	Nioro EA2	Louga EA1	Louga EA2
Mil	Base	1 769	5 628	2 313	8 500	0 ()	1012
	Assu	3 191 (0,80)	5 795 (0,03)	2 313 (0,00)	8 475 (0,00)	0 ()	1 012 (0,00)
	AssuSubPrim	3 488 (0,97)	6 739 (0,20)	2 787 (0,20)	9 067 (0,07)	0 ()	1 163 (0,15)
	SubTauxInt	1 769 (0,00)	8 810 (0,57)	0 (-1,00)	2 466 (-0,71)	0 ()	1 012 (0,00)
	AssuSub TauxInt	3 735 (1,11)	11 409 (1,03)	420 (-0,82)	2 466 (-0,71)	0 ()	1 012 (0,00)
	SubEng	3 376 (0,91)	8 360 (0,49)	3 278 (0,42)	8 002 (-0,06)	2 513 ()	2 901 (1,87)
	AssuSubEng	4 099 (1,32)	8 523 (0,51)	3 443 (0,49)	7 843 (-0,08)	2 513 ()	2 901 (1,87)
	CashTrsft	2 943 (0,66)	6 000 (0,07)	1 471 (-0,36)	7 589 (-0,11)	0 ()	1 012 (0,00)
	AssuCashTrsft	3 643 (1,06)	6 633 (0,18)	1 532 (-0,34)	7 838 (-0,08)	0 ()	1 012 (0,00)

Pour ces deux exploitations, les politiques qui ont le plus d'impact sur la croissance des revenus, c'est-à-dire la subvention au taux d'intérêt avec accès au crédit, avec ou sans assurance, se traduisent par une très forte croissance de la production de maïs : +200% et +289% respectivement avec et sans assurance pour l'exploitation NioroEA1 et +318% pour NioroEA2 pour les 2 scénarios. Il n'y a alors pas d'impact négatif sur la production d'arachide, mais une forte diminution de la production de mil. Le transfert monétaire, avec ou sans assurance, qui a également un impact positif sur les revenus des exploitants de cette zone se traduit par une croissance de la production de maïs de 82 et 89% respectivement pour NioroEA1 et NioroEA2, accompagnée d'une croissance de la production d'arachide (+29 et +18%) et d'une baisse de celle de mil (-36 et -34%). Dans le contexte actuel, où le changement climatique modifie la distribution des précipitations, une telle intensification, exclusivement basée sur le maïs, peut devenir problématique, cette culture étant beaucoup plus sensible que le mil au stress hydrique.

Les différences de comportement entre exploitations et entre le Sine et le Saloum, du point de vue de l'impact simulé des politiques sur les quantités produites, reflètent des contraintes très différentes entre les quatre exploitations traitées. Le rôle important de l'assurance pour l'accroissement de la production de céréales dans le centre du bassin arachidier (Sine) et le fait que les exploitations de cette région ne mobilisent pratiquement pas le maïs dans leur réponse aux politiques d'incitation à l'intensification sont cohérents avec le risque climatique auquel elles sont exposées, très supérieur à celui que subissent les deux exploitations du sud du bassin arachidier (Saloum). La place du mil, comparativement au maïs, dans les exploitations les plus pauvres du Saloum lorsque les politiques sont les moins efficaces, témoigne du rôle clé de cette culture pour la sécurité

alimentaire des ménages et des imperfections des marchés qui poussent les ménages les plus pauvres à ne pas y avoir recours, plutôt que de vendre un produit et d'en racheter un autre pour la consommation.

Pour Louga, la situation est différente : les revenus extra-agricoles constituent l'essentiel des ressources, si bien que ces exploitations ne sont pas tournées vers l'autoconsommation et satisfont les besoins alimentaires de la famille en achetant du riz sur le marché. Ainsi, l'exploitation 1 ne produit pas du tout de mil, tandis que l'exploitation 2, disposant de plus de terres, ne produit qu'environ la moitié des besoins alimentaires du ménage. Les politiques de subvention aux engrais, avec ou sans assurance, ont un fort impact sur la production de mil qui double pour l'exploitation 2, tandis qu'elle passe de 0 à 2,5 tonnes pour l'exploitation 1. Quant à la production d'arachide, elle diminue alors de 50% pour l'exploitation 1 et de 20% pour l'exploitation 2. Les autres politiques n'ont pas d'impact sur la production.

En résumé, les politiques testées sont dans l'ensemble favorables à l'intensification agroécologique : elles permettent d'accroître la production nationale de céréales et répondent ainsi à l'objectif de souveraineté alimentaire. Cependant, il convient de trouver un compromis : selon les politiques, c'est plutôt le mil ou le maïs dont les quantités augmentent et plutôt le Sine ou le Saloum qui est le lieu privilégié de l'intensification. Pour chaque exploitation, les mesures ont d'autant plus d'impact qu'elles correspondent à la contrainte la plus importante : le risque pour Niakhar EA1, le risque et les liquidités pour NiakharEA2 et Nioro EA1, les liquidités pour Nioro EA2. Ainsi, les politiques les plus favorables à l'intensification sont la subvention aux engrais avec ou sans assurance pour NiakharEA1, suivie de près par la subvention au taux d'intérêt avec accès au crédit combiné à l'assurance et le transfert monétaire combiné à l'assurance, et c'est alors la production de mil qui augmente. La subvention aux engrais avec ou sans assurance et la subvention au taux d'intérêt avec accès au crédit, avec ou sans assurance, sont les plus favorables à l'intensification pour NiakharEA2 et NioroEA1. Avec la subvention aux engrais, ce sont les productions de mil et de maïs qui augmentent de façon équilibrée, alors que dans le cas de la subvention au taux d'intérêt, c'est le maïs qui augmente. Pour NioroEA2, c'est la subvention au taux d'intérêt avec accès au crédit, avec ou sans assurance, qui permet le plus d'intensification, encore une fois au profit de la production de maïs, avec une chute de celle de mil.

Pour que cet impact sur la production se traduise bien par la croissance de revenu analysée dans la partie précédente, il est nécessaire que la demande soit suffisante pour éviter une baisse des prix ; en l'absence d'un contexte suffisamment porteur, des politiques de soutien aux prix devront être mises en place simultanément (Gérard *et al.* 2011). Le risque de baisse des prix est donc moins important avec les politiques de subvention aux engrais qui permettent une croissance équilibrée entre les volumes produits de mil et de maïs. Toutefois, les besoins de l'alimentation animale en maïs devraient permettre une demande suffisante pour éviter la baisse des prix.

3.2.3. Impact des politiques sur les surfaces cultivées avec des techniques d'intensification agroécologique

Toutes les politiques testées ont un impact global significativement positif sur le recours aux itinéraires techniques agroécologiquement intensifs sur les céréales. Cependant, pour un certain nombre de politiques, moins de 10% des surfaces sont concernées par l'intensification agroécologique. C'est le cas pour l'assurance, avec ou sans subvention, la subvention au taux d'intérêt, sans assurance, les transferts monétaires, avec ou sans assurance. Au contraire, pour les autres politiques, l'accroissement de la part des surfaces cultivées avec des itinéraires techniques agroécologiquement intensifs est massif. On passe en effet de 46% à 66% des surfaces cultivées avec les politiques de subvention aux engrais sans assurance (et à 68% avec) et de 46% à 74% avec la subvention au taux d'intérêt avec accès au crédit, combiné à l'assurance (tableau 9).

Tableau 9 : Part des itinéraires techniques (intensif, agroécologiquement intensif, extensif) dans les surfaces cultivées pour l'ensemble des exploitations représentées et chaque politique (%)

	Intensif	TAE	Extensif
Base	0,00	0,46	0,54
Assu	0,00	0,49	0,51
AssuSubPrim	0,00	0,55	0,45
SubTauxInt	0,00	0,56	0,44
AssuSubTauxInt	0,00	0,74	0,26
SubEng	0,00	0,66	0,34
AssuSubEng	0,00	0,68	0,32
CashTrsft	0,00	0,54	0,46
AssuCashTrsft	0,00	0,56	0,44

L'impact est plus ou moins marqué selon les zones. Dans le Sine, on passe de 35% des surfaces cultivées avec des techniques agroécologiquement intensives à 82% avec la subvention au taux d'intérêt avec accès au crédit, combiné à l'assurance, 70% avec les politiques de subvention aux engrais avec assurance et 67% sans assurance (tableau 10).

**Tableau 10 : Part des itinéraires techniques
(intensif, agroécologiquement intensif, extensif) dans les surfaces cultivées
pour les exploitations du Sine dans chaque politique (%)**

	Intensif	TAE	Extensif
Base	0,00	0,35	0,65
Assu	0,00	0,43	0,57
AssuSubPrim	0,00	0,47	0,53
SubTauxInt	0,00	0,58	0,42
AssuSubTauxInt	0,00	0,82	0,18
SubEng	0,00	0,67	0,33
AssuSubEng	0,00	0,70	0,30
CashTrsft	0,00	0,48	0,52
AssuCashTrsft	0,00	0,54	0,46

**Tableau 11 : Part des itinéraires techniques
(intensif, agroécologiquement intensif, extensif) dans les surfaces cultivées
pour les exploitations du Saloum dans chaque politique (%)**

		Intensif	TAE	Extensif
Base		0,00	0,41	0,59
Assu		0,00	0,41	0,59
AssuSubPrim		0,00	0,46	0,54
SubTauxInt		0,00	0,55	0,45
AssuSubTauxInt		0,00	0,78	0,22
SubEng		0,00	0,63	0,37
AssuSubEng		0,00	0,64	0,36
CashTrsft		0,00	0,47	0,53
AssuCashTrsft		0,00	0,49	0,51

Dans le Saloum, on passe de 41 % des surfaces cultivées avec des techniques agro-écologiquement intensives à 78 % avec la subvention au taux d'intérêt avec accès au crédit, combiné à l'assurance, 64% avec les politiques de subvention aux engrais avec assurance et 63% sans assurance (tableau 11). En revanche, dans la région de Louga (tableau 12), la croissance est moins importante, car on part de surfaces cultivées avec des techniques agroécologiquement intensives plus importantes dans la situation de référence (58 %).

**Tableau 12 : Part des itinéraires techniques
(intensif, agroécologiquement intensif, extensif) dans les surfaces cultivées
pour les exploitations de Louga dans chaque politique (%)**

	Intensif	TAE	Extensif
Base	0,00	0,58	0,42
Assu	0,00	0,58	0,42
AssuSubPrim	0,00	0,66	0,34
SubTauxInt	0,00	0,55	0,45
AssuSubTauxInt	0,00	0,64	0,36
SubEng	0,00	0,68	0,32
AssuSubEng	0,00	0,69	0,31
CashTrsft	0,00	0,63	0,37
AssuCashTrsft	0,00	0,64	0,36

Les différents types d'exploitants dans chaque zone réagissent différemment aux politiques mises en place (tableau 13).

L'impact le plus important apparaît dans le Sine, en particulier pour Niakhar EA1, où les politiques les moins efficaces mènent pratiquement à un doublement des surfaces cultivées de manière agroécologiquement intensive, si bien que l'essentiel de la superficie de ces exploitations est cultivé avec ces techniques. Ces modifications des itinéraires techniques concernent le mil. Les mesures les plus efficaces sont l'assurance combinée à la subvention aux engrais (+197 % de TAE, si bien que toutes les superficies passent sous ces techniques) et la subvention aux engrais sans assurance (+164 %).

Pour Niakhar EA2, de la même façon, ce sont les surfaces en mil avec engrais qui augmentent massivement. La politique la plus efficace pour promouvoir l'intensification écologique est la subvention au taux d'intérêt combinée à l'assurance (+137 %) qui permet que 90 % de la superficie de ces exploitations soit cultivée avec des itinéraires agroécologiquement intensif. Elle est suivie de la subvention au taux d'intérêt seule (+87 % où 70% de la surface cultivée passe en technique agroécologiquement intensive. Viennent ensuite les politiques de subvention aux engrais avec ou sans assurance (+69%), qui assurent que plus de la moitié de la superficie soit cultivée avec des techniques agro-écologiquement intensives, puis le transfert monétaire avec assurance (+26 %) ou sans (+20 %).

Dans le Saloum, l'accroissement des surfaces en techniques agroécologiquement intensives concerne le mil et le maïs, parfois simultanément. Il est dans l'ensemble moins important que dans le Sine, mais on part d'un niveau beaucoup plus élevé de mobilisation de ces techniques dans la situation actuelle (simulation de base, tableaux 10 et 11). En effet, elles concernent dans la situation de référence la moitié des surfaces des petites exploitations (NioroEA1) et 60% des plus grandes (NioroEA2).

Pour Nioro EA1, l'impact est négatif en cas de subvention au taux d'intérêt (-24%). Avec cette politique, les exploitants se tournent vers le maïs intensif et diminuent leur surface en mil au profit de l'arachide extensif. L'impact positif est le plus important pour la subvention aux

engrais avec assurance (+45%) ou sans assurance (+37%) et concerne alors uniquement la culture du mil ; pour la subvention au taux d'intérêt avec assurance (+40%), seul le maïs est concerné. Viennent ensuite la subvention à l'assurance (+20%), puis les transferts monétaires avec assurance (+12%) et sans assurance (+9%) ; pour ces deux dernières mesures, seules les surfaces en maïs sont concernées.

L'impact est moins important pour NioroEA2 où les surfaces concernées augmentent de 11% pour la subvention à l'assurance, de 10% pour la subvention aux engrais, de 9% si elle est combinée à l'assurance ou pour les transferts monétaires avec assurance, de 7% sans assurance. Les autres politiques n'ont pas d'impact.

Dans la région de Louga, la subvention aux engrais avec ou sans assurance conduit à un accroissement des surfaces en TAE de 214% (soit 2,4 ha de mil avec engrais) pour l'exploitation 1 et de +162% (+1,8 ha de mil) pour l'exploitation 2. Pour cette dernière, la subvention à l'assurance conduit à une croissance de 13% (+0,1 ha de mil), tandis que les autres politiques n'ont aucun impact.

Les ressources en fumier des exploitations sont insuffisantes pour que cette intensification soit produite uniquement avec les itinéraires techniques n'employant que des doses faibles ou nulles d'engrais minéraux (tableau 14). Ce résultat n'est pas surprenant dans la mesure où l'ensemble des ressources organiques est recyclé dans le scénario de référence, conformément à ce qu'on observe de manière spectaculaire dans les exploitations réelles.

Comme nous l'avons déjà mentionné, notre modèle rend assez mal compte des possibilités d'évolution des systèmes d'élevage. Il en va donc de même pour celles qui pourraient conduire à disposer de davantage de fumier ou à réduire les pertes de nutriments le long des flux de biomasse et de déjections entre productions végétales et élevage. Cependant, la marge de progrès dans les unités fertilisantes disponibles sous forme de biomasse endogène à l'exploitation reste nécessairement faible, compte tenu justement du niveau bas de production de biomasse observé actuellement, par rapport à ce que permet l'engrais minéral à des doses restant très raisonnables. Réduire les pertes en azote – certes substantielles – dans les flux entre les déjections des animaux et sa restitution au sol sous forme de matières organiques offre également assez peu de marge de manœuvre (Vayssière et Rufino, 2012) et suppose des investissements dans des surfaces de stockage étanches et couvertes, dont les avantages pour la productivité de l'exploitation ne se manifesteront qu'à très long terme. A priori, il est peu probable que les engrais minéraux atteignent des prix tellement bas à l'avenir qu'ils dissuadent les agriculteurs de recycler autant qu'ils le font aujourd'hui les nutriments, par des retours au sol d'une part substantielle de la biomasse directement ou après transit par les animaux. On devrait donc pouvoir compter à moyen terme sur des effets vertueux pour les cycles de nutriments de l'accroissement général de la biomasse disponible résultant du recours raisonné à l'azote minéral.

La croissance de l'utilisation de techniques agroécologiquement intensives est donc surtout le résultat d'une intensification basée sur des doses d'engrais minéraux cohérentes avec l'objectif de produire en maîtrisant les risques économiques et environnementaux.

Tableau 13 : Différence avec le scénario de base des surfaces conduites avec les techniques agroécologiquement intensives par exploitation avec chacune des mesures testées (ha).

Source : simulations Anders-Celsius

		Assu	Assu SubPrim	Sub TauxInt	Assu SubTauxInt	SubEng	Assu SubEng	Cash Trsft	Assu CashTrsft
Niakhar EA1	Fumier	0,01	0,00	0,00	-0,18	0,02	-0,04	0,01	-0,16
	Engrais	1,17	1,47	0,00	1,73	1,91	2,36	1,09	1,91
Niakhar EA2	Fumier	0,00	0,01	-0,01	-0,28	0,47	0,48	0,01	0,01
	Engrais	0,04	0,25	3,22	5,37	2,07	2,07	0,75	0,95
Nioro EA1	Fumier	0,00	0,04	-1,09	-0,69	-0,01	0,07	0,07	0,08
	Engrais	0,00	0,59	0,32	2,01	1,21	1,40	0,20	0,30
Nioro EA2	Fumier	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Engrais	-0,02	1,08	-0,04	-0,04	0,96	0,86	0,70	0,85
Louga EA1	Fumier	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Engrais	0,00	0,00	0,00	0,00	2,38	2,38	0,00	0,00
Louga EA2	Fumier	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Engrais	0,00	0,14	0,00	0,00	1,79	1,79	0,00	0,00
Somme en Fumier + Engrais		1,21	3,58	2,39	7,92	10,80	11,36	2,83	3,94
Somme en Fumier		0,01	0,04	-1,10	-1,15	0,48	0,51	0,08	-0,07
Somme en Engrais		1,20	3,54	3,50	9,07	10,32	10,85	2,75	4,00

Note : techniques utilisant du fumier éventuellement combiné à de faibles doses d'engrais minéral (Fumier) ou de faibles doses d'engrais minéral sans fumier (Engrais), voir tableau 3.

Tableau 14 : Surfaces avec techniques agroécologiquement intensives de type « Fumier » (avec matières organiques combinées à des apports raisonnés d'engrais minéraux), par type d'exploitant, culture et politique testée (ha).
Source : simulations Anders-Celsius

Exploitation	Culture	Base	Assu	Assu SubPrim	Sub TauxInt	Assu Sub TauxInt	SubEng	Assu SubEng	Cash Trsft	Assu Cash Trsft
Niakh EA1	Mil	1,18	1,18	1,18	1,18	0,99	0,48	0,60	1,18	0,68
	Maïs	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,47	0,02	0,00	0,02
	Arachide	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,24	0,52	0,00	0,32
	Total	1,18	1,18	1,18	1,18	1,00	1,20	1,14	1,18	1,02
Niakh EA2	Mil	3,39	3,39	3,39	3,37	2,83	3,86	3,86	3,39	3,39
	Maïs	0	0	0	0	0,01	0	0	0	0
	Arachide	0	0	0	0	0,26	0	0	0	0
	Total	3,39	3,39	3,39	3,37	3,1	3,86	3,86	3,39	3,39
Nioro EA1	Mil	2,135652	2,135637	2,250573	0	0,569219	1,60082	1,864498	1,683624	1,692631
	Maïs	0,177207	0,177197	0,101522	1,219154	1,05646	0,7	0,515055	0,7	0,7
	Arachide	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Total	2,312859	2,312834	2,352095	1,219154	1,625679	2,30082	2,379553	2,383624	2,392631
Nioro EA2	Mil	3,89	3,89	3,89	3,34	3,34	3,89	3,89	3,89	3,89
	Maïs	0,00	0,00	0,00	0,55	0,55	0,00	0,00	0,00	0,00
	Arachide	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Total	3,89	3,89	3,89	3,89	3,89	3,89	3,89	3,89	3,89
Louga EA1	Mil	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Maïs	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Arachide	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11
	Total	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11
Louga EA2	Mil	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
	Maïs	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Arachide	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Total	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52

Tableau 15 : Surfaces avec techniques agroécologiquement intensives de type « Engrais » (apports minéraux raisonnés inférieurs à 60 kg/ha d'azote, non combinés à des apports organiques) par type d'exploitant, culture et politique testée (ha).

Source : simulations Anders-Celsius

Exploitation	Culture	Base	Assu	Assu SubPrim	Sub TauxInt	Assu SubTauxInt	SubEng	Assu SubEng	Cash Trsft	Assu CashTrsft
Niakh EA1	Mil	0	1,17	1,47	0,00	1,73	1,91	2,36	1,09	1,91
	Maïs	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Arachide	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Total	0,00	1,17	1,47	0,00	1,73	1,91	2,36	1,09	1,91
Niakh EA2	Mil	0,31	0,35	0,56	3,53	5,68	2,38	2,38	1,06	1,26
	Maïs	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Arachide	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Total	0,31	0,35	0,56	3,53	5,68	2,38	2,38	1,06	1,26
NioroEA1	Mil	0	0	0,22	0	0	1,29	1,23	0	0
	Maïs	0,91	0,91	1,28	1,22	2,91	0,82	1,07	1,11	1,20
	Arachide	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Total	0,91	0,91	1,5	1,22	2,91	2,12	2,30	1,11	1,20
NioroEA2	Mil	3,63	3,61	3,72	0,00	0,00	3,61	3,49	3,30	3,49
	Maïs	1,94	1,94	2,93	5,53	5,53	2,92	2,93	2,97	2,93
	Arachide	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Total	5,57	5,55	6,65	5,53	5,53	6,53	6,43	6,27	6,42
LougEA1	Mil	0	0	0	0	0	2,38	2,38	0,00	0,00
	Maïs	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Arachide	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Total	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,38	2,38	0,00	0,00
LougEA2	Mil	0,59	0,59	0,73	0,59	0,59	2,38	2,38	0,59	0,59
	Maïs	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Arachide	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Total	0,59	0,59	0,73	0,59	0,59	2,38	2,38	0,59	0,59

La comparaison des politiques les plus efficaces selon les types d'exploitants et les critères (tableau 16) montre la difficulté dès que plusieurs critères et systèmes de production sont considérés : la politique la plus efficace n'est pas la même, non seulement en fonction du type d'exploitant mais aussi selon la variable cible. Pour les exploitants les plus pauvres du Sine (Niakhar EA1), la politique de transfert monétaire est parmi les plus efficaces si l'on souhaite accroître le revenu, mais elle est beaucoup moins performante pour promouvoir une certaine indépendance alimentaire au niveau des marchés internationaux, puisqu'elle augmente deux fois moins le volume de production que celle de la subvention aux engrais. Par ailleurs, la politique de subvention aux engrais permet une croissance beaucoup plus importante des surfaces cultivées avec des techniques d'intensification agroécologique. On constate la même chose pour NioroEA1 : le transfert monétaire, efficace si l'on souhaite accroître le revenu, ne permet qu'une faible croissance de la production.

A cette difficulté s'ajoute l'impossibilité de mettre en place une politique comprenant des mesures différentes par zone ou par exploitant. En effet, les politiques, comme les subventions aux engrais, sont déjà souvent détournées au profit de quelques acteurs bien placés et peu honnêtes. Dans ce contexte, appliquer des mesures différenciées selon les zones géographiques ou la situation des exploitants agricoles multiplierait les possibilités de détournement et les rentes associées. Les mesures deviendraient alors beaucoup plus coûteuses et perdraient leur efficacité.

Les analyses précédentes montrent qu'une politique de subvention aux engrais, éventuellement couplée avec de l'assurance, est la mesure qui serait la plus favorable à l'intensification écologique tout en diminuant les inégalités, car elle bénéficie aux groupes des exploitations les plus pauvres et augmente de façon équilibrée la production de mil et de maïs.

Toutefois, des politiques de subvention aux engrais ont déjà été mises en place par le gouvernement du Sénégal après la crise de 2008 et renforcées récemment afin d'accroître la souveraineté alimentaire nationale (Grande Offensive pour la Nourriture et l'Abondance (GOANA, 2008), Programme d'Accélération de la Cadence de l'Agriculture Sénégalaise (Phase 1: 2014-2017 ; Phase 2: 2018-2022)). Le problème est que, selon les paysans comme les décideurs et experts locaux, l'engrais subventionné n'est jamais disponible lorsque les paysans en ont besoin et ce en dépit de sommes importantes allouées à l'application de cette mesure (4,6 milliards de FCFA en 2004/2005, 18,1 milliards de FCFA en 2012/2013 et 21,5 milliards prévus pour 2019-2020). Il est probable que, comme dans de nombreux pays (Gérard *et al.* 2011), l'engrais subventionné soit détourné, accaparé par quelques acteurs, puis revendu au prix du marché, le différentiel constituant un bénéfice substantiel (50% du prix de l'engrais). C'est d'ailleurs en raison de la difficulté à mettre en place des politiques de soutien aux prix efficaces et non détournées que de nombreux auteurs ont préconisé le retrait des politiques publiques (Gérard, 2010). Il est néanmoins possible de réfléchir à une application plus efficace de ces mesures, ce qui semble réalisable au Sénégal, où de nombreux paysans sont organisés en GIE ou

coopératives, en livrant celles-ci directement et en informant l'ensemble des producteurs, afin qu'ils puissent défendre leurs intérêts, et en améliorant la gouvernance et le contrôle local de la distribution.

Tableau 16 : Synthèse : politiques ayant le plus d'impact, selon les variables cibles et les exploitations types

	Niakhar EA1	Niakhar EA2	Nioro EA1	Nioro EA2	Louga EA1	Louga EA2
Impact sur revenu (1) %	Subeng 26 ASubeng 30 CashTft 28 ACashTft 30	ASTxInt 13 CashTft 12 STxint 10 ACashTft 10	Stxint 25 ASTxint 25 CashTft 20 ACashTft 20	Stxint 20 ASTxint 20	CashTft 5 CashTft 5	Pas d'impact significatif
Impact sur production (2) %	Subeng 78 ASubeng 79 ASTxint 64 ACashTft 66	ASTxInt 65 STxint 41 Subeng 26 ASubeng 25	ASTxInt 59 STxint 43 Subeng 31 ASubeng 31	Stxint 31 ASTxint 31	Subeng 62 ASubeng 62	Pas d'impact significatif
Impact sur surfaces en TAE (3) ha	ASubeng 2,3 Subeng 1,9	ASTxInt 5,9 STxint 3,2	ASTxInt 1,3 Subeng 1,2 ASubeng 1,5	ASprim 1,1 Subeng 1	Subeng 2,4 ASubeng 2,4	Subeng 1,8 ASubeng 1,8
Impact sur les inégalités dans la zone (4)	Niveau dans la référence 2,7	Subeng 2,3 ASubeng 2,3 ASprim 2,3 ACashTft 2,3	Niveau dans la référence 2,2	Subeng 2 ASubeng 2 CashTft 2 ACashTft 2	Niveau dans la référence 3,8	CashTft 3,6 ACashTft 3,6 Subeng 3,7 ASubeng 3,7

(1) % d'augmentation par rapport à la référence (base)

(2) % d'augmentation par rapport à la référence (base) toutes cultures confondues en kg

(3) Différence en ha par rapport à la référence des surfaces en TAE (toutes techniques et toutes cultures confondues)

(4) Revenu des moins pauvres/Revenu des plus pauvres, colonne 1 : niveau de référence, colonne 2 niveau avec les politiques les plus favorables à la réduction des inégalités.

Assu : Possibilité de souscrire une assurance agro-climatique non subventionnée
ASPrim : Possibilité de souscrire une assurance agro-climatique subventionnée (60 % de la prime d'assurance est subventionnée)
STxInt : Subvention à un programme de prêt, diminution de 90% du taux d'intérêt (14 % à 1,4 %) et augmentation de l'accès maximal au crédit
ASTxInt : Subvention à un programme de prêt (diminution du taux d'intérêt de 14 % à 1,4 %) avec la possibilité de souscrire à une assurance agro-climatique non subventionnée
SubEng : Subvention aux engrais (réduction du prix des engrais de 50 %)
ASubEng : Subvention aux engrais (réduction du prix des engrais de 50%) avec possibilité de souscrire une assurance agro-climatique non subventionnée
CashTft : Transferts monétaires (réception sans condition par les agriculteurs simulés d'une somme d'argent)
ACashTft : Transferts d'argent (réception sans condition par les agriculteurs simulés d'une somme d'argent) avec possibilité de souscrire une assurance agro-climatique non subventionnée

S'il n'est pas possible de mettre en place la subvention aux engrais afin que les paysans les plus pauvres en bénéficient également, il sera alors préférable de se tourner vers les transferts monétaires. En effet, ces politiques reposant sur un versement direct de l'État aux ménages bénéficiaires ne sont pas aisément détournées et l'analyse réalisée montre qu'elles auraient un fort impact économique, tant du point de vue des revenus des ménages les plus pauvres que de la croissance de la production. Ces transferts existent d'ailleurs déjà pour les ménages les plus vulnérables (Programme national de bourses de sécurité familiale mettant à la disposition des ménages vulnérables des bourses de 25 000 FCFA par trimestre pour renforcer leurs moyens d'existence et capacités éducatives et productives) ; il s'agirait donc d'en augmenter le montant en y ajoutant une part destinée non à la consommation mais aux activités de production et d'étendre le nombre de bénéficiaires. En effet, le problème des transferts monétaires, alors que les revenus des ménages sont extrêmement faibles, est que la tentation est forte de les utiliser pour satisfaire les besoins de consommation immédiats plutôt que d'investir dans la prochaine campagne agricole, ce qui est nécessaire à une croissance durable des revenus. Par ailleurs, afin de rester dans des dépenses publiques réalistes dans les conditions actuelles, la somme testée par ménage est de 100 000 FCFA (150€). Dès lors, les politiques les plus efficaces permettent une croissance de 30%, ce qui est loin d'être négligeable mais également loin de permettre de passer au-dessus du seuil de pauvreté par actif. Une dépense 10 fois plus élevée serait sans doute nécessaire pour ce résultat, mais nous n'avons pu la tester dans le cadre de ce projet de recherche. Dans les conditions actuelles et avec le budget de dépenses publiques prévu dans cette étude, la meilleure politique semble donc la subvention aux engrais avec une refonte totale des modalités de distribution afin de s'assurer que ceux-ci atteignent bien les populations, y compris les plus vulnérables.

Conclusion

Plusieurs résultats majeurs se dégagent de cette analyse des possibilités et conséquences de l'intensification agroécologique dans le bassin arachidier du Sénégal.

Tout d'abord, il apparaît qu'intensifier les céréales dans le nord du bassin ne serait pas la meilleure stratégie compte tenu de la faible efficacité de la fertilisation sous un climat aussi aride. Il vaut donc mieux soutenir la filière arachide, voire le développement de filières pour d'autres légumineuses à cycle court (niébé), pour améliorer la valeur ajoutée de ces filières et la redistribution vers les agriculteurs d'une partie de cette valeur ajoutée.

Pour les zones centrales exposées au risque climatique mais où il existe une marge de manœuvre pour l'intensification, il est important de disposer d'instruments d'assurance contre les risques, mais cela ne doit pas être au détriment du financement de solutions de crédit ou de l'accès à des fertilisants à un prix raisonnable, étant donné la grande pauvreté des exploitants.

Dans toutes les régions où l'intensification fait sens, il vaut mieux cibler les subventions aux engrais pour les plus pauvres et, pour les moins pauvres, l'accès au crédit combiné à des subventions et à des assurances pour le rendre abordable et attractif pour le plus grand nombre. Dans l'ensemble, étant donné le coût et les imperfections des assurances, les plus pauvres renoncent à s'endetter pour ne pas faire face au risque de non-remboursement et à ses conséquences dramatiques pour leur activité. Les politiques de subvention au taux d'intérêt avec accès au crédit, même combinées à de l'assurance, ont donc tendance, du fait d'un fort effet d'éviction, à accroître les inégalités. Ce n'est pas le cas avec les politiques de subvention aux engrais avec assurance qui profitent surtout aux plus pauvres et permettent d'accroître la production de céréales d'environ 50%. En revanche, il est nécessaire que la distribution subventionnée des engrais soit repensée et contrôlée afin de bénéficier effectivement aux plus pauvres.

Du point de vue de l'environnement, si l'on veut éviter que l'intensification des céréales se traduise aussi par une diminution des surfaces en arachide et donc des surfaces en rotation céréale-légumineuse, avec des conséquences néfastes à terme sur la pression des bio agresseurs, il faudra veiller à soutenir aussi les filières légumineuses, qui peuvent être améliorées (tandis qu'à part par le biais de la fourniture en temps utile de semences de qualité, la marge de progrès du rendement par des méthodes agroécologiques est assez faible pour ces cultures comparativement aux céréales).

Ces politiques de soutien à l'intensification écologique mériteront aussi d'être accompagnées de mesures de soutien à la réduction des pertes en nutriments dans les relations agriculture-élevage (subventions aux prêts à plus long terme, pour équipement de surface de stockage du fumier ou de compostage des matières organiques par exemple) ou à l'entretien des parcs arborés.

Il est aussi fort possible que les encouragements à l'intensification se traduisent aussi par un recours accru à la mécanisation des itinéraires techniques. Dans notre étude, les systèmes de culture sur maïs sont mécanisés, comme c'est déjà le cas aujourd'hui pour les itinéraires semi-intensifs ou intensifs pratiqués par certains agriculteurs du Saloum, mais nous n'avons pas envisagé les très grandes variations de performance agronomique et environnementale auxquelles la mécanisation peut conduire lorsqu'elle est mal maîtrisée. Dans certains cas, notamment lorsque les agriculteurs utilisent des tracteurs loués à l'heure ou la surface travaillée auprès d'opérateurs privés ou de groupements d'agriculteurs, des méthodes de gestion ou des pratiques de travail du sol et de semis mal adaptées peuvent conduire en quelques années à des densités de peuplement de la culture insuffisantes et à des enherbements très importants que les agriculteurs traitent avec un usage immodéré d'herbicides, et à des risques d'érosion des sols peuvent également apparaître (voir par exemple Lairez *et al.*, 2020). Pour éviter ce type d'évolution, les politiques de soutien à l'intensification écologique devront être accompagnées d'actions de formation des agriculteurs, ainsi que des opérateurs privés ou des groupements d'agriculteurs opérant les tracteurs, et d'actions régulières d'évaluation des performances agronomiques et environnementales de ces pratiques, de manière à adapter en temps utile les politiques agricoles (par exemple, par un soutien à l'investissement pour limiter les risques de compétition entre agriculteurs dans l'accès à la machinerie, source de la plupart des pratiques inadaptées).

À plus long terme, il est très probable que des abus apparaissent dans l'utilisation des engrais minéraux ou, à l'inverse, que les politiques perdent de leur efficacité à soutenir l'intensification si elles ne sont pas ajustées en fonction de l'évolution des prix des produits agricoles et des engrais, voire de l'évolution du climat et des teneurs en matière organique des sols. Une fois la transition vers des exploitations procurant un revenu décent aux agriculteurs et contribuant efficacement à la sécurité alimentaire et plus généralement à l'économie du pays, il paraît évident que, puisque le poids relatif des dimensions environnementales et économiques dans la durabilité de l'agriculture de la région aura changé autant que les ressources en biomasse des exploitations, les politiques agricoles susceptibles de maintenir les exploitations dans un espace de sécurité de leur revenu et de leur impact environnemental seront sans doute assez différentes de celles étudiées ici pour amorcer l'intensification écologique ou durable (Cassman et Grassini, 2020). En effet, elles s'apparenteront davantage à celles que les pays développés expérimentent aujourd'hui pour ce qu'ils appellent la « transition agroécologique ». Cependant, nous en sommes loin aujourd'hui : même dans les politiques les plus favorables, les revenus par actif des exploitants les plus pauvres n'atteignent pas le seuil de pauvreté, alors que chaque actif doit nourrir un consommateur en plus de lui-même. De nouvelles simulations, avec un budget public au moins 5 fois plus important, seraient nécessaires afin de voir s'il serait possible dans ces conditions de sortir l'ensemble des exploitants du piège à pauvreté et quelles seraient les formes d'intensification choisies par les producteurs virtuels dans cette éventualité. Cependant, se lancer dans une telle recherche n'a de sens que si l'on peut trouver suffisamment de fonds publics dans le contexte actuel...

Néanmoins, les politiques testées permettent un accroissement de revenu surtout pour les plus pauvres, luttant ainsi contre les inégalités. Elles entraînent aussi l'accroissement de la production de céréales et renforcent ainsi la souveraineté alimentaire du Sénégal sans dégrader l'environnement et donc sans hypothéquer les possibilités des générations futures à se nourrir. Il est toutefois important de souligner la faiblesse des ressources organiques disponibles qui constitue un frein majeur au développement d'une agriculture écologiquement intensive. La diminution des surfaces dévolues au pâturage des animaux élevés de façon extensive, souvent remplacé par des plantations dont la production est destinée au marché international, joue à ce titre un rôle profondément négatif dans la transition agroécologique. Plus la pression sur l'espace s'accroît, plus il sera nécessaire d'introduire dans le système des nutriments exogènes à l'écosystème pour satisfaire les besoins élémentaires des ménages agricoles. Le temps presse donc pour engager une intensification durable de l'agriculture dans la région et se donner ainsi une marge de manœuvre pour l'avenir. Enfin, en dépit des politiques testées et de leur impact positif sur les revenus et les inégalités, il est important de souligner que si elles sont loin de permettre la sortie du piège à pauvreté pour la majorité des ménages, c'est surtout du fait de la faiblesse des surfaces disponibles par actif. Dans ce contexte, il est probable que seul le développement des activités extra-agricoles, offrant l'opportunité d'un emploi à au moins un actif dans chaque ménage, pourrait permettre d'atteindre cet objectif.

Bibliographie

- Affholder, F. (1995).** Effect of organic matter input on the water balance and yield of millet under tropical dryland condition. *Field Crops Res.* 41, 109–121.
- Affholder, F. (1997).** Empirically modelling the interaction between intensification and climatic risk in semiarid regions. *Field Crops Res.* 52, 79–93.
- Affholder, F., Poeydebat, C., Corbeels, M., Scopel, E., Titttonell, P., (2013).** The yield gap of major food crops in family agriculture in the tropics: Assessment and analysis through field surveys and modelling. *Field Crops Res.* 143, 106–118.
- Affholder, F., Parrot, L., Jagoret, P., (2014).** Acquis et perspectives de l'intensification écologique. In: Sourisseau, J.M. (Ed.), *Agricultures familiales et mondes à venir*. Quae, Versailles, France, pp. 303–316.
- Alvarez, S., Paas, W., Descheemaeker, K., Titttonell, P., Groot, J.C.J. (2014).** Constructing typologies, a way to deal with farm diversity: general guidelines for the Humidtropics. Report for the CGIAR Research Program on Integrated Systems for the Humid Tropics. Plant Sciences Group, Wageningen University, the Netherlands.
- Ba D., Kébé M., Niang M., Faye A., et Guissé S. (2016).** Profil de référence de l'économie des ménages ruraux de la zone de moyens d'existence SN 09/pluviale-arachide-céréales sèches (Senegal). Dakar : HEA SAHEL.
- Badji F., Ndiaye M., Dieng M., Faye A., et Guissé S. (2016)a.** Profil de référence de l'économie des ménages ruraux de la zone de moyens d'existence SN 05/pluviale-niebe et arachide (Senegal). Dakar : HEA SAHEL.
- Badji F., Ndiaye M., Dieng M., Faye A., et Guissé S. (2016)b.** Profil de référence de l'économie des ménages ruraux de la zone de moyens d'existence SN 10/pluviale-arachide-céréales sèches (Senegal). Dakar : HEA SAHEL.
- Boulier, F., Jouve, P., (1990).** Evolution des systèmes de production sahéliens et leur adaptation à la sécheresse. R3S-CORAF-CILSS-CIRAD, Montpellier.
- Brockhaus, M., Djoudi, H., Locatelli, B., (2013).** Envisioning the future and learning from the past: Adapting to a changing environment in northern Mali. *Environmental Science & Policy* 25, 94–106. doi:10.1016/j.envsci.2012.08.008.
- Cassman, K.G., Grassini, P., (2020).** A global perspective on sustainable intensification research. *Nature Sustainability* 3, 262–268.
- CSE. (2007).** Caractérisation des systèmes de production agricole au Sénégal. Centre de Suivi Ecologique (Land Degradation Assessment (LADA).
- Daw, T., Brown, K., Rosendo, S., Pomeroy, R., (2011).** Applying the ecosystem services concept to poverty alleviation: the need to disaggregate human well-being. *Environmental Conservation* 38, 370–379. doi:10.1017/S0376892911000506
- Delaunay, V., Deschamps-Cottin, M., Bertaudière-Montes, V., Vila, B., Oliveau, S., Dos Santos, S., Soumaré, M., Lalou, R., (2009).** Dynamique démographique et dynamique du parc agroforestier à *Faidherbia albida* (Del.) A. Chev. en pays Serer (Sob, Sénégal).
- Dzambah. AF (2019).** Quelles politiques pour promouvoir l'agroécologie dans le bassin arachidier (Sénégal) ? Diagnostic de la situation socio-économique des ménages agricoles et tests de mesures alternatives à l'aide d'un modèle bioéconomique de simulation, Mémoire Master 2 Sup Agro Montpellier, p.147.
- Faye, N.F., SALLM, Affholder. F and Gerard. F (2019),** « Inégalités de revenu en milieu rural dans le bassin arachidier du Sénégal », *Papiers de Recherche AFD*, n° 115, Octobre.
- Gérard. F. (1991)** "Risque et production agricole : les limites du libéralisme" in *L'Etat et l'Agriculture*, actes du séminaire international organisé par la SFER ? Economica, Paris.

Gerard. F, Erwidodo, I. Marty, (1999). Evaluation of the Impact of Trade Liberalization of the Food Crop Production and Farm Income in Java Lowland, Indonesia. In G.H. Peters and J. Von Braun (ed) Food security, diversification and resource management: refocusing the role of agriculture, Ashgate

Gérard F. (2010). Dynamique de l'offre, incertitude et régulation des marchés agricoles. Mémoire pour l'Habilitation à diriger des recherches en Sciences économiques. Paris I, Université Panthéon-Sorbonne, 71 p.

Gérard F. Alpha A. , Beaujeu R., Levard L. , Maître d'Hotel E. , Rouille d'Orfeuill H., Bricas N., Daviron B., Galtier F., Boussard J.M..(2011). Managing Food Price Volatility for Food Security and Development.
http://www.interreseaux.org/IMG/pdf/Managing_Food_Price_Volatility_for_Food_Security_and_Development_Grema.pdf

Sanfo, S., Gérard, F. (2012). Public policies for rural poverty alleviation: The case of agricultural households in the Plateau Central area of Burkina Faso. Agr. Syst., <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2012.02.006>

Grillot, M., Guerrin, F., Gaudou, B., Masse, D., Vayssières, J., (2018). Multi-level analysis of nutrient cycling within agro-sylvo-pastoral landscapes in West Africa using an agent-based model. Environmental Modelling & Software 107, 267-280.

Lairez, J., Lopez-Ridaura, S., Jourdain, D., Falconnier, G.N., Lienhard, P., Striffler, B., Syfongxay, C., Affholder, F., In press. Context matters: agronomic field monitoring and participatory research to identify criteria of farming system sustainability in South-East Asia. Agric. Syst.

Louppe, D., (2016). Des associations bénéfiques arbres-productions agricoles au Sénégal et en Côte d'Ivoire. Forêt Entreprise, 30-36.

Noba, K., Ngom, A., Guèye, M., Bassène, C., Kane, M., Diop, I., Ndoye, F., Mbaye, M.S., Kane, A., Tidiane Ba, A., (2014). L'arachide au Sénégal : état des lieux, contraintes et perspectives pour la relance de la filière. OCL 21, D205.

Peltier, R., (1996). Les parcs à faidherbia. CIRAD-Forêt, Montpellier, France.

Pieri, C., (1989). Fertilité des terres de savanes. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara. CIRAD, Montpellier

Ricome, A., Affholder, F., Gérard, F., Muller, B., Poeydebat, C., Quirion, P., & Sall, M. (2017). Are subsidies to weather-index insurance the best use of public funds? A bioeconomic farm model applied to the Senegalese groundnut basin. Agricultural Systems 156, 149-176

Noba, K., Ngom, A., Guèye, M., Bassène, C., Kane, M., Diop, I., Ndoye, F., Mbaye, M.S., Kane, A., Tidiane Ba, A., (2014). L'arachide au Sénégal : état des lieux, contraintes et perspectives pour la relance de la filière. OCL 21, D205.

Rufino et al., (2007). Manure as a key resource within smallholder farming systems: Analysing farm-scale nutrient cycling efficiencies with the NUANCES framework. Livestock Science 112, 273-287.

Scopel, E., Macena da Silva, F.A., Corbeels, M., Affholder, F., Maraun, F., (2004). Modelling crop residue mulching effects on water use and production of maize under semi-arid and humid tropical conditions. Agronomie 24, 383-395.

Toukara, A., Clermont-Dauphin, C., Affholder, F., Ndiaye, S., Masse, D., Cournac, L., (2020). Inorganic fertilizer use efficiency of millet crop increased with organic fertilizer application in rainfed agriculture on smallholdings in central Senegal. Agriculture, Ecosystems and Environment 294, 11 p.

Van Ittersum, M.K., Brouwer, F., (2009). Integrated assessment of agricultural and environmental policies- concepts and tools. Environ. Sci. Policy 12, 543-545.

Annexe 1 : Le modèle Anders

Sets

ac: agricultural activities

ag: age of family members

an: animal types ,

e: state of nature

ge: gender of family members

inp: inputs

ins: insurance type

ne: nutrient type (digestible nitrogen matter / energy in kcal)

p: period

pdt: agricultural products

s: soil types,

sps: subsidy program scenario

str: straw type (from millet or maize; subset of *pdt* for straw)

t: type of off-farm labor (including agricultural and non-agricultural labor, remittances)

tan: animals used for traction (subset of *an*)

z: field types,

Variables

Endogenous variables are in *UPPER CASE* and exogenous parameters in *lower case*.

π_e income by state of nature

$activ_{ge,ag}$ active family members by gender and age

$anim_{an,p}$ stock of animals by type of animal and period

$animneed_{ne,p}$ animals nutritional needs (*ne*) by period

$atneed_{z,s,ac,p}$ animal traction requirements by field type, soil type, agricultural activity and period

$BA_{an,p}$ animals bought by type of animal and period

$BC_{pdt,p,e}$ agricultural products bought for consumption

BRW_p borrowing by period

$CASH_{p,e}$ Cash available by period p and state of nature

$cashtr_{sps}$ Cash transfer by subsidy program scenario

$canim_{an}$ return from animal selling by animal type

$co_{s,z,ac,inp,p}$ input coefficient for agricultural activities by animal type by field type, soil type, agricultural activity, input and period

$coanim_{an}$ costs associated with raising animals by animal type

$CONSA_{p,pdt,e}$ animal consumption of farm products by period, product and state of nature

$CONSAT_{p,pdt,e}$ Total animal consumption by period, product and state of nature

$CONSH_{p,pdt,e}$ human consumption of agricultural products by period, product and state of nature

$CONSO_{p,pdt,e}$ Other consumption of farm products by period, product and state of nature (straw)

$contf_{ne}$ Nutritional content of purchased feedstock by nutrient type

$contpa_{ne,p}$ Nutritional content of pasturing by nutrient type and period

$contpdt_{ne}$ Nutritional content of straw by nutrient type

$FEED_{an}$ feedstock bought for animals by animal type

$FINCASH_e$ Cash available at the end of the year, by state of nature

$FINSTOCKAC_{pdt,e}$ agricultural product stocks at the end of the year by product and state of nature

$human_{ag,ge}$ family members by age and gender

i interest rate

$inicash$ initial cash

$inistock_{pdt}$ initial stock by agricultural product

$isubv_{sps}$ subsidy on interest rate by subsidy program scenario

$inpsubs_{sps}$ subsidy on inputs price by subsidy program scenario

$inssubs_{sps}$ subsidy on insurance premium by subsidy program scenario

$INSX_{ac,ins}$ insured area cultivated by activity and insurance type

$kcal_{pdt}$ Energy (in kcal) contained in each product, by product

$kcalneed_{ge,ag,p}$ Energy (in kcal) necessary to feed households members by gender, age and period

$Lab_{ac,p}$ labor need by agricultural activity and period

$land_{s,z}$ farm endowment in land by type and zone

$manuprod_{an}$ manure production by animal type

$minc_p$ minimum expenditure in cash for the household by period

$OFF_{t,p}$ off farm activities by type of off-farm labor and period

$pac_{pdt,p,e}$ crop buying prices by product, period and state of nature

$panim_{an,p}$ animal prices by type of animals and period

$past_{p,e}$ feed from pasture by period and state of nature

$Pastarea_p$ pasture Area by period

$PAYOFF_{ac,ins,e}$ Payoff associated with insurance by agricultural activity, insurance type and state of nature

$pco_{inp,p}$ inputs prices by input and period

$pfeed_{an}$ feed price by animal type

$pinsu_{ac,ins}$ Insurance premium by agricultural activity and insurance type

$pvac_{pdt,p,e}$ crop selling prices by product, period and state of nature

pxp_p agricultural labor price by period

ra absolute risk aversion

$RENTA_p$ rented animals for traction by period

SA_{an} animals sold by animal type

$SC_{pdt,p,e}$ crops sold by product, period and state of nature

$STOCKAC_{pdt,p,e}$ agricultural product stocks by product, period and state of nature

$straw_{str,e}$ coefficient for straw used for manure by straw type and state of nature

$tracd_{tan,p}$ days of traction by animal type and period

w initial wealth

$wd_{ge,ag,p}$ working days by gender, age and period

$WFAM_p$ family labor used on farm by period

WX_p agricultural labor bought by period

$X_{s,z,ac}$ area cultivated by soil type, field type and agricultural activity

$Y_{s,z,ac,pdt,e}$ yield by animal type by soil type, field type, agricultural activity, product and state of nature

$YPast_{p,e}$ pasture capacity by period and state of nature

Équations

Objective function

$$EU = \frac{1}{n} \sum_{e=1}^n 1 - \text{Exp}[-r_a(\pi_e + w)] \quad (\text{F1})$$

Certainty equivalent income

$$CEI = \frac{\ln[1-EU]}{-r_a} - w \quad (\text{FIB})$$

Income

$$\begin{aligned} \pi_e = & \sum_{p,pdt} (\sum_{ac,s,z} (X_{s,z,ac} * \text{yield}_{s,z,ac,pdt,e}) - \text{CONSA}_{p,pdt,e} - \text{CONSO}_{p,pdt,e}) * p_{vac} \text{ }_{pdt,p,e} - \sum_{inp,p} \sum_{s,z,ac} X_{s,z,ac} * co_{s,z,ac,inp,p} * \\ & p_{co} \text{ }_{inp,p} * (1 - \text{inpsubs}_{inp,sps}) - \sum_p WX_p * p_{wx} \text{ }_p - \sum_{ac,ins} p_{insu} \text{ }_{ac,ins} * (1 - \text{inssubs}_{sps}) * \text{INSX}_{ac,ins} + \text{PAYOFF}_{ac,ins,e} * \\ & \text{INSX}_{ac,ins} \\ & + \sum_{p,an} (\text{canim}_{an} - \text{coanim}_{an} - \text{FEED}_{an} * p_{feed} \text{ }_{an}) * (\text{anim}_{an,p} + BA_{an,p} - SA_{an,p}) + (BA_{an,p} - SA_{an,p}) * p_{anim} \text{ }_{an,p} + \\ & (\text{anim}_{an,p7} - SA_{an,p7}) * p_{anim} \text{ }_{an,p} + \sum_{t,p} \text{OFF}_{t,p} + \sum_{sps} \text{cashtr}_{sps} - \sum_p i * (1 - \text{isubs}_{sps}) * BRW_p \quad (\text{F2}) \end{aligned}$$

Land constraint

$$\sum_{ac} X_{s,z,ac} \leq \text{land}_{s,z} \quad (\text{F3})$$

Labor needs

$$\sum_{s,z,ac} X_{s,z,ac} * \text{lab}_{s,ac,p} + \sum_{an} (\text{anim}_{an,p} + BA_{an,p} - SA_{an,p}) * \text{lab}_{an,p} + \sum_t \text{OFF}_{t,p} \leq \text{WFAM}_p + WX_p \quad (\text{F4})$$

Labor constraint

$$\text{WFAM}_p + \sum_t \text{OFF}_{t,p} \leq \sum_{ge,ag} \text{activ}_{ge,ag} * wd_{ge,ag,p} \quad (\text{F5})$$

Animal traction constraint

$$\sum_{s,z,ac} X_{s,z,ac} * \text{atneed}_{s,z,ac,p} - \text{RENTA}_p \leq \sum_{tan} \text{anim}_{tan} * \text{tracd}_{tan,p} \quad (\text{F6})$$

Cash equations

$$\text{CASH}_{p,e} \geq 0 \quad (\text{F7})$$

For $p \geq 1$:

$$\begin{aligned}
CASH_{p,e} = & CASH_{p-1,e} + \sum_{pdt} SC_{pdt,p-1} * pvac_{pdt,p-1,e} \\
& - \sum_{inp} \sum_{s,z,ac} X_{s,z,ac} * co_{s,z,ac,inp,p-1} * pco_{inp,p-1} * (1 - inpsubs_{inp,sps}) \\
& - WX_{p-1} * pwx_{p-1} - RENTA * Pra \\
& + \sum_{an} (Canim_{an} - coanim_{an} - FEED_{an} * pfeed_{an}) * (anim_{an,p-1} - SA_{an,p-1} + BA_{an,p-1}) \\
& + (SA_{an,p-1} - BA_{an,p-1}) * panim_{an,p-1} - \sum_{pdt} BC_{p-1,pdt,e} * pac_{p-1,pdt,e} \\
& + \sum_t OFF_{t,p-1} + BRW_{p-1} - minc_{p-1} \\
& - if (P = 3) \quad \sum_{ac,ins} pinsu_{ac,ins} * (1 - inssubs_{sps}) * INSX_{ac,ins} + casht_{sps} \\
& + if (P = 6) \quad PAYOFF_{ac,ins} * INSX_{ac,ins} \quad (F7B)
\end{aligned}$$

Final cash

$$\begin{aligned}
FINCASH_e = & CASH_{p7",e} \\
& + \sum_{pdt} SC_{pdt,"p7"} * pvac_{pdt,"p7"} + \sum_{an} SA_{an,"p7"} * panim_{an,"p7"} - \sum_{pdt} BC_{p7",pdt,e} * pac_{p7",pdt,e} \\
& - \sum_p BRW_p * (1 + i (1 - isubs_{sps})) \quad (F8)
\end{aligned}$$

Supply-utilization account for $p \geq 1$:

$$\begin{aligned}
STOCKAC_{pdt,p,e} = & STOCKAC_{pdt,p-1,e} \\
& + BC_{pdt,p-1,e} - SC_{pdt,p-1,e} - CONSAT_{p-1,pdt,e} - CONSH_{p-1,pdt,e} - CONSO_{p-1,pdt,e} \\
& + if (P = P6) \quad \sum_{ac,s,z} X_{s,z,ac} * yield_{s,z,ac,pdt,e} \quad (F9)
\end{aligned}$$

Final stocks

$$FINSTOCKAC_{pdt,e} = STOCKAC_{pdt,"p7",e} + BC_{pdt,"p7",e} - SC_{pdt,"p7",e} \quad (F10)$$

Family nutritional constraint

$$\sum_{ge,ag} kcalneed_{ge,ag,p} * human_{ge,ag} \leq \sum_{pdt} kcal_{pdt} * CONSH_{p,pdt,e} \quad (F11)$$

Animals nutritional constraint

$$\sum_{an} animneed_{an,ne,p} * (anim_{an,p} + BA_{an,p} - SA_{an,p}) \leq contpa_{ne,p} * past_{p,e} + \sum_{pdt} contpdt_{ne} * CONSAT_{p,pdt,e} + \sum_{an} conf_{ne} * FEED_{an} \quad (F12)$$

Pasture capacity constraint

$$past_{p,e} \leq Pastarea_p * YPast_{p,e} \quad (F13)$$

Manure production

$$\sum_{an} (anim_{an,p} + BA_{an,p} - SA_{an,p}) * a_{an} * manuprod_{an} * straw_{str,e} = CONSO_{p,str,e} \quad (F14)$$

Manure balance

$$\sum_p \sum_{s,z,ac} X_{s,z,ac} * CO_{s,z,ac,"man",p} \leq \sum_{an} (n * (anim_{an,p} + BA_{an,p} - SA_{an,p}) * manuprod_{an} \quad (F15)$$

Viability constraint on expected cash

$$inicalsh \leq \frac{1}{n} \sum_{e=1}^n FINCASH_e \quad (F16)$$

Viability constraint on expected energy (in kcal) for stocks

$$\sum_{pdt} inistock_{pdt} * kcal_{pdt} \leq \frac{1}{n} \sum_{e=1}^n \sum_{pdt} FINSTOCKAC_{pdt,e} * kcal_{pdt} \quad (F17)$$

Viability constraint on cash (softened by informal insurance)

$$0.5 * inicalsh_e \leq FINCASH_e \quad (F18)$$

Viability constraint on stocks (softened by informal insurance)

$$0.5 * \sum_{pdt} inistock_{pdt,e} * kcal_{pdt} \leq \sum_{pdt} FINSTOCKAC_{pdt,e} * kcal_{pdt} \quad (F19)$$

Annexe 2 : Évolution des assolements avec les différentes politiques dans chaque exploitation

Figure 23 : NiakharEA1

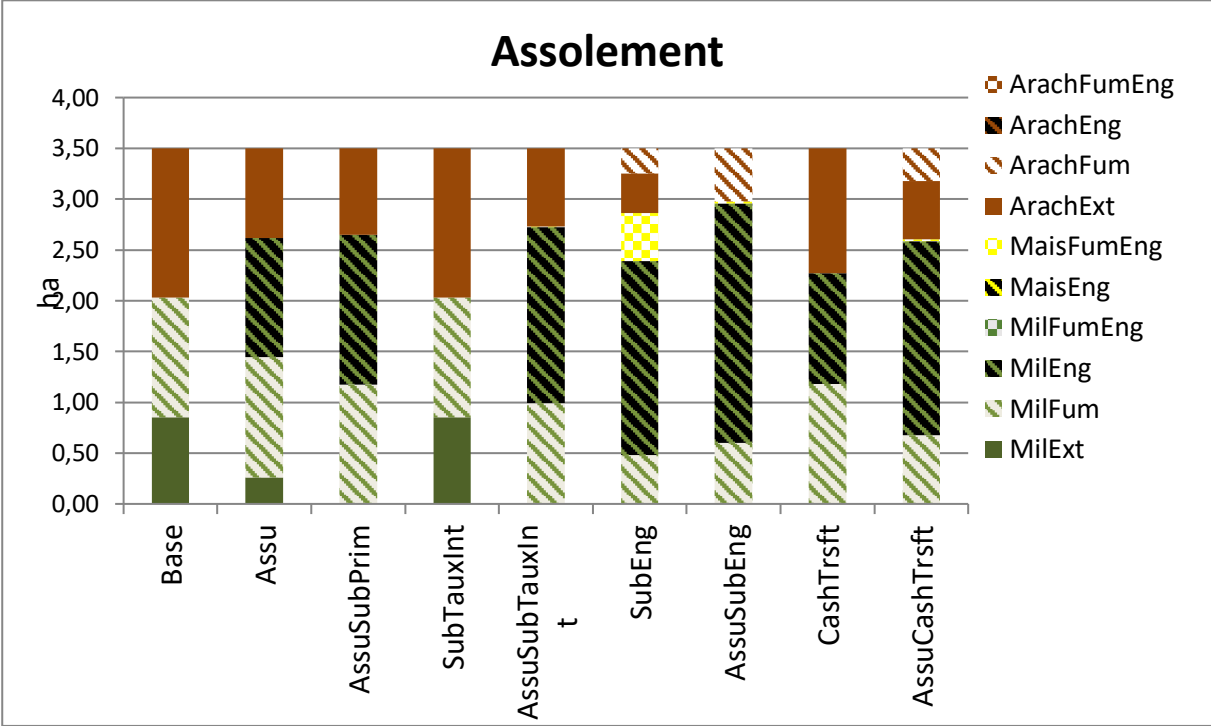


Figure 24 : Niakhar EA2

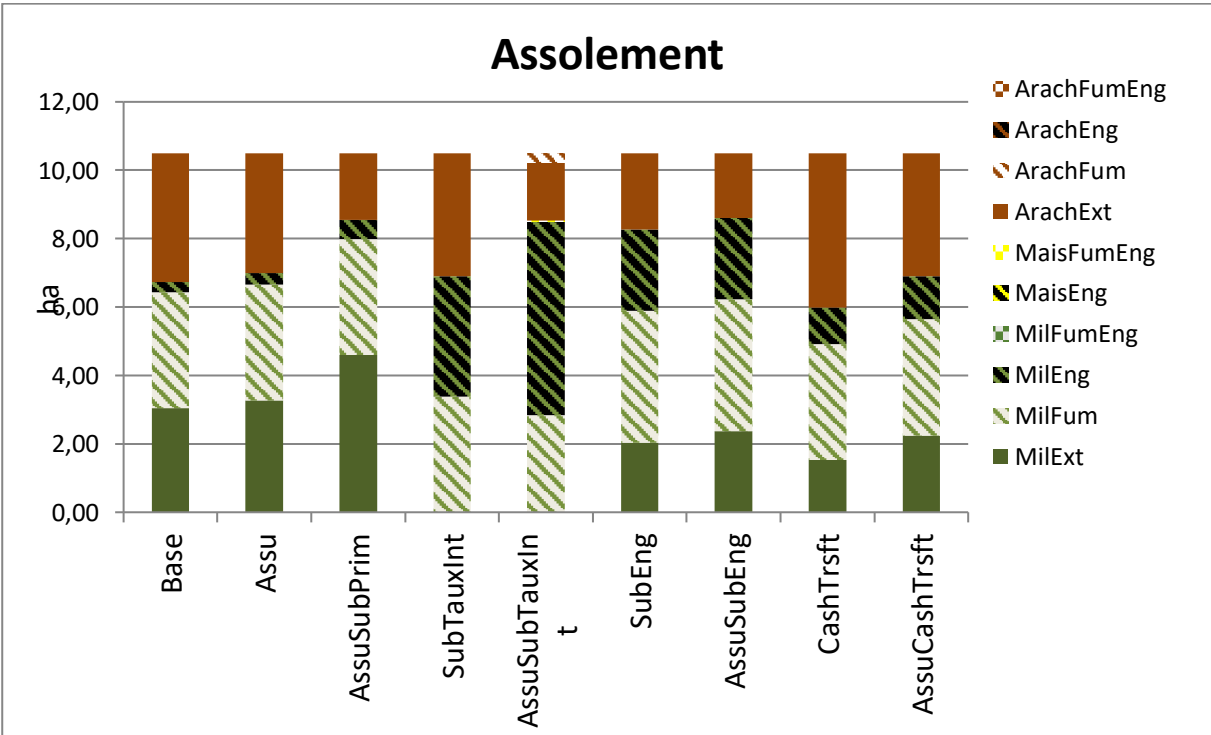


Figure 25 : Nioro EA1

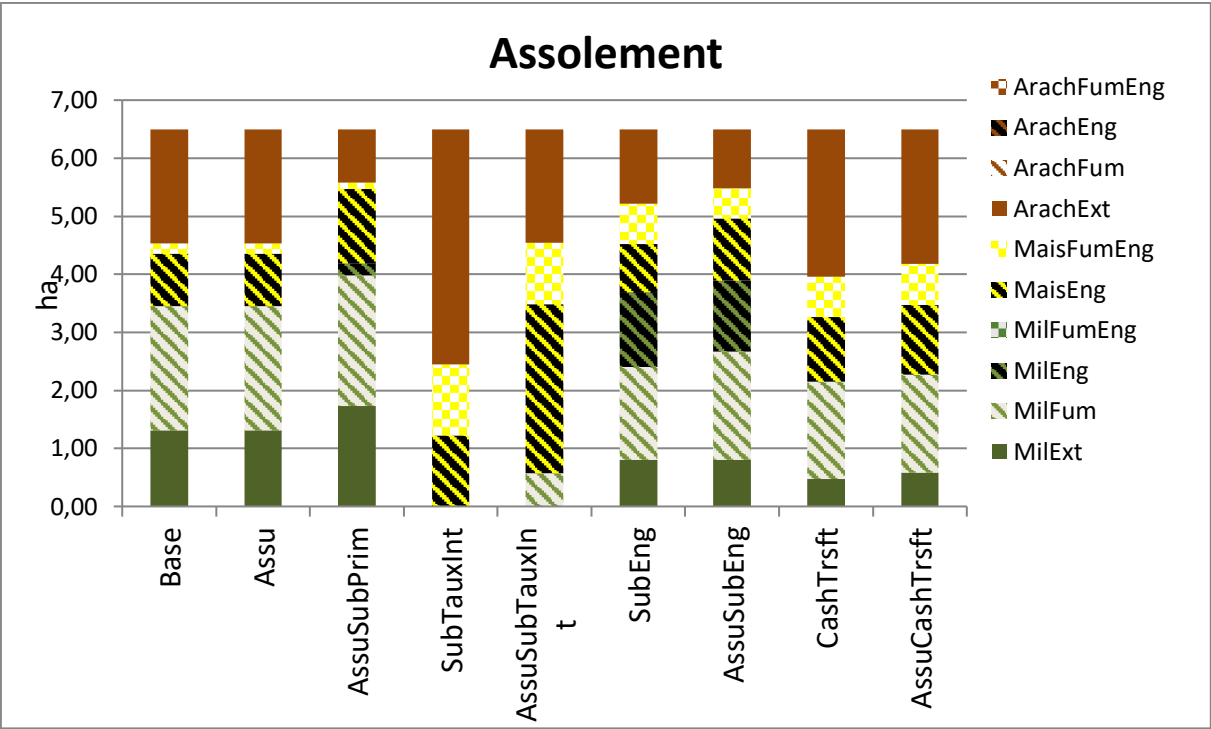


Figure 26 : Nioro EA2

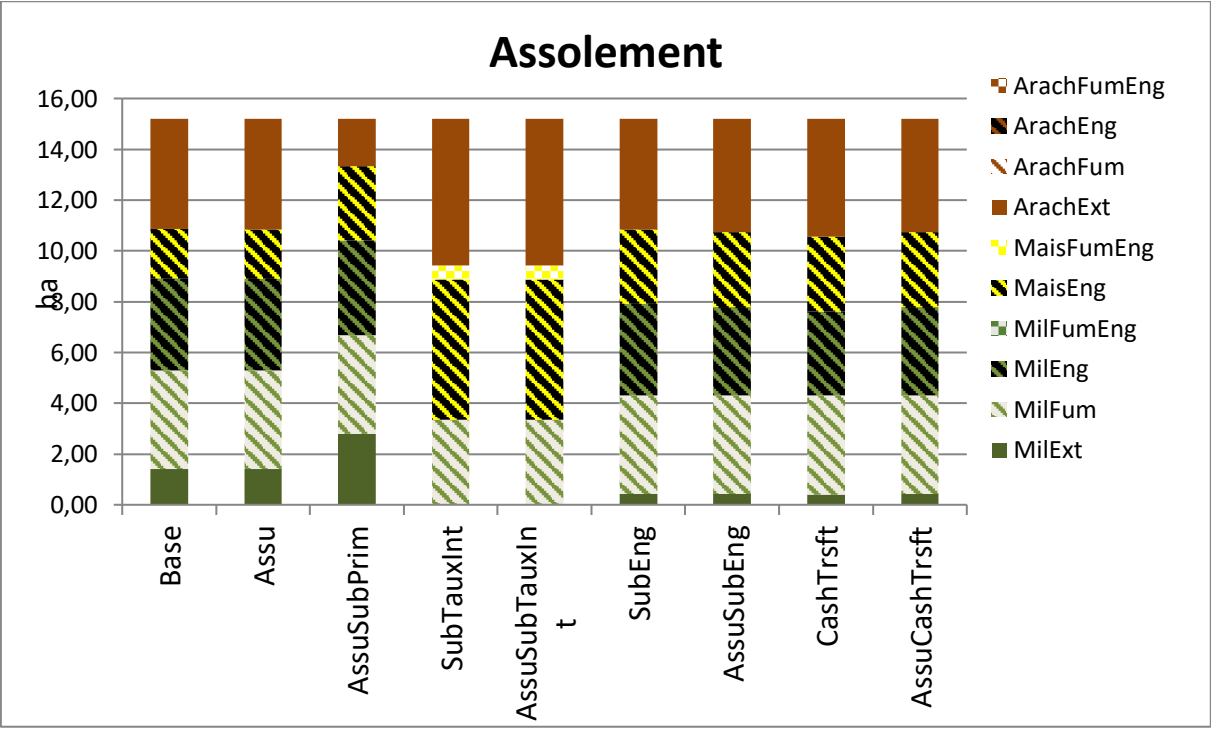


Figure 27 : Louga EA1

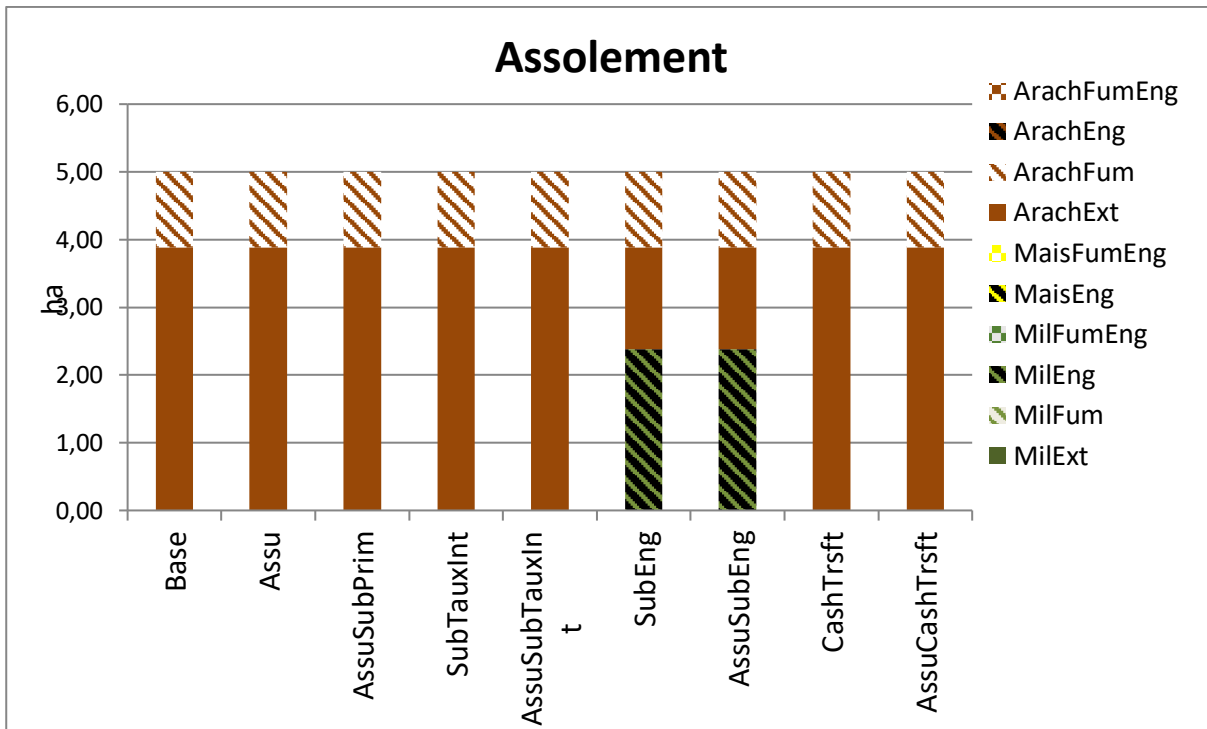
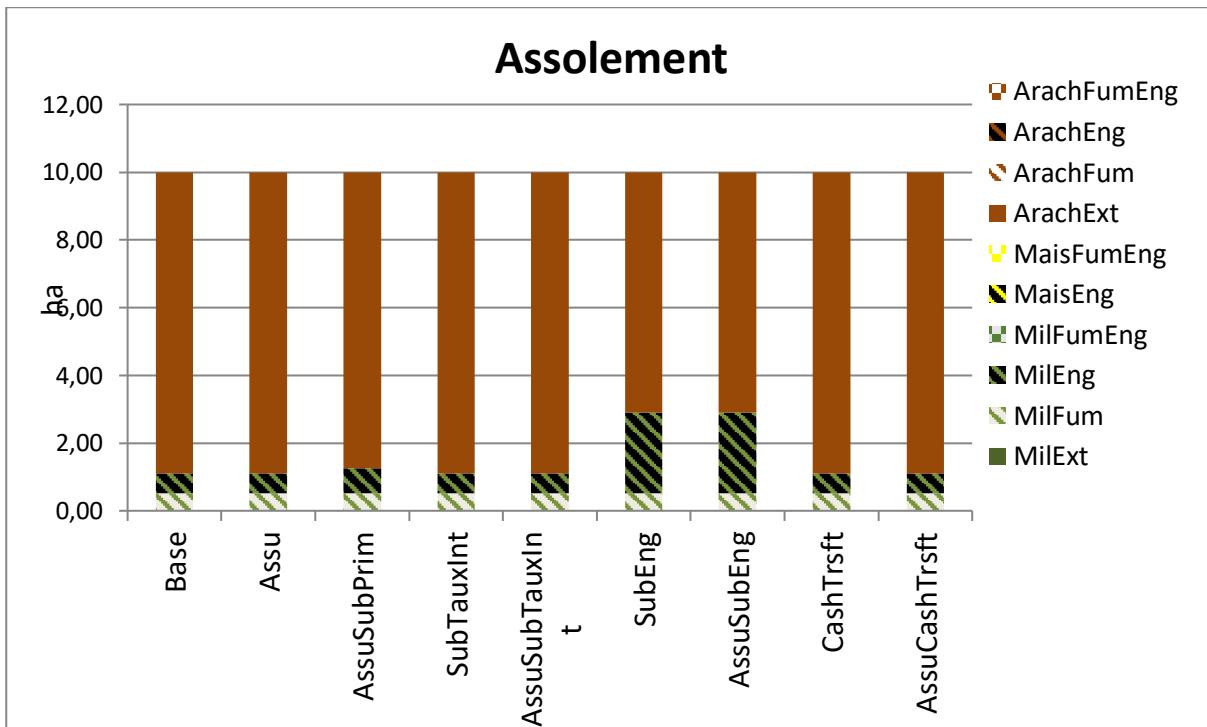


Figure 28 : Louga EA2



Qu'est-ce que le groupe AFD ?

Le groupe Agence française de développement (AFD) est un établissement public qui finance, accompagne et accélère les transitions vers un monde plus juste et durable. Plateforme française d'aide publique au développement et d'investissement de développement durable, nous construisons avec nos partenaires des solutions partagées, avec et pour les populations du Sud.

Nos équipes sont engagées dans plus de 4 000 projets sur le terrain, dans les Outre-mer et dans 115 pays, pour les biens communs de l'humanité – le climat, la biodiversité, la paix, l'égalité femmes-hommes, l'éducation ou encore la santé. Nous contribuons ainsi à l'engagement de la développement durable. Pour un monde en commun.

Directeur de publication Rémy Rioux
Directeur de la rédaction Thomas Mélonio

Dépôt légal 3^e trimestre 2020

ISSN 2492 – 2846 © AFD

Création graphique MeMo, Juliegilles, D. Cazeils

Conception et réalisation AFD

Imprimé par le service reprographie de l'AFD

Pour consulter les autres publications
de la collection Papiers de recherche :
[https://www.afd.fr/fr/collection/papiers-
de-recherche](https://www.afd.fr/fr/collection/papiers-de-recherche)